



Determinación del estado de esfuerzos mecánicos actuantes en tuberías superficiales con problemas de hundimientos diferenciales en la Terminal Venta de Carpio

Ernesto R. Neri B., Nairobi García E.

Introducción

La Terminal Venta de Carpio se ubica en la parte norte del antiguo Lago de Texcoco, Estado de México, en terreno altamente compresible. En ella, se recibe, regula, mide y distribuye gas natural, gas LP y productos de Pemex Refinación que se suministran a terminales de distribución y centros de consumo localizados en el área central del país, que comprende los estados de Puebla, Tlaxcala, México, Hidalgo, Querétaro y una pequeña parte del Distrito Federal. La construcción de la estación Venta de Carpio data de 1960; desde entonces, se han presentado asentamientos regionales importantes debidos, principalmente a la extracción de agua del subsuelo, que han impuesto deformaciones a los sistemas de tuberías conectados con las instalaciones superficiales que han sido piloteadas en la terminal. De igual modo, otros sistemas de tuberías e instalaciones superficiales presentan deformaciones por hundimientos diferenciales entre sus apoyos.

Con base en los Procedimientos de Trabajo de un estudio de ingeniería realizado por el IIE y PGPB, revisados y autorizados por Supervisión de Campo, Coordinación de Obras y el Área de Seguridad Industrial y Protección Ambiental de PGPB, personal del IIE realizó las mediciones físicas en la Terminal Venta de Carpio.

“Ingeniería para la renovación de tuberías, repavimentación, reconstrucción de barda colindante y muro de protección en el Sector Venta de Carpio, Edo. de México”. Uno de los objetivos que se establecieron para el proyecto fue la determinación del estado actual de esfuerzos mecánicos en los sistemas de tuberías, el nivel de seguridad de éstos y la recomendación de las medidas necesarias para lograr su renovación.

Para determinar el estado actual de esfuerzos en las tuberías, la solución no puede limitarse a introducir datos a un programa de análisis para generar modelos, asignar cargas y obtener resultados en una serie de corridas. Esto se debe a que existe un estado de esfuerzos previo, en principio desconocido, generado por los asentamientos diferenciales que los sistemas de tuberías han sufrido entre apoyos y en los tramos que se entierran a los lados de las plataformas, cuyo efecto debe ser determinado e incluido en los modelos

Considerando el posible riesgo generado por los hundimientos diferenciales y las deformaciones sufridas por los sistemas de tuberías, en el año 2001 la Subgerencia de Tecnología de la Subdirección de Ductos, de PGPB solicitó a la Gerencia de Ingeniería Civil (GIC) del IIE la realización del proyecto





para el análisis de flexibilidades. El problema se complica porque, se carece de información sobre la configuración original de proyecto de todos los sistemas de tuberías, sobre la configuración final de construcción y tampoco se tiene información sobre la historia de los asentamientos. Además, los resultados de los análisis de flexibilidades son muy sensibles a las suposiciones sobre la configuración geométrica de partida.

Para obtener los datos necesarios para los modelos de análisis, la GIC consideró indispensable realizar un programa de mediciones físicas en campo. Se midieron las reacciones en los apoyos de las tuberías y las deformaciones y esfuerzos mecánicos en secciones seleccionadas para cada una de las líneas de tuberías que forman las instalaciones superficiales en la Terminal Venta de Carpio. Estos trabajos se realizaron sin interrumpir la operación normal de los sistemas.

Planteamiento básico

Para la determinación analítica del estado actual de esfuerzos en los sistemas de tuberías, se parte de la hipótesis fundamental que considera que las deformaciones y los esfuerzos en el material se mantienen actualmente en el intervalo de comportamiento elástico. Esto es, a lo largo de la vida de la instalación, las deformaciones causadas por los hundimientos diferenciales pueden haberse acumulado o compensado en diferentes sitios de la instalación, pero se han mantenido en el intervalo elástico. Si no se cumple esta hipótesis fundamental, entonces se plantean dos posibilidades:

1. No podría determinarse confiablemente el nivel de deformaciones en el material, pues la configuración actual dependería de la historia de cargas, es decir, de la secuencia, localización y magnitud de las deformaciones plásticas permanentes. Como se carece de información sobre la configuración original del proyecto, sobre la configuración final de construcción y tampoco se tiene información sobre la historia de los asentamientos, entonces habría que suponer y revisar diversas secuencias de asentamientos en el terreno donde va la tubería enterrada y en los soportes de la tubería superficial en cada sitio. Es decir, los resultados de los análisis dependerían siempre de las condiciones supuestas sobre la configuración geométrica de partida. Esto no sería muy útil, pues dichos resultados son muy sensibles a las suposiciones sobre la configuración geométrica de partida.
2. Si se encontrase evidencia de que el material en diversas zonas ha alcanzado o rebasado el límite elástico sería de mayor importancia práctica, porque entonces las tuberías estarían trabajando fuera de las normas de diseño, careciendo de los factores de seguridad básicos y en una situa-

ción real de riesgo que no sería posible evaluar con precisión. Si esta situación se presentase, se daría aviso a las autoridades de PGPB para que se tomen las medidas pertinentes.

Por el contrario, si se cumple la hipótesis básica, es decir, si el sistema se encuentra trabajando en el intervalo elástico, entonces la determinación analítica del estado actual de esfuerzos en las tuberías requiere encontrar la configuración previa del sistema, de manera que –al verse sometida a las cargas de operación–, trabaje, se deforme y adopte una configuración geométrica igual a la actual y en equilibrio con las condiciones de frontera actuales, que se refieren tanto a las reacciones medidas en los apoyos, ya sean de compresión o de tensión, como a los elementos mecánicos actuantes en secciones transversales seleccionadas de la tubería. En un trabajo presentado en el 7º Congreso Internacional de Ductos (Neri y Corona, 2003) se plantea la solución analítica para determinar el estado actual de esfuerzos y la secuencia de cálculo necesaria.

Programa de mediciones físicas

Con base en los Procedimientos de Trabajo de un estudio de ingeniería realizado por el IIE y PGPB (IIE-PGPB, 2000), revisados y autorizados por Supervisión de Campo, Coordinación de Obras y el Área de Seguridad Industrial y Protección Ambiental de PGPB, personal del IIE realizó las mediciones físicas en la Terminal Venta de Carpio. En dichos Procedimientos de Trabajo se plantea el objetivo, descripción general, notas importantes de seguridad, los procedimientos aplicados paso a paso con esquemas de los equipos



de medición, los recursos necesarios en cuanto a personal, equipo de seguridad y de trabajo, herramientas y materiales empleados. La medición física de reacciones en los apoyos y de deformaciones y esfuerzos mecánicos en las tuberías se llevó a cabo en forma simultánea y sin interrumpir la operación normal de los sistemas. En las figuras 1 a 10 se ilustran los procesos y a equipos utilizados; los equipos para medición de reacciones fueron diseñados y habilitados específicamente para este proyecto.

Medición física de reacciones en los soportes de las tuberías

Se midieron las reacciones en los 630 soportes que existen en las tuberías superficiales en toda la planta. La idea básica del procedimiento de medición de reacciones consistió en transferir gradualmente la carga actuante en cada soporte hacia los sistemas de aplicación y medición de carga colocados a ambos lados del mismo, e identificar con precisión en qué momento el apoyo queda libre de carga. En varios casos se utilizó un solo sistema de carga por facilidad de acceso o medición. En el proceso se midieron los desplazamientos de la

propia tubería en la sección y se mantuvieron siempre menores a 4 mm. En cada uno de los soportes debió determinarse la forma en que estaba trabajando, ya fuera a compresión o a tensión. La mayoría de los soportes son mochetas de concreto y algunas de ellas no trabajan, pues el tubo pasa por encima sin apoyarse y no tienen cincho o el cincho está flojo o suelto. En otras mochetas, el tubo evidentemente se apoya en ellas y de la misma forma, falta el cincho o está flojo o suelto. Sin embargo, en algunos casos la forma de trabajo solo pudo definirse midiendo físicamente. Así, en los casos donde se dedujo que el cincho estaba trabajando a tensión y que el tubo tendía a separarse de la mocheta, primero se aplicó el procedimiento para medir reacciones a tensión. En las mochetas donde se determinó que el tubo se apoyaba, se aplicó el procedimiento para medir reacciones a compresión. En todos los casos, los datos y lecturas fueron registrados en formatos adecuados para su procesamiento posterior por parte del personal del IIE.

Medición de deformaciones y esfuerzos principales en las tuberías mediante el método del barreno en rosetas de deformímetros

Se midieron deformaciones y esfuerzos en 330 puntos, que corresponden a 110 secciones transversales en las tuberías localizadas convenientemente en toda la planta. La idea básica del procedimiento para la medición de esfuerzos principales actuantes en la tubería mediante el método del barreno en rosetas de deformímetros en cada uno de los tres deformímetros incorporados en una roseta típica, la deformación asociada a la relajación de los esfuerzos que se da a lo largo de la frontera de un pequeño barreno (1.6 mm de diámetro y de profundidad), que se hace en el material. Las deformaciones medidas en cada deformímetro se resuelven en esfuerzos principales aplicando la metodología específica y las leyes constitutivas elásticas del material. Con ello, se conoce el estado previo de esfuerzos principales actuantes en el punto donde se realizó el barreno. Este método está definido en la norma ASTM-E837-99 (ASTM, 1999) y en la Nota Técnica TN-503-4 de Measurements Group (Measurements Group Inc., 1993). La transformación de las microdeformaciones unitarias medidas en cada punto a esfuerzos principales se programó en Excel con base en la misma Nota Técnica del Measurements Group de 1993. Una vez que se han determinado los esfuerzos principales actuantes en tres puntos localizados conve-

Figura 1. Soporte de tubería trabajando a compresión.



Figura 2. Midiendo reacciones a compresión.





Figura 3. Otro tipo de equipo para medir reacciones a compresión.



Figura 4. Soporte de tubería trabajando a tensión.



Figura 5. Equipo para medir reacciones a tensión.

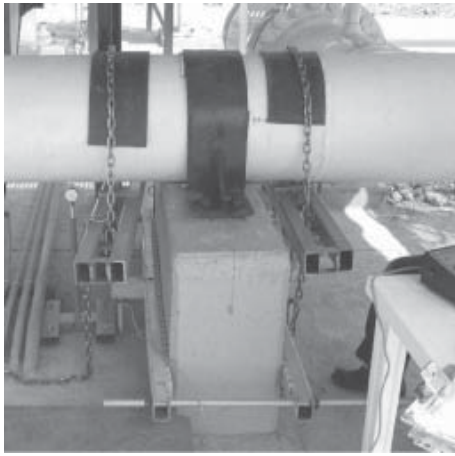
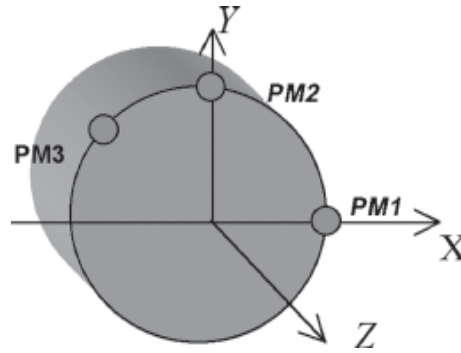


Figura 6. Ubicación de los puntos de medición con rosetas de deformímetros sobre la sección transversal de la tubería.



nientemente sobre el plano de una sección transversal del tubo, como se ve en la Figura 6, pueden calcularse los elementos mecánicos actuantes en la misma sección –momentos de flexión y de torsión, fuerzas cortantes y carga axial– para a) determinar condiciones de frontera conocidas para simplificar los modelos de análisis eliminando en el modelado el efecto del suelo sobre la tubería enterrada; b) contar con puntos de control para verificar los elementos mecánicos que resultarían de los análisis; c) identificar, de ser así, las secciones donde se hubiese rebasado el límite elástico del material.

Para esto, las secciones para medición de esfuerzos se ubicaron principalmente en las inmediaciones de los puntos donde la tubería se entierra, cerca de la primera mocheta. En muchos casos se identificaron zonas en las que la forma de trabajo, las deformaciones de la tubería y los soportes indicaban que allí podrían encontrarse esfuerzos elevados. También se ubicaron secciones para medición buscando determinar los esfuerzos y elementos mecánicos en secciones inmediatas a las válvulas y equipos muy rígidos y pesados, en donde sería muy difícil medir las reacciones. El cálculo de los elementos mecánicos en la sección transversal de interés en la tubería a partir de los esfuerzos principales también se programó en Excel.

Resultados del programa de mediciones físicas

De las reacciones en los soportes de las tuberías

Como parte del proyecto general, entre otros trabajos, se realizaron levantamientos topográficos de precisión y se identificaron las características reales de todos los equipos y tuberías. Con base en esta información, se generaron modelos para análisis de flexibilidades de todas las instalaciones en la terminal Venta de Carpio. Empleando el programa CAEPIPE (SST Systems Inc., 2001) con estos modelos y sin considerar el

Figura 7. Equipo para medir esfuerzos mediante la prueba del barreno.

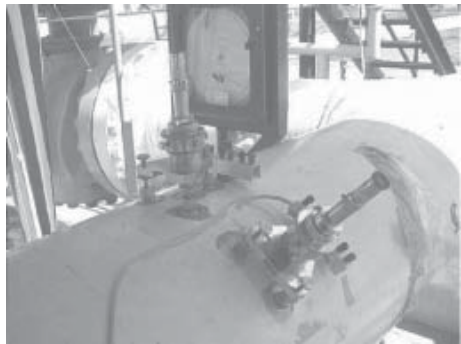


Figura 9. Centrado para barrenar.



Figura 8. Instalación de deformímetros.

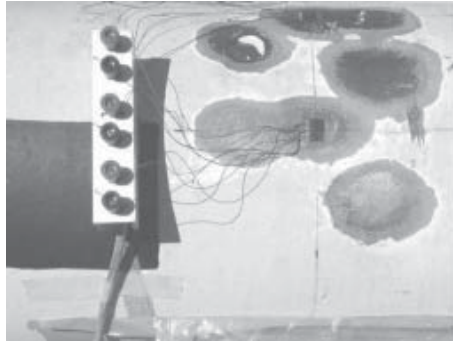


Figura 10. Barrenando una roseta de deformímetros.



28 años INNOVANDO con ENERGÍA



trabajan a tensión, ya sea por efecto de palanca o porque el propio soporte cuelga del tubo, se ha invertido la forma de trabajo que seguramente se consideró en el diseño original. Estos cambios permiten ubicar en forma cualitativa las zonas de la instalación donde se han concentrado más los efectos provocados por los asentamientos diferenciales.

De las deformaciones y esfuerzos en las tuberías

Al procesar las deformaciones medidas en cada deformímetro en cada uno de los puntos en los que se aplicó la prueba del barreno, se obtienen los valores de los esfuerzos principales máximo y mínimo actuantes en el punto y el ángulo que forman respecto a la dirección del deformímetro 1 en la roseta perforada. En cada punto de medición se consideró el valor del esfuerzo de fluencia que señala la norma aplicable para el tipo particular de acero de la tubería en el tramo en estudio. Los esfuerzos principales máximo y mínimo forman una pareja de valores que, recurriendo al criterio de fluencia de Tresca, permiten definir si el estado de esfuerzos en el punto se ubica o no dentro de la región elástica del polígono de Tresca. Los resultados se pueden resumir como sigue:

- De los 330 puntos en los que se aplicó la prueba del barreno, se encontraron 179 (54%) con esfuerzos principales ubicados dentro de la región definida por el polígono de Tresca, es decir, en condiciones elásticas.
- Sólo en 25 (23%) de las 110 secciones se encontraron condiciones elásticas en sus 3 puntos de medición.
- Solamente en 2 de los 41 sistemas que forman las instalaciones superficiales en la Terminal Venta de Carpio se encontraron condiciones elásticas en todas sus secciones de medición.

Conclusiones

Los resultados encontrados, en cuanto a las reacciones medidas en los soportes y las deformaciones en las tuberías mediante la prueba del barreno, son congruentes e indican zonas de concentración elevada de cargas y deformaciones, provocadas por los hundimientos diferenciales en tuberías y soportes. De haber encontrado en todas las secciones de los sistemas de tuberías un comportamiento elástico, podría calcularse el estado de esfuerzos mecánicos en cualquiera de sus puntos y definir maniobras de renivelación que pudiesen realizarse sin generar esfuerzos excesivos. Como no se presenta esta situación, se carece de información sobre la configuración original del proyecto y sobre la historia de los asentamientos y, al mismo tiempo, los resultados de los análisis de flexibilidades son muy sensibles a las suposiciones sobre la configuración geométrica de partida, entonces no es posible modelar ni evaluar con precisión el estado actual de esfuerzos en las tuberías ni los que podrían provocarse en diversos sitios de la instalación al efectuar determinadas maniobras de renivelación.

En consecuencia, considerar los datos señalados, la antigüedad y el deterioro de las cimentaciones y lo incierto que resultaba realizar maniobras de renivelación sin conocer plenamente los esfuerzos mecánicos que pudieran darse en las tuberías y sus conexiones, además de la posibilidad de una falla, la GIC del IIE recomendó a PGPB una alternativa viable a las maniobras de renivelación en las tuberías, que es la de instalar derivaciones temporales, que permitan construir las losas de cimentación diseñadas dentro del proyecto (PGPB-IIE, 2000; Vilar, 2003) y reemplazar la parte superficial de las tuberías actuales y los tramos curvos que conectan con las tuberías enterra-

das; o bien construir una nueva zona de trampas y tuberías adyacentes a las actuales, aplicando el mismo sistema de losas de cimentación referido.

El planteamiento y desarrollo de los trabajos descritos, así como la interpretación del IIE de los resultados obtenidos, proporcionó a PGPB un mejor entendimiento de los fenómenos que se han presentado en la planta, una mejor estimación del estado real de las instalaciones y el sustento técnico para llevar adelante el plan de acciones programadas para subsanar estos problemas de manera definitiva. Estos trabajos han permitido incrementar la seguridad de la planta y prevenir alguna eventualidad. PGPB programó la construcción de los *by pass* para todas las trampas de diablos, iniciando con 2 LPG-ductos de 24" y 2 gasoductos de 36" que tienen el mayor impacto en la reducción del riesgo y del inventario en caso de un incidente. También se han iniciado la Ingeniería Básica y de Detalle, así como la licitación y construcción de las instalaciones definitivas en Venta de Carpio. Como una acción a largo plazo, PGPB considera el estudio de factibilidad, la ingeniería y la construcción del libramiento del LPG-ducto de 24" y 180 km San Martín Texmelucan-Santa Ana.

Además, el grupo multidisciplinario que participa en este proyecto señaló la necesidad de vigilar las deformaciones que pudiesen presentarse en las tuberías en Venta de Carpio. Como una medida preventiva, PGPB ha solicitado al IIE el monitoreo periódico de la evolución de las deformaciones en las tuberías superficiales (Neri, 2002) y la inspección mensual del estado de las soldaduras en las mismas (Muñoz Ledo, 2002) durante los años 2002 a 2004, hasta que se construyan las instalaciones nuevas en Venta de Carpio.



Recomendaciones

Como es lógico, no deben aplicarse los mismos criterios en el caso de la revisión de un sistema mecánico o estructural en operación, que los empleados para su dimensionamiento. En la etapa de diseño de los elementos se hacen consideraciones de comportamiento elástico que permiten generar sistemas que operan de manera satisfactoria en la práctica. Sin embargo, cuando se busca determinar el estado actual de un sistema mecánico o estructural en operación, es indispensable realizar mediciones físicas en campo en las que realmente están presentes los efectos de multitud de variables que, durante la etapa de diseño, no son consideradas o son supuestamente cubiertas a través de factores de seguridad, que pueden reducirse o perderse cuando el sistema estructural se ve sometido a condiciones radicalmente diferentes a las consideradas en su diseño original. Sería deseable poder extender la aplicabilidad de los métodos experimentales para la determinación de deformaciones y esfuerzos actuantes al intervalo inelástico. Asimismo, es indispensable profundizar en el conocimiento del comportamiento hasta la falla de tuberías de acero trabajando a presión mediante pruebas físicas, posiblemente empleando modelos a escala reducida. Solamente así podrá estimarse, con menores incertidumbres, el estado real de deformaciones y esfuerzos en un sistema de tuberías en operación, su capacidad remanente y los riesgos asociados a aplicar cualquier tipo de maniobras o permitir que continúe operando en las mismas condiciones.

Agradecimientos

Se agradece la asesoría técnica, comentarios y observaciones a las siguientes etapas del proyecto de: Dr. José M. González S., Dr. Gustavo Ayala M., Dr. Oscar González C., Dr. Luis Ferrer A., Ing. Alfredo Olivares P., Ing. Enrique Tamez G. Asimismo, los autores patentizan su agradecimiento a la Gerencia de Mantenimiento de la Subdirección de Ductos de Pemex Gas y Petroquímica Básica por el patrocinio de este proyecto y la confianza manifestada a lo largo del desarrollo del mismo.

Referencias

ASTM. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM Standard E837, USA, 1999.

Measurements Group Inc. Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. Tech Note TN-503-4, Measurements Group Inc., Raleigh, NC, USA, 1993.

Gerencia de Ingeniería Civil. *Ingeniería para la renovación de tuberías, repavimentación, reconstrucción de*

barda colindante y muro de protección en el Sector Venta de Carpio, IIE, México, 2000.

Muñoz Ledo, Ramón et al, *Inspección por ultrasonido en soldaduras de ductos en puntos críticos del Sector Venta de Carpio, Edo. de México, Informe Técnico Final, IIE, México, 2002.*

Neri B., Ernesto et al, *Monitoreo de deformaciones en las tuberías superficiales dentro del Sector Venta de Carpio, Edo. de México, Informe Técnico Final, IIE, México, 2002.*

Neri B., Ernesto R. y J. C. Corona F. *Determinación analítica del estado actual de esfuerzos en tuberías con problemas de hundimientos diferenciales en la Terminal Venta de Carpio, 7º Congreso Internacional de Ductos, Puebla, México, 2003.*

SST Systems, Inc. *CAEPIPE User's Manual, V5.10, San José, California, EE.UU., 2001.*

Vilar R., Jorge I. *Solución estructural al problema de hundimientos diferenciales en las tuberías superficiales de Venta de Carpio, 7º Congreso Internacional de Ductos, Puebla, México, 2003.*

Ernesto Rodolfo Neri Barrio

Ingeniero civil egresado de la Ingeniería de Estructuras de la UNAM (1981) y maestro en Ingeniería (Estructuras) por la División de Estudios de Postgrado de la misma Facultad de (1989).

Ha sido responsable de una amplia variedad de proyectos relacionados con el análisis, diseño y optimización de torres para transmisión de energía eléctrica, y con el desarrollo de criterios y especificaciones para su diseño. También ha sido responsable del desarrollo de programas especializados tipo CAD para el análisis, diseño y optimización de estructuras para líneas de transmisión.

Entre sus proyectos más relevantes se encuentran: Diseño Estructural, Ingeniería de Detalle, Encuentro de Pruebas y Determinación de los Diagramas de Utilización Mecánica del Catálogo de Torres de Transmisión Normalizadas por la Comisión Federal de Electricidad, para 115, 230 y 400 kV y Monitoreo de las deformaciones en las tuberías superficiales del Sector Venta de Carpio, Edo. de México".
eneri@iie.org.mx

Nairobi García Estrada

Ingeniero mecánico graduado en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (2001). Desde diciembre del 2001 trabaja en la Gerencia de Ingeniería Civil del IIE y participa principalmente en el programa para la determinación física y analítica del estado de esfuerzos mecánicos actuantes en las tuberías superficiales del Sector Venta de Carpio Estado de México; así como en el monitoreo de sus deformaciones en los proyectos realizados por el IIE para la gerencia de Mantenimiento de Ductos, de Pemex Gas y Petroquímica Básica.
nge@iie.org.mx