



Investigación y desarrollo en productos tubulares

Por Carlos A. Pampillo, Centro de Investigación Industrial FUDUTEC de Siderca

Tecnología es el conjunto de conocimientos científicos, técnicos o artesanales que permiten producir un bien o un servicio. La tecnología no es solamente *hardware*, es fundamentalmente conocimiento. Para desarrollar nuevos productos y mejorar aspectos de calidad o para aumentar la productividad, es imprescindible a veces indagar en los conocimientos más básicos, es decir, aquellos de la física, de la química, de la mecánica que subyacen a esa tecnología, hacer explícito el *know why* que subyace al *know how* utilizado, para poder avanzar con conocimientos que no entran en rendimientos decrecientes.

La conferencia "Investigación y desarrollo en procesos de producción y productos tubulares para el campo petrolero" pronunciada a mediados del año pasado por el Dr. Carlos A. Pampillo en el 2° Workshop sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo realizado en Mendoza, expone las distintas actividades de investigación y desarrollo que se vienen realizando desde 1986 para Siderca. Por su interés, en esta edición de *Petrotecnia* se brindará una síntesis concentrada solamente en los temas ligados a productos tubulares para las instalaciones de gas y petróleo.

En la actividad de investigación y desarrollo dedicada al proceso de producción de tubos de acero sin costura, conjuntamente con los técnicos y operadores de las plantas, se han encarado temas que afectan a la productividad y a la calidad, como son por ejemplo los temas de acería y la tecnología de acero limpio y la colada continua con la que se producen las barras de acero que, por perforación y laminación, se convierten en tubos sin costura. Por otro lado, en el caso de los productos finales que son utilizados en la producción de gas y de petróleo, es necesario también conocer parte de la tecnología del cliente o usuario de esos productos: conocer las condiciones de utilización de productos tubulares en los pozos permite estudiar su performance en condiciones de servicio y relacionar esa performance con las propiedades de los aceros y los parámetros dimensionales ligados al proceso productivo. En este caso, el trabajo en colaboración con clientes de Siderca ha sido una necesidad y esta colaboración dio resultados muy positivos.

El modelado numérico, una tecnología horizontal

Hoy, merced a la mayor capacidad computacional y a los mejores y más eficientes algoritmos computacionales, el modelado numérico se ha convertido en una tecnolo-

gía horizontal de aplicación en prácticamente todas las otras tecnologías y ramas de la ciencia. En nuestra actividad de investigación, en casi todos los casos, hemos seguido una metodología por la cual, el modelado numérico y algunas mediciones de laboratorio necesarias se anticipan a cualquier prueba a escala real del proceso productivo en planta. De esta forma, se entiende en profundidad la interrelación entre los parámetros del proceso y la sensibilidad de los mismos, siendo el experimento a plena escala sólo una forma de convalidar el modelo computacional. La computadora, finalmente, es capaz de predecir resultados de modificaciones de parámetros que afectarán a la calidad o productividad o, sencillamente, indicará el camino hacia la solución de un problema de *trouble shooting*. En el caso de productos finales, los ensayos a plena escala

El conocimiento es la única herramienta de producción que no está sometida a rendimientos decrecientes.

A. Clark

My biggest challenge is not to think about technology as hardware, but rather as knowledge... Right now, we could reduce drilling costs by 25% if we could just do a better job of applying the knowledge that people in the company possess.

Henrik Carlsen, Sr. VP,
E&P Technology Division, Statoil

que se realizan en un laboratorio construido especialmente para ese fin por Siderca, simulan físicamente lo que ocurre con un tubo y sus uniones en un pozo que produce gas o petróleo, por ejemplo, presión interna o externa de gas o líquido, tracción, compresión, flexión y combinaciones de estas.

Se escapan a las posibilidades del modelado temas en los que todavía el modelado numérico no es realizable. Un ejemplo particularmente importante es el de la corrosión debido a su complejidad y a la diversidad de los mecanismos microscópicos actuantes que no son suficientemente conocidos como para conformar un modelo armable desde los primeros principios. Es necesario en este caso recurrir a los experimentos y mediciones de laboratorio exclusivamente para entender estos mecanismos y hacer hipótesis metalúrgicas y fisicoquímicas.

cas que permitan formulaciones de aceros más resistentes a la corrosión en estudio.

Los laboratorios

El modelado numérico es realizado en el Laboratorio de Mecánica Computacional, utilizando el método de elementos finitos mediante un código ADINA originado en MIT, con modificaciones y adiciones producto del trabajo interno. Para los productos tubulares, la experimentación física que simula casi todas las condiciones a las que se ve expuesto un tubo en un pozo de producción de gas o petróleo es realizado en el Laboratorio de Ensayos a Plena Escala (LEPE).

Para el caso de la evaluación de la resistencia a la corrosión en medio sulfídrico, se utiliza el laboratorio de corrosión sulfídrica, mientras que los experimentos sobre corrosión en medio CO₂ son realizados en el laboratorio de corrosión de la Comisión Nacional de Energía Atómica, dentro de un convenio de colaboración entre Siderca e YPF por el que se contrata a este laboratorio para estas evaluaciones.

Por su interés en esta revista, nos centraremos solamente en los temas ligados a productos tubulares para las instalaciones de producción de gas y petróleo, dejando de lado las actividades que se han encarado relacionadas a los procesos productivos.

La relación con el mundo científico

No podemos concebir nuestra actividad sin una adecuada conexión con el mundo científico nacional e internacional. En casi todos los temas hemos hecho uso de esas relaciones completando nuestras investigaciones con las desarrolladas conjuntamente con otros científicos en universidades o instituciones de investigación y desarrollo de prestigio reconocido. Ejemplos son las Comisión Nacional de Energía Atómica de nuestro país, la UBA, el INIFTA y la Universidad de la Plata y, en el extranjero, el MIT en Boston⁽¹⁾, el Corrosion y Protection Center de la University of Manchester en Inglaterra y la Universidad de Cataluña en España. También, en muchos casos, estas instituciones de investigación y desarrollo han sido las pertenecientes a los clientes de Siderca. Como ejemplo destacable en el ámbito nacional mencionamos la interacción con los profesionales de YPF y su Laboratorio de Análisis Especiales en temas de corrosión dulce (CO₂), dentro del convenio de colaboración ya mencionado. En el ámbito internacional podemos mencionar la interacción con el Calgary Research Center de SHELL en Canadá; con el Research and

Engineering Centre de British Petroleum en Londres; con el INTEVEP de la Corporación Venezolana de Petróleo y con el VINIIGAS, ente de investigación y desarrollo de GAZPROM en Rusia, en temas de corrosión sulfídrica y en esta última también en temas sobre tubulares para uso ártico; con el Tubular Goods Research Center de la Corporación China de Petróleo en temas ligados a Uniones especiales.

Los temas de investigación sobre productos tubulares que describiremos muy resumidamente son:

- Tubulares resistentes al colapso
- Tubulares resistentes al estallido
- Tubulares resistentes a la corrosión sulfídrica
- Tubulares resistentes al CO₂
- Uniones especiales
- Aplicación de redes neuronales a la detección de defectos por flujo magnético disperso.

Las grandes presiones

Con las mayores profundidades de pozo que se han ido perforando en el mundo buscando más fuentes de gas y petróleo, las presiones que tienen que soportar los tubulares han sido cada vez mayores. En el fondo del pozo el problema es el colapso del *casing* debido a las altas presiones externas al tubo generadas, por ejemplo, por la columna hidrostática del terreno actuando sobre el revestimiento. Para el estallido, en cambio, el revestimiento puede quedar expuesto a la presión interna al tubo en zonas cercanas a la boca del pozo. En el desarrollo de la tubería adecuada para resistir estas presiones se han indagado las características geométricas/dimensionales y metalúrgicas más importantes que permiten lograr una mayor resistencia al colapso por un lado y al estallido por el otro. Como veremos, estas características están ligadas a propiedades distintas del material.

Colapso bajo presión exterior

En el Laboratorio de Mecánica Computacional ha sido posible modelar el proceso de colapso de un tubo en función de sus características geométricas y de sus propiedades plásticas.⁽²⁾ Los resultados muestran con claridad que los factores que influyen sobre la presión de colapso son, fundamentalmente, la ovalidad y las tensiones internas contenidas en el acero como resultado del proceso productivo; en mucho menor medida



afecta la excentricidad. Los experimentos para medir físicamente la presión de colapso son realizados en el Laboratorio de Ensayos a Plena Escala en cámaras especialmente diseñadas⁽³⁾ para colapsar tubos con presión externa. La experiencia extraída por el modelado sobre la importancia de las tensiones internas permite actuar sobre el proceso productivo, en particular el proceso de enderezado y redondeado de tubos que debe entonces ser realizado a las temperaturas que garanticen una recuperación dinámica de la deformación plástica introducida en ese proceso (>450°C) reduciendo las tensiones internas generadas.

En el modelado numérico, para la desviación de la forma circular, se tomó en cuenta solamente la elipse que es el modo más débil que induce al colapso a través del pandeo (radial) dando resultados teóricos del lado conservativo, es decir presiones de colapso inferiores a las reales como se comprueba experimentalmente. Existen otras desviaciones de la redondez perfecta. Para caracterizar más adecuadamente los tubos con respecto a su posible falta de redondez, siguiendo las ideas de Babcock y Kyryakides⁽⁴⁾ de la Univ. of Texas at Austin, que estudiaron los problemas de colapso en *line pipe* utilizado en profundidad marina, se ha construido un "formímetro"; este es un dispositivo que permite medir la forma del tubo con gran exactitud. La señal obtenida, digitalizada, es descompuesta en serie de Fourier permitiendo separar cuantitativamente los distintos modos de apartamiento de la forma circular perfecta (el modo oval, el triangular, el cuadrangular, etc.). Los resultados de estas mediciones y el estudio por elementos finitos del colapso debido a cada modo, permitirán obtener resultados de mayor exactitud. Por otro lado, suponiendo que cada modo está relacionado a alguna parte específica del proceso de laminación de tubos, los resultados de estas mediciones permitirán actuar sobre el proceso de laminación de tubos realizando correcciones meno-



res que llevarán a geometrías más perfectas. En los estudios desarrollados no se han incluido problemas de colapso ante tensiones de corte como, por ejemplo, las que aparecen sobre *casing* atravesando zonas sometidas a hundimientos (*subsidence-induced casing failure*)⁽⁵⁾ o mantos salinos, temas que podrán ser abordados en el futuro cercano.

Estallido bajo presión interna

Cuando ocurre el estallido debido a una presión interna, la propagación de la fisura, pasante en el espesor del tubo que se genera, puede recorrer grandes longitudes o realizar un recorrido muy corto y arrestarse rápidamente; en el primer caso estamos ante un colapso estructural frágil mientras que en el segundo es dúctil. Con la fractura frágil la propagación de la fisura que ocurre a lo largo de todo el tubo provoca la pérdida de integridad estructural de la columna. En un *line pipe* con alta presión de gas, la diferencia puede ser entre el estallido que da lugar a una fisura pasante de pocos centímetros de longitud por donde se producirá una pérdida de gas (*leak before break*) o, en el caso de fragilidad, varios kilómetros de longitud de fisura pasante y destrucción de la tubería.

Se estudiaron experimentalmente las condiciones bajo las cuales se pasa de un modo de fractura frágil a uno dúctil utilizando como parámetro fundamental la tenacidad del acero del tubo medida por un ensayo *Charpy*. Los experimentos se realizaron utilizando tubos cuya metalurgia, mediante tratamientos térmicos adecuados, permitía una variedad de tenacidades. A estos tubos se le produjo artificialmente por maquinado una fisura del lado externo de unos 5 cm de largo a la que se le produjo un pequeño crecimiento por fatiga para lograr una fisura natural muy aguda. La medición de la longitud de propagación final debido

al estallido por presión interna con agua muestra que, a temperatura ambiente, existe un cambio brusco de comportamiento para tenacidades de 40 Joule. Para tenacidades menores el tubular se comporta en forma frágil, con longitudes de propagación grandes (la máxima longitud disponible de tubo) mientras que para tenacidades mayores la propagación se reduce a solo unos pocos cm. Es importante hacer notar que, en todos los casos, frágil o dúctil, para todas las tenacidades, a pesar de que se utilizaron fisuras profundas que afectaban más del 50% del espesor del tubo, el estallido y propagación de la fisura se produce luego de que el tubo llega a fluencia completa por efecto de la presión interna. La medición de parámetros fractomecánicos, como el *Jc*, y una interpretación fractomecánica de los resultados, permitió establecer que el proceso de reventado se ajusta bien a lo que puede predecir la fractomecánica.⁽⁶⁾

Teniendo en cuenta las características de la metalurgia de transformación del proceso productivo, es decir las modificaciones microestructurales que produce la elaboración del tubo, de las conclusiones extraídas en esta investigación fue posible realizar las formulaciones de composición química y tratamientos térmicos que permiten superar la tenacidad necesaria para evitar el comportamiento frágil. Los dos métodos metalúrgicos para lograrlo son el templado y revenido que produce una microestructura muy fina de martencita revenida que logra alcanzar las tensiones de fluencia necesaria superando ampliamente la tenacidad necesaria. Para el caso de productos sin templado y revenido, utilizando microaleaciones con Nb, V o Ti, se logra una refinación del grano ferrítico que confiere la tenacidad necesaria (debemos recordar que el tamaño de grano es el único componente microestruc-

tural que aumenta la tensión de fluencia y la tenacidad al mismo tiempo).

El tema de la ductilidad/fragilidad en el reventado de tubos y la tenacidad necesaria para garantizar comportamiento dúctil se relaciona también con el problema del punzado o perforado (*shooting*) del *casing* para la admisión del petróleo desde la formación. En el perforado por explosión contenida se producen tensiones suficientemente grandes sobre el *casing* como para que pueda haber propagación de fisuras a partir de los agujeros mismos producto del perforado. Los estudios que se realizaron muestran que aquí también existe una tenacidad mínima necesaria para que esto no ocurra. Esta tenacidad es inferior a la encontrada para el reventado siendo de alrededor de 20 Joule para *casing* grado N80.

Tubulares resistentes a la corrosión sulfídrica

En los medios sulfídricos que muchas veces se encuentran en pozos de petróleo, aparece una forma de corrosión (corrosión ácida) cuya base es la fragiliación por la introducción catódica de hidrógeno en el metal. Este tipo de corrosión tiene una fuerte sinergia con las tensiones aplicadas por las cargas de servicio. El problema es parecido a la corrosión bajo tensión (de tipo anódico) que se produce en algunas aleaciones y aceros en medios con cloruros pero, en el caso de la corrosión sulfídrica (H_2S), el proceso está controlado catódicamente. Basta con que los niveles de H_2S superen lo especificado en la norma NACE MR-01-75-88 (presión parcial de $H_2S > 0.05$ psi o sea 5 ppm a 10.000 psi) para que exista el peligro de este tipo de corrosión que, a diferencia de la corrosión dulce por CO_2 , ocurre en forma rápida, sin avisar, a veces catastróficamente, llevando muchas veces a situaciones peligrosas para instalaciones, para la seguridad del personal y para el medio ambiente. Una variable muy importante a tener en cuenta es la temperatura pues, por encima de unos 80°C, este tipo de corrosión pierde agresividad (tampoco aparece a temperaturas muy por debajo de temperatura ambiente). Dependiendo de la temperatura máxima en el fondo y la mínima en superficie, este tipo de corrosión puede estar cercano a la boca del pozo (no así en pozos *offshore* con bajas temperaturas del lecho del mar).

La resistencia a la corrosión sulfídrica disminuye en forma importante al aumentar el grado del acero utilizado, es decir, al aumentar la tensión de fluencia y es entonces necesario considerar compromisos entre el espesor y la tensión de fluencia compatible

con las cargas de servicio que deben ser soportadas. Esto nos ha llevado a investigar en la metalurgia para diseñar composiciones y microestructuras de aceros que confieran la mayor resistencia a la corrosión sulfídrica posible para una dada tensión de fluencia; y es aquí donde radica fundamentalmente el desarrollo de los tubulares llamados *sour service* o *servicio agrio*. Por ejemplo, para mostrar las diferencias, un P110 API, no resistente al H₂S, que en aire es capaz de deformarse plásticamente por lo menos un 20%, no permitirá deformación plástica alguna cuando está dentro de un medio sulfídrico como el que determina la norma NACE, rompiendo en el rango elástico en forma totalmente frágil; en cambio, el acero de un tubular *sour service* grado 110, en un medio igual de H₂S, admitirá deformaciones plásticas que pueden llegar a más del 20% de la deformación en aire; es decir que una metalurgia adecuada permitirá alcanzar importantes ductilidades en medio sulfídrico. Para lograr estos grados especiales para la corrosión ácida fue necesario recurrir a una metalurgia muy fina que hace uso extensivo de la microscopía electrónica de transmisión de alta resolución. Para esto recurrimos a un convenio de investigación con el Corrosion and Protection Centre del University of Manchester Institute of Science and Technology, en Inglaterra, donde uno de nuestros investigadores estudió y correlacionó la resistencia de los aceros con distintas composiciones químicas y tratamientos térmicos, que daban lugar a distintas microestructuras⁽⁷⁾. El resultado muestra que la microestructura que produce la mayor resistencia a la corrosión sulfídrica es la martencita que es posible revenir a temperaturas suficientemente altas (>700°C) logrando recristalización de la misma. Se forma así una ferrita de tamaño de grano ultra fino (<1/2 micrón).

Aunque el tamaño de grano tan fino contribuye a una tensión de fluencia alta (de acuerdo con la ley de Petch) fue necesario compensar la pérdida de tensión de fluencia por desaparición de dislocaciones debido a la fuerte recuperación; esto se hizo mediante la incorporación de microaleantes como el V o el Nb que forman carburos muy finos (< a 0.05 micrones) y estables. Los tenores de carbono deben ser también compatibles con el grado. De esta forma fue posible desarrollar tubulares hasta el grado 110 con resistencias a la tracción estática en medio sulfídrico de hasta el 85% de la tensión de fluencia mínima del grado. En los grados menores al 110, la metalurgia es similar aunque no es necesaria la introducción de microaleantes. Las mediciones de resistencia a la corrosión sulfídrica se realizaron en el Laboratorio de Corrosión Sulfídrica de Siderca utilizando ensayos con probetas fractomecánicas compactas (Klssc) y ensayos de tracción estática en medio sulfídrico. También se realizaron ensayos de deformación plástica lenta en medio sulfídrico.

Tubulares resistentes al CO₂

La corrosión dulce o por CO₂ (disuelto en medio acuoso) aparece con mayor frecuencia en yacimientos productores de gas donde el CO₂ se disuelve en el fluido condensado internamente sobre la tubería de producción; esto ocurre generalmente en las cercanías de la boca del pozo donde las temperaturas favorecen la condensación.

A diferencia de la corrosión sulfídrica, este tipo de corrosión no tiene sinergia con las tensiones aplicadas sobre la tubería; su generación se evidencia en pérdida del material que pasa a formar compuestos, productos de la corrosión que, en algunos casos, pueden convertirse en barreras adecuadas para la corrosión misma. Esa pérdida de material se

genera ya sea en forma uniforme, llevando a una pérdida uniforme de espesor a lo largo del tiempo, o en forma localizada, dando lugar al picado que lleva a la perforación y a la pérdida prematura de la estanqueidad de la tubería sea ésta de transmisión, *line pipe* o de producción, *tubing*, o a la rotura prematura de una varilla de bombeo.

El estudio de esta corrosión requiere el uso de autoclaves adecuadas donde sea posible reproducir las condiciones imperantes en el pozo, es decir, presión, temperatura y medio corrosivo agregando también como variable muy importante la velocidad del fluido que define la tensión de corte generada por el movimiento del fluido sobre la superficie del tubular. Dada la importancia de este tipo de corrosión en los yacimientos de nuestro país, se estableció un convenio de colaboración entre la empresa YPF y Siderca mediante el cual se contrata al laboratorio LANAIS de corrosión de la Comisión Nacional de Energía Atómica para desarrollar en colaboración con los profesionales de ambas empresas, los estudios necesarios. Mediante el estudio de materiales corroídos en pozo se ha comenzado a tipificar la corrosión en los yacimientos de YPF comenzando por el de Chuiidos y Lomitas. En laboratorio se reproduce la corrosión encontrada utilizando el medio corrosivo similar y luego se estudian los mecanismos imperantes. Posteriormente, con las mismas condiciones, que son reproducción de las imperantes en el pozo, se estudian materiales alternativos tratando de desarrollar aquellos que permitan una resistencia a este tipo de corrosión. El reto pasa por el desarrollo de aceros al carbono sin tener que recurrir a las aleaciones con altos contenidos de cromo (> 13% Cr) que encarecen en forma muy importante las instalaciones. En este momento se está experimentado con aceros



HENRY HIRSCHEN & CIA. S.A.

Suministros para la industria del petróleo y el gas

- TRIETILENGLICOL
- MONOETILENGLICOL
- MONO-DI-TRIETANOLAMINA
- ODORANTES PARA GAS NATURAL Y LICUADO

Av. L.N. ALEM 1110 - 9º PISO - TEL.: 311-8239 • 312-1500 FAX 311-8239 • 312-4512 BUENOS AIRES

conteniendo hasta 1% de Cr; el tipo de microestructura debido al contenido de otros aleantes (particularmente el contenido de carbono y microaleantes) y al tratamiento térmico aparece como de importancia. Aunque no totalmente comprobado todavía, la microestructura de ferrita/perlita aparece como la que confiere mayor resistencia a la corrosión. La velocidad del fluido por dentro de la tubería es una variable determinante del tipo de corrosión; existen evidencias que muestran que, mientras que a velocidades bajas aparece corrosión localizada fuerte, en la forma de picado o ataque tipo mesa, el mismo material puede mostrar ventajas relativas importantes cuando las velocidades de flujo son altas.⁽⁶⁾ Esto resulta importante para discriminar el uso particular de cada material habida cuenta de que, en pozos productores de gas, la película condensada dentro de la tubería, que es la que produce la corrosión, se mueve a una velocidad muy pequeña con respecto a la tubería, mientras que en pozos productores de petróleo el movimiento del fluido es rápido. El programa contempla en forma importante el estudio de inhibidores y los mecanismos de inhibición.

Uniones especiales

Las uniones entre tubos pueden realizarse mediante soldadura, como ocurre generalmente en el caso de tubería de transporte, o con uniones roscadas como es hoy en día necesario hacerlo tanto con la tubería de revestimiento como en la de producción debido a la forma de bajar la tubería en el pozo perforado. Existen uniones roscadas con especificaciones dadas por la API de EE.UU., sin sellos, que permiten una integridad estructural adecuada pero que no son suficientemente estancas en ciertas condiciones de carga en servicio o cuando el fluido es gas.

Varias empresas han desarrollado sus propias uniones "especiales" que llevan en general un sello metal contra metal que permite una estanqueidad adecuada en condiciones de servicio de mayor severidad y con producción de gas.

Existen tres funciones que debe cumplir una unión: 1. mantener unidos los tubos a cada lado ante las cargas de servicio en el pozo; 2. mantener la estanqueidad, aun bajo las distintas cargas de servicio, sellando adecuadamente el pasaje de fluidos, líquidos o gases, empujados por un diferencial de presión entre el exterior e interior de la tubería; 3. permitir un fácil armado y desarmado de la unión sin crear daños a los sellos o rosca de la unión permitiendo la reutilización de la tubería (en especial tbg).

Debido a que las condiciones de servicio pueden ser muy distintas en su nivel de exigencia, la API a través de la 5C5 considera 4 grupos o clases de uniones; cada clase se distingue por un conjunto de exigencias contenidas en una serie de ensayos a plena escala diseñados específicamente, teniendo en cuenta distintos factores que intervienen aumentando de severidad desde la clase IV a la I. Algunas empresas petroleras requieren para ciertas aplicaciones, que las uniones pasen ensayos especialmente diseñados; así existen los ensayos Shell o los ensayos Mobil por ejemplo, para aplicaciones en pozos con condiciones difíciles o con requerimientos de seguridad o medio ambiente muy importantes. Obviamente, para lograr cumplir las funciones en medios cada vez más severos, los costos de producción y los precios de estas uniones también aumentan de IV a I por lo que es necesario conocer muy bien las exigencias que demandará el servicio en pozo para adecuar el costo a la prestación.

En el Centro de Investigación Industrial

se desarrollaron investigaciones alrededor de la Unión SEC de Siderca. El modelo computacional permitió determinar las tensiones y deformaciones (elásticas y plásticas) distribuidas alrededor de la unión, tanto en el cuerpo de la cupla como en el de la tubería que forma el pin roscado que rosca dentro de la cupla. Esta distribución se obtuvo por el armado o **make-up** de la unión cupla/pin, en cuyo caso, las tensiones y deformaciones provienen de las interferencias entre pin y cupla y a las presiones en el hombro de torque. Una vez conocida esta distribución se convalidó el modelado numérico mediante ensayos a plena escala con la inclusión de extensómetros o *strain-gauges* que permiten medir las tensiones en superficie y compararlas con los resultados del modelado. Habiendo constatado la coincidencia de los resultados teóricos con los experimentales, el modelado quedó entonces como herramienta de predicción en otras condiciones. Se llevó adelante el modelado para diversas condiciones contempladas en los estados de carga que aparecen en servicio en el pozo: tracción, presión interna y flexión y la combinación de estas. En particular, se establecieron las presiones de contacto a través de las superficies de los sellos metal/metal, verificando las modificaciones que se producen en la distribución y magnitud de estas presiones por obra de la aplicación de los distintos estados de carga, en particular los de tracción y de flexión (en sector traccionado) que disminuyen las presiones de contacto. Los niveles y la distribución particular de las presiones de contacto a través de los sellos metal/metal son de fundamental importancia para la sellabilidad de las uniones especiales o *premium* al punto que una empresa petrolera utiliza estos resultados del modelado numérico exclusivamente para calificar las uniones es-

CERTIFICACION DE CALIDAD EN CARTELERIA INSTITUCIONAL

- HOMOLOGACIÓN DE MARCAS, INSUMOS, PRODUCTOS E INSTALACIONES
- NORMALIZACIÓN DE PROCESOS, TRANSPORTE E INSTALACIONES
- PLANES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO, ACCIDENTE O CATÁSTROFE



大君

TAIKUN S.A.

CONTROL DE CALIDAD EN VIA PUBLICA

peciales que utilizarán. Sin embargo, aunque sea conocida en detalle esta distribución de presiones, el modelado numérico no es capaz de predecir cuál distribución de presiones sellará adecuadamente un determinado gradiente de presiones de gas. Es necesario contar con un criterio de sellabilidad; este debe ser obtenido experimentalmente. Se han implementado experimentos en este sentido para completar el trabajo realizado con el modelado.

Paralelamente, se realizaron los ensayos a plena escala en el laboratorio LEPE para calificar el nivel máximo de prestación de la unión SEC. Estos ensayos son los especificados en la norma 5C5 de API concretándose tanto en *casing* como en *tubing* la superación del nivel III, lográndose el nivel II (este nivel exige ensayos sobre 24 probetas de *casing* y 24 de *tubing*) salvo en los tamaños de *casing* mayores a 95/8" de diámetro.

¿Qué se ganó en experiencia con el modelado numérico? El análisis por modelado numérico de la distribución de tensiones se realizó para las distintas interferencias de rosca y sello y para los distintos niveles de tolerancia de fabricación, teniendo en cuenta tolerancias encontradas entre la cupla y el pin. Esto permitió encontrar los límites ideales de fabricación en el que se logra una buena sellabilidad y al mismo tiempo un bajo nivel de engrane de roscas (*galling*), problema que afecta particularmente las uniones hechas en aceros inoxidables.

Aplicación de redes neuronales para la detección de defectos por flujo magnético disperso^{9,10}

La técnica de detección no destructiva por flujo magnético disperso hace uso de la intensidad de la señal que es capaz de producir un detector colocado a cierta distancia de la superficie de un tubo, cuando el flujo magnético de un campo inducido en el material del tubo es dispersado hacia el exterior debido a la existencia de un defecto. La intensidad de la señal está directamente relacionada con la profundidad del defecto o tamaño de la fisura y por lo tanto su peligrosidad; esta intensidad de la señal medida pico a pico se utiliza como criterio de aceptación del tubo en las mediciones tradicionales. Pero la intensidad de la señal también depende de la intensidad del campo aplicado, del espesor del tubo en el punto específico, las propiedades magnéticas del acero y la distancia exacta del detector a la superficie del tubo y de fisuras/defectos internos o

externos. Todos estos parámetros están sometidos a fluctuaciones inevitables que harán fluctuar también la intensidad de la señal para un defecto dado. Esto lleva a que se cometan errores por exceso y por defecto en la detección de defectos en el tubo: habrá tubos que serán rechazados aun cuando la gravedad del defecto real no alcanzaba al nivel crítico de rechazo (falsas alarmas) y otros que pasarán a pesar de contener un defecto mayor a la severidad límite. Para evitar esto último, que es lo más peligroso, se procede a disminuir el umbral de rechazo a expensas de aumentar notoriamente las falsas alarmas y, por lo tanto, las inspecciones posteriores de tubos rechazados. Pero ocurre que la señal del detector, además de su intensidad pico a pico, contiene en la forma de la señal mucha información adicional que no se usó y que se refiere al tipo de defecto, en particular, su ubicación, forma y profundidad o peligrosidad, que es sobre lo que se quiere discriminar. Para extraer y usar esta información adicional, se desarrolló primeramente un modelo numérico que permitió reproducir por computadora la señal, en intensidad y forma, proveniente de la detección de un defecto de profundidad igual a 12.5% del espesor del tubo como límite de aceptación para fisuras.⁽¹¹⁾ La intensidad y forma de la señal generada por el modelo está parametrizada en función de todas las variables que pueden fluctuar, a saber, ancho del defecto, espesor de pared del tubo para el acero en cuestión, valor de saturación del campo inducido e intensidad de campo magnético para 50% de saturación, campo magnético aplicado y distancia del detector a superficie del tubo. La fluctuación al azar (dentro de esos límites normales establecidos) de varios parámetros que afectan a la medición fue introducida mediante una simulación de Monte Carlo por medio de la cual, con el modelo numérico, se generó una población de 1000 casos para una misma profundidad de fisura (12.5% del espesor). Esta población es la que se utilizó para "entrenar" una red neuronal para que ésta luego discrimine la severidad (profundidad) de la fisura a pesar de las variaciones de los parámetros del proceso de medición, haciendo uso de la información existente en la forma de la señal.

Una red neuronal es un conjunto de algoritmos computacionales con parámetros que son determinados ajustando ejemplos históricos de resultado conocido. Permite, posteriormente a este "entrenamiento", pre-

decir resultados que se quieren conocer. En nuestro caso, se "entrenó" una red neuronal desarrollada especialmente para esta aplicación. Posteriormente, la red fue capaz de predecir, con buen éxito, la profundidad de una fisura cuando se le da como *input* la señal del campo disperso del defecto en un tubo a pesar de las fluctuaciones al azar que ocurren en los parámetros del proceso de medición; es decir, aprendió a reconocer el defecto por otras características de la señal además de la intensidad medida pico a pico. En forma por ahora experimental, mediante modelado, como resultado del uso de una red neuronal, fue posible reducir el número de falsas alarmas en un factor cinco para una probabilidad dada de detección.

REFERENCIAS

- 1 En esta universidad se ha instituido la beca Rocca para estudios de Postgrado hacia el Doctorado en Ciencias de los Materiales e Ingeniería Mecánica.
- 2 Ver A. P. Assanelli, *Actualización sobre Casing High Collapse* CINI N° I-834/95; Dvorkin, E. N. y Assanelli, A. P., *High Collapse casing*. Part I: *Ovality effects*, CINI I.249/90; Part II: *Eccentricity effects*, CINI I.249/90; Assanelli, A. P., Radovitzky, R. A. y Dvorkin E. N.; Part III: *Residual Stress effects*, CINI I.314/91; Part IV: *Material Strain Hardening effect*, CINI I. 408/92.
- 3 Stress Engineering Services, Houston Texas.
- 4 Madhavan, R., Babcock, C. D. y Singer, J. *On the collapse of long, thick walled tubes under external pressures and axial tension*, Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 115, pp. 15-26, 1992.
- 5 M. S. Bruno, *Subsidence-Induced well failure*, SPE Drilling Engineering, June, 1992.
- 6 R. Herrera CINI, Informe.
- 7 G. Echaniz, T. Pérez, C. A. Pampillo, R. P. M. Procter, G. Lorimer and R. Newman, 1994 *Hydrogen Embrittlement Conference*, Jackson Hole, WY.
- 8 Vera J. R., Vilora A., Castillo M., Ikeda A. and Ueda M., *Flow velocity effect on CO2 corrosion of carbon steel using a dynamic field tester*. In *Predicting CO2 corrosion in the oil and gas industry*, European Federation of Corrosion Publications N° 13.
- 9 Este es un caso muy interesante de interacción colaborativa entre instituciones dedicadas a la investigación científica como son la Comisión Nacional de Energía Atómica y el Centro de Estudios Avanzados de la UBA y un centro dedicado a la investigación tecnológica industrial.
- 10 H. Gavarini, R. P. J. Perazzo, S. L. Reich, E., Altschuler y A. Pignotti, *Neural Network Classifier of Cracks in Steel Tubes*, CINI N° D-848/95.
- 11 *API Specification 5CT for Casing and Tubing*, Section 9, 1992. International Standard ISO 9402:1989 (E).