



3° Congreso de Integridad en Instalaciones
en el Upstream y Downstream
de Petróleo y Gas



Análisis de integridad de juntas embonadas

Por **Aníbal Márquez** (GIE S.A. y Universidad Nacional de Mar del Plata)

Rossangela Elizabeth Assante Adriazola (Pluspetrol Norte)

Lucio Márquez y Pablo Fazzini (GIE S.A.)

La tecnología de unir los diferentes tramos mediante la inserción de los extremos con interferencia se utilizan desde hace más de 50 años. Este método para el tendido de ductos tiene varias ventajas, como la facilidad de instalación y la preservación de la composición química y microestructural.

La búsqueda de tecnologías innovadoras se volvió una constante con el fin de maximizar la productividad, la seguridad y la economía en la construcción y en la operación de ductos destinados al transporte de fluidos. La unión circunferencial de tubos en la construcción de ductos, constituye un aspecto clave durante la construcción, que tendrá luego una marcada influencia en la integridad del activo.

La tecnología de unir los diferentes tramos mediante la inserción de los extremos con interferencia, escasamente difundido, ha sido utilizada por más de 50 años. Este método para el tendido de ductos, a veces denominado de

juntas embonadas, se basa en una conexión por interferencia mecánica por embutido entre un extremo expandido en forma de campana (*bell-end* o conexión hembra) y un extremo macho (*pin-end*), generados a partir de la conformación en frío de los extremos de los tubos (Figura 1).

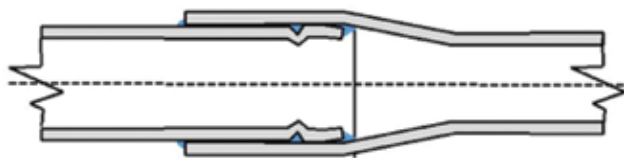


Figura 1. Esquema de una junta por interferencia, con extremo abocardado externo, virola y cono interno y grouting de epoxi.

Este tipo de juntas genera la unión por traba mecánica por interferencia, sin accesorios, con el aditamento de un adhesivo para asegurar la estanqueidad, que oficia también de lubricante en el momento del ensamblado de la unión. La integridad mecánica de la unión es mantenida por las tensiones residuales que se generan durante el proceso de armado del ducto (*Mechanical Interlocking*, Brandon y Kaplan, 1997).

La unión mecánica tiene varias ventajas, como la facilidad de instalación y la preservación de la composición química y microestructural del material del tubo, ya que no hay fusión ni material de aporte. En cambio, las altas tensiones residuales fueron una limitación importante para la aplicabilidad de este tipo de uniones (Messler, 1993). El tendido de ductos con esta tecnología es mucho menos dependiente de recursos humanos altamente especializados, como soldadores, preparadores y radiografistas.

Mucho esfuerzo se ha realizado con el objetivo de validar la aptitud para el servicio de estas tecnologías, generalmente basándose en ensayos *full scale* en condiciones controladas de laboratorio. De este modo, se han determinado las sollicitaciones admisibles para diferentes diámetros y espesores.¹ Todos estos estudios se han realizado sobre juntas ensambladas que no han estado en servicio por tiempos prolongados.

La integridad de la junta en servicio se basa en dos factores: la permanencia de las tensiones residuales y la continuidad del sello o *grouting* de la unión mediante resinas epoxi. En consecuencia, pueden surgir planteamientos respecto de la aptitud para el servicio de las uniones antiguas debido a la relajación de las tensiones residuales o a la degradación del *grouting* por diversos mecanismos.

En este estudio se tuvo la oportunidad de evaluar el comportamiento de juntas con más de 30 años en servicio.

Desarrollo

El sistema de juntas embonadas para la unión de dos ductos se basa en una conexión por interferencia mecánica entre una campana, *bell-end* o conexión hembra; y un extremo macho o *pin-end*, generadas a partir de la conformación en frío de los extremos originales de los ductos (Figura 2). En el caso que se estudió, los tubos no poseen recubrimiento interno.

La resistencia mecánica de la unión derivó proviene de la fricción que se establece a partir del contacto metal con metal generado entre los dos extremos embonados, en el cual el extremo hembra ejerce efecto de zunchado sobre el extremo macho. De esta manera, el *pin-end* queda sometido a tensiones circunferenciales de compresión mientras que el *bell-end* a tensiones circunferenciales de tracción. La presión que se produce en la interfaz de los dos extremos es lo que mantiene por fricción en su lugar a los elementos cuando la unión se la somete a la carga en servicio.

Si bien la interferencia presenta un buen grado de estanqueidad, para optimizar este aspecto se hace uso de una resina epóxica como sello al final de cada uno de los extremos. La resina también oficia de lubricante en el momento del ensamblado de la unión y colabora en la resistencia mecánica frente a tensiones axiales.

El tipo de junta estudiada se aplica para tuberías de transporte de hidrocarburos en un amplio espectro de dimensiones, en tubos sin costura o con soldadura longitudinal ERW.

El proceso de construcción del ducto consiste en la inserción del extremo macho en el extremo hembra a través de prensas hidráulicas que ejercen los esfuerzos requeridos para tal fin. El extremo macho actúa como un mandril causando una deformación adicional en la campana. A su vez, el extremo macho es comprimido y experimenta tensiones de compresión similares en magnitud a las del extremo hembra, pero no experimenta deformación plástica, debido a un estado tri-axial de tensiones más favorable que el de la campana.

Para la evaluación de integridad de la junta, se diseñaron dos ensayos: uno de resistencia a la presión interna hasta la rotura, sin restricción de la deformación axial, y otro de medición de las tensiones residuales de zunchado de la unión mediante la medición de deformaciones durante el desarme de la junta. Para el primer tipo de ensayo se sometió a la unión a tensiones circunferenciales y longitudinales, generada por presión interna en una junta a la que se le soldaron dos cabezales con casquetes esféricos

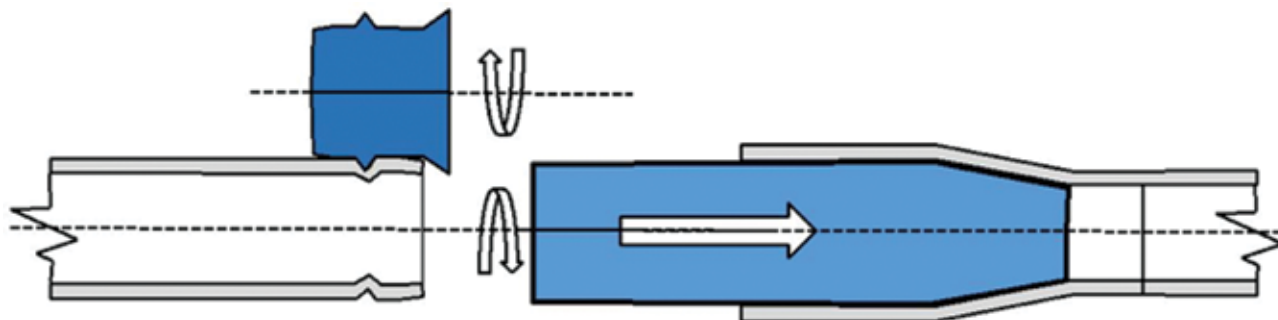


Figura 2. Conformado del extremo hembra y macho.

en los extremos. Para el segundo tipo de ensayo, se instrumentó con *strain gauges* el tubo externo en diferentes planos transversales y se eliminaron las tensiones de armado mediante la remoción del tubo interno.

Para este estudio, se recibieron tres juntas retiradas de una línea con más de 30 años en servicio. Las juntas serán identificadas como muestra 1, muestra 2 y muestra 3, respectivamente, compuestas cada una por un caño A (macho o pin) y otro B (hembra o campana), el sentido de circulación es de A a B. Las juntas embonadas no presentan evidencias de reparaciones y se encuentran en buen estado en general (Figura 3).

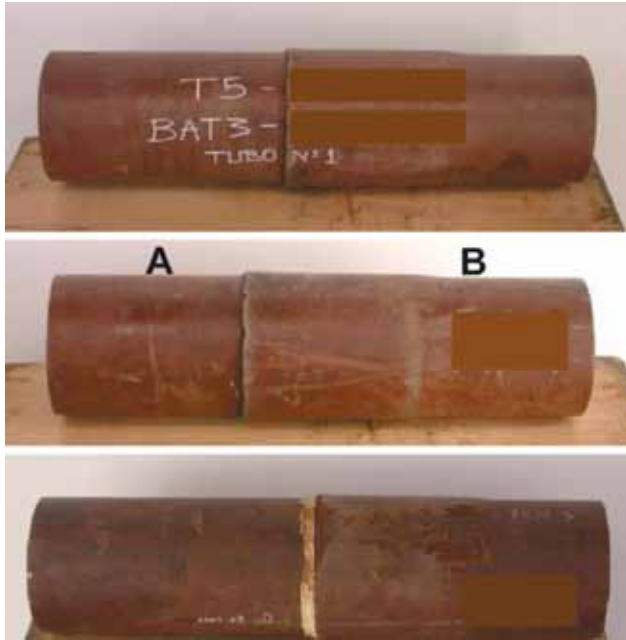


Figura 3. Juntas analizadas.

Relevamiento del daño acumulado por el *coating* y el material de los tubos en la zona de las uniones

Muestra 1: el *coating* exterior presenta desprendimiento y corrosión en determinados sitios (Figura 4), en especial en el borde de junta del lado B (Figura 5). Dicho borde tiene restos de resina epoxi del embonamiento (Figura 6).



Figura 4. Desprendimiento de *coating*, pit y raspones en el cuerpo de la muestra 1.

El interior de la muestra no presenta *coating* y su superficie, si bien presenta corrosión superficial, se encuentra en relativo buen estado. El borde de junta del lado A presenta remanentes de resina epoxi con desprendimiento en algunas zonas. Puede distinguirse en el lado interno el pliegue de la ranura necesaria para el almacenamiento de resina en la junta (Figura 7).



Figura 5. Desprendimiento de *coating* y corrosión con pérdida de material en el borde de junta del lado 1B.



Figura 6. Remanentes de resina epoxi del embonamiento en el borde de junta del lado 1B.



Figura 7. a) Remanentes de resina epoxi en el borde de junta del lado 1A. Detrás, el pliegue de la ranura de almacenamiento de resina. b) Zonas de dicho borde con desprendimiento de resina.

Muestra 2: el *coating* exterior presenta desprendimiento y corrosión en determinados lugares e indentaciones superficiales circunferenciales de aspecto reciente

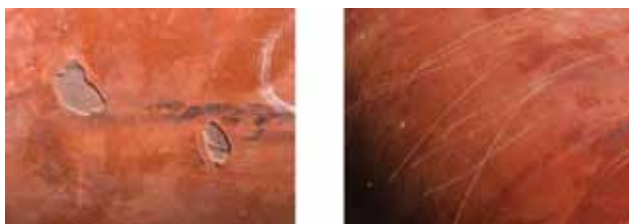


Figura 8. a) Desprendimiento de coating en el cuerpo de la muestra 2. b) Indentaciones superficiales circunferenciales sobre el coating de aspecto reciente.



Figura 9. Desprendimiento de coating y corrosión con pérdida de material en el borde de junta 2B.



Figura 10. Remanentes de resina epoxi del embonamiento en el borde de junta 2B.

(Figura 8). El borde de junta del lado B presenta corrosión con pérdida de material (Figura 9). Dicho borde posee en algunas zonas restos de resina epoxi del embonamiento (Figura 10). El interior de la muestra no presenta *coating*. Existe una banda longitudinal de corrosión de aproximadamente 20 mm de ancho, que recorre la muestra de lado a lado (Figura 11), pero con una pérdida de espesor despreciable. El borde de junta del lado A presenta remanentes de resina epoxi con desprendimiento en algunas zonas. Puede distinguirse, en el lado interno, el pliego de la ranura necesaria para el almacenamiento de resina (Figura 12).



Figura 11. Banda longitudinal de corrosión.



Figura 12. Remanentes de resina epoxi con desprendimiento en el borde 2A. Detrás, el pliego de la ranura de almacenamiento de resina.



Figura 13. Desprendimiento de *coating* y corrosión con pérdida de material en el cuerpo de la muestra 3.



Figura 14. Desprendimiento de *coating* y corrosión con pérdida de material sobre el borde de junta 3B. Puede apreciarse la resina que recubre el borde y se presume posterior al embonado de los caños.

Muestra 3: el *coating* exterior presenta considerable desprendimiento y corrosión con pérdida de material en lugares que se corresponden con raspaduras antiguas (Figura 13). El borde de junta del lado B presenta corrosión con pérdida de material. El mismo se encuentra recubierto por una resina, la cual se presume no es la del embona-



Figura 15. Pits de corrosión en el interior de la muestra 3.



Figura 16. Remanentes de resina epoxi con desprendimiento parcial del excedente y ranura de sello de resina.

miento, sino que es posterior al mismo (Figura 14). El interior de la muestra no posee *coating* y presenta sedimentos y pits de corrosión (Figura 15). El borde de junta del lado A presenta remanentes de resina epoxi con desprendimiento en algunas zonas. Puede distinguirse en el lado interior la ranura necesaria para el almacenamiento de resina (Figuras 16 y 17 corte transversal).

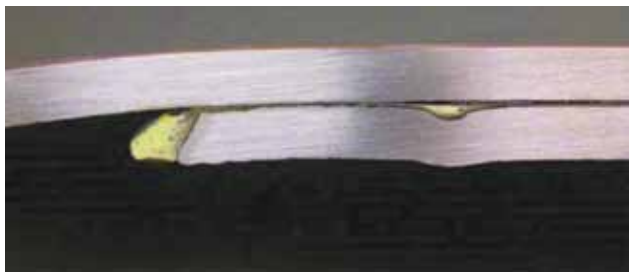


Figura 17. Detalle de extremo interno del pin, ranura del sello con epoxi.

Relevamiento dimensional

Se relevaron las medidas pertinentes de las tres muestras (Figura 18, Tabla 2). Se determinó la ovalización, definida como diferencia entre el diámetro hora 12-6 y el diámetro hora 9-3, de las muestras en tres puntos: extremo de caño A, zona de interferencia de la junta y extremo del caño B (Tabla 3).

Se relevaron por ultrasonido los espesores del caño A y B en sus extremos y en la zona de junta, tomando en cada caso cuatro mediciones a las horas 12, 3, 6 y 9 (Tabla 4).

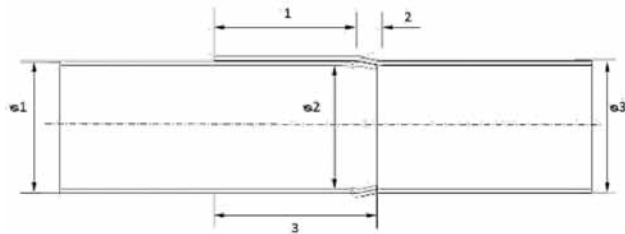


Figura 18. Medidas de las muestras (ver referencias de dimensiones en la tabla 2).

Muestra N°	COTAS (mm)					
	1	2	3	Ø 1	Ø2	Ø3
1	252	50	305	220	203,5	219
2	267	45	310	220	204,6	220
3	258	50	267	220	204,5	219

Tabla 2. Mediciones realizadas sobre cada muestra.

Muestra N°	OVALIZACIÓN (mm)		
	Punto A	Junta	Punto B
1	0,63	-0,82	-1,1
2	-1	-0,23	-2,3
3	-1	0	-1,15

Tabla 3. Mediciones de ovalización.

Muestra N°	Extremo "A"				Extremo "B"				Junta							
	12'	3'	6'	9'	12'	3'	6'	9'	12'	3'	6'	9'	12'	3'	6'	9'
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	5,56	5,51	5,56	5,49	5,5	5,45	5,41	5,43	5,6	5,38	5,44	5,32	5,49	5,3	5,44	5,26
2	5,75	5,55	5,6	5,53	5,57	5,7	5,41	5,61	5,31	5,13	5,4	5,73	5,12	5,01	5,38	5,39
3	5,48	5,47	5,37	5,44	5,32	5,27	5,4	5,56	5,5	5,42	5,46	5,48	5,5	5,37	5,43	5,46

Tabla 4. Registros de mediciones de espesores.

Análisis químico del material y ensayos mecánicos

Se realizaron ensayos de tracción uniaxial según API 5L y análisis químico de muestras extraídas de material base de un tubo perteneciente a la línea (Tabla 5). La muestra

analizada satisface los requerimientos químicos y mecánicos de API 5L GR X60 PSL 1, con una tensión de fluencia de 461 MPa y 570 MPa de rotura (Figura 19 y Tabla 6), con estructura ferrítico-perlítica (Figuras 20 y 21).

Muestra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
Tubo API 5L GR X60 PSL 1 (máx.)	0,23	0,02	0,69	0,014	0,011	0,02	0,01	0,01	0,01	0,002
	0,26	-	1,40	0,030	0,030	-	-	-	-	-
API 5L GR X60 PSL 2 (máx.)	0,12	0,45	1,60	0,025	0,015	-	-	-	-	-

Tabla 5. Composición química del material base del tubo de 8". Base Fe. Valores expresados en % m/m. Composición química especificada para un acero API 5L GR X60, PSL 1 y PSL 2. (Specification for Line Pipe, API Specification 5L, Forty-Fifth Edition, December 2012 (Effective date: July 1, 2013).

Muestra	Tensión de fluencia (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Alargamiento %
Material base	461	570	26.1
API 5L X60 PSL1	415	520	20,5*
API 5L X60 PSL2	415-565	520-760	20,5-14,6*

Tabla 6. Resultados del Ensayo de Tracción realizado bajo Norma API 5L. Propiedades mecánicas especificadas para un acero API 5L GR X60 PSL 1 y PSL 2. *Valor de alargamiento mínimo.

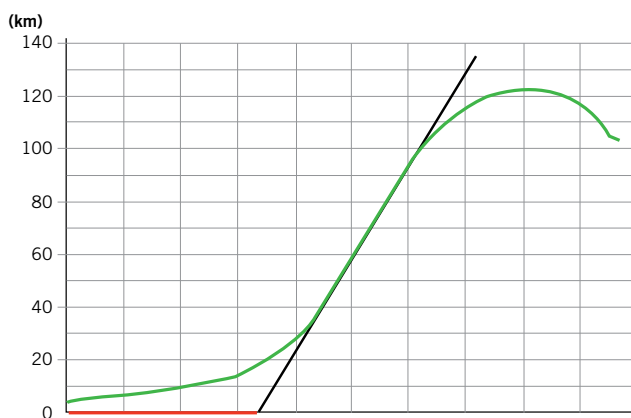


Figura 19. Carga desplazamiento de ensayo probeta tubo 8". Equipo SHIMADZU MM 151.

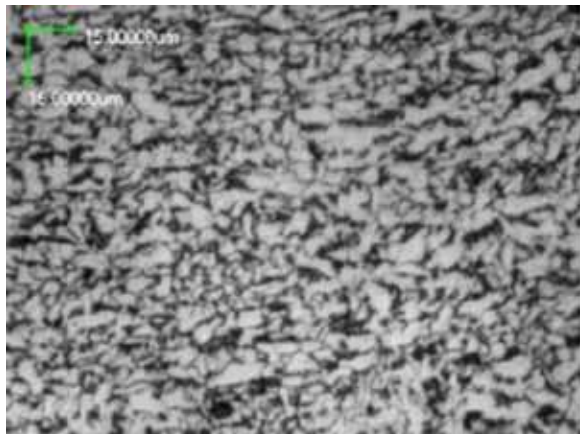


Figura 20. Estructura metalográfica material ducto B1, sección transversal. Estructura ferrítico perlítica. Pulido, nital 3%. Original 300X.

Prueba hidrostática de las uniones

Se soldaron en los extremos de las muestras 1 y 2 cabezales de prueba de 8" SCH40 de 200 mm de largo, con sendos niples de 3/4", ubicados a 180° uno respecto al otro, a modo de entrada y purga de fluido, respectivamente (Figura 22).

Se instaló un sistema de registro de desplazamiento axial con una base de medición que abarca la junta embozada y se complementó con un comparador analógico, lo que permite relevar la eventual separación progresiva de la junta en sentido axial durante el ensayo.

Modelado e instrumentación

Para verificar si la colocación de los cabezales ofrecía efectos de borde de rigidización, se modeló el estado tensional de las tensiones remanentes y bajo presión. Se determinó que la zona instrumentada no se ve afectada por el ensamble (Figura 23).

Con el fin de relevar las deformaciones circunferenciales en relación con la presión, se instrumentaron las muestras con dos *strain gauges* en dirección circunferencial.

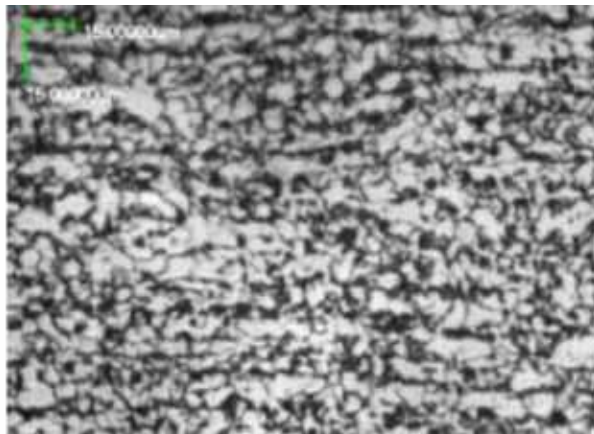


Figura 21. Estructura metalográfica material ducto B1, sección longitudinal. Estructura ferrítico perlítica con bandeo de laminación. Pulido, nital 3%. Original 300X.

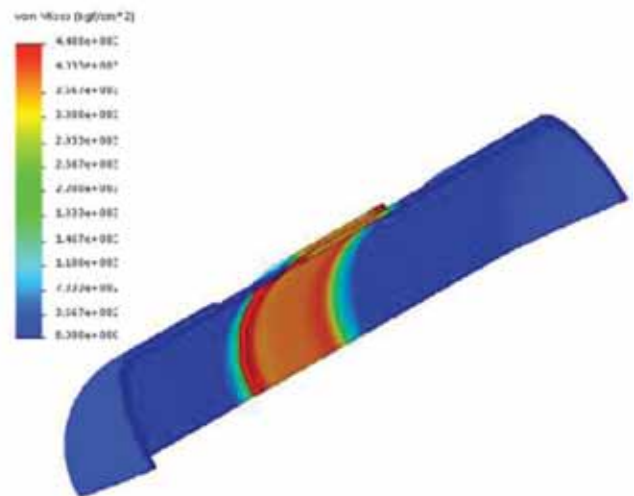


Figura 22. Armado de los cabezales con virolas e instrumentación. Izquierda, modelo del ensamble con el estado tensional residual previo al ensayo.

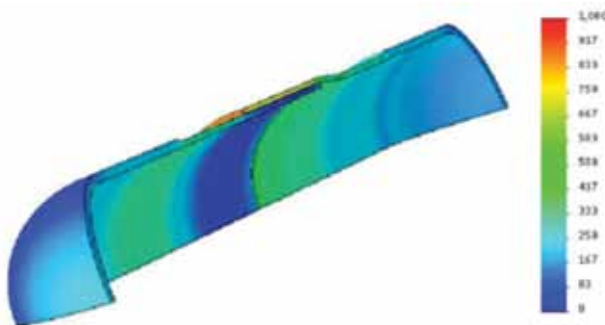


Figura 23. Estado tensional de la junta bajo presión interna de 20 MPa. Se observa que la inclusión de los cabezales no modifica el estado tensional de la zona instrumentada.

Un *strain gauge* fue colocado sobre la junta propiamente dicha y otro sobre el ducto del lado del Pin (macho), ambos colocados sobre la misma generatriz. Durante el ensayo, los *gauges* adquieren deformación en tiempo real junto a un transductor de presión electrónico ubicado en el *manifold* del circuito.

El ensayo se realizó presurizando con una bomba hidráulica de bajo caudal, alta presión, con regulación modulada de presión. Los ensayos se realizaron en forma cuasi-estática con un incremento de presión menor a 0,15 Pa/seg. Las curvas obtenidas se muestran en los gráficos 1 y 2, donde se obtuvo la deformación de la junta y material base contrastada con la presión de la prueba hidráulica. El manómetro analógico clase (0,5%) se utilizó como referencia y calibración para el registrador.

Las escalas de deformaciones y presiones fueron escaladas para compartir la misma escala de ordenadas (la presión se expresa en 40x en MPa y las deformaciones es strain adimensional, el canal sobre la junta X0.5). La diferencia en el inicio entre las curvas de los gráficos 1 y 2 se deben meramente a las diferencias de tiempo en el inicio de la presurización. Mientras que en el gráfico 1 la presurización comenzó inmediatamente y la velocidad de presurización fue mayor (por eso la pendiente de deformación *versus* tiempo es mayor), en el gráfico 2 la presurización demoró alrededor de 20 segundos en comenzar.

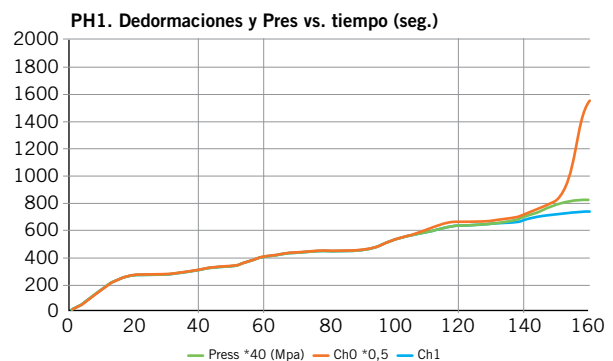


Gráfico 1. PH1 - DEFORMACIONES Y PRES vs. tiempo [seg].
Celeste: deformaciones circunferenciales en el tubo.
Rojo: deformaciones circunferenciales sobre la junta embonada.

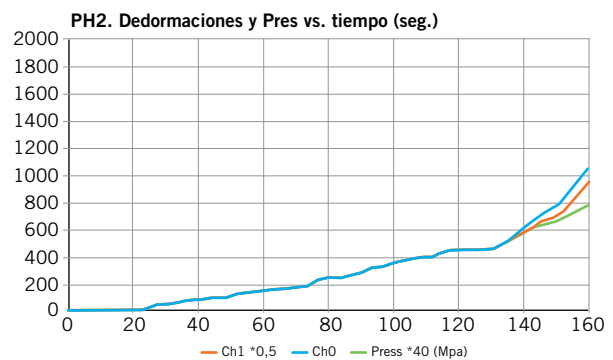


Gráfico 2. PH2 - DEFORMACIONES Y PRES vs. tiempo [seg].

Las pruebas de resistencia de la junta se realizaron a la rotura. El modo de fallo fue la separación de los extremos embonados en forma axial. Las presiones máximas registradas fueron de 24,4 y 27,8 MPa en cada una de las pruebas hidráulicas.

Las presiones de falla son superiores a las necesarias para generar en el tubo, fuera de la junta, solicitaciones mayores a las de fluencia del material (Figura 24).

En ambas pruebas se registró el mismo tipo de deformación plástica del material de los tubos del denominado lado B (no instrumentado). En ambos casos la deformación produjo un aumento del diámetro hasta alcanzar

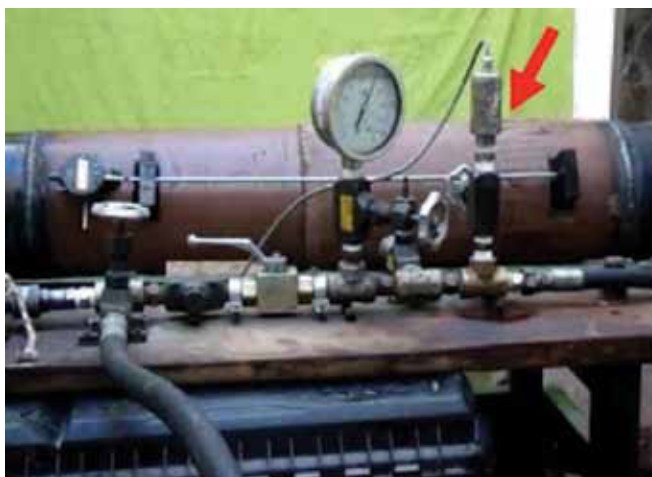


Figura 24. Ensayo destructivo de la junta. A la izquierda, instantes previos, se indica la zona de deformación plástica del lado B. A la derecha, el instante de la separación de la junta.



Figura 25. Muestra 1, posensayo. Separación de la junta.



Figura 26. Muestra 1, posensayo. *Debonding* del coating caño B debido a la deformación plástica.



Figura 27. Muestra 2, posensayo. Separación de junta.



Figura 28. Muestra 2, posensayo. Delaminación del recubrimiento epoxi debido a deformación plástica circunferencial, lado B, similar al de la muestra 1.

aproximadamente el diámetro de la campana en la zona de juntura, es decir, un aumento del diámetro equivalente a dos espesores, produciendo el resquebrajamiento del *coating* (Figuras 26, 27 y 28).

Los registros de las deformaciones en ambos ensayos indican una proporcionalidad entre las deformaciones circunferenciales en el ducto y sobre la junta con la presión (Gráficos 3 y 4). En estos gráficos se ha representado el histórico del ensayo incluido el registro en instantes posteriores a la rotura. Los valores tanto de deformaciones como de presión en función del tiempo. En la primera prueba se realizó una carga y descarga de presión (punto 1, gráfico 3), luego se inspeccionó visualmente la junta, y finalmente, se reestableció la presión y se elevó hasta provocar la rotura de la junta. Se observa que previo a la rotura de la junta, el material base del tubo ya había superado la fluencia.

En ambos ensayos se observó proporcionalidad hasta valores en la deformación circunferencial del orden de 1500 me, valor a partir del cual se observó el comienzo de la pérdida de linealidad del comportamiento. Esto ocurrió a una presión de ensayo del orden de 20 MPa (2.9 Ksi). En esas condiciones, la tensión equivalente de Von Mises³ a la que teóricamente está sometido el material resulta de 429,9 MPa (62,351 psi) (Tabla 6).

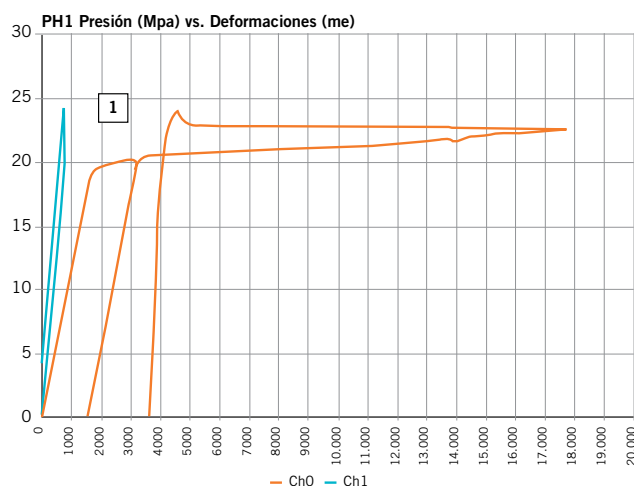


Gráfico 3. Diagrama presión-deformación a rotura de juntas embonadas. Ensayo 1. Deformación circunferencial versus presión. PH1. En rojo, deformaciones sobre el tubo; en azul, deformaciones sobre la junta embonada.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

En la zona de la junta, el pin o tubo interno, que tiene tensiones remanentes circunferenciales de compresión, disminuye el estado tensional cuando se aplica presión interna. Por el contrario, la campana o tubo externo de la unión, que ya tenía tensiones circunferenciales de tracción, sobrepasa el límite de fluencia transfiriendo la reserva de estabilidad al tubo interno.

Tensiones de Von Mises

		Valores unitarios de Pi [MPa]	Tensiones a Pi=19,6 MPa (2,9 Ksi) [MPa] (KSi)
Presión interna	Pi	1	19,6
Tensión circunferencial	σ_C	18,7	366,6
Tensión longitudinal	σ_L	9,4	183,3
Tensión Equiv. De Von Mises	σ_{VM}	21,9	429,9 (62,33)

Tabla 6. Cálculo de tensión equivalente de Von Mises.

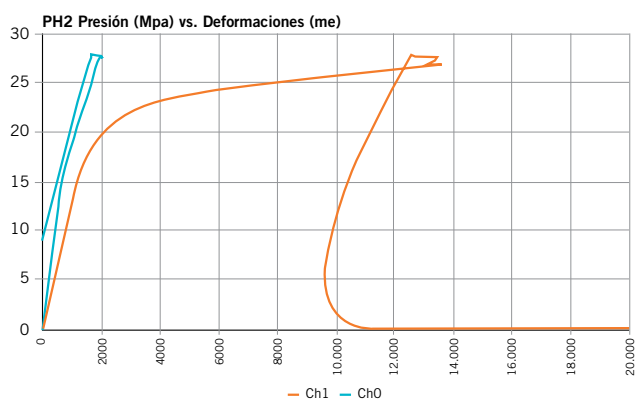


Gráfico 4. Diagrama presión-deformación a rotura de juntas embonadas. Ensayo 2. Deformación circunferencial versus presión. PH2. En rojo, deformaciones sobre el tubo; en azul, deformaciones sobre la junta embonada.

Del mismo modo, los desplazamientos registrados durante los ensayos de los extremos de las juntas mantienen linealidad hasta la presión de fluencia (Figura 29). Estos desplazamientos resultaron del orden del doble de los desplazamientos que el modelado lineal elástico indica (Figura 30).

La diferencia se debe en parte las deformaciones secundarias inducidas por el abarrilamiento del tubo en la medición y también al corrimiento relativo entre los extremos de la junta. Por lo tanto, la junta está produciendo entonces un desplazamiento relativo interno menor a 0,18 mm en el momento de la rotura. La inspección de la parte visible de la junta durante el ensayo no evidenció signos de desplazamientos relativos y de *debonding* del recubrimiento epóxico.

Medición de tensiones residuales

El procedimiento de ensamblado de las juntas aprovecha las propiedades elasto-plásticas del material. Durante el proceso de deformación previo al ensamblaje, se suele conseguir un incremento de la tensión de fluencia por deformación plástica del orden del 10%.

**LA CALIDAD ES
NUESTRO RECURSO
INAGOTABLE**

Cables de acero a la medida
de la Industria Petrolera.

www.iphglobal.com
(5411) 4469 8100

IPH
CABLES DE ACERO | ESLINGAS | ACCESORIOS

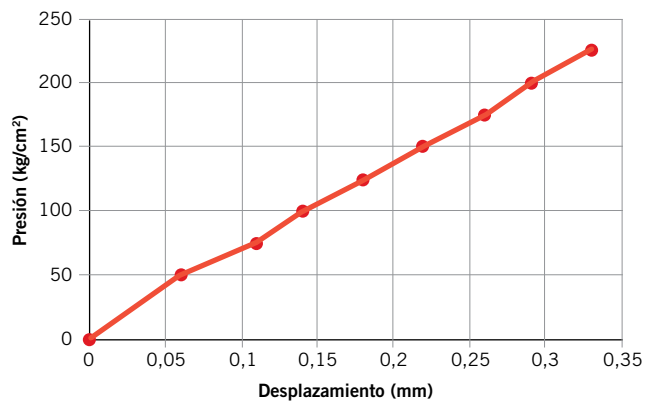
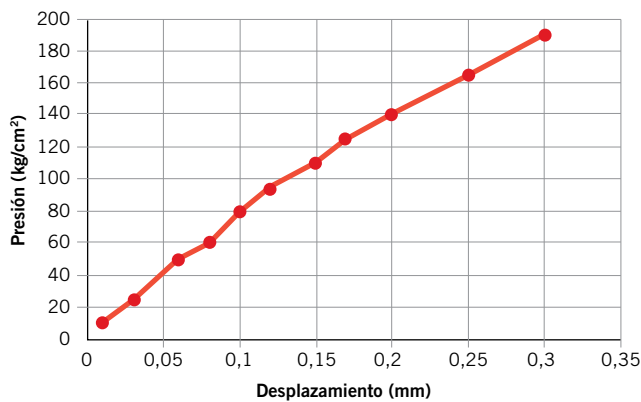


Figura 29. Registro de desplazamientos de los extremos durante los ensayos en las muestras 1 y 2. El desplazamiento muestra linealidad hasta la presión de fluencia.



Figura 30. Modelado desplazamiento debido a presión interna. [20 MPa y tensiones residuales de zunchado]. Desplazamiento relativo entre los puntos de medición de 0,18 mm.

El mandril utilizado para formar la campana está dimensionado de manera que el diámetro interno de campana será menor que el diámetro externo del extremo del tubo, esta interferencia genera una tensión radial de compresión en ambos tubos, de magnitud suficiente como para asegurar la unión por fricción.

La determinación de las tensiones residuales en la junta puede ponerse en evidencia midiendo las deformaciones que se producen al desarmar la unión. En este caso, se prefirió desarmar la unión mediante el corte del tubo interno y la eliminación de un sector en la posición de la instrumentación (Figura 31). El ensayo se realizó sobre la muestra 3.

El corte del tubo interno libera o elimina la tensión circunferencial del tubo externo. Asimismo, la eliminación del sector tubular en contacto con el *strain gauge* (SG) libera de posibles componentes de *bending* inducidas por el corte. Para la medición de las deformaciones, en el tubo externo se colocaron SG en dirección circunferencial. La medición se realizó en tiempo real durante el corte. Se realizaron determinaciones sobre dos sectores de la unión, uno correspondiente al extremo del tubo externo y otro en el plano medio de la unión (Figura 32).

Ambas determinaciones presentaron el mismo comportamiento, el registro de la figura 32 muestra los datos de ambas determinaciones, los tramos horizontales corresponden a interrupciones del proceso de corte para la medición de la profundidad de mecanizado. Luego de separado un sector del tubo interno y normalizadas las temperaturas, ambas mediciones se estabilizaron en -2100 me.



Figura 31. Junta embonada de 8". Instrumentación y corte de sector interno de sector. Virola del plano medio de la junta.

La congruencia de los resultados en ambas mediciones indica que las deformaciones no están acopladas a tensiones longitudinales a lo largo de la junta. La liberación de

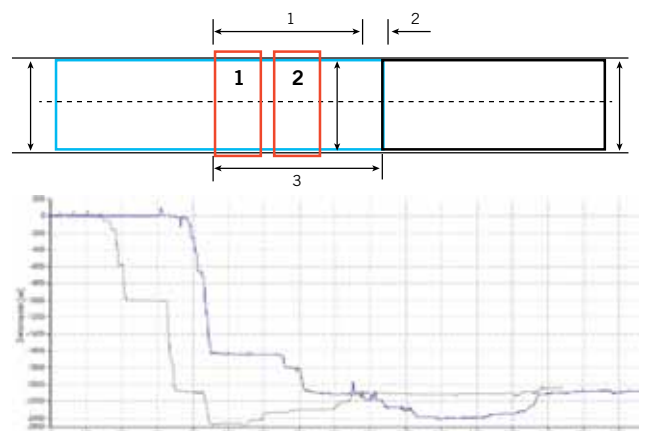


Figura 32. Registro en tiempo real de la deformación circunferencial, ensayos de alivio de tensiones residuales. Corte 1 y 2 realizados sobre la junta embonada.

las tensiones en el tubo interno produjo la inmediata separación de la superficie de contacto.

Dada la naturaleza fundamentalmente membranar de las tensiones residuales, la tensión medida es de 441 MPa (Tabla 7), lo que resulta del orden de la tensión de fluencia del material (461 MPa). Dada la deformación previa acumulada durante el procedimiento de formación de la campana, la tensión de fluencia real en esta zona resulta mayor a las del material base del tubo.

Deformación circunferencial residual		2100	me
Módulo de elasticidad	E	210000	MPa
Tensión circunferencial residual	ocr	441	MPa

Tabla 7. Tensiones residuales de zunchado en junta embonada de 8".

Cálculo de la solicitación axial de colapso de la junta

La capacidad de la junta frente a las solicitaciones axiales está dada por las tensiones de zunchado que, como se vio, resultan de 441 MPa y del coeficiente de fricción de los materiales y la longitud efectiva de la interferencia. Se ha demostrado que la longitud efectiva de la interferencia resulta ser la longitud de la unión menos 2", debido a los efectos de borde. La capacidad de carga axial se puede calcular como¹:

Donde:

$$T_{interference} = \frac{\sigma_{yield} t}{r_o} \mu_{friction} L \pi d_o$$

$T_{interference}$ is the axial capacity

$\mu_{friction}$ is the coefficient of friction

L is the insertion length

d_o is the outside diameter of the pin

De acuerdo con lo anterior y considerando un coeficiente de fricción de 0,37 (valor experimental de ensayos de Zap-Lok® Pipeline Systems, Inc.), la junta tiene la capacidad de resistir una carga axial de 105,632 kg. Este valor es el 81,3% de la máxima carga axial a la rotura del ducto (Tabla 8). La misma relación ha sido encontrada en estudios anteriores.² Es decir, la junta embonada romperá al llegar al 81,3% de lo que rompería por fluencia axial el ducto sin junta.

		Valor	Unidad
Long efectiva de la junta	L	200	Mm
Tensión circunferencial	ocr	423,8	Mpa
Tensión radial	or	22,66	Mpa
Coeficiente de fricción	μ	0,37	-
Diámetro interno	DI	208	Mm
Superficie de corte		130600	mm ²
Carga axial máxima de la junta, ref. Ec.1	T	1035896	N
Presión equivalente a carga axial máx.		30,5	Mpa
Carga axial máxima para producir fluencia σ_y	Cy	1274884	N
Carga axial máx. de la junta/ Carga axial máx. a fluencia	T/Cy	81,3	%

Tabla 8. Capacidad de carga axial teórica.

Conclusiones

- Se realizaron ensayos sobre tres muestras de juntas tipo embonadas pertenecientes a un ducto de 8" con 30 años de servicio, dos de las cuales fueron ensayadas a rotura mediante prueba hidráulica.
- El material de ducto satisface los requerimientos de API X60, la estructura es ferrítico perlítica de grano equiaxial en sección transversal y con bandeado de laminación en corte longitudinal. No se observaron estructuras degradadas en las secciones transversales de la junta.
- El modo de falla durante las pruebas fue desprendimiento expansivo de la junta en sentido axial (*pull out*), a presión superior a la que produce fluencia en el material del tubo. La falla se produjo cuando la deformación del ducto en la zona adyacente a la junta superó el diámetro de la campana.
- Esta deformación permite el percolado del fluido transportado dentro de la junta provocando simultáneamente dos efectos: el tubo exterior adopta la totalidad de la solicitación y el interior queda descargado. Lo anterior produce el aflojamiento de la presión de contacto permitiendo el desplazamiento axial entre las partes.
- La deformación plástica previa a la rotura provocó el delaminado del recubrimiento epoxi del ducto.
- Las mediciones de tensiones residuales en la junta indican que las tensiones circunferenciales en el ducto exterior son del orden de la tensión de fluencia del material. Las ecuaciones de equilibrio indican que las tensiones inducidas en el tubo interior son del mismo orden.
- Dichas tensiones residuales aseguran, mediante la fricción inducida por las mismas, una carga axial de separación de la junta del 80% de la carga axial que produce rotura del ducto por tracción axial (Tabla 8). Este resultado es congruente con los resultados encontrados en la literatura y es la base para la determinación de la máxima carga axial admisible.
- Las juntas no han perdido capacidad de carga debido al tiempo que llevan en servicio.

A partir los resultados de los ensayos realizados, del modo de falla de los niveles durante las pruebas hidrostáticas realizadas y los resultados de los ensayos mecánicos sobre los materiales, se identificaron todos los elementos relevantes para la integridad de la junta.

Debido a que la integridad de la junta está asegurada por las tensiones residuales generadas durante el armado de las mismas, la pérdida de material por procesos corrosivos o erosivos afecta a la capacidad de soportar presión interna y a la resistencia frente a solicitaciones axiales del ducto.

La pérdida de resistencia solo puede ser evaluada mediante el modelado numérico de cada situación en particular, aplicando criterios de pérdida efectiva de tensiones residuales por pérdida de material.

En función de los resultados obtenidos, se prevé que, a falta de restricciones axiales, la falla puede sobrevenir de manera catastrófica (*pull out*), con escaso indicio previo de desplazamiento relativo entre las partes.

Adicionalmente, se comprobó que la junta falla inmediatamente después de perder su estanquidad. Por lo tanto, no es esperable encontrar en servicio pequeñas pérdidas que alerten de forma temprana sobre la posibilidad de colapso de la junta.

La resistencia de la junta frente al *pull out* está asegurada si las tensiones longitudinales admisibles se calculan considerando un factor 0,8, es decir, los códigos ASME B31.3, B31.4, B31.8 pueden ser usados con la siguiente restricción:

$$SLT = 0,8 * SA$$

Donde SA es la tensión admisible establecida por el código que aplique y SLT es la tensión longitudinal calculada para tubo recto, debida a presión interna y cargas externas actuado en la dirección axial de todo origen (peso propio, sísmicas, térmicas o inducidas por interacción suelo - ducto), pero sin incluir componentes cargas debidas a flexión.⁴

De lo anterior surge que la determinación y los monitores de las cargas axiales son las herramientas más aptas para asegurar la integridad de este tipo de juntas. Si se desconoce el historial completo del ducto, la estimación de las tensiones longitudinales actuales resulta muy imprecisa. Por lo tanto, se recomienda la implementación de medición de deformaciones mediante la colocación WVSG con el siguiente plan de acción:

1. Aprovechar las oportunidades de reparaciones o cortes programados para efectuar mediciones de tensiones longitudinales. La técnica a utilizar es similar a la utilizada para la medición de tensiones residuales descrita en este informe. Antes del corte programado de la cañería, se deben colocar SG de resistencia variable. Las lecturas, antes y después del corte, permiten calcular con suma precisión las tensiones longitudinales en la progresiva.

A continuación, y luego de culminadas las reparaciones programadas, se sugiere instrumentar la sección del ducto mediante WVSG. Estos instrumentos permiten medir las deformaciones y calcular las tensiones. Al colocarse luego del corte y de la reparación, se elimina el historial previo de tensiones y se parte de un estado relajado de tensiones longitudinales. Con el monitoreo de estos instrumentos pueden prevenirse esfuerzos longitudinales excesivos que comprometan la integridad de las juntas. ■

Referencias

1. *Evaluating the performance of the zap-lok connection system* chris alexander stress engineering services, inc. Houston, Texas chris.alexander@stress.com david Roberts Zap-Lok Pipeline Systems, Inc. Houston, Texas droberts@zap-lok.com Robert Logan. *Zap-lok pipeline systems, inc.*
2. *Zap-lok ® Connection Testing And Axial Strength Design* Pedro Vargas Chevron, Energy Technology Company Houston, Tx, Usa Ben Crowder Chevron, Energy Technology Company Houston, Tx, Usa David Roberts Zap-Lok® Pipeline Systems, Inc. Cambridge, Ma, Usa.
3. G. Mecánica del medio continuo. E. Mase: Serie Schaum, McGraw-hill, 1977.
4. Asme b31.4-2012, *Pipeline Transportation Systems For Liquids And Slurries.*