

CFC₃D – CURVADO EN FRÍO DE CAÑOS EN 3 DIMENSIONES: ESTUDIO RESUMIDO SOBRE LA INNOVACIÓN, FLEXIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA CON APLICACIÓN EN PIPING PARA LA INDUSTRIA DE OIL&GAS

CBP₃D – COLD BENDING OF PIPES IN 3 DIMENSIONS: SUMMARY STUDY ON THE INNOVATION, FLEXIBILITY AND RELIABILITY OF TECHNOLOGY WITH APPLICATION IN PIPING FOR THE OIL&GAS INDUSTRY

Walter Ezequiel Rodriguez¹

wer.projects@gmail.com

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Juan XXIII y Ruta 4, 1832, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina.

Recibido 17/11/2024; Aceptado: 03/02/2025

Resumen: El piping existe para diversas aplicaciones en la industria, y las fábricas de cañerías encuentran seguridad en operar mediante la aplicación de las tecnologías y métodos disponibles y ampliamente probados, por lo tanto cuanto más antecedentes haya en los métodos aplicados mejor aceptados son. Entre las prácticas convencionales se encuentran las actividades que requieren soldadura para la fabricación de spools que serán destinados a distintos sistemas de piping destinados a diversas aplicaciones, y entre ellas, la industria del petróleo y el gas. Surge entonces, no solo la inquietud sobre la existencia de alguna tecnología confiable que optimice el proceso de fabricación del piping reduciendo la cantidad de soldadura por spool, sino la necesidad de evaluar si tal tecnología es capaz de brindar la confiabilidad que la industria del Oil&Gas requiere para garantizar la seguridad y calidad operativas. Este dilema es posible resolverlo si se logra responder a preguntas como: ¿pueden los curvados 3D en frío sustituir con éxito las uniones soldadas? ¿cuáles son los requisitos normativos que debe cumplir un caño curvado para garantizar la seguridad y la calidad operativas? ¿cuánta la industria del Oil&Gas con antecedentes de aplicación? ¿cuáles son los beneficios que ofrece esta tecnología? ¿es posible aplicar el curvado 3D en frío a una escala industrial de producción estandarizada? ¿cuál es su potencial en materia de costos? En este estudio, en búsqueda de resultados concluyentes acerca de este tema y con el objetivo de respaldar los atributos de innovación, flexibilidad y confiabilidad del CFC₃D, se da respuesta a estos y más interrogantes.

Palabras-clave: Innovación; Flexibilidad; Confiabilidad; Tecnología; Piping; Curvados 3D; Escalabilidad Económica; Industria; Metalmeccánica; CFC₃D.

Abstract: Piping exists for various applications in the industry, and pipe factories find security in operating by applying available and widely tested technologies and methods, therefore the more background there is in the applied methods, the better accepted they are. Conventional practices include activities that require welding for the manufacture of spools that will be destined for different piping systems for various applications, including the oil and gas industry. This raises not only the concern about the existence of a reliable technology that optimizes the piping manufacturing process by reducing the amount of welding per spool, but also the need to evaluate whether such technology is capable of providing the reliability that the Oil & Gas industry requires to guarantee operational safety and quality. This dilemma can be resolved if questions such as: can cold 3D bending successfully replace welded joints? What are the

regulatory requirements that a bent pipe must meet to guarantee operational safety and quality? Does the Oil & Gas industry have a history of application? What are the benefits of this technology? Is it possible to apply 3D cold bending on an industrial scale for standardized production? What is its cost potential? In this study, in search of conclusive results on this topic and with the objective of supporting the attributes of innovation, flexibility and reliability of the CFC₃D, answers are given to these and more questions.

Keywords: Innovation; Flexibility; Reliability; Technology; Piping; 3D Bending; Economic Scalability; Industry; Metalworking; CBP₃D.

1. Introducción

Mediante diversos estudios desarrollados desde el año 2014, se ha comprobado que hay una forma de fabricar piping optimizando el costo y el tiempo de fabricación. Pero estas son solo alguna de las ventajas que ofrece la tecnología de curvado en frío de caños en 3 dimensiones (CFC3D).

Mucho se ha cuestionado, en la historia, a cada propuesta en materia de innovación tecnológica, con sustento en las carencias en materia de aplicabilidad, flexibilidad y confiabilidad. El caso del CFC3D no es la excepción. Cada vez que se ha propuesto reemplazar el proceso de soldaduras de caños con codos por el curvado en frío, se han recibido cuestionamientos, los cuales son esperables, genuinos y necesarios, y sólo pueden ser resueltos con información, que en este caso surge de datos que tuvieron que ser obtenidos para ser luego procesados, pues no estaban disponibles en la industria.

Es cierto que el curvado de cañerías no es algo reciente. Sin ir más lejos, es una tecnología utilizada desde hace años en la Industria Naval (Galvo Amat, 1987). Muchas industrias aplican el curvado en frío de caños y perfiles, del mismo modo que se aplica la técnica del conformado por embutido o por plegado (Groover, 2010). En el caso del curvado de caños, y lo que motiva este artículo es que, la innovación no radica en la técnica aplicada sino en la información generada mediante el conjunto de variables analizadas y estudios realizados en el marco de normas internacionales como códigos de aplicación. Estos estudios, los cuales no solamente involucraron una serie de END, sino que llevaron al extremo los ED aplicables en el marco de la Norma Internacional ASME B31.3, proporcionan mediante resultados satisfactorios la garantía de seguridad y calidad operativas del piping fabricado mediante CFC3D para la industria del Oil&Gas, la cual habitualmente emplea el método de fabricación convencional (soldadura de caños con codos). Además del permanente ajuste del CFC3D a los códigos de aplicación es necesario garantizar la repetibilidad de los resultados, sobre todo, pensando en un proceso que se debe repetir en toda su extensión: tareas / actividades, know how, restricciones normativas, calidad y resultados obtenidos. En este marco, con el aporte del conocimiento desarrollado durante los últimos 10 años en la línea de investigación liderada por el autor de este artículo, en términos de confiabilidad en cuanto a su ejecución, es necesaria la aplicación de los procedimientos y controles estándar desarrollados para tal fin.

2. Desarrollo

Curvado en frío de caños en 3 dimensiones (CFC3D):

Como un anticipo de las conclusiones de este artículo, si fuera necesario resumir los 3 principales beneficios del CFC3D, el resultado sería el siguiente:

- Contribuye en la optimización del proceso de fabricación de spools, puesto que requiere menor calificación de la mano de obra, menor gestión de compras, menor gestión de actividades e implica menor riesgo en materia de suministros.
- Se emplearía una tecnología sustentable con proceso estándar normalizado, dado que, comparado con el proceso de soldadura, genera menos emisiones gaseosas al ambiente, menor cantidad de residuos sólidos y un menor consumo energético. Por otra parte, el riesgo del operador es menor, por cuanto se reduce la cantidad de soldadura a realizar. Adicionalmente, el proceso se ha estandarizado mediante procedimientos, controles y registros obligatorios, en base a los códigos internacionales de aplicación.

- Favorece significativamente la reducción de tiempos y costos, representando la misma un importante beneficio para quien lo emplee, amplificándose este efecto en caso de realizar una fabricación estándar a escala industrial.

Metodología:

El abordaje metodológico para realizar el análisis técnico que arriba a los resultados finales podría resumirse de la siguiente manera:

- Identificar el marco normativo correspondiente.
- Definir las dos concepciones del piping en materia de codos y curvas.
- Profundizar sobre el avance tecnológico sobre métodos y maquinarias de curvado.
- Delimitar el alcance del marco teórico investigando a nivel normativo las exigencias asociadas a procesos de soldadura y su aplicación al curvado de caños.
- Identificar los requisitos del código ASME B31.3 y B16.9.
- Seleccionar un proyecto de referencia sobre el cual diseñar un protocolo de validación.
- Diseñar el protocolo de homologación mediante:
 - Generación de probetas.
 - Ensayos no destructivos.
 - Mediciones.
 - Ensayos destructivos.
- Diseñar el Plan de Inspección y Ensayos (PIE) que gobierne al protocolo en su ejecución.
- Ejecutar el protocolo según el PIE.
- Releva mediciones y resultados.
- Compararlos con los esperados en el sistema constructivo convencional según el proyecto base elegido.
- Registrar conclusiones.

A los efectos de avanzar con las referencias más significativas de este estudio y con el fin de responder las preguntas de investigación citadas, solo se abordarán superficialmente en este documento las etapas más representativas.

Maquinaria utilizada

Las curvas fabricadas a los efectos de este estudio fueron realizadas mediante maquinarias con sistema hidráulico y CNC de funcionamiento en 3 dimensiones, sin aporte de calor, con uso de lubricantes, para los diámetros de 2 a 6” de diámetro.

Las máquinas utilizadas para realizar las probetas de curvado fueron:

- AMOB CH-170-CNC, con mandril (AMOB Group, 2024)
 - Curvadora Hidráulica (CH).
 - Diámetros de 2” Sch 40 hasta 6” Sch 80.
 - Doblado en 3 dimensiones.
 - Caños Long. 6 m máximo, customizable.
 - Radio mínimo de curvado (RC) = $1.5\varnothing$.
 - Sistema de control de movimiento electrónico, que proporciona información sobre el estado de la máquina, instrucciones y mensajes de advertencia.
- TRANSFLUID DB 40168 – 3A – CNC, con mandril (TRANSFLUID, 2024)
 - Curvadora Hidráulica (CH).
 - Diámetros de 2” Sch 40 hasta 6” Sch 80.
 - Doblado en 3 dimensiones.
 - Caños Long. 6 m máximo.
 - Radio mínimo de curvado (RC) = $2\varnothing$.

Reconocimiento del proceso de CFC3D por los códigos de construcción:

Si bien ya sea por falta de información, desconocimiento o por escasos de antecedentes, en la actualidad continúa predominando el proceso tradicional de construcción mediante soldadura, el CFC3D está totalmente reconocido por las normas internacionales más utilizadas en la industria del Oil&Gas, como los códigos aplicables a la construcción de cañerías correspondientes a la familia “B 31” de ASME.

ASME es una norma empleada para garantizar la seguridad operativa de las instalaciones que trabajan bajo presión. Para ello toma determinados márgenes de seguridad y define códigos como el B31.1, B31.3, B31.4 y B31.8 que tienen aplicación en el diseño y construcción de distintas plantas industriales para el mundo del Oil&Gas, e inclusive son de aplicación dentro de centrales termoeléctricas. Estas normas se conocen como códigos de construcción porque definen cómo hacer la ingeniería, cómo seleccionar los materiales, cómo construir y cómo controlar la cañería para que sea segura.

Dentro de los códigos antes mencionados se encuentran los capítulos de construcción, los cuales admiten el conformado y el plegado de distintas piezas. Un ejemplo de esto, en ASME B 31.3, es el punto 332 “Bending and Forming”, que precisa las condiciones necesarias para el curvado y conformado seguros. Siguiendo con este ejemplo, dentro del 332 se encuentra el punto 332.4.2 “Cold Bending and Forming” que refiere al conformado y al curvado en frío y abarca también al conformado de cañerías, lo cual demuestra que el CFC3D es un método totalmente reconocido por las normas internacionales, aunque su aplicación bajo protocolos homologados y estándares no es habitual en la industria de Oil&Gas, pues tampoco es común que los fabricantes realicen este tipo de estudio.

Es correcto afirmar que el curvado de cañerías no reemplaza al 100% de la soldadura de un spool, pues la adición de bridas y derivaciones no se resuelve con una curvadora, pero también es cierto que, a nivel económico, técnico, operativo, metalúrgico y de plazos, la mejor soldadura es la que no se hace – pues conserva el material base siendo este mucho menos afectado metalúrgicamente por el CFC3D que por el proceso de soldadura –, por lo que toma mayor fuerza la iniciativa del CFC3D como mejora tecnológica.

Ejemplo de trazado para análisis de deformaciones:

Como proceso estándar debe realizarse, para cada tipo de cañería a curvar en frío, una prueba prototipo sobre un caño trazado a los efectos de poder estudiar las deformaciones propias del conformado. La manera de realizar la grilla sobre el caño a curvar es trazarle líneas longitudinales en 8 generatrices en todo su diámetro y luego marcar cada 50 mm cada generatriz en toda su longitud, con la consideración de que todas las marcas deben estar alineadas transversalmente. De esta manera, al deformarse el caño, se podrán determinar las elongaciones y compararlas con lo que admite la norma ASME, lo que definirá necesidad o no de tratamiento térmico (TT), independientemente de la agresividad del fluido a circular.

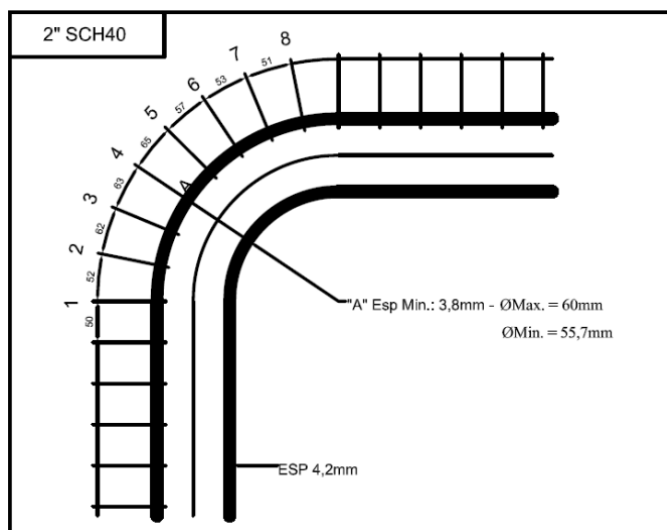


Figura 1 – Ejemplo de trazado de grilla para análisis de deformaciones en caño curvado de $\varnothing=2"$ (Fuente: elaboración propia).

Una vez curvada la cañería es posible medir la elongación de las fibras entre los distintos puntos y generatrices trazados. Cuando se curva el caño se deforma plásticamente y se generan tensiones en la zona más deformada. En función del porcentaje de deformación en la zona 1 – 8 de la figura, se definirá si la pieza requerirá tratamiento térmico de alivio de tensiones. Por esta razón, de la misma manera que se califica un procedimiento de soldadura, en el caso del CFC3D se debe validar cada proceso de conformado de cañería generando un prototipo para cada combinación de material, diámetro, espesor y radio de curvatura a emplear.

Soldadura vs CFC3D

Resulta necesario realizar la comparativa entre procesos, es decir comparar la soldadura de caños con codos con la propuesta de CFC3D, a fin de entender cómo se enmarcan normativamente los requisitos de cada proceso, lo cual va a determinar la conveniencia a nivel operativa, económica y temporal.

A modo de comparativa, y a los efectos de dar dimensión a los beneficios del CFC3D por sobre el proceso convencional de construcción se detalla la tabla de análisis de requisitos normativos para cada proceso:

Requisitos	Descripción
328.	Soldadura
328.2	Calificación de procedimiento de soldadura
328.2	Calificación de soldadores
328.3	Consumibles de soldadura
328.4	Preparación para soldar
328.5	Específicos para soldar
328.5	Reparaciones de soldadura
328.7	Soportes soldados
330.	Precalentamiento
331.	Tratamiento térmico
344.	Tipos de ensayos
344.2	Inspección visual
344.3	Partículas magnéticas
344.4	Líquidos penetrantes
344.5	Radiografía
344.6	Ultrasonido

Figura 2 – Requisitos del Código ASME B31.3 para soldaduras (Daniel H. Bravo, 2024).

Requisitos	Descripción
332.	Curvado y conformado
332.2	Control de ovalización
332.4.2	Tratamiento térmico
344.	Tipos de ensayos
344.2	Inspección visual

Figura 3 – Requisitos del Código ASME B31.3 para curvado en frío (Daniel H. Bravo, 2024).

Los requisitos del código para realizar una soldadura son los listados en la tabla arriba, debiendo contar con procedimientos y soldadores calificados, los consumibles identificados y acordes a la soldadura – con su costo y plazo asociados –, preparar los biselos para soldar y limpiar la zona de soldadura – requisitos específicos –, precalentamientos controlados para garantizar la integridad de la unión soldada, tratamiento térmico post soldadura para alivio de tensiones (PWHT). Luego de realizada la soldadura, se deben realizar los controles y ensayos requeridos por norma que incluyen la inspección visual y la combinación requerida de métodos de ensayo superficiales como partículas magnéticas y líquidos penetrantes (LP), y volumétricos como la radiografía (gammagrafía) y ultrasonido (que incluye la técnica de phased array).

En el caso del CFC3D, el código solicita hacer un control visual del caño curvado – para asegurar que no haya pliegues, arrugas, aplastamiento (Tronvoll, Ma y Welo, 2022) o fisuras visibles –, un control de ovalización – por cuestiones de la mecánica del fluido a circular –, tratamiento térmico en caso de que aplique, por lo cual será necesario medir las elongaciones para definir si el TT es requerido. Este proceso, que explicado de esta forma parece simple, viene precedido de un estudio complejo que lo respalda y permite simplificarlo siempre en condiciones controladas de manera estándar.

Tal como puede esperarse, la diferencia de complejidad de ambos procesos se traduce en una diferencia significativa de costo y plazo, resultando el CFC3D conveniente.

Consideraciones en cuanto al requerimiento de tratamiento térmico:

El TT de alivio de tensiones es un proceso normal y habitual en el proceso de fabricación de piping. Ya sea por soldadura o por deformación plástica suele ser necesario realizar alivio de tensiones para favorecer la integridad y, a consecuencia, la seguridad operativa de la instalación.

Al momento de evaluar el requerimiento de TT, es necesario entender cuál será el fluido que circulará por la instalación. No es lo mismo que el fluido se aire, vapor de agua o agua, que un hidrocarburo. Si el producto que circula en la cañería es tendiente a liberar hidrógeno atómico, ese hidrógeno tenderá a penetrar intermolecularmente entre los átomos de hierro con predisposición a migrar a las zonas más duras y frágiles. Esto sumado a las tensiones residuales de soldadura o de curvado y a las estructuras metalúrgicas duras, puede ser nocivo al material llevándolo a la fisuración inducida por hidrógeno (FIH).

En otras palabras, la concentración de tensiones en zonas frágiles más la acción del hidrógeno es garantía de fisuración en servicio, siendo cuestión de tiempo el momento en el que ocurra (Fontana, 1986).

En estos casos, por más que por espesor la norma ASME B31.3 (para soldadura) no pida TT será necesario hacerlo dado el fluido circulante. Esto se extrapola al curvado: cuando el fluido circulante puede generar corrosión bajo tensión o FIH, hay que hacer TT de alivio de tensiones.

ASME B31.3 indica el TT como mandatorio, aunque establece las posibles excepciones, es decir que cuando, por ejemplo, los aceros al carbono pueden estar exceptuados, pero existe otro apartado que indica que hay productos nocivos (sulfídrico, aminos/soda cáustica, fluorídrico), para los cuales se requiere el TT. En estos casos como no debe haber concentración de tensiones porque éstas fomentan los procesos corrosivos, independientemente de lo que dice en general el código, debe realizarse el TT.

Por otro lado, en el caso del curvado propiamente dicho, para los fluidos circulantes que requieren que la soldadura si o si lleve TT, hay que hacerlo independientemente del porcentaje de elongación de la fibra. En estas mismas condiciones, para la soldadura no se deben exceptuar los TT y en todos los espesores soldados las soldaduras deben ser aliviadas térmicamente.

El fluido circulante debe estar indicado en el piping class que rija al diseño, en el cual también suele estar asociada la norma NACE (National Association for Corrosion Engineers) MR 103 (Downstream) y 175 (Upstream).

Evaluación técnico-normativa:

Derivado de un protocolo de homologación realizado con el fin de evaluar la aplicabilidad del CFC3D, se realizaron los controles y ensayos enmarcados en el código ASME B 31.3 los cuales se detallan a continuación:

- Controles dimensionales antes del doblado.
- Toma de muestra testigo de material virgen.
- Grilla de 8 generatrices y trazados cada 50mm, para analizar la deformación plástica.
- Fabricación de probetas de muestreo.
- Muestreo de probetas en zona más deformada para ensayos físicos. Al estar deformadas las probetas el incremento de dureza por fenómeno de acritud hace que las tensiones de rotura (tracción) sean mayores que en un material virgen (sin deformar).
- Controles dimensionales sobre probetas:
 - Control Ovalización post doblado $\leq 8\%$, requerido por ASME B31.3 punto 332.2.1.
 - Control elongación fibra, según la configuración de la curva, es un factor que define la necesidad de TT de alivio de tensiones. Si la elongación supera el 50% de lo admitido por ASME B31.3 punto 332.4.2 y ASME II Parte A Tabla 4.2, se requerirá TT.
 - Control espesores en zona curvada, para determinar disminuciones mediante técnica de ultrasonido. El menor espesor aceptable es el mínimo establecido en el diseño.

- Prueba de ruptura conocida como Bursting Test, según ASME B16.9. Consiste en inyectar agua (prueba hidráulica) a alta presión (600 bar) hasta la ruptura del caño a fin de evaluar:
 - La presión de ruptura
 - La ubicación de la ruptura en la probeta
 - Zona curva
 - Zona recta
 - Con base en costura de casquete de prueba
- Ensayos de tipo según las distintas combinaciones de: material, diámetro, schedule y RC.

Resultados generales:

Luego de distintos ejercicios de curvado en ángulos de 90 grados, combinando diferentes materiales (SA-312 y SA-106), diámetros (entre 2 y 6”), schedules (40 y 80), y radios de curvatura (entre 2Ø y 4Ø), los resultados fueron:

- Elongación máxima entre 30-32% (requiere TT, para los materiales de acero al carbono). Satisfactorio.
- Ovalización máxima entre 2.1-3.5% (requerido: ovalización $\leq 8\%$). Satisfactorio.
- Reducción espesores en la fibra externa mayores que el mínimo aceptado por diseño ($< 12\%$ del espesor de diseño de piping). Satisfactorio.
- Ensayos de presión hasta rotura de probetas curvadas cerradas con caps en sus extremos. Los valores de ruptura obtenidos fueron en promedio 472 bar, mayor al mínimo requerido. Es importante considerar que el piping class que regía en ese tipo de piping requería una presión de operación de 51 bar (máximo), es decir que superó en casi 10 veces lo requerido. Satisfactorio.
- También se realizó ensayo de tracción en probetas obteniéndose valores de resistencia máxima a la tracción entre 602-633 Mpa, confirmándose que el material experimento un aumento de la resistencia a la tracción por el proceso de deformación en frío “Acritud” del orden del 29%. Satisfactorio.



Figura 4 – Imágenes de ejemplares curvados en distintas combinaciones de materiales, diámetros, schedule y radios de curvatura (Fuente: AESA).

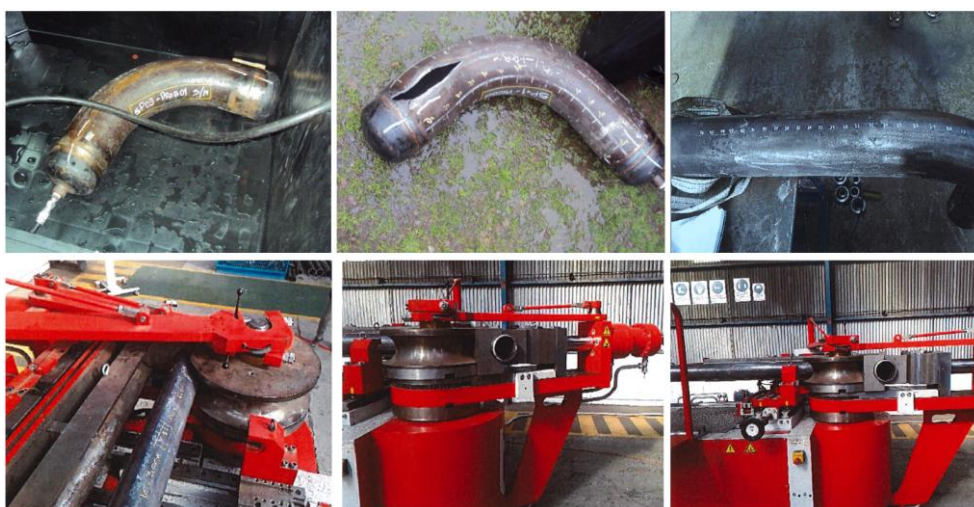


Figura 5 – Imágenes de ejemplares de bursting test y caños en proceso de curvado (Fuente: AESA).

Es importante considerar que el tipo de ruptura obtenido fue el conocido como “ruptura de labio fino” y ocurrió en la zona recta, alejado de la zona de curvado, originándose el mecanismo de rotura en la zona afectada por el calor, donde se soldó el casquete para PH. Esto demuestra que la zona de la soldadura tiende a ser aquella en la que se origina este tipo de fallas, por lo que eliminarlas añade una ventaja más: reducir el riesgo de ruptura por presión en operación ante cualquier variación imprevista en los parámetros de funcionamiento de la planta.

Procedimientos y controles estandarizados:

A los efectos de garantizar la seguridad y calidad operativas fue necesario desarrollar una serie de documentos que rijan con la mayor precisión y ajuste normativo posible al proceso de CFC3D.

Los documentos creados para tal fin fueron los siguientes:

- Protocolo de homologación de CFC3D: establece los requisitos normativos, los ensayos mandatorios y los criterios de aceptación.
- Procedimiento de CFC3D: establece la técnica de CFC3D en base a lo establecido en el protocolo de homologación.
- Plan de Inspección y Ensayos (PIE) para el CFC3D: lista los ensayos a realizar junto con las normas y procedimientos de aplicación, para cada etapa del proceso, desde la inspección del material hasta el curvado con su aprobación o rechazo.
- Registro dimensional para proceso de CFC3D: respalda a modo de documento los resultados analizados para determinar la aprobación o rechazo del PIE.

CONTROL DE CALIDAD						
PASO	TIPO DE VERIFICACIÓN	DOCUMENTACIÓN APLICABLE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN	RESULTADO CANTIDAD APROBADA	FIRMA Y FECHA FÁBRICA	FIRMA Y FECHA CLIENTE
VERIFICACIÓN SUPERFICIAL						
1.	Verificación de identificación	Plano e Isométrico	--			
2.	Inspección Visual	Norma B 31.1 Punto 3.2.6.1	Ausencia de ondulaciones, grietas, entallas, fisuras, muescas u otro daño mecánico			
3.	Revestimiento	Norma B 31.1 Punto 3.2.6.1	No se admiten fallas			
4.	Marcado de los puntos de mediciones		Al menos 3 puntos (inicio, centro y final de curva)			
VERIFICACIÓN DIMENSIONAL						
5.	Longitud Total	Plano e Isométrico	--			
6.	Grados	Plano e Isométrico	--			
7.	% de Deformación (EXTRADÓS)	Norma B 31.1 Punto 332.4.2 (a)	Si excede el 50% de elongación del material deben ser tratadas térmicamente			
8.	Ovalización	Norma B 31.1 Punto 332.2.1	≤ 8% del diámetro externo para presión interna y 3% para presión externa			
9.	Control de espesores (EXTRADÓS)	Norma B 31.1	≥ del espesor de diseño (aquí se debe indicar cuál es el espesor de diseño)			
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS						
10.	Verificación de espesores por Ultrasonidos	Norma B 31.1	Ídem paso 9 de este Check list			
11.	Líquidos penetrantes o partículas magnéticas (en casos de dudas al realizar el control del Paso 2)	Norma B 31.1 Punto 3.2.6.1	Ausencia de ondulaciones, grietas, entallas, fisuras, muescas u otro daño mecánico			
TRATAMIENTO TÉRMICO						
12.	Control de Ciclo	Norma B 31.1 Punto 332.4.2 (a)	Tabla 331.1.1			
13.	Control de dureza	Norma B 31.1 Punto 3.2.6.4	Según definición de ingeniería con acuerdo del cliente			
LIBERACIÓN FINAL						
14.	Verificación de completitud de controles realizados y cierre de posibles No Conformidades	N/A	N/A			

Figura 6 – Plan de Inspección y Ensayos tipo (Fuente: AESA).

Dimensión económica de la propuesta:

En el artículo “ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE LA ESCALABILIDAD INDUSTRIAL DEL PREFABRICADO DE PIPING MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE MODELADO 3D EN FRÍO. ESTUDIO COMPARATIVO” publicado en julio de 2024 se indica que, para un modelo productivo a escala industrial, el ahorro con foco en el reemplazo de codos soldados por curvados podría superar el 60% (Rodríguez, 2024).

En un ejercicio reciente sobre el caso real de un proyecto de una planta compresora y una unidad de separación primaria, el ahorro calculado en base a pulgadas factorizadas, costo hora hombre base por pulgada, costo de codos, horas de operador de curvadora, END y tratamiento térmico (PWHT o PBHT), ascendió al 45%, con potencial optimizable en un contexto de escalabilidad industrial.

Tecnología, innovación y confiabilidad:

Como es habitual, todo cambio conlleva una propuesta disruptiva y una respuesta basada en cuestionamientos. Estos cuestionamientos no solamente son válidos, sino que son necesarios para poderlos resolver, y qué mejor manera de hacerlo que compartiendo la solución con la comunidad científica e industrial.

Es necesario entender que, a pesar de estar contemplado por ASME el curvado de cañerías desde hace décadas, también es cierto que alrededor de la industria de la soldadura existe y está desarrollado un tejido comercial e industrial que pueden verse amenazados por la tecnología del CFC3D. Sucedió con la válvula y el transistor, con los rollos fotográficos y las cámaras digitales, con el alquiler de películas y las plataformas digitales, y también sucede con el curvado y la soldadura. En el caso de esta última están en juego los negocios de: consumibles, calificaciones de soldadores (WPQR) y de procedimientos de soldadura (WPS/PQR), servicios de ensayos, máquinas para soldar, repuestos, mantenimiento, sindicatos, etc.

Lo importante aquí es destacar, que el curvado no reemplaza completamente a la soldadura, sino que permite una más rápida y menos costosa solución a los fabricantes, aprovechando los recursos soldadores donde agregan el verdadero valor: en aquellas soluciones en las que la soldadura y todo el sistema industrial que la escolta son imprescindibles.

Tal como se indicó más arriba, la innovación de este estudio no radica en la técnica del curvado. Tampoco se basa en la maquinaria empleada ni en la aplicación de un conjunto de normas.

La innovación en este trabajo tiene sus fundamentos en:

- El conocimiento desarrollado sobre el comportamiento del material durante y después del proceso de curvado en frío.
- La generación de antecedentes inéditos (bases de datos en base a miles de mediciones y resultados) enmarcados en normas internacionales, lo cual fortalece la confianza en el sistema constructivo como intrínsecamente seguro (base ASME).
- La verificación mediante ensayos de que lo establecido por ASME se puede cumplir superando los beneficios ofrecidos por la práctica tradicional de la soldadura, no solamente en los resultados propios del proceso de CFC3D sino también por la seguridad que brinda a la instalación y al personal que la opere, el hecho de minimizar las intervenciones metalúrgicas que son habituales mediante soldadura.
- La demostración de que, más allá que el piping probado hidráulicamente hasta la rotura haya colapsado a casi 10 veces la máxima presión de diseño para esa clase o serie de cañería, la rotura tuvo lugar en todos los casos en la zona recta del piping, alejada de la zona del curvado (lo cual demuestra la seguridad del método) y con origen en la soldadura del casquete de prueba (lo que demuestra la propensión de la soldadura a concentrar las tensiones que dan lugar a la falla, aun habiendo realizado tratamiento térmico localizado).

Adicionalmente a la funcionalidad del proceso de curvado, la cual no está en discusión, los ensayos (no destructivos y destructivos), la verificación del cumplimiento del marco normativo, la vinculación de los resultados con diversos papers sobre análisis directa e indirectamente relacionados al objeto de estudio y las pruebas piloto ulteriores realizadas sobre proyectos reales de la industria del Oil&Gas – entre otras –, aportan la confiabilidad necesaria para que la industria del petróleo y el gas acepte esta tecnología dentro de los procesos de fabricación admisibles según especificaciones de diseño particulares, cumpliendo a su vez con el concepto de innovación de Schumpeter quien la definió como la introducción de nuevos productos al mercado, nuevos métodos de producción, nuevas fuentes de suministro, exploración de nuevos mercados y/o nuevas formas de organizar a la empresa (Jordán, 2011).

3. Conclusiones:

Los resultados de los diferentes ejercicios, ensayos y análisis realizados indican que el CFC3D como propuesta tecnológica ofrece las siguientes ventajas:

- A partir del estudio realizado, el CFC3D se trata de una tecnología estudiada, normalizada, homologada, estandarizada y probada.
 - Estudiada, por cuanto fue – y continúa siendo – puesta a prueba.
 - Normalizada, por cuanto se han establecido las normas a aplicar.
 - Homologada, puesto que las condiciones de ensayo se ajustan a lo requerido por los códigos de aplicación.
 - Estandarizada, dado que se han creado los documentos estándar regulatorios para garantizar aplicación de las exigencias normativas y, a consecuencia, la seguridad y calidad operativas.
 - Probado, por cuanto fue aplicada a diferentes muestras y pilotos.
- Se desarrolla un proceso de fabricación estandarizado
 - Procedimiento de trabajo.
 - PIE estándar.
 - Protocolo de inspección.

Adicionalmente el CFC3D:

- Reduce el costo económico, por cuanto
 - reduce el consumo de materiales,
 - minimiza la MOI (menos carga de trabajo en gestión de compras, fabricación, proyectos, calidad) y

- no requiere ensayos gammagráficos, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ni ultrasonido, sino que, una vez homologado el proceso de curvado para la producción normal de una dada combinación de material, diámetro, schedule y radio de curvatura, se requiere únicamente inspección visual, control dimensional de ovalización y elongación, por muestreo, para garantizar la seguridad y calidad operativas.
- Reduce el costo financiero, por cuanto ya no es necesario financiar
 - la compra de codos estándar,
 - la MOD asociada a la fabricación con codos y
 - la MOI asociada a la gestión de compras, fabricación, proyectos, calidad).
- Reduce el plazo de fabricación, por cuanto reduce el tiempo de
 - preparación al no requerir corte, biselado y precalentamiento de los caños a curvar, y
 - fabricación mediante curvadora CNC.
- Reduce costos y plazos en calificación de mano de obra, por cuanto no se requiere calificación del operador
- Reduce los plazos del control de calidad, por cuanto reduce la cantidad de END al reemplazar soldaduras por codos.
- Ofrece mayor seguridad operativa
 - en cuanto al proceso de fabricación, pues eliminar cantidad de soldaduras reduce la probabilidad de accidentes y enfermedades profesionales asociadas a dicha tarea, y
 - en cuanto al funcionamiento de la planta en la cual va a ser montado el piping, por cuanto el proceso se homologa en el marco de normas internacionales intrínsecamente seguras como lo es ASME.
- Menor impacto ambiental, dado que el reemplazo de soldaduras por codos reduce las emisiones gaseosas de soldaduras, los residuos sólidos asociados a los consumibles de soldadura y la carga térmica que genera el proceso de soldadura.
- Mayor flexibilidad en el diseño (no limitado a 45, 90 y 180°).
 - El CFC3D permite cualquier combinación de ángulos, mientras la ingeniería de procesos lo permita, sin necesidad de limitarse a los ángulos estándar que ofrece el mercado.
 - Promueve el mejor aprovechamiento del espacio en volúmenes reducidos, principalmente en instalaciones que deben ser diseñadas y fabricadas con ciertas condiciones de transportabilidad.

- Apta escalabilidad industrial, por cuanto los ahorros que ofrece la tecnología de CFC3D puede ser optimizada, principalmente en virtud de la escala de producción que demanda la fabricación estándar de módulos, piping paquetizado e internos de intercambiadores de calor, entre otros.

Adicionalmente a los ejes temáticos abordados, se encuentran bajo análisis diferentes sub líneas de investigación asociadas a la propuesta de este artículo, cuyos resultados se espera que contribuyan con nueva información de valor acerca de la temática en cuestión. En este sentido, a modo de conclusión final, se puede afirmar que el CFC3D, en marco de las ventajas y evidencias enumeradas, se presenta como una tecnología innovadora, flexible y confiable con aplicación directa en la industria de Oil&Gas.

4. Glosario

A

ASME

American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

B

Bursting Test

Terminología proveniente del inglés utilizada por ASME para referirse a la prueba de rotura.

C

Cap/Casquete

elemento con forma semiesférica, elíptica o semielíptica que puede soldarse a para conformar el cuerpo de un equipo como para cerrar el extremo de un spool.

CFC3D

Curvado en Frío de Caños en 3 Dimensiones.

CNC

Computer Numerical Control (Control Numérico Computarizado).

Codo

accesorio de tubería que conecta dos tramos rectos de caño. La función principal es cambiar la dirección del flujo transportado. Los codos de acero suelen venir 45 grados, 90 grados y 180 grados.

Conformado

proceso que implica alterar la forma de los metales (su geometría, su tamaño, sus propiedades) para crear productos o componentes específicos.

Curvado 3D

conformado de caños en tres direcciones (X, Y, Z).

Curvado

como primera acepción, corresponde al proceso de conformado de un caño o perfil. Como segunda acepción, corresponde a la pieza conformada. Sinónimo de doblado.

Curvadora

termino comunmente empleado en la indistria para referirse a una máquina utilizada para curvar caños o perfiles.

Curvar

conformar un caño mediante alguno de los métodos y tecnologías disponibles.

D

Downstream

terminología proveniente del inglés utilizada para referirse a las actividades que se realizan después de la extracción del petróleo, como la refinación, comercialización y distribución de los productos derivados del petróleo.

Ch

CH

Curvadoras Hidráulicas.

E

ED

Ensayos Destructivos.

Elongación

alargamiento.

END

Ensayos No Destructivos

Extradós

parte exterior de la superficie de un arco.

F

Frío

temperatura ambiente.

G

Gammagrafia

técnica de ensayo no destructivo que utiliza radiación gamma para inspeccionar la integridad de materiales y soldaduras en estructuras metálicas.

Generatriz

línea exterior de una superficie que al girar alrededor de un eje da lugar a un cuerpo de revolución.

H

Homologación

acción y efecto de homologar.

Homologar

contrastar el cumplimiento de determinadas especificaciones o características de un objeto o de una acción.

I

Isometrías / Isométricos
conjunto de planos dimensionales utilizados para diseñar el sistema de tuberías de una planta industrial.

L

Líquidos Penetrantes (LP)
técnica de ensayo no destructivo utilizada para detectar defectos superficiales, como grietas o porosidades, en materiales no porosos.

M

Mandril
elemento de una máquina curvadora que se introduce en el caño durante el proceso de doblado.

Metalmecánica
rama de la ingeniería que abarca los procesos de diseño, fabricación, transformación y ensamblaje de piezas y estructuras metálicas. Involucra diversas técnicas como corte, soldadura, doblado, mecanizado y fundición, entre otras.

Modularizado
disciplina que consiste en lograr que una instalación, o parte de ella se presente en la condición de un módulo listo para montar.

Módulo
equipo, instalación, o parte de una instalación presentada sobre una estructura, lista para posicionarse y conectarse en una planta industrial.

N

NACE
National Association of Corrosion Engineers
(Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión).

O

Oil&Gas
rama de la industria dedicada a la exploración, explotación, producción y comercialización del petróleo, el gas, y/o sus derivados.

Ovalización
fenómeno que se manifiesta en la pérdida de la forma circular de la sección de un caño pasando a tener dos diámetros predominantes, tal como ocurre en el caso de una elipse.

P

Paquetizado
terminología equivalente a modularizado.

PBHT

Post Bend Heat Treatment, que traducido al español es Tratamiento Térmico Post Curvado.

PIE

Plan de Inspección y Ensayos.

Piping

terminología proveniente del idioma inglés que refiere a los sistemas de tuberías y conductos que se utilizan para transportar fluidos.

Piping Class

terminología proveniente del idioma inglés que refiere al documento que define un conjunto de tuberías y sus componentes para ser utilizados en condiciones específicas de presión o temperatura para diferentes servicios

Protocolo

documento que recopila, ordena y reglamenta normativamente los requisitos y ensayos no destructivos y destructivos necesarios para validar el cumplimiento de los criterios de aceptación de un sistema constructivo.

Prueba Hidráulica (PH)

prueba que consiste en llenar la tubería con agua y aumentar la presión interna por encima de su presión de funcionamiento normal. Luego, se mantiene esa presión durante un período de tiempo para detectar posibles fugas o deformaciones en la tubería.

PQR

Procedure Qualification Record, que traducido al español es Registro de Calificación del Procedimiento.

PWHT

Post Weld Heat Treatment, que traducido al español es Tratamiento Térmico Post Soldadura.

R

RC

Radio de Curvatura.

S

Schedule (Sch)

valor adimensional directamente relacionado al espesor de la pared.

Skid

terminología equivalente a módulo

Spool

proveniente del inglés, refiere a un tramo de cañería compuesta por caño, bridas, accesorios y válvulas para su montaje en un sistema de piping.

T

Tratamiento Térmico (TT)

conjunto de procesos que consisten en modificar las propiedades físicas, mecánicas y/o químicas de los materiales, principalmente aceros y aleaciones metálicas mediante el sometimiento de los mismos a determinadas temperaturas, con curvas de calentamiento/enfriamiento especificadas.

U

Ultrasonido

método de ensayo no destructivo que utiliza ondas de sonido de alta frecuencia para inspeccionar la integridad de materiales y soldaduras.

Upstream

terminología proveniente del inglés utilizada para referirse a la primera etapa de la cadena de suministro del petróleo, que incluye la exploración y producción de crudo y gas natural.

W

WPQR

Welder Performance Qualification Record, que traducido al español es Registro de Calificación del Rendimiento del Soldador.

WPS

Welding Procedure Specification, que traducido al español es Especificación de Procedimiento de Soldadura.

5. Referencias bibliográficas.

- [1] AMOB Group, <https://amobgroup.com/products/hydraulic-tube-bending-machines-ch-series>.
- [2] Fontana, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1986.
- [3] GALVO AMAT, Juan Ramón. Contribución a las Nuevas Tendencias en el Diseño de Tuberías en Construcción Naval. Sevilla, 1987.
- [4] GROOVER, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes, and Systems. United States of America, 2010
- [5] TRANSFLUID, https://www.transfluid.net/fileadmin/Catalogs/TRA_pbr_Katalog_2022_NA.pdf.
- [6] JORDÁN, Juan Carlos. La innovación: una revisión teórica desde la perspectiva de marketing. Bolivia. 2011.
- [7] RODRIGUEZ, Walter. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE LA ESCALABILIDAD INDUSTRIAL DEL PREFABRICADO DE PIPING MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE MODELADO 3D EN FRÍO. ESTUDIO COMPARATIVO. Buenos Aires, 2024. <http://revistas.unlz.edu.ar/ojs/index.php/riiym/article/view/96/112>
- [8] The American Society of Mechanical Engineers, ASME B16.9, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2018.
- [9] The American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.3, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2022.
- [10] Tronvoll, «Deformation behavior in tube bending: a comparative study» The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.