

Ubicación Óptima de la Soldadura para Mayor Integridad en la Fabricación de Tubos Perfilados

Optimal Weld Seam Placement for Enhanced Integrity in Profiled Tubes Manufacturing

Posicionamento ideal da costura de solda para maior integridade na fabricação de tubos perfilados.

Sergey V. Parshin ¹ (*), Anastasiya A. Parshina ²

Recibido: 11/09/2025

Aceptado: 24/11/2025

Resumen. - La producción de tubos de gran diámetro con perfiles complejos, como estrellas de múltiples puntas, a menudo depende de tubos soldados debido a la escasez y alto costo de tubos sin costura. Sin embargo, la soldadura presenta una ductilidad entre un 5-10% menor que el metal base, aumentando el riesgo de falla durante la conformación plástica del perfil. Este estudio emplea modelado por elementos finitos (MEF) para simular el proceso de perfilado de un tubo con forma de estrella de seis puntas, con el objetivo de identificar la ubicación óptima de la soldadura que minimice la intensidad de deformación y maximice la integridad estructural. Los resultados identificaron zonas de deformación mínima en los puntos de inflexión de la curvatura del perfil, permitiendo una estrategia práctica de rotación del tubo antes del conformado para posicionar la costura en estas áreas. El estudio concluye que esta metodología ofrece una solución efectiva y potencialmente costo-eficiente para la fabricación industrial de tubos perfilados soldados, mitigando el riesgo de falla.

Palabras clave: ubicación de soldadura; tubos perfilados; modelado por elementos finitos; intensidad de deformación; integridad estructural

¹ Doctor en Ciencias Técnicas (Ingeniería), Profesor. Universidad Federal de los Urales, Facultad de Nuevos Materiales y Tecnologías, svparshin@urfu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7814-1247>

² Candidato en Ciencias Técnicas (Ingeniería), Profesor Asociado. Universidad Federal de los Urales, Facultad de Nuevos Materiales y Tecnologías, a.a.parshina@urfu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8633-4690>

Summary. - The production of large-diameter profiled pipes, such as multi-ray stars, often relies on welded blanks due to the scarcity and high cost of seamless alternatives. However, the weld seam has 5-10% lower ductility than the base metal, increasing the risk of failure during profiling. This study uses finite element modeling (FEM) to simulate the profiling process of a six-ray star-shaped pipe, aiming to identify the optimal weld seam placement that minimizes deformation intensity and maximizes structural integrity. Results identified zones of minimal deformation at the inflection points of the profile's curvature, enabling a practical strategy of pipe rotation before forming to position the seam in these areas. The study concludes that this methodology offers an effective and potentially cost-efficient solution for the industrial manufacturing of welded profiled pipes, mitigating the risk of failure.

Palabras clave: weld seam placement; profiled pipes; finite element modeling; deformation intensity; structural integrity.

Resumo. - A produção de tubos perfilados de grande diâmetro, como os em formato de estrela de múltiplos raios, frequentemente depende de blanks soldados devido à escassez e ao alto custo de alternativas sem costura. No entanto, a junta de solda apresenta ductilidade 5-10% menor que a do metal base, aumentando o risco de falha durante a perfilação. Este estudo utiliza modelagem por elementos finitos (MEF) para simular o processo de perfilação de um tubo em formato de estrela de seis raios, com o objetivo de identificar o posicionamento ideal da junta de solda que minimize a intensidade da deformação e maximize a integridade estrutural. Os resultados identificaram zonas de mínima deformação nos pontos de inflexão da curvatura do perfil, possibilitando uma estratégia prática de rotação do tubo antes da conformação para posicionar a junta nessas áreas. O estudo conclui que essa metodologia oferece uma solução eficaz e potencialmente economicamente eficiente para a fabricação industrial de tubos perfilados soldados, mitigando o risco de falha.

Palavras-chave: posicionamento da junta de solda; tubos perfilados; modelagem por elementos finitos; intensidade da deformação; integridade estrutural.

1. Introducción. - La producción de tubos perfilados de gran diámetro, como las configuraciones multi-punta, enfrenta desafíos debido a la disponibilidad limitada y el alto costo de los blanks de tubos sin costura [1]. Los tubos soldados son una alternativa viable, pero sus costuras de soldadura, con una ductilidad entre un 5% y 10% menor que el metal base, son propensas a fallar bajo deformación plástica significativa durante el perfilado [2]–[4] o en operaciones posteriores como la expansión. Estudios previos destacan el impacto de las imperfecciones de la soldadura y los esfuerzos residuales en el riesgo de falla [3], [4], sin embargo, las estrategias para optimizar la ubicación de la costura de soldadura permanecen poco exploradas. El hidroconformado de tubos (THF) y el conformado por rodillos son métodos comunes de perfilado, pero ambos enfrentan desafíos relacionados con la deformación de la costura de soldadura [5], [6]. En el THF, la ductilidad reducida de la soldadura aumenta el riesgo de fractura por tracción en zonas de alta curvatura [6]. El modelado por elementos finitos (MEF) se ha utilizado para predecir distribuciones de tensión y deformación en perfiles complejos [7], [8], lo que ofrece información valiosa sobre el comportamiento de la costura. Por ejemplo, estudios sobre esfuerzos residuales en uniones soldadas [9] y sobre hidroconformado de tubos soldados a medida [10] enfatizan la importancia de la optimización de la ubicación de la soldadura. Este estudio tiene como objetivo identificar ubicaciones óptimas para la costura de soldadura utilizando MEF para minimizar el daño inducido por la deformación y mejorar la integridad estructural en la fabricación de tubos perfilados, centrándose en un perfil en forma de estrella de seis puntas.

2. Materiales y métodos. -

2.1 Diseño del estudio. - Este estudio empleó modelado tridimensional por elementos finitos (MEF) para simular el proceso de perfilado de tubos soldados con una sección transversal en forma de estrella de seis puntas. El modelo analizó la intensidad de deformación (deformación plástica equivalente, $\epsilon_{\sim i}$) y los estados de tensión ($\sigma_{\sim i}$) para identificar zonas óptimas de ubicación de la costura de soldadura.

2.2 Modelado por Elementos Finitos. - El modelo MEF se desarrolló utilizando ANSYS Multiphysics para replicar el perfilado multietapa. Se utilizó un modelo tridimensional de elementos finitos para simular el proceso de perfilado, utilizando elementos tetraédricos SOLID187 capaces de capturar geometrías complejas y soportar malla adaptativa. Este tipo de elemento proporciona alta precisión para modelar los intrincados perfiles de los tubos y maneja eficientemente las interacciones de contacto. La malla se refinó considerando la geometría del tubo y las regiones de máxima deformación: a lo largo del espesor de la pared del tubo, se utilizaron hasta 3-4 elementos. Se aplicó una malla adaptativa en la zona de soldadura para capturar con precisión las concentraciones de tensión y deformación en esta área. En otros lugares, se empleó una malla más gruesa para equilibrar la eficiencia computacional y la precisión. Las condiciones de contorno incluyeron restricciones de simetría (simetría BC), que redujeron la carga computacional al explotar la simetría del perfil. La interacción entre los rodillos de perfilado y el tubo se modeló mediante condiciones de contacto, se utilizó una formulación de contacto penal. El coeficiente de fricción entre los rodillos y el tubo se estableció en 0.15, un valor típico para interacciones acero-acero. Un análisis de sensibilidad preliminar mostró que la localización de las zonas de deformación mínima es poco sensible a variaciones razonables (± 0.05) en este parámetro. Teniendo en cuenta el posible deslizamiento y la presión ejercida por los rodillos. El modelo replicó una secuencia de perfilado multietapa típica, con 3 pasos de formación progresiva. En cada paso, se aplicó un desplazamiento prescrito a los rodillos para lograr la deformación incremental del perfil. El análisis se realizó en condiciones estáticas, con propiedades elasto-plásticas del material especificadas según las características del metal base. El comportamiento del material se definió mediante un modelo elasto-plástico isotrópico con endurecimiento cinemático y el criterio de fluencia de von Mises. La curva tensor-deformación para el metal base se obtuvo de ensayos de tracción (tabla I). La ductilidad reducida (5-10%) de la soldadura se implementó mediante un límite de deformación plástica equivalente (fracture strain) inferior en la zona afectada por el calor (zac), manteniéndose las mismas propiedades de resistencia y endurecimiento que el metal base para simplificar el modelo, enfoque justificable para el objetivo de ubicación óptima. La deformación plástica se modeló utilizando leyes constitutivas elasto-plásticas estándar. Los esfuerzos y deformaciones residuales se despreciaron en el modelo, lo cual es aceptable para optimizar la ubicación de la soldadura asumiendo que no influyen significativamente en el comportamiento de deformación del perfil. Esta suposición se justifica en el contexto de este estudio, ya que los esfuerzos residuales de soldadura superpuestos a los esfuerzos de conformado pueden afectar los niveles absolutos de tensión, pero es poco probable que cambien la ubicación relativa

de los mínimos de deformación a lo largo de la circunferencia del perfil, siendo esta ubicación el objetivo principal del análisis. Las conclusiones son más fiables para casos con calidad de soldadura alta y distribuciones típicas de esfuerzos residuales. El análisis implicó identificar los puntos de deformación y tensión máximas y mínimas, permitiendo determinar las zonas con deformación mínima, correspondientes a las ubicaciones óptimas de la costura de soldadura. Los parámetros clave incluyeron: Propiedades del Material: propiedades del metal base y de la soldadura, con la ductilidad de la soldadura establecida entre un 5-10% menor que la del metal base [2], [11]. Trayectoria de Deformación: los criterios basados en curvatura, derivados de la segunda derivada de la geometría del perfil, identificaron zonas de deformación mínima [8]. El criterio de optimalidad formalizado fue: 1) minimizar la intensidad de deformación plástica equivalente (ϵ_i) a lo largo de la línea de soldadura, y 2) preferir regiones donde el estado de tensiones locales durante el conformado evite valores máximos de tracción. Los puntos de inflexión, donde la segunda derivada de la curva del perfil es máxima, satisfacen este criterio. Condiciones de Contorno: se simuló una deformación multietapa, reflejando las restricciones industriales del conformado por rodillos [7]. El modelo calculó la intensidad de deformación y los estados de tensión en la sección transversal del tubo, centrándose en puntos característicos (crestas, valles, zonas de transición).

Propiedad	Valor
Módulo de Elasticidad (E)	210 GPa
Límite de Fluencia (σ_y)	350 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.3
Curva de Endurecimiento ($\sigma = K\epsilon^n$)	K = 650 MPa, n = 0.18
Deformación plástica equivalente a la fractura (ϵ_f)	0.25

Tabla I. Propiedades del material del metal base (acero aleado).

2.3 Análisis de Datos. - Se analizaron las distribuciones de intensidad de deformación y estado de tensiones en puntos clave del perfil. El punto de inflexión se identificó maximizando la derivada de la función de curvatura. Para cuantificar la ventaja de la ubicación óptima, se compararon los valores de ϵ_i en diferentes puntos característicos (tabla II). Los resultados se validaron con predicciones teóricas y estudios previos [9].

Ubicación en el Perfil	Valor de ϵ_i
Cresta (Punto 4, superficie interna)	0.15
Valle (Punto 1)	0.08
Punto de Inflexión (Punto 2)	0.02

Tabla II. Comparación cuantitativa de la intensidad de deformación (ϵ_i).

3. Resultados. - El modelado por elementos finitos reveló variaciones significativas en la intensidad de deformación (ϵ_i) y el estado de tensiones (σ_i) a través de la sección transversal del tubo en forma de estrella de seis puntas (Figura I).

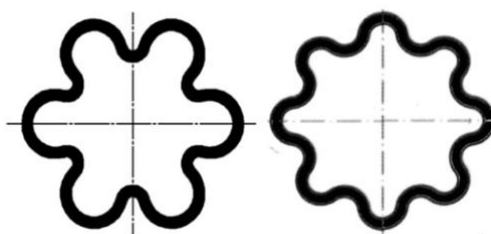


Figura I. Perfiles transversales de tubos multirradiados, con especial atención al perfil estrellado de seis radios.

La Figura I ilustra los perfiles seccionales de tubos multi-punta, destacando la configuración de seis puntas utilizada en este estudio.

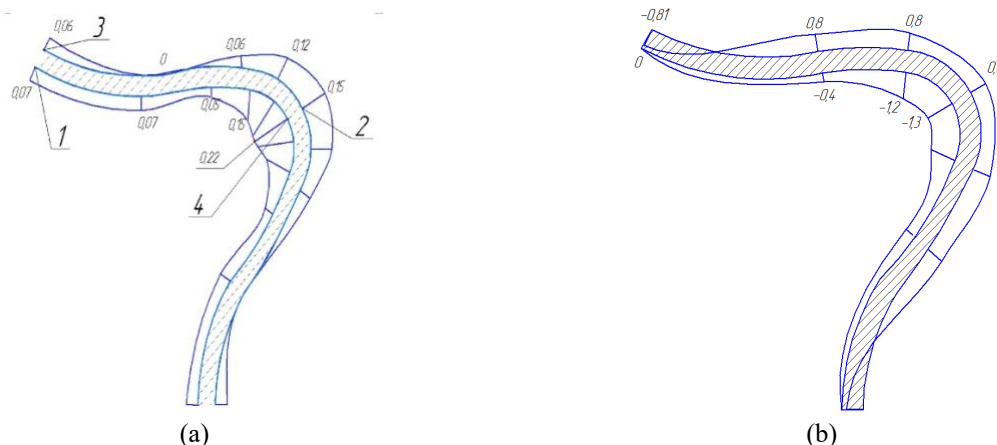


Figura II.- Distribución de (a) la intensidad de deformación y (b) el estado de tensiones durante el conformado. Los puntos 1 y 3 representan los valles, los puntos 2 y 4 representan las crestas, con el punto de inflexión entre crestas y valles.

La Figura II(a) muestra que la máxima intensidad de deformación ocurrió en las superficies internas de las crestas (punto 4, $\epsilon_i \approx 0.15$), mientras que se observó una deformación mínima en los puntos de inflexión (punto 2, $\epsilon_i \approx 0$). La Figura II(b) indica una transición de tensiones de tracción a compresión en el punto de inflexión, minimizando las concentraciones de tensiones.

Para el perfil de seis puntas, se identificaron 12 zonas óptimas de ubicación de la costura de soldadura, correspondientes a los puntos de inflexión de la curvatura externa de cada punta, lo que permite una implementación práctica mediante la rotación del tubo.

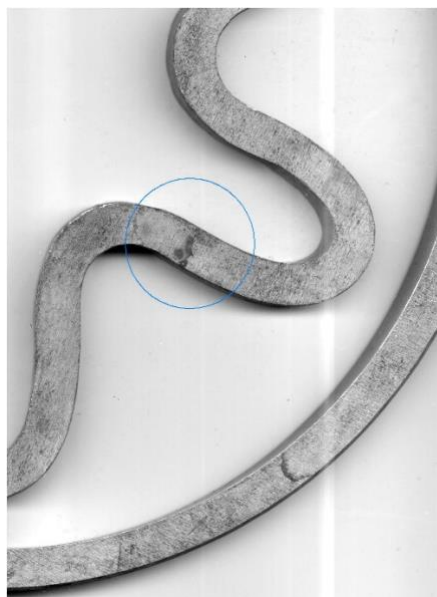


Figura III. Ubicación óptima de la soldadura en un tubo perfilado con forma de estrella de seis radios.

La foto (Figura III) presenta un espécimen físico de un tubo perfilado en forma de estrella de seis puntas fabricado de acuerdo con los parámetros optimizados derivados del análisis de elementos finitos. La costura de soldadura se posiciona a lo largo del punto de inflexión de la curvatura externa del perfil, donde el modelado computacional predijo una intensidad de deformación mínima ($\epsilon_i \approx 0$). Esta ubicación crítica se determinó mediante un análisis sistemático de los patrones de distribución de deformación en la sección transversal del tubo durante la simulación de perfilado. La línea de soldadura visible demuestra una fusión adecuada y una penetración uniforme, confirmando la viabilidad

de la implementación industrial. La superficie del tubo exhibe transiciones suaves entre las puntas sin defectos visibles, validando el enfoque de modelado para la mitigación de deformaciones en tubos perfilados soldados.

4. Discusión. - Posicionar las costuras de soldadura en los puntos de inflexión de la curvatura del perfil reduce significativamente el daño inducido por la deformación, alineándose con hallazgos previos sobre optimización del pie de soldadura [11]. Este enfoque mitiga los esfuerzos residuales y las deformaciones pico, ofreciendo una alternativa práctica a los tratamientos posteriores a la soldadura. En comparación con las estrategias de hidroconformado [10], la rotación del tubo antes del perfilado es más simple y potencialmente más rentable, aunque se necesita un análisis de costo-beneficio más profundo. Estudios sobre tubos corrugados laterales (LCTs) muestran que la geometría del perfil influye en la distribución de deformaciones [12]. El método propuesto se alinea con las técnicas de conformado incremental inverso (ICF) [13], donde los ajustes de parámetros reducen errores de forma. Las 12 zonas óptimas proporcionan flexibilidad para aplicaciones industriales, similar a las estrategias para minimizar el movimiento de la línea de soldadura en hidroconformado [10]. Limitaciones y generalización: el estudio se centra en un perfil específico de seis puntas. Sin embargo, la metodología propuesta (identificar zonas de deformación mínima mediante *mef* y posicionar la soldadura en esos puntos) es generalizable a otros perfiles, como tubos cuadrados, rectangulares o estrellas con diferente número de puntas. La regla heurística de "soldar en los puntos de inflexión" se espera que sea válida para perfiles con curvatura alternada (crestas y vallos), aunque la ubicación exacta de dichos puntos debe reevaluarse para cada geometría particular mediante simulación. Las principales limitaciones del modelo incluyen la negligencia de esfuerzos residuales y la falta de un criterio explícito de daño por fractura; la evaluación de integridad se basa en proxies de deformación/tensión, no en una predicción directa de falla. Las limitaciones incluyen el enfoque en un perfil de seis puntas, que puede no generalizarse a otras geometrías. Trabajos futuros deberían validar el enfoque en diversas configuraciones y entornos reales.

5. Conclusiones. - Este estudio demuestra que colocar las costuras de soldadura en zonas de deformación mínima, identificadas mediante modelado por elementos finitos, mejora la integridad estructural de los tubos perfilados. Para perfiles en forma de estrella de seis puntas, la rotación del tubo para alinear las costuras con los puntos de inflexión ofrece una solución rentable para la fabricación industrial. La validación cualitativa mediante un espécimen físico fabricado (figura III), de acero aleado de 3 mm de espesor y 250 mm de diámetro, perfilado en 3 pasos, confirmó la ausencia de grietas o defectos visibles cuando la soldadura se ubicó en la posición óptima. Ensayos informales previos con soldaduras en posiciones no óptimas (e.g., en las crestas) mostraron mayor propensión al agrietamiento, apoyando cualitativamente los resultados numéricos. Investigaciones futuras deberían validar este enfoque en diversas geometrías de tubos e integrar optimización paramétrica para mejorar aún más la confiabilidad.

Referencias

- [1] A. Abrass, T. Kessler, and P. Groche; "Optimizing roll forming processes with the aid of a new numerical algorithm," **Key Eng. Mater.**, 2012. 504–506: p. 857–862.
- [2] A. A. Bogatov; **Welded Cold-Formed Pipes**, 1991, Metallurgiya: Moscow, Russia.
- [3] V. V. Yakovlev, V. I. Krylov, and A. N. Ivanov; "Methods for improving the quality of cold-formed welded pipes," **Stal**, 1988. (1): p. 60–62.
- [4] V. M. Vlasov; "Production of thin-walled welded pipes with reduced internal burr," **Stal**, 1983. (7): p. 50–51.
- [5] A. Alaswad, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi; "Tube hydroforming process: A reference guide," **Mater. Des.**, 2012. 33: p. 328–339.
- [6] Y.-M. Hwang and Y.-K. Lin; "Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process," **J. Mater. Process. Technol.**, 2002. 125–126: p. 821–825.
- [7] Y. Yan and Q. Li; "FEM modeling and mechanics analysis of flexible roll forming," **Appl. Mech. Mater.**, 2010. 44–47: p. 132–137.
- [8] B. Abeyrathna, B. Rolfe, P. Hodgson, and M. Weiss; "Local deformation in roll forming," **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 2017. 88: p. 2405–2415.
- [9] D. E. Katsareas, A. Youtsos, and C. F. T. Mattas; "Finite element simulation of welding in pipes: A sensitivity analysis," in **Residual Stress and Its Effects on Fatigue and Fracture**, A. G. Youtsos, Ed., 2006, Springer: Dordrecht, Netherlands. p. 15–26.
- [10] R. A. F. Valente, R. M. N. Jorge, A. D. Santos, and L. M. J. S. Dinis; "Simulation of dissimilar tailor-welded tubular hydroforming processes using EAS-based solid finite elements," **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 2008. 37: p. 670–689.
- [11] Y. Wang, Z. Li, and X. Zhang; "Applying weld toe process design in finite element analysis of super large structure," **J. Mech. Sci. Technol.**, 2017. 31(12): p. 5865–5873.
- [12] X. Deng, X. Liu, and Y. Zhang; "On the crashworthiness analysis and design of a lateral corrugated tube," **Int. J. Mech. Sci.**, 2018. 140: p. 30–41.
- [13] J.-C. Park, D.-Y. Yang, M. Cha, and D. Kim; "Investigation of a new incremental counter forming in flexible roll forming," **Int. J. Mach. Tools Manuf.**, 2014. 86: p. 68–80.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

SVP has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

AAP has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.