Análisis tensodeformacional y evaluación de fractura en camisas de bombas centrífugas de Acero AISI 304 bajo condiciones operativas industriales

Stress-Strain Analysis and Fracture Evaluation in Centrifugal Pump Casings Made of AISI 304 Steel under Industrial Operating Conditions

Rosabel Barrera Ruiz* rosabelruiz2904@gmail.com (1)
https://orcid.org/0009-0005-1904-1720
Anabel Ruiz Padilla aruiz@ismm.edu.cu (2)
https://orcid.org/0009-0003-0750-8472
(2) Empresa Niquelífera Pedro Sotto Alba, Moa, Cuba
(2) Universidad de Moa, Moa, Cuba
* Autor para la correspondencia

Resumen: Este artículo presenta un estudio técnico sobre el comportamiento tensodeformacional y la susceptibilidad a la fractura de camisas de bombas centrífugas fabricadas en acero inoxidable AISI 304, utilizadas en sistemas hidráulicos industriales cubanos. Se aplican principios de la mecánica de fractura y simulaciones por elementos finitos para determinar zonas críticas de esfuerzo, tamaño de grieta permisible y factores de intensidad de tensiones. Los resultados permiten establecer recomendaciones para el rediseño y mantenimiento predictivo de estos componentes.

Palabras clave: aceros aleados, equipamiento mecánico, mecánica de fluidos

Abstract: This article presents a technical study on the stress-strain behavior and fracture susceptibility of centrifugal pump casings manufactured from AISI 304 stainless steel, used in Cuban industrial hydraulic systems. Principles of fracture mechanics and finite element simulations are applied to determine critical stress zones, permissible crack size, and stress intensity factors. The results allow establishing recommendations for predictive and redesign maintenance of these components.

Keywords: alloy steels, fluid mechanics, mechanical equipment

1. Introducción

Las bombas centrífugas son componentes fundamentales en sistemas hidráulicos industriales, donde la eficiencia y confiabilidad operativa dependen de la integridad estructural de sus partes internas (Valarde *et al.,* 2023; Fajardo-Pulido *et al.,* 2024; López *et al.,* 2024). En particular, las camisas ubicadas en el impulsor, están sometidas a esfuerzos complejos que incluyen tracción, compresión, flexión y torsión, lo que puede generar fallas por fatiga o fractura. En Cuba, las bombas KSB-67227 en industrias metalúrgicas, han evidenciado fallas recurrentes en las camisas, generando pérdidas económicas y paradas no programadas.

La mecánica de fractura ofrece herramientas para predecir el comportamiento de materiales ante defectos internos o superficiales, permitiendo anticipar fallas y mejorar el diseño. Este estudio se enfoca en el acero AISI 304, utilizado por su resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas (Silvina Román *et al.,* 2016; Suárez-Miranda & Vargas-Gutiérrez,2024; Ruelas Santoyo *et al.,* 2025).

La integridad estructural de componentes sometidos a condiciones operativas severas, como las camisas de bombas centrífugas en la industria, es un aspecto crítico para la seguridad y la eficiencia de los procesos industriales. El acero inoxidable AISI 304 es ampliamente utilizado en la fabricación de estos componentes debido a su excelente resistencia a la corrosión y facilidad de conformado y soldadura (Estupiñán *et al.,* 2022; Barbosa *et al*., 2022; Barbosa *et al.,* 2023; Aznárez-Ferrando *et al.,* 2024). Sin embargo, la presencia de defectos inherentes al proceso de fabricación (como discontinuidades en soldaduras) y la exposición a cargas cíclicas, ambientes corrosivos y temperaturas variables, pueden comprometer la integridad estructural y la vida útil de estos elementos (España *et al.,* 2008; Arganis-Juárez & Zenteno-Suárez, 2023).

El propósito de este estudio es analizar el comportamiento tensodeformacional y la evaluación de fractura en camisas de bombas centrífugas de acero AISI 304, integrando tanto la caracterización experimental como la simulación numérica avanzada. El problema central radica en la necesidad de garantizar la integridad estructural de las camisas frente a la presencia de defectos, principalmente en las zonas de soldadura y zonas afectadas por el calor (ZAC), bajo la acción combinada de cargas mecánicas, térmicas y ambientales, que pueden inducir mecanismos de fractura frágil, dúctil, fatiga y corrosión bajo tensión (Arganis-Juárez & Zenteno-Suárez, 2023).

2. Materiales y métodos

2.1. Caracterización del Acero AISI 304

El acero inoxidable AISI 304 es un material austenítico con una composición típica de 18 % Cr y 8 % Ni, lo que le confiere una excelente resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas (Li & Zeng, 2022; Zhou *et al.,* 2025). Estas propiedades mecánicas varían según el estado de suministro y el procesamiento.

Tabla 1. Propiedades mecánicas típicas del acero inoxidable AISI 304 (recocido, ASTM A240/A276)

Propiedad	Valor típico
Resistencia a la tracción (MPa)	515-620
Límite elástico 0.2 % (MPa)	205-310
Alargamiento (%)	40-60
Dureza Brinell (HB)	≤ 201
Módlo elástico (GPa)	193
Densidad (g/cm^3)	7.93

2.1.2. Ensayos de tenacidad y normas aplicables

La tenacidad a la fractura es clave para evaluar la resistencia a la propagación de grietas. Para metales, los ensayos más utilizados son:

- Ensayo de impacto Charpy V-notch (CVN): Determina la energía absorbida (ASTM E23). Útil para caracterizar la transición dúctilfrágil y estimar la tenacidad a la fractura de manera indirecta (ZwickRoell, 2025).
- Ensayo de tenacidad a la fractura (K_IC): Obtiene el valor crítico del factor de intensidad de tensiones para la iniciación de la fractura en condiciones de deformación plana (ASTM E399) (Ramos Morales *et al.,* 2005; Terán *et al.,* 2016; Anderson, 2017).

2.2. Soldadura de camisas, efectos en la ZAC y modelado por elementos finitos

Las camisas suelen fabricarse mediante la unión de tramos tubulares por soldadura circunferencial a tope. Este proceso genera una zona afectada por el calor (ZAC) y un metal de aporte, cuyas propiedades pueden diferir significativamente del metal base. La ZAC es susceptible a la formación de microestructuras heterogéneas, crecimiento de grano y concentración de tensiones residuales, lo que puede favorecer la iniciación y propagación de grietas (Zhang *et al.,* 2024). La selección del procedimiento de soldadura y el control de la entrada de calor son fundamentales.

Se utilizó el Método de Elementos Finitos (MEF) para simular el comportamiento tensodeformacional de la camisa, incluyendo zonas de soldadura y defectos típicos (fisuras circunferenciales). Se emplearon elementos sólidos y de contacto para representar la interacción con el fluido. La calidad del mallado es crítica; se refinó la malla en las zonas de concentración de tensiones (extremos de fisuras) y se evaluaron métricas como skewness y ortogonalidad (Rodríguez & Mollehuanca, 2021; Sánchez Mateo, 2024).

Se simularon escenarios de carga representativos (impacto, presión interna, fluctuaciones térmicas). La interacción camisa-fluido se modeló con elementos de contacto, considerando la transferencia de presión y vibraciones inducidas por el flujo (Rojas Suárez *et al.,* 2021).

2.3. Criterios de Evaluación de Falla: CEGB R6 y BS 7910

La evaluación de la aptitud al servicio se realizó siguiendo procedimientos normativos internacionales que utilizan el Diagrama de Evaluación de Falla (FAD):

- CEGB R6: Combina el análisis de la tenacidad a la fractura (Kr) y la proximidad al colapso plástico (Lr) para determinar la seguridad de un componente fisurado (Budden & Sharples, 2015; TWI, 2004).
- BS 7910/PD 6493: Proporciona guías detalladas para la evaluación de defectos en estructuras metálicas soldadas, integrando el enfoque FAD (Budden & Sharples, 2015; TWI, 2004).

Estos procedimientos permitieron determinar si un defecto es aceptable bajo las condiciones de carga y operación previstas.

3. Resultados y discusión

3.1. Zonas críticas de esfuerzo

Las simulaciones MEF revelaron que las mayores concentraciones de esfuerzos ocurren en tres regiones específicas:

1. En el interior de la soldadura (metal de aporte), donde el cambio geométrico de la unión y las tensiones residuales generan un factor de concentración de esfuerzos (Kt)

de hasta 3.2, alcanzando valores de tensión de Von Mises de 350 MPa bajo carga combinada (presión + axial).

2. En la ZAC, particularmente en el lado exterior de la camisa, donde la microestructura heterogénea (presencia de martensita inducida por deformación y posible sensibilización) reduce la tenacidad. Aquí las tensiones alcanzan 310 MPa, superando el límite elástico del material en ese estado (estimado en 240 MPa).

3. En el frente de la fisura circunferencial, especialmente en los bordes de la misma, donde se produce una singularidad de tensiones con valores por encima de 600 MPa, aunque plásticamente relajados.

Estas zonas coinciden con las ubicaciones de fallas reportadas en los informes de mantenimiento de las bombas KSB-67227.

3.2. Factores de intensidad de tensiones (K)

Se calcularon los factores de intensidad de tensiones K_I para diferentes profundidades de grieta (a) en la ZAC, considerando una fisura semielíptica

superficial (relación a/2c = 0.2). Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Variación de K_I con la profundidad de grieta

Profundidad de grieta	K_I (MPa√m)	Observación
0.5	32	Régimen seguro
1	58	Seguro
1.5	78	Cercano al límite (ZAC)
2	95	Supera K_{IC} ZAC (90)
2.5	112	Propagación inestable

La condición de falla ocurre cuando K_I \geq K_{IC}. Para el material base (no soldado), la K_{IC} es 120 MPa√m, lo que permitiría grietas de hasta 2.2 mm sin propagación inmediata. Sin embargo, en la ZAC, con K_{IC} reducido a 90 MPa√m, el valor crítico se alcanza con a = 1.6 mm.

Los factores de intensidad obtenidos validan que el modo de fractura predominante es el Modo I (apertura por tracción), dado que los esfuerzos principales máximos son perpendiculares al plano de la soldadura circunferencial.

3.3. Tamaño de grieta permisible

Utilizando el diagrama FAD según BS 7910 y los valores de K_{IC} y tensión de fluencia (\sigma_{ys} = 240 MPa para la ZAC, 290 MPa para el material base), se determinó el tamaño máximo de defecto aceptable para un factor de seguridad de 1.5 sobre la carga de diseño.

Tras aplicar un factor de seguridad adicional de 2 sobre la carga, y considerando la sensitividad a la corrosión bajo tensión, se establece un tamaño de grieta permisible de:

- 1.8 mm de profundidad para defectos en la ZAC.

- 2.5 mm para el material base.

Las inspecciones por ultrasonidos o tintas penetrantes deben detectar grietas ≥ 1.0 mm para actuar preventivamente.

La combinación de MEF y el enfoque FAD permitió cuantificar que, bajo condiciones normales de operación, defectos moderados (menores a 1.5 mm) en la ZAC son aceptables. Sin embargo, la presencia de martensita inducida por deformación (por malas prácticas de soldadura o trabajos en frío) reduce la tenacidad efectiva, desplazando los puntos de evaluación hacia la región insegura del diagrama. Además, la corrosión bajo tensión en ambientes con cloruros (comunes en aguas industriales cubanas) puede disminuir la K_{IC} hasta 50 MPa√m, haciendo críticas incluso microfisuras.

Los resultados validan que la camisa puede operar de manera confiable si se implementa un plan de mantenimiento predictivo basado en inspección periódica de las zonas críticas (soldadura y ZAC) y control de la calidad de la soldadura (aporte térmico ≤ 1.5 kJ/mm, enfriamiento controlado). Para rediseño futuro, se recomienda incrementar el espesor local en la unión soldada o cambiar a un acero con mayor tenacidad, como el AISI 316L.

4. Conclusiones

El análisis demuestra que la integridad estructural de las camisas de bombas centrífugas de acero AISI 304 depende de la interacción entre las propiedades del material, la calidad de las soldaduras, la presencia de defectos y las condiciones de carga y ambiente. La aplicación de la mecánica de la fractura (FAD), combinada con simulaciones

MEF y criterios normativos (R6, BS 7910), permite evaluar la aptitud al servicio de manera integral.

Para defectos moderados en soldaduras, los puntos de aceptación caen dentro de la curva FAD bajo las condiciones estudiadas. No obstante, factores como la martensita inducida por deformación o la sensibilización aumentan el riesgo en la ZAC. La implementación de las estrategias de rediseño y mantenimiento predictivo propuestas es crucial para maximizar la confiabilidad y vida útil de estos componentes.

Referencias bibliográficas

Anderson, T.L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781498728140_A36376995/preview-9781498728140_A36376995.pdf

Arganis-Juárez, C.R., & Zenteno-Suarez, J.C. (2023). Evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo del acero 304 en tiosulfato de sodio 0.002 M por tres métodos de Prueba. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, *11*(21), 78–83. https://doi.org/10.29057/icbi.v11i21.10500

Aznárez-Ferrando, I., Jacas-Cabrera, M., Rodríguez-Pérez, R., Gálvez-Cardentey, J. C., & Tamayo-Sixto, L. D. (2024). Rugosidad superficial en el maquinado del acero inoxidable AISI 304 en el proceso de torneado. *Ingeniería Mecánica*, *27*(2), 19-25. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442024000200019&script=sci_arttext

Barbosa, J. E., García-Páez, I. H., & García-Medina, V. (2022). Analysis of formability of AISI 304 steel sheets with different thicknesses by the tensile properties. *Revista UIS ingenierías*, *21*(4), 97-106. https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022009

Barbosa, J.E., García-Páez, I., & García-Medina, V. (2023). Curvas límite de conformado en láminas de acero inoxidable AISI 304 utilizadas por el sector metalmecánico. *Ingeniería y competitividad, 25*(3). https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.12702

Budden, P.J., & Sharples, J.K. (10-14 August 2015). *The R6 defect assessment procedure: status and key recent developments*. 23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Reino Unido. https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/f2f92fbb-de49-4438-b223-6c3cfb64e7e9/content

España, C., Cocuy, C., Vargas, A., Aperaor, W., & Castro, I. (2008). Estudio del comportamiento mecánico y frente a la corrosión bajo tensión de acero inoxidable AISI 304 sometido a laminación. *Tecnura, 12*(23), 24-31. https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6267

Estupiñán, D.L.B., Castañeda, Á.B., & Márquez, S. (2022). Performance of nozzle steels in biofuel. *Ingeniería y Universidad*, *26*, 16. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9860528

Fajardo Pulido, G.A., Sandoval Villegas, J.C., Cabrera Castillo, K.V., & Quintal Vázquez, J.F. (2024). Evaluar el Efecto de la Máxima Amplitud de Vibración de un Sistema con Amortiguamiento Viscoso, Generada por Cavitación en Bombas Centrífugas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(5), 10247-10259. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14407

Hadley, I. & Wintle. J.B (2004). The future of fracture assessment. https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-future-of-fracture-assessment

Ruelas Santoyo, E.A., Figueroa Fernández, V., Hernández González, S. (2025). Reconocimiento de patrones de corrosión en acero inoxidable mediante el método congruencia de fases. Revista *RAITES, 11*(23). https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/raites/article/download/4107/2832

Li, K., & Zeng, Y. (2022). Corrosion of heat exchanger materials in co-combustion thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112328

López, A., Chávez, O. A., Rosas, I., & Ambriz, V. (2024). Estudio de Cavitación en una Bomba Centrífuga con Impulsor Semiabierto de Flujo Radial. *Revista ELECTRO*, *46*(1), 309-313. https://www.itchihuahua.mx/revista_electro/2024/A33_309-313.pdf

Ramos Morales, F., Duffus Scott, A., & Palomo Nápoles, N. (2005). Determinación de la tenacidad a la fractura de muestras de Acero 45 fundido empleando las correlaciones entre el KIC y la energía de impacto medida en el ensayo de Charpy. *Ingeniería Mecánica, 8*(2), 29-33. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225118187004

Rodríguez Valdivia, M., & Mollehuanca Caballero, E. (2021). Caracterización mecánica y microestructural de un acero inoxidable AISI 304 endurecido mediante nitruración usando residuos de melamina. *Revista Boliviana de Química, 38*(5). https://doi.org/10.34098/2078-3949.38.5.1

Rojas-Suárez, J.P., Vergel-Ortega, M., & Orjuela-Abril, S. (2021). Investigaciones con CFD aplicadas a bombas centrífugas. *Revista Boletín Redipe, 10*(9), 515-525. https://doi.org/10.36260/rbr.v10i9.1458

Sánchez Mateo, D. (2024). *Cómo validar un mallado en elementos finitos*. Ingeniería SAMAT. https://ingenieriasamat.es/blog/como-crear-buen-mallado-elementos-finitos/

Silvina Román, A., Barrientos, M.S., Harms, F., Méndez, C.M., & Ares, A.E. (2016). Resistencia corrosión de acero inoxidable AISI 304L en biodiesel de soja. *Anales, 27*(1). https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-11682016000100003

Suárez Miranda, H.V. & Vargas Gutiérrez, G. (2024). Electrodisolución selectiva de acero inoxidable AISI 304 en un electrolito ecológico a base de NaCl. *Nexo Revista Científica*, *37*(2), 61-73. https://doi.org/10.5377/nexo.v37i2.19821

Terán, G., Capula-Colidres, S., Ángeles-Herrera, D, Velázquez, J.C., & Fernández-Cueto, M.J. (2016). Estimation of fracture toughness KIC from Charpy impact test data in T-welded connections repaired by grinding and wet welding. *Engineering Fracture Mechanics, 153,* 351-359. http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.12.010

Velarde, J.D.C., Pulido, M.M., Aranda, J.A., Velarde, J.G.C., & Serrano, A.L.G. (2023). Diseño, análisis y fabricación de las partes de una bomba centrífuga impresa con filamento petg. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, (11), 250-263. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10158589

Zhang, P., Laleh, M., Hughs, E., Marceau, R., Hilditch, T., & Yongjun, M. (2024). Effect of microstructure on hydrogen embrittlement and hydrogen-induced cracking behavior of a high-strength pipeline steel weldment. *Corrosion Science, 227.* https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111764

Zhou, Z.Y., Liao, B.K., Qi, K., Qiu, Y.B., Chen, Z.Y. & Guo, X.P. (2025). Effect of heat flux on the passive film and passive/active transition behavior oh heat transfer surface of 304 SS in 0,5M H_2SO_4 solution. *Surface and Interfaces, 60.* https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106021

ZwickRoell. (2025). *ASTM E23: Ensayo de flexión por impacto, Charpy e Izod.* https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-flexion-por-impacto-astm-e23/

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autoría según taxonomía CRedit

Rosabel Barrera Ruiz: Conceptualización/Análisis formal de datos/Curación de contenidos y datos/Metodología/Investigación/Redacción–borrador original
Anabel Ruiz Padilla: Curación de contenidos y datos/Metodología/Supervisión/Redacción – revisión y edición