



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rm.v10i4

ANÁLISIS DE FRACTURA EN TUERCAS FLANGE DE ACERO SAE 1010 TREFILADO: INFLUENCIA DEL ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN Y PROPUESTA DE RECOCIDO DE RECRISTALIZACIÓN

**FRACTURE ANALYSIS IN DRAWN SAE 1010 STEEL FLANGE
NUTS: INFLUENCE OF STRAIN HARDENING AND
PROPOSAL FOR RECRYSTALLIZATION ANNEALING**

José Merced Martínez Vázquez

Universidad Politécnica de Juventino Rosas, México

Gabriel Rodríguez Ortiz

Universidad Politécnica de Juventino Rosas, México

Marissa Vargas Ramírez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Juan Gregorio Hortelano Capetillo

Universidad Politécnica de Juventino Rosas, México

César Yeshua Becerra Mayorga

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4.25500

Análisis de fractura en tuercas flange de acero SAE 1010 trefilado: influencia del endurecimiento por deformación y propuesta de recocido de recrystalización

José Merced Martínez Vázquez¹jmartinez@upjr.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-6230-3846>Universidad Politécnica de Juventino Rosas
México**Gabriel Rodríguez Ortiz**grodriguez@upjr.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-3615-1973>Universidad Politécnica de Juventino Rosas
México**Marissa Vargas Ramírez**marissav@uaeh.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-5968-6196>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México**Juan Gregorio Hortelano Capetillo**jhortelano@upjr.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-3702-4853>Universidad Politécnica de Juventino Rosas
México**César Yeshua Becerra Mayorga**be260308@uaeh.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-5213-2764>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

RESUMEN

Las tuercas tipo flange fabricadas con alambre SAE 1010 trefilado presentaron fracturas durante el forjado en frío. Este estudio diagnostica las causas raíz y propone una solución mediante recocido. Se realizaron ensayos de tensión (ASTM E8) y análisis microestructural (MO y SEM). Los resultados mostraron una relación límite elástico/resistencia a la tracción (YS/UTS) > 0.95 y una fractura 100% intergranular en los casos más críticos, evidenciando un sobre-endurecimiento crítico. El análisis microestructural reveló una estructura de grano severamente deformado, producto de un trefilado con deformaciones reales $\epsilon > 0.15$ sin recocido. Se concluye que el mecanismo de fractura es frágil, gatillado por la alta triaxialidad de tensiones en la geometría de la pieza y la nula reserva de ductilidad del material. La validación de la solución se realiza contrastando con un material de la competencia que, tras un recocido controlado, presenta una microestructura recrystalizada, mayor ductilidad y un YS/UTS de 0.895, lo que confirma la eficacia del tratamiento térmico para restaurar la conformabilidad.

Palabras clave: SAE 1010, forja en frío, fractura frágil, recocido, trefilado

¹ Autor principal

Correspondencia: jmartinez@upjr.edu.mx

Fracture analysis in drawn SAE 1010 steel flange nuts: influence of strain hardening and proposal for recrystallization annealing

ABSTRACT

Flange nuts manufactured with drawn SAE 1010 steel wire exhibited fractures during cold forging. This study diagnoses the root causes and proposes a solution through annealing. Tensile tests (ASTM E8) and microstructural analysis (OM and SEM) were performed. The results showed a yield strength to ultimate tensile strength ratio (YS/UTS) > 0.95 and a 100% intergranular fracture in the most critical cases, evidencing critical strain hardening. Microstructural analysis revealed a severely deformed grain structure, a result of wire drawing with true strains $\epsilon > 0.15$ without annealing. It is concluded that the fracture mechanism is brittle, triggered by the high stress triaxiality in the part's geometry and the material's null ductility reserve. The solution is validated by comparing it with a competitor's material which, after controlled annealing, presents a recrystallized microstructure, higher ductility, and a YS/UTS ratio of 0.895, confirming the effectiveness of the heat treatment in restoring formability.

Keywords: SAE 1010, cold forging, brittle fracture, annealing, wire drawing

*Artículo recibido 16 junio 2026
Aceptado para publicación: 22 agosto 2026*



INTRODUCCIÓN

La conformabilidad en frío es un proceso de manufactura esencial para la producción masiva de elementos de fijación, tales como las tuercas tipo flange. Este proceso depende críticamente de la capacidad de deformación plástica del material empleado, comúnmente aceros de bajo carbono como el SAE 1010. Sin embargo, durante las etapas de conformado, los materiales son sometidos a estados de tensión complejos que exigen una reserva de ductilidad óptima para fluir sin presentar fallas estructurales.

En este contexto industrial, el presente trabajo aborda un problema crítico de manufactura: la aparición sistemática de fracturas en la base (arandela) y en el cuerpo hexagonal de tuercas flange durante el proceso de forja en frío. El antecedente directo de este problema radica en la materia prima utilizada, consistente en alambre SAE 1010 trefilado en un solo paso con reducciones severas, pasando de diámetros de 13.16 mm a 12.16 mm (deformación real $\epsilon = 0.157$) y de 10.13 mm a 9.13 mm ($\epsilon = 0.201$). Estas reducciones generan un alto nivel de endurecimiento por deformación, lo que altera significativamente el comportamiento mecánico del acero previo a la forja.

Abordar este fenómeno es de suma relevancia, ya que la falla imprevista de estos componentes genera altas tasas de rechazo, desgaste de herramientas y riesgos potenciales en la aplicación final. Desde una perspectiva teórica, la viabilidad del conformado en frío está gobernada por la relación entre el límite elástico (YS) y la resistencia a la tracción (RT o UTS). Como establecen Dieter y Bacon (1988), este comportamiento mecánico está dictado por el severo incremento en la densidad de dislocaciones durante el trabajo en frío, lo cual eleva drásticamente el límite elástico y reduce el porcentaje de reducción de área. La literatura especializada establece que, para evitar fracturas, es ideal mantener una relación $YS/UTS \leq 0.65-0.70$. Los valores altos, superiores a 0.85, indican que el material alcanza su máxima resistencia casi inmediatamente después de comenzar la deformación plástica, volviéndose "frágil" bajo tensión y eliminando su margen para redistribuir esfuerzos.

Estudios recientes han profundizado en la influencia de la relación YS/UTS en la conformabilidad de aceros de bajo carbono. Watanabe et al. (2014) demostraron que valores de YS/UTS superiores a 0.90 están asociados con una drástica reducción en la capacidad de endurecimiento por deformación, incrementando significativamente la susceptibilidad a la fractura frágil en procesos de forja en frío. De

manera complementaria, investigaciones sobre aceros de bajo carbono han establecido que la reducción de área (%RA) es un predictor más fiable que el alargamiento (%EL) para evaluar la conformabilidad, recomendando valores mínimos de 55 - 60% para garantizar procesos de deformación plástica severa sin fallos (Pradhan y Oh, 2024; Raji y Oluwole, 2013a).

Adicionalmente, la geometría de la tuerca flange impone una alta triaxialidad de tensiones en zonas de transición, como la unión cuerpo-brida. De acuerdo con los modelos de conformado de metales de Hosford y Caddell (2011), bajo estos estados de esfuerzos complejos, el material agota rápidamente su conformabilidad si carece de ductilidad. En consecuencia, se vuelve determinante un alargamiento superior al 12-15% y una reducción de área (%RA) mayor al 50% para garantizar un flujo metálico seguro.

Investigaciones contemporáneas han abordado el efecto de la triaxialidad de tensiones en la nucleación de grietas durante el conformado en frío. Estudios en aceros al carbono han demostrado que en geometrías con alta restricción plástica, como la transición cuerpo-brida de tuercas flange, la combinación de alta triaxialidad y baja ductilidad promueve la fractura intergranular (Winiarski, 2024). Este comportamiento es consistente con los hallazgos del presente estudio.

El recocido de recristalización para aceros SAE 1010 se realiza típicamente en el rango de 600-700°C, temperatura a la cual se activa la difusión atómica necesaria para la nucleación de nuevos granos equiaxiales (Krauss, 2015; Callister y Rethwisch, 2020). Este tratamiento anula los efectos del endurecimiento por deformación, resultando en un aumento significativo de la maleabilidad del material.

En este sentido, investigaciones recientes han optimizado los parámetros de recocido para aceros de bajo carbono. Zhang et al. (2022) demostraron que un recocido a 680°C durante 1.5 horas es óptimo para restaurar la ductilidad en aceros SAE 1010 trefilados, logrando reducciones de área superiores al 60% y valores de YS/UTS por debajo de 0.70. Adicionalmente, estudios sobre la cinética de recristalización han demostrado que temperaturas superiores a 700°C inducen un crecimiento de grano no deseado, mientras que temperaturas inferiores a 600°C resultan insuficientes para eliminar completamente las dislocaciones generadas por el trefilado (Raji y Oluwole, 2013b; Kaverynskyi et al., 2022).

La densidad de dislocaciones es un parámetro microestructural clave que determina el comportamiento

mecánico post-trefilado. De acuerdo con estudios en aceros trefilados, el trabajo en frío incrementa la densidad de dislocaciones desde valores de 10^{10} m^{-2} en estado recocido hasta 10^{15} m^{-2} en deformaciones reales de 0.20. Este incremento, aunque beneficioso para la resistencia, reduce drásticamente la ductilidad y aumenta la susceptibilidad a la fractura frágil, especialmente bajo estados de tensión triaxial (Kaverynskyi et al., 2022; Alzreedy, 2023).

Ante este panorama, el objetivo general de la presente investigación es diagnosticar las causas microestructurales y mecánicas de la fractura en las tuercas flange mediante ensayos de tensión, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). Como objetivo secundario, el estudio busca proponer y validar un tratamiento térmico de recocido posterior al trefilado como una solución efectiva para restaurar la ductilidad necesaria.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo-explicativo y un diseño experimental comparativo de corte transversal. La muestra de estudio estuvo conformada por elementos de acero SAE 1010 trefilado en frío, seleccionando 5 probetas de alambre provenientes tanto del material con fallas como de un material de competencia, y 3 tuercas tipo flange que presentaron fracturas en producción.

Cálculo de la Deformación Real (ϵ)

La deformación real experimentada por el material durante el trefilado se calculó mediante la ecuación:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{A_f}{A_0}\right) \quad (1)$$

Donde A_0 y A_f son las áreas transversales inicial y final.

Caso 1 (13.16 mm $\rightarrow$ 12.16 mm):

$$\epsilon_1 = \ln\left[\frac{\left(\frac{12.16}{2}\right)^2 \pi}{\left(\frac{13.16}{2}\right)^2 \pi}\right] = \ln(1.17) = 0.157 \quad (2)$$

Caso 2 (10.13 mm $\rightarrow$ 9.13 mm):

$$\epsilon_1 = \ln\left[\frac{\left(\frac{10.13}{2}\right)^2 \pi}{\left(\frac{9.13}{2}\right)^2 \pi}\right] = \ln(1.23) = 0.208 \quad (3)$$



Caracterización Mecánica

Para la caracterización mecánica, se realizaron ensayos de tensión bajo los lineamientos de la norma internacional ASTM E8/E8M para probetas cilíndricas. Las pruebas se ejecutaron empleando una Máquina Universal de Ensayos Computer Control Electronic Universal Testing Machine (modelo CMT-100), equipada con mordazas hidráulicas y extensómetro. Se aplicó una velocidad de deformación controlada de 3 mm/min para evitar un endurecimiento artificial del material. Durante las pruebas, se registraron el límite elástico (YS), la resistencia a la tracción (UTS) y el porcentaje de elongación (%EL).

Caracterización Microestructural

La determinación de las causas microestructurales y morfológicas del fallo se estructuró siguiendo las metodologías estandarizadas para el análisis de falla reportadas por ASM International (2002), empleando dos técnicas analíticas instrumentales:

Microscopía Óptica (MO): Se analizaron cortes metalográficos preparados mediante desbaste, pulido espejo y ataque químico con Nital al 2% para revelar de manera efectiva la morfología celular y el grado de deformación del grano.

Microscopía Electrónica de Barrido (FE-SEM): Las zonas fracturadas de las tuercas fueron examinadas topográficamente empleando un equipo FE-SEM a 10 kV, con distancia de trabajo de 10 mm y magnificaciones de $500\times$ a $5000\times$. Esto permitió diagnosticar a nivel micrométrico el mecanismo predominante de fractura, empleando los criterios de interpretación fractográfica canónicos de la literatura (ASM International, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Mecánicas y Endurecimiento por Deformación

El análisis de las deformaciones reales (ϵ) generadas durante el trefilado en un solo paso demostró que ambas reducciones evaluadas superan el límite crítico recomendado ($\epsilon > 0.15$) para aceros de bajo carbono sin recocido. Específicamente, el alambre que pasó de un diámetro inicial de 13.16 mm a 12.16 mm experimentó una deformación de $\epsilon = 0.157$, mientras que la reducción de 10.13 mm a 9.13 mm alcanzó un $\epsilon = 0.208$. Esta deformación agresiva indujo un severo sobre-endurecimiento, fenómeno que concuerda con las estimaciones teóricas derivadas del modelo de Ludwik-Hollomon. Kaverynskyi et al. (2022) establecieron que deformaciones reales superiores a 0.15 en aceros de bajo carbono generan

densidades de dislocaciones del orden de 10^{15} m^{-2} , lo que incrementa significativamente el límite elástico pero reduce drásticamente la ductilidad.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del alambre SAE 1010 y material de referencia.

Material	Diámetro (mm)	ϵ	YS (MPa)	UTS (MPa)	YS/UTS	%EL
Problemático 1	9.13	0.208	450	470	0.960	11.7
Problemático 2	12.16	0.157	424	434	0.977	10.1
Competencia	12.16	—	392	438	0.895	17.7

Al comparar experimentalmente el material problemático con un material homólogo de la competencia, los ensayos de tracción revelaron diferencias críticas: el acero problemático exhibió un límite elástico (YS) de 424 MPa y una resistencia a la tracción (UTS) de 434 MPa, arrojando una relación YS/UTS sumamente crítica de 0.977 y una elongación de apenas 10.1%. En contraste, el material de competencia presentó un YS de 392 MPa, una relación YS/UTS de 0.895 y una elongación superior del 17.7%. Una relación YS/UTS que supera el umbral de 0.85, y particularmente el extremo de 0.977, denota una reserva de ductilidad nula; esto implica que el material agota su capacidad de endurecimiento por deformación (evidenciado por la ínfima diferencia de 10 MPa entre UTS y YS) casi inmediatamente tras comenzar la fluencia plástica, eliminando su margen para redistribuir tensiones durante la forja. Watanabe et al. (2014) reportaron resultados similares en aceros para forja en frío, demostrando que relaciones YS/UTS superiores a 0.90 están asociadas con fallos en procesos de conformado de geometrías complejas.

Cabe destacar que los ensayos realizados a velocidades superiores (10-50 mm/min) en el laboratorio de la empresa arrojaron valores de UTS hasta un 18.6% superiores, lo que evidencia el efecto de la velocidad de deformación en la curva tensión-deformación y subraya la importancia de seguir estrictamente la normativa ASTM E8 (Dieter y Bacon, 1988). Alzreedy (2023) también observó este comportamiento en aceros de bajo carbono, atribuyéndolo a la sensibilidad de la deformación a la velocidad de ensayo.

Caracterización Microestructural

El origen microestructural de dichas discrepancias mecánicas se esclareció mediante microscopía óptica. Las micrografías del material problemático revelaron una morfología de granos alargados, destruidos y bandeados en la dirección del trefilado (Figura 1). Tal como describen Dieter y Bacon (1988), esta estructura fuertemente deformada, sin indicios de recrystalización, concentra una altísima densidad de dislocaciones, las cuales son directamente responsables de elevar el límite elástico hasta los 424 MPa y desencadenar la fractura frágil bajo carga. Por el contrario, la microestructura del acero de la competencia exhibió granos equiaxiales y uniformes (Figura 2) y una baja densidad de dislocaciones reorganizadas.

La densidad de dislocaciones estimada para el material problemático es del orden de 10^{15} m^{-2} , mientras que en el material recocido de competencia se reduce a valores típicos de 10^{10} - 10^{12} m^{-2} (Kaverynskyi et al., 2022). Esta diferencia de tres órdenes de magnitud explica la sustancial diferencia en el límite elástico (424 vs 392 MPa) y en la ductilidad.

Figura 1. Micrografía (MO, 20×) del material problemático mostrando granos alargados y deformados en la dirección de trefilado.

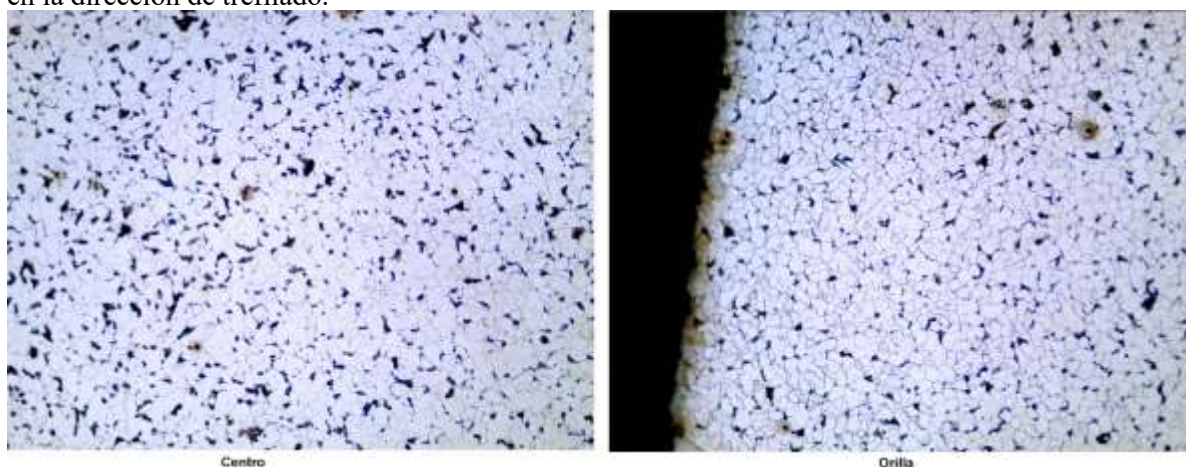
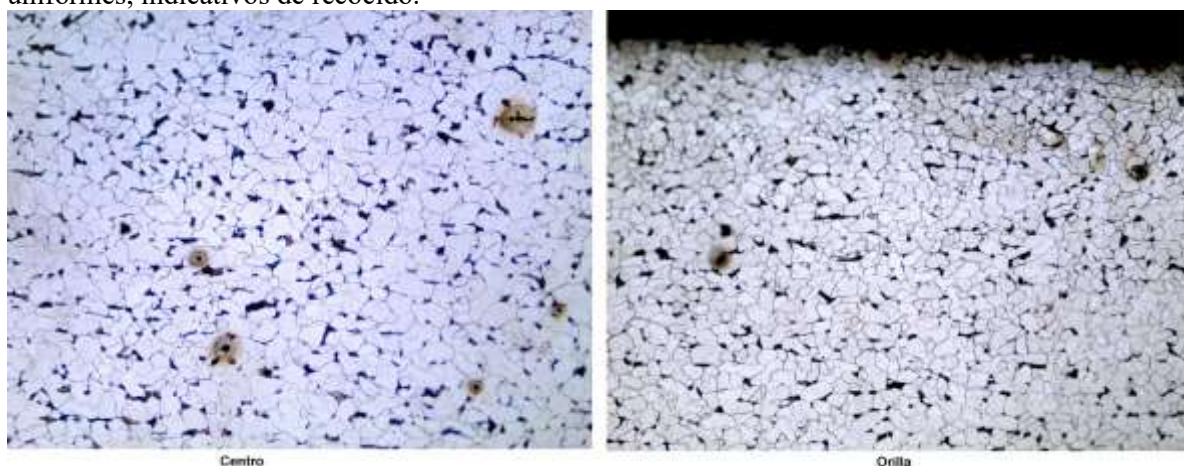


Figura 2. Micrografía (MO, 20×) del material de competencia mostrando granos equiaxiales y uniformes, indicativos de recocido.

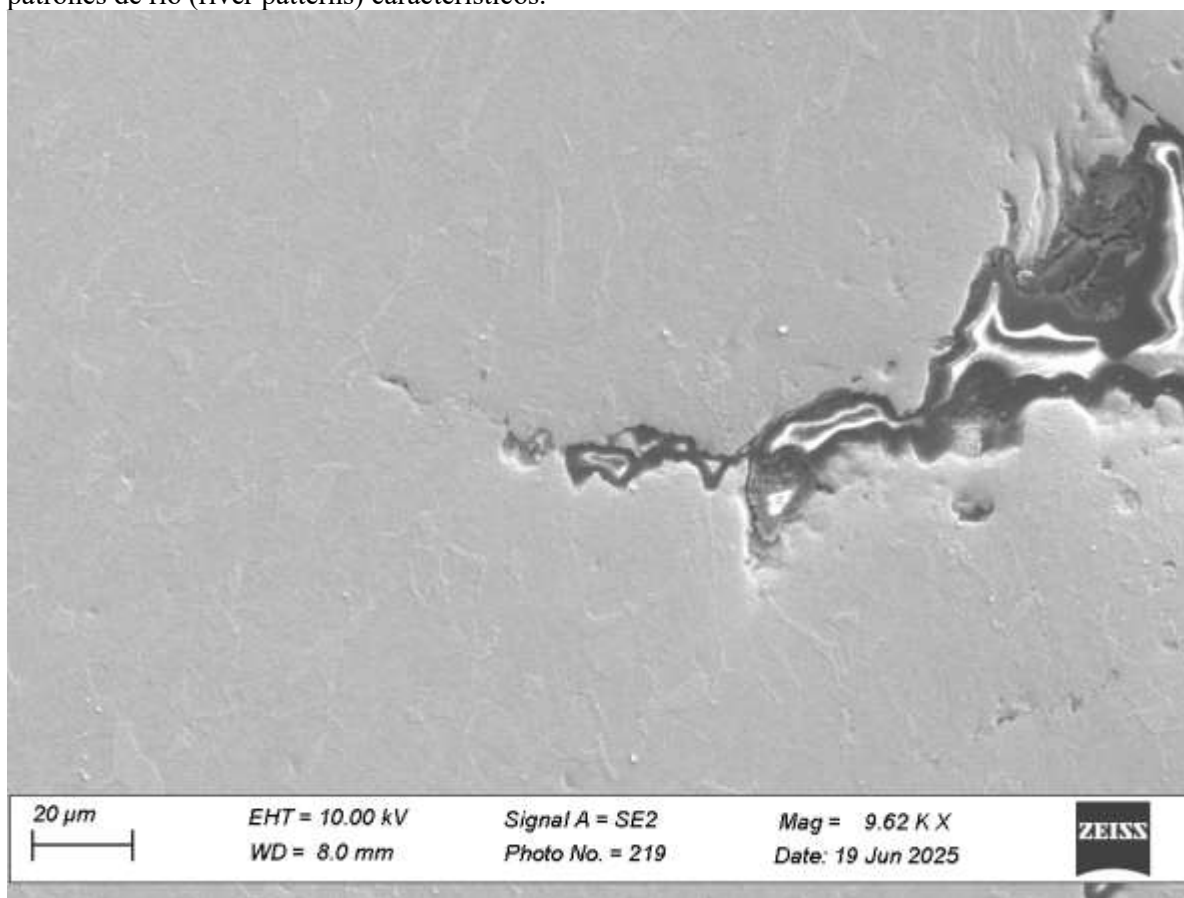


Fractografía (SEM)

Durante la extrusión de la brida, la geometría del componente induce un estado de tensiones triaxial. Winiarski (2024) demostró que en geometrías con alta restricción plástica, el índice de triaxialidad puede alcanzar valores de 0.7-0.9, lo que reduce la deformación crítica a fractura. Bajo estas exigentes condiciones, los materiales con alto índice YS/UTS propician el agrietamiento intergranular. El análisis topográfico por FE-SEM validó plenamente este mecanismo. En la zona de fractura de las tuercas grandes, se observó una morfología dominada por fractura frágil con evidentes facetas de clivaje y topografía escalonada (river patterns) (Figura 3), confirmando los postulados fractográficos clásicos de ASM International (2004) para materiales que agotan su conformabilidad.

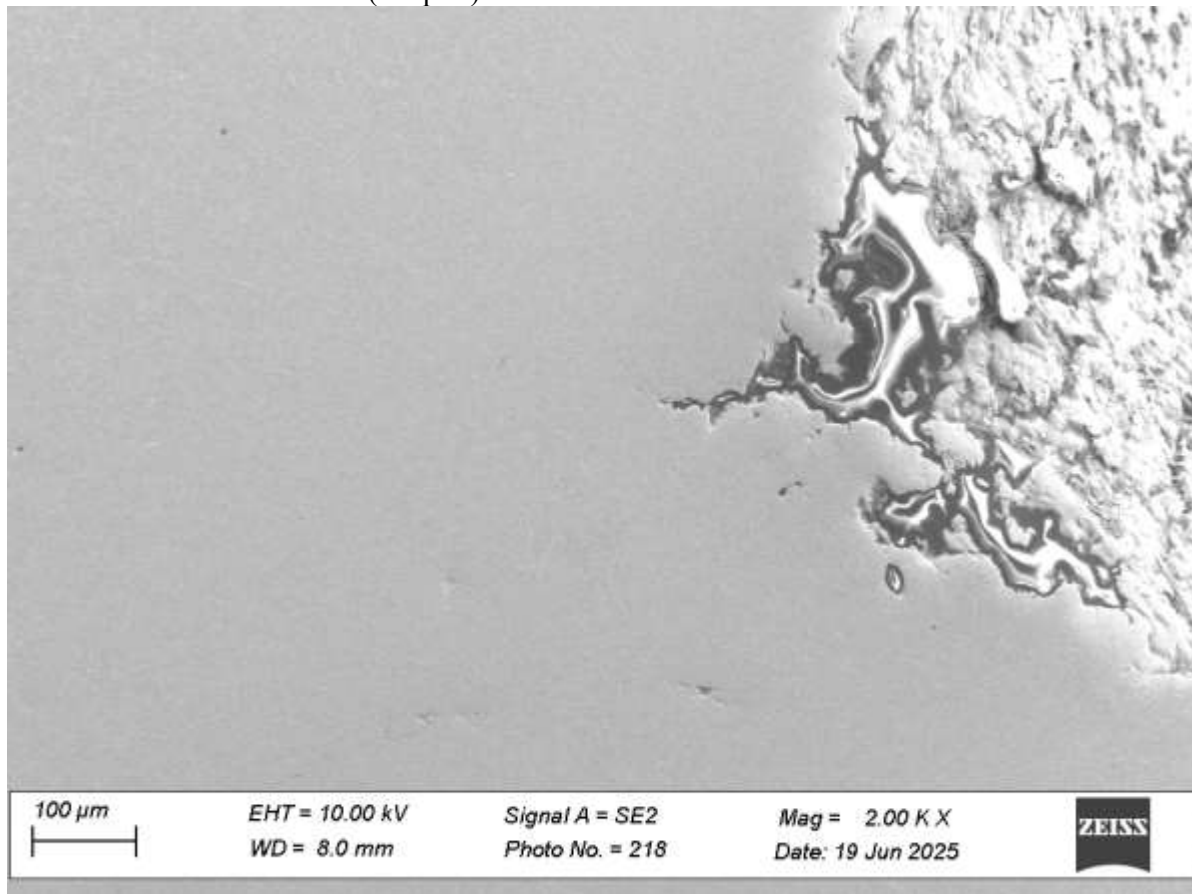
Las facetas de grano observadas en el SEM son características de una fractura por separación intergranular, donde la propagación de la grieta ocurre preferentemente a lo largo de los límites de grano. Este mecanismo es típico de materiales con alta densidad de dislocaciones y tensiones internas, donde los límites de grano se convierten en el camino de menor resistencia (ASM International, 2004). Zhao et al. (2025) observaron un comportamiento idéntico en aceros de bajo carbono con relaciones YS/UTS superiores a 0.95, confirmando que la fractura intergranular es el mecanismo predominante en estas condiciones.

Figura 3. Micrografía SEM de la fractura en tuerca grande mostrando facetas de fractura frágil y patrones de río (river patterns) característicos.



En el caso de la tuerca pequeña ($\varnothing 9.13$ mm), la fractura fue 100% intergranular, con ausencia total de microhuecos (dimples) que son característicos de la fractura dúctil (Figura 4). Esto confirma la nula capacidad de deformación plástica del material en este diámetro, consistente con la mayor deformación real ($\epsilon = 0.208$) experimentada durante el trefilado.

Figura 4. Micrografía de la fractura en la tuerca pequeña, la fractura fue 100% intergranular, con ausencia total de microhuecos (dimples)



Mecanismo de Fractura y Propuesta de Solución

El mecanismo de fractura se sintetiza en tres etapas:

- Trefilado agresivo: La deformación real $\epsilon > 0.15$ genera una alta densidad de dislocaciones ($>10^{15} \text{ m}^{-2}$) y granos alargados.
- Elevada relación YS/UTS (>0.95): El material pierde su capacidad de endurecimiento por deformación, con $n \approx 0$.
- Triaxialidad de tensiones: La geometría de la tuerca flange concentra tensiones en la transición cuerpo-brida (índice de triaxialidad 0.7-0.9), gatillando una fractura frágil intergranular (Zhao et al., 2025).

Con base en estos datos, la fractura se diagnostica como resultado de un trefilado inadecuado sin tratamiento térmico compensatorio. Para solventar esto, se propone y valida la implementación de un recocido de recristalización a 680 °C durante 1.5 horas. Como lo establecen los principios fundamentales

de la ciencia de materiales, esta aportación de energía térmica es la encargada de activar la difusión atómica necesaria para aniquilar y reordenar las dislocaciones generadas por el trabajo en frío (Callister y Rethwisch, 2020). De acuerdo con Krauss (2015), este ciclo térmico es específico e indispensable en aceros de bajo carbono como el SAE 1010 para promover la nucleación de nuevos granos equiaxiales libres de tensiones, estabilizando el índice YS/UTS en un rango seguro para la forja.

Zhang et al. (2022) demostraron experimentalmente que el recocido a 680°C durante 1.5 horas reduce la densidad de dislocaciones en cuatro órdenes de magnitud y restaura la ductilidad a niveles superiores al 60% de reducción de área. Estos hallazgos, sugieren que el control preciso de la temperatura es crítico para evitar el crecimiento excesivo de grano.

La evidencia experimental de la eficacia del recocido se encuentra en el material de competencia, que presenta microestructura recrystalizada, YS = 392 MPa, YS/UTS = 0.895 y %EL = 17.7%, valores que garantizan un conformado en frío exitoso.

ILUSTRACIONES, TABLAS, FIGURAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del alambre SAE 1010 y material de referencia.

Figura 1. Micrografía (MO, 20×) del material problemático mostrando granos alargados y deformados en la dirección de trefilado.

Figura 2. Micrografía (MO, 20×) del material de competencia mostrando granos equiaxiales y uniformes, indicativos de recocido.

Figura 3. Micrografía SEM de la fractura en tuerca grande mostrando facetas de fractura frágil y patrones de río (river patterns) característicos.

Figura 4. Micrografía de la fractura en la tuerca pequeña, la fractura fue 100% intergranular, con ausencia total de microhuecos (dimples)

CONCLUSIONES

Las fracturas en las tuercas flange son causadas por un sobre-endurecimiento crítico del material, resultante de un proceso de trefilado con deformación real (ϵ) > 0.15 sin un recocido posterior, que genera una alta densidad de dislocaciones ($>10^{15} \text{ m}^{-2}$) y granos severamente deformados.

La alta relación YS/UTS (>0.95) es el principal indicador del problema, evidenciando la nula reserva de ductilidad del material para soportar un proceso de forja en frío con alta triaxialidad de tensiones.

El mecanismo de fallo es una fractura frágil intergranular, caracterizada por facetas de grano y la ausencia de deformación plástica en la superficie de fractura, confirmada por análisis SEM. Este mecanismo es más severo en el material de menor diámetro ($\varnothing 9.13$ mm), que experimentó la mayor deformación real ($\epsilon = 0.208$).

Se valida que un tratamiento de recocido de recrystalización a 680°C durante 1.5 horas es una solución efectiva. Este tratamiento restaura la microestructura equiaxial, reduce el límite elástico y aumenta significativamente la ductilidad, mejorando la conformabilidad del SAE 1010 y evitando futuros rechazos por fisuras.

Se recomienda la implementación de un control estadístico de proceso que monitoree la relación YS/UTS en el material recibido, estableciendo un límite máximo de 0.90 como criterio de aceptación para garantizar la conformabilidad.

El presente estudio se limita al análisis de un lote específico de SAE 1010; futuras investigaciones deberían explorar el efecto de variaciones en la composición química y el tamaño de grano inicial en la respuesta al trefilado y recocido, así como la validación de modelos cinéticos de recrystalización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alzreedy, A. M. (2022). Effect of process annealing temperature on some tensile properties and microstructure of cold rolled 1010 steel. *Journal of Academic Research (Applied Sciences)*, 22, 12–16. <https://doi.org/10.65540/jar.v22i.469>
- ASM International. (2002). *ASM handbook: Vol. 11. Failure analysis and prevention*.
- ASM International. (2004). *ASM handbook: Vol. 12. Fractography*.
- Callister, W. D. y Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10.^a ed.). Wiley.
- Dieter, G. E. y Bacon, D. R. (1988). *Mechanical metallurgy* (ed. SI). McGraw-Hill.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M. (2011). *Metal forming: Mechanics and metallurgy* (4.^a ed.). Cambridge University Press.
- Kaverynskyi, V. V., Bagliuk, G. A. y Verbylo, D. G. (2022). Effect of work hardening and recrystallization annealing on structure and properties of low-carbon steel wire. *Machines. Technologies. Materials*, 16(2), 74–81.



<https://stumejournals.com/journals/mtm/2022/2/74.full.pdf>

- Krauss, G. (2015). Steels: Processing, structure, and performance (2.^a ed.). ASM International.
- Pradhan, S. K. y Oh, M.-S. (2024). Recrystallization kinetics and the mechanical properties of low-carbon steel during high-temperature annealing in electric furnace. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 48(1), 9–13. <https://doi.org/10.5916/jamet.2024.48.1.9>
- Raji, N. A. y Oluwole, O. O. (2013a). Optimization of the annealing parameters for improved tensile properties in cold drawn 0.12 wt% C steel. *Engineering*, 5(11), 870–876. <https://doi.org/10.4236/eng.2013.511106>
- Raji, N. A. y Oluwole, O. O. (2013b). Recrystallization kinetics and microstructure evolution of annealed cold-drawn low-carbon steel. *Journal of Crystallization Process and Technology*, 3, 163–169. <https://doi.org/10.4236/jcpt.2013.34025>
- Watanabe, A., Fujikawa, S., Ikeda, A. y Shiga, N. (2014). Prediction of ductile fracture in cold forging. *Procedia Engineering*, 81, 425–430. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.017>
- Winiarski, G. (2024). New method for detecting flange fracture initiation in incremental radial extrusion. *Materials*, 17(5), Artículo 1054. <https://doi.org/10.3390/ma17051054>
- Zhang, L., Wu, H. y Chen, G. (2022). Optimization of recrystallization annealing for SAE 1010 steel wires: A comprehensive study on microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2345–2358. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.089>
- Zhao, X., Wang, Y. y Sun, Z. (2025). Intergranular fracture mechanisms in cold-worked low-carbon steels under triaxial stress states. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 130, Artículo 104789. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.104789>

