

# Análisis de falla en perno de sujeción de unidad de bombeo mecánico Lufkin a640d – 427 – 144

Ing. Henry Santamaría de la Cruz\*

*\*Magister en Ingeniería Mecánica. Docente Catedrático  
Universidad Autónoma del Caribe. Programa de Ingeniería Mecánica  
E-mail: henry.santamaria@uniautonomia.edu.co*

## RESUMEN

Este artículo presenta el análisis de falla de un perno de sujeción de una unidad de bombeo mecánico marca Lufkin; modelo A640D – 427 – 144. El informe se encuentra estructurado en las siguientes partes principales: Antecedentes, Examen macroscópico de la parte fallada, identificación del modo de falla, inspección microscópica, análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones. Las unidades de bombeo mecánico son muy utilizadas por la industria petrolera nacional, por lo tanto, se encuentran en muchas zonas petroleras del país. Las fallas de pernos en estos tipos de máquinas son muy comunes, no siendo así los análisis de falla. Por lo que este trabajo pretende ser una primera aproximación al estudio de falla de pernos de sujeción en unidades de bombeo mecánico.

**Palabras clave:** Análisis de falla, modos de falla, perno, unidad de bombeo mecánico.

## ABSTRACT

This article presents the analysis of failure of a bolt of subjection of a mechanical pumping unit Lufkin; model A640D - 427 - 144. The report is structured in the following main parts; Antecedents, macroscopic Examination of the failed part, identification of the failure modes, microscopic inspection, analysis of results, conclusions and recommendations. The units of mechanical pumping very are used by the national oil industry, therefore, they are in many oil zones of the country. The bolt failures in these types of machines are very common, not being therefore the fault analyses. Because this work tries the first approach to the study of failure of subjection bolt in mechanical pumping units.

**Keywords:** Analysis of failure, failure modes , bolt, mechanical pumping units.

## NOMENCLATURA

Resistencia mínima de prueba [Lb/in<sup>2</sup>]

Resistencia de fluencia mínima [Lb/in<sup>2</sup>]

Resistencia a la tensión mínima [Lb/in<sup>2</sup>]

*Símbolos*

(Kpsi)

1000 [Lb/in<sup>2</sup>]

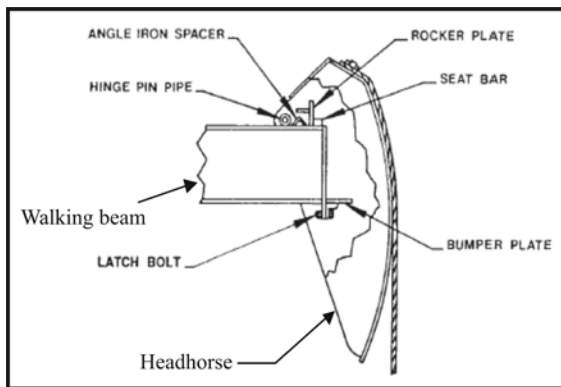
## INTRODUCCIÓN

La falla ocurrió en el perno de sujeción que mantiene unido los componentes denominados horse head

y working beam, tal como se muestra en la Fig. 1. En la Fig. 2 se presenta la panorámica general del colapso del horse head.

Los componentes nombrados pertenecen a una unidad de bombeo mecánico de hidrocarburos. Las especificaciones técnicas del equipo se presentan en la Tab. 1. La falla generó daño en las estructura y mecanismos de balancín. Además de esto el motor que transmitía la potencia tuvo un doblez que obligó al cambio de este dispositivo.

**Figura 1.** Ubicación de los componentes en la unidad de bombeo.



**Tabla 1.** Especificaciones técnicas.

Equipo	Unidad de bombeo mecánico
Marca	Lufkin
Modelo	A640D - 427 - 144
Capacidad - Torque máximo	640.000 Lbf*pulg.
Gpm x carrera	11 x 144 pulg.
Velocidad de giro	10 rpm

Las horas de servicio e historial de mantenimiento de la bomba no se encuentran disponibles al momento del análisis. Según datos suministrados, el perno de sujeción correspondería a un tornillo de 3/4"-UNC grado 5 y longitud 2 1/4". Según Norton[1] un perno con estas características tendría las propiedades mecánicas que se muestran en la Tab. 2.

**Figura 2.** Panorámica general del colapso.



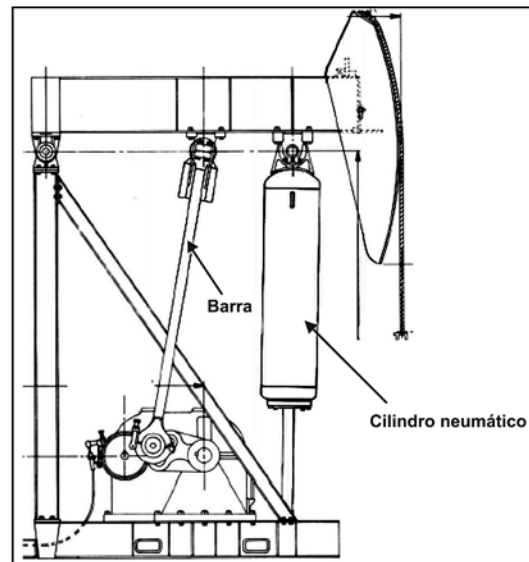
**Tabla 2.** Especificación SAE y resistencia para perno de acero grado 5.

Número Grado SAE	Resistencia mínima de prueba (kpsi)	Resistencia de fluencia mínima (kpsi)	Resistencia a la tensión mínima (kpsi)	Material
5	85	92	120	medio carbono, templado y revenido

El personal de la empresa reporta rotura de perno de unión de horse head y walking beam debido a impacto generado por el impulso que generó la viga en su carrera ascendente por la brusca expansión del aire comprimido en el cilindro neumático una vez fue liberado el freno de la unidad del pozo DK-22, ocasionan-

do el colapso del componente horse head y pandeo del extremo libre de la barra lisa. Un esquema del equipo completo se presenta en la figura 3. La falla ocurrió el día septiembre 27 de 2004 en horas de la madrugada.

**Figura 3.** Esquema de unidad de bombeo mecánico.



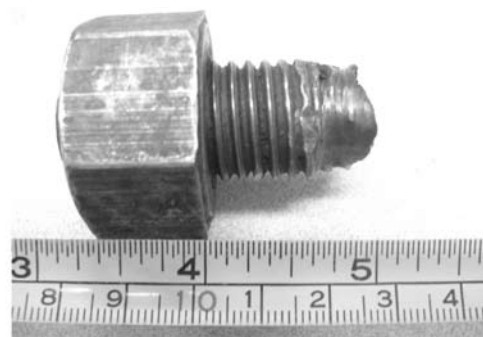
Tomada y modificada de catálogo Lufkin for installation manual M-02

## METODOLOGÍA

### INSPECCIÓN VISUAL DE LA PARTE FALLADA

Para identificar la causa real de la falla, se comenzó por un análisis visual macroscópico del perno fracturado, observándose residuos de grasa a lo largo de los hilos del tornillo. Uno de los extremos fallados del perno se encuentra enroscado en la tuerca y presenta desgaste excesivo cerca de la zona de fractura, como se aprecia en la figura 4. Además, en la superficie de fractura se distingue presencia de corrosión incipiente. En la figura 5 se muestra la zona de fractura vista de perfil, en la cual se alcanza a apreciar una grieta en el fondo de uno de los hilos del tornillo y cerca de la zona de fractura.

**Figura 4.** Extremo inferior del perno fallado muestra evidencia de desgaste excesivo en zona de fractura.



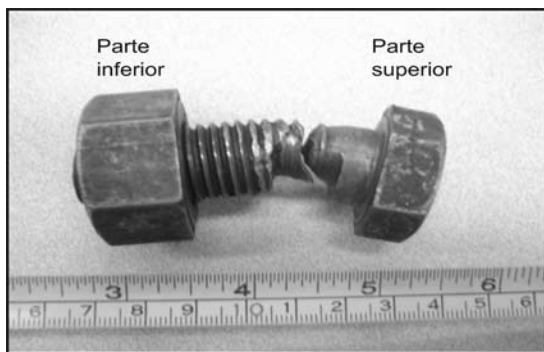
**Figura 5** Acercamiento de la zona de desgaste.



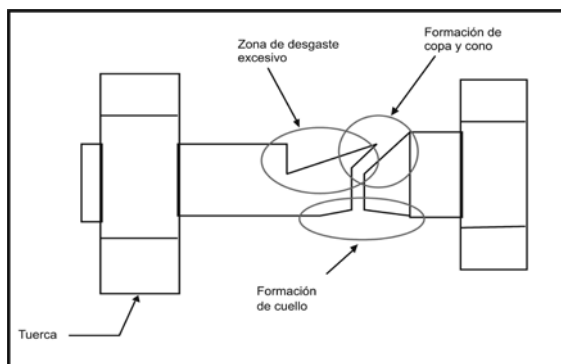
En la figura 6 muestra la forma final de perno de sujeción después de fractura. Se observa la forma de “banana” que adquiere posiblemente como resultado de una carga lateral excesiva. Un esquema de la parte fallada se muestra en la figura 7, en la cual se aprecia la formación de un cuello cerca de la zona de fractura, formación de copa y cono con labio de 45° respecto al plano de fractura. En la misma figura se aprecia una reducción apreciable del área transversal del perno debido a desgaste excesivo [2]. La existencia de un cuello es un indicio de deformación plástica antes que ocurra la falla. En la figura 8 se muestra la parte inferior del perno fracturado, en la cual se señala la ubicación de una gran grieta macroscópica en el fondo del hilo del tornillo.

La figura 8 muestra que muy cerca de la zona de falla se observa una grieta en el fondo del hilo del tornillo.

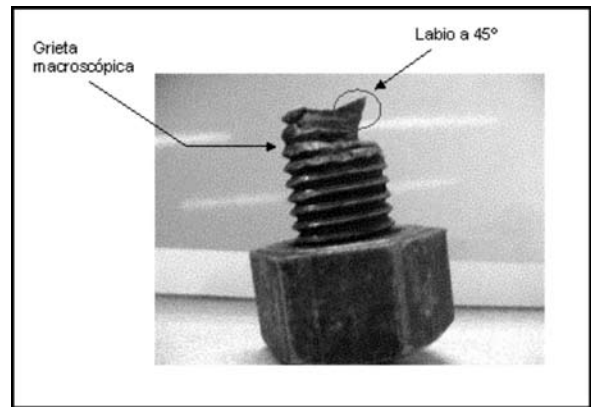
**Figura 6.** Esquema del componente después de la falla.



**Figura 7.** Fotografía extremo inferior del perno fracturado.



**Figura 8.** Fotografía extremo inferior del perno fracturado



En la figura 9 se aprecia la topografía de la superficie fracturada. La superficie lisa es producto de un esfuerzo de corte y la rugosa de un esfuerzo de tensión. Al analizar el relieve de la superficie de la fractura (ver figura 9) para ambas partes se observó una serie de marcas tipo abanico en la superficie de la rotura de la pieza inferior al perno. Haciendo el rastreo de las marcas se obtiene el origen de la grieta, como se muestra en la figura 10. El desgaste del perno se cree que es debido a las malas propiedades mecánicas de las partes en contacto. Posiblemente las durezas de perno y guía son muy diferentes.

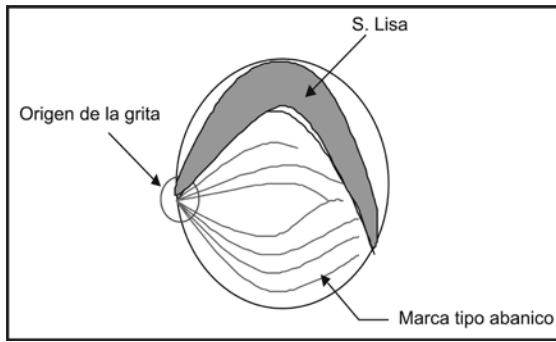
**Figura 9.** Topografía de la superficie de fractura



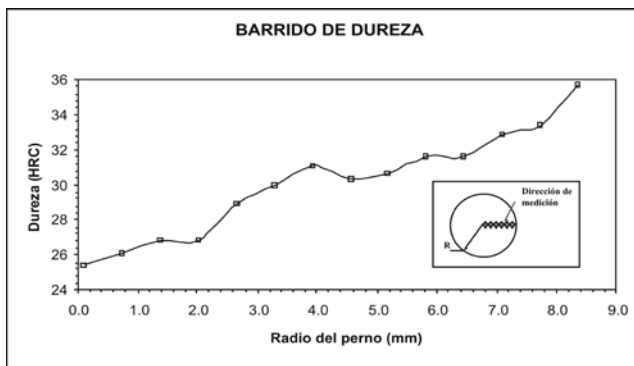
$$\frac{dC}{dw} = \frac{du}{dw} \cdot F_u + \frac{dv}{dw} \cdot F_v$$

Actualmente no se cuenta con la pieza que sujetaba al perno y, por lo tanto, no se puede medir sus propiedades mecánicas. Además, existía juego excesivo entre guía y perno que a su vez acelera el mecanismo de desgaste. Para evaluar la dureza en el perno se hizo un barrido de dureza a lo largo de la sección transversal, como se muestra en la figura 11. En la figura 12 se ejemplifica la guía de conexión donde se alojaba el perno.

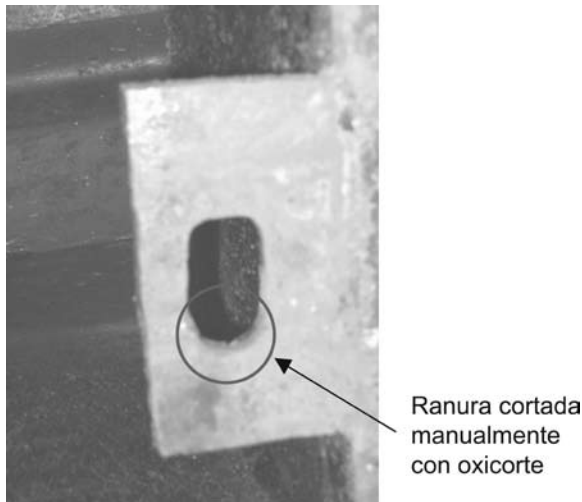
**Figura 10.** Representación esquemática de la superficie de fractura en la parte inferior del perno fallado.



**Figura 11.** Barrido de dureza a lo largo de la sección transversal del perno fallado.



**Figura 12.** Guía de conexión del perno.

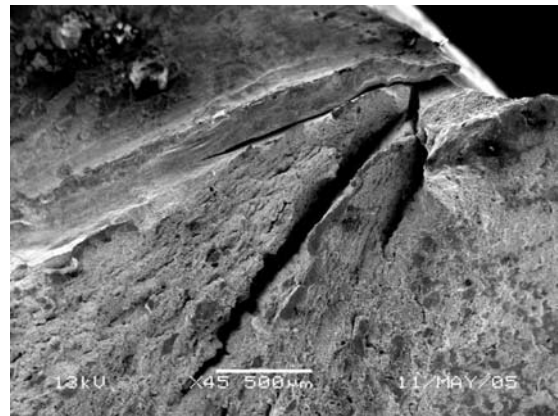


**INSPECCIÓN MICROSCÓPICA**

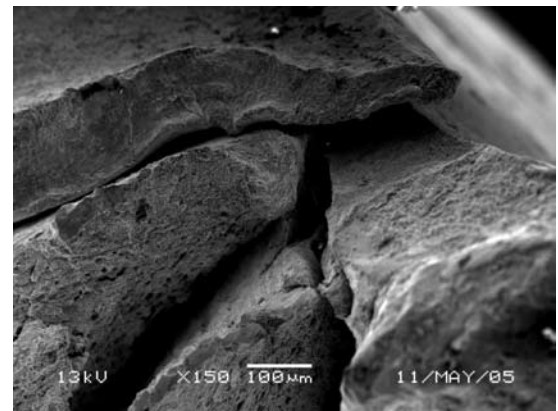
Se cortó una pequeña muestra que contenía el origen de la zona marcada por el círculo en la figura 10. Además se utilizó limpieza ultrasónica para lavar la superficie de fractura y luego se examinó la pieza en un microscopio de barrido electrónico (SEM por sus siglas en inglés). El inicio de la grieta es mostrado en la figura 13 y una ampliación de la zona en la figura 14. En estas figuras se observa claramente cómo las marcas tipo abanico detectadas en el examen macroscópico convergen al punto de inicio de la fractura. Por otra

parte, nótese cómo coexisten tres fisuras en la misma fractura. En la figura 16 se observa la fractografía típica de la superficie fracturada resultante de una falla de un material tipo dúctil; se caracteriza por su topografía fibrosa y presencia de copa y cono. Por otro lado, en la figura 16 se evidencia la presencia en menor grado de falla tipo frágil por clivaje.

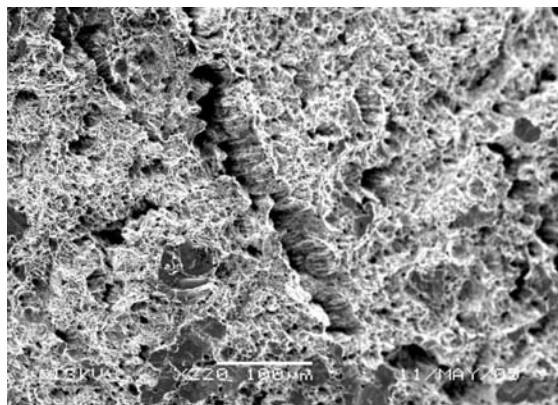
**Figura 13.** Fractografía SEM del origen de la grieta que muestra la convergencia de las marcas de fractura tipo abanico. Aumento: 45X.



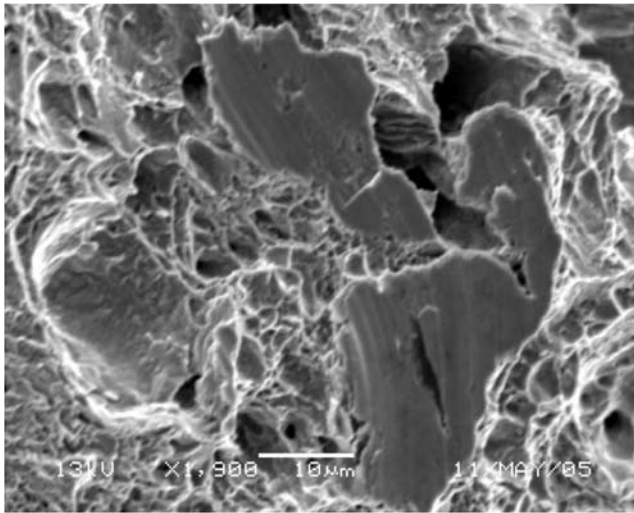
**Figura 14.** Fractografía SEM del origen de la grieta. Aumento: 150X.



**Figura 15.** Fractografía SEM en la región de fractura. Aumento: 220X.



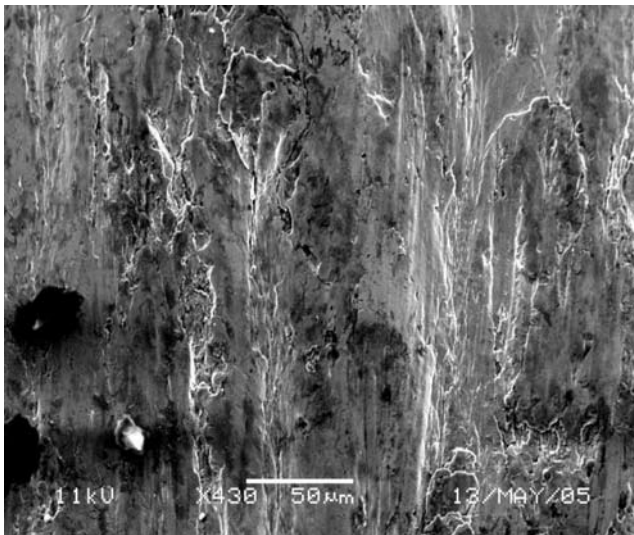
**Figura 16.** Fractografía SEM en la región de fractura. En la región de fractura se observa presencia de superficies lisas. Aumento: 1900X.



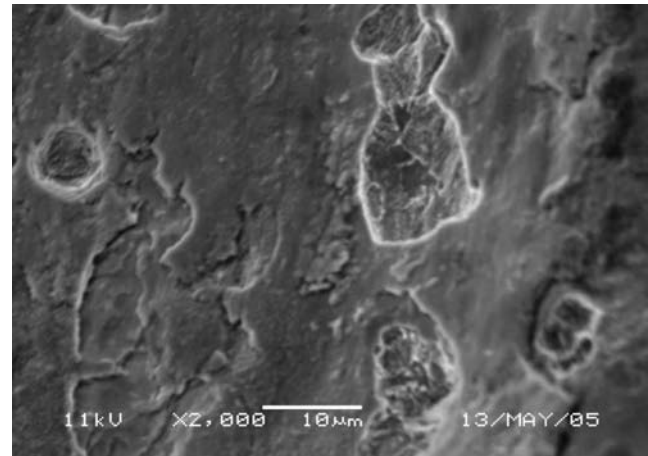
### INSPECCIÓN DE LA SUPERFICIE DESGASTADA

Al examinar la superficie desgastada del flanco del perno se nota un tipo de desgaste adhesivo, caracterizado por desgarramiento del material y rugosidad microscópicas, como se muestra en las figuras 17 y 18. En la figura 17 se aprecia la aspereza de la superficie debida a deslizamiento de una superficie respecto a la otra bajo presión; como consecuencia aparecen marcas longitudinales. En la figura 18 se revela con detalle el desgarramiento del material debido a micro soldaduras que se forman y se fragmentan durante el proceso de deslizamiento de una superficie respecto a la otra, originando el fenómeno de desgaste por adhesión que luego se combina con el desgaste abrasivo producido por las partículas de material desprendidas.

**Figura 17.** Fotografía SEM de la zona de desgaste del perno. Aumento: 430X.



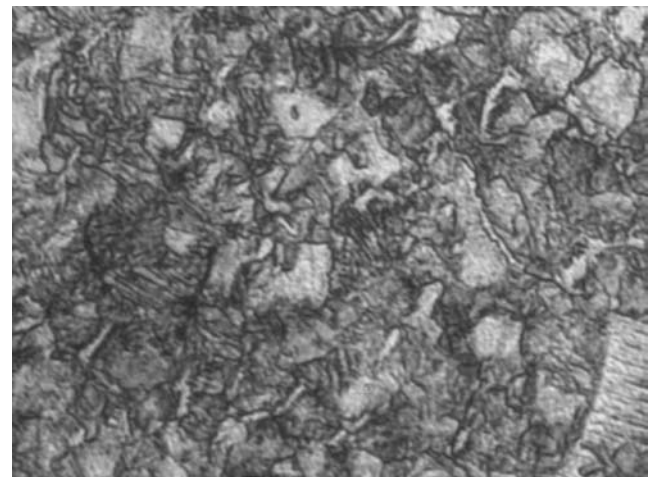
**Figura 18.** Fotografía SEM de la zona de desgaste del perno. Aumento: 2000X.



### ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Se cortó una pequeña muestra cerca de la región que contiene al origen de la fractura, se preparó metalográficamente la probeta y se observó en un microscopio óptico en su condición atacada. Después del ataque con Nital al 2% (2% de HNO<sub>3</sub> en etanol), el material mostró una estructura martensítica revenida, como se aprecia en la figura 19.

**Figura 19.** Fotomicrografía óptica que muestra la microestructura del material constitutivo del perno. Se aprecia martensítica revenida. Aumento: 200X.



### PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las características fractográficas grosso modo indican al desgaste adhesivo como el mecanismo que inició la falla en el perno. A medida que el desgaste del perno fue progresando el área neta efectiva resistente a esfuerzo se reduce. Esto indica que la falla fue progresiva en sus inicios. Rastreando las marcas dejadas por la fisura, se determinó el origen de la grieta y se encontró que estaba ubicado en el fondo de uno de los hilos del tornillo.

El hecho que la grieta se haya originado en el fondo de uno de los hilos del tornillo, indica concentración de esfuerzos en este punto. De las observaciones se podrían extraer varias razones para la concentración de esfuerzos en el origen de la grieta. Estas son: (i) presencia de grietas previas al ensamble; (ii) superficie rugosa y desgarramiento de material debido a desgaste adhesivo; y (iii) reducción del área neta efectiva de esfuerzo debida a desgaste. Uno o más de los factores mencionados podrían producir una muesca o concentrador de esfuerzo de suficiente magnitud para causar la iniciación de la grieta. El examen microscópico reveló la presencia de zonas de fractura frágil por clivaje que pueden ser resultado de direcciones de esfuerzos desfavorables a la orientación de algunos planos atómicos [3].

El desgaste adhesivo de metal a metal en este caso se acentúa por el hecho de acoplar superficie endurecida con superficie (perno) suave (guía de perno). Además de la evidente holgura entre perno y guía.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Existe evidencia sólida para afirmar que la falla se dio por fractura frágil.
- El mecanismo de falla es una combinación de esfuerzos de tensión con esfuerzos de corte genera-

dos por cargas de tensión.

- La forma "banana" que tiene el perno es un indicio de existió una caga lateral sobre el perno que produjo deformación plástica. Posiblemente debido a un ajuste deficiente entre la guía y el perno.
- Se favoreció la condición de desgaste al acoplar dos superficies con diferentes durezas y permitir deslizamiento relativo entre ellas sin lubricación.
- La grieta se origina en solo punto como lo evidencia el rastreo de las marcas tipo abanico.
- La presencia de una grieta cerca de la zona de fractura genera concentradores de esfuerzos y posiblemente una grieta similar generó la falla catastrófica.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NORTON, R. Machine Design: An integrated approach. New Jersey: Prentice hall, 1996. p. 914
- [2] WULPI, D. Understanding How Components Fail. 7<sup>th</sup>. Edition. USA: American Society for Metal, 1977. p.36.
- [3] BUDINSKY, K and BUDINSKY, M. Engineering Mateerias: Properties and Selection. Sixth edition. Prentice hall: New Jersey, 1999. 719 p.