

## DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LA HERRAMIENTA DE EXTRACCIÓN DE LA FLECHA MOTRIZ DEL HELICÓPTERO BELL 407

### Determination of national manufacture material for bell 407 kaflex tool

#### RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el material de fabricación de la herramienta Kaflex que presentó ruptura dentro de las labores de mantenimiento del helicóptero Bell 407. El análisis metalográfico reveló una microestructura granular ferrítica y 190 HV. Sus propiedades mecánicas se determinaron por medio de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica. Se construyó la curva de resistencia residual de la herramienta para establecer su tiempo de vida. Adicionalmente se simuló la falla de la herramienta Kaflex mediante el Método de Elemento Finito. De acuerdo a la microestructura y propiedades mecánicas el material es acero inoxidable AISI 430.

**PALABRAS CLAVES:** herramienta, fractura, inoxidable

#### ABSTRACT

*In this project, the material for national manufacture of Kaflex tool, used in Bell 407 main rotor driveshaft extraction, was determined. This tool suffered fracture on service during the B407 maintenance labours. The compressor screw of Kaflex tool was analyzed by Metallographic analysis revealed a stainless ferritic steel microstructure with 190 HV.*

*The mechanical properties were calculated by Linear Elastic Fracture Mechanics. With analytic data, residual strength curve was drawn, indicating an approach tool life time. Kaflex tool collapse was simulated with Finite Element Method. Agree with mechanical properties and microstructure, sample matches with AISI 430 stainless steel.*

**KEYWORDS:** tool, fracture, stainless. alfabéticamente.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del procedimiento de inspección de aeronaves de ala rotativa; es de extrema importancia la habilitación de la flecha motriz del rotor principal (Fig. 1). Para ello se necesita desmontar dicho elemento transmisor, y realizar las tareas indicadas en el manual del fabricante.

La problemática gira en torno a este inciso, a causa de que la herramienta de sujeción y extracción de la flecha motriz (herramienta Kaflex (Fig. 2.)) ha presentado ruptura durante su utilización en numerosas ocasiones aún y cuando ha sido manejada con el método y precauciones señalados.

El presente trabajo tiene por objetivo, determinar el material de fabricación de la herramienta Kaflex mediante un análisis metalográfico y del estudio de la falla por medio de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica. La finalidad de ello es indicar la causa probable del colapso.

#### MAURICIO TORRES

Ingeniero Aeronáutico.  
Estudiante de Maestría  
Instituto Politécnico Nacional  
mtorresa@prodigy.net.mx

#### VICTOR SAUCE

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc.  
Profesor Investigador  
Instituto Politécnico Nacional  
sauvic@hotmail.com

#### ANTONIO MOSQUEDA

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc.  
Profesor Investigador  
Instituto Politécnico Nacional  
mossantony@hotmail.com

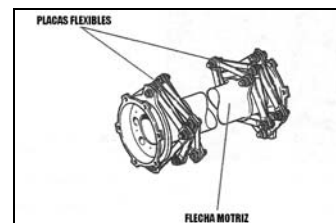


Fig. 1 Esquema de la flecha motriz [1].

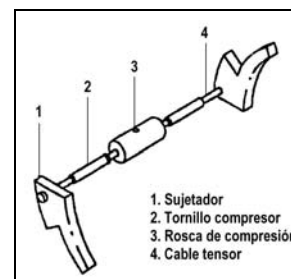


Fig. 2 Dibujo de la herramienta de extracción y sujeción Kaflex [2].

Para verificar los resultados del procedimiento experimental y analítico, la herramienta Kaflex se dibuja conforme a las especificaciones del Manual de Mantenimiento General del helicóptero Bell 407 y se analiza mediante el Método de Elemento Finito aplicando las cargas de servicio. Esto da como resultado la simulación de la fractura dentro del rango lineal elástico.

**2. CONTENIDO**

**2.1 Análisis Metalográfico**

Primeramente se tomó una muestra de la herramienta, específicamente del tornillo compresor, componente en el cual se presentó la fractura.

Se le realizó un análisis metalográfico conforme a la metodología expuesta en la norma *ASTM D 648*.

Cabe aclarar que la microestructura presente puede diferir debido a la deformación sufrida y a los tratamientos térmicos y superficiales a los que el material fue sometido, así como del proceso de manufactura con el que fue confeccionado.

Posteriormente se realizó una prueba de dureza Vickers, registrándose una lectura de HV 190.

Adicionalmente, la muestra se sometió a una prueba magnética, con la finalidad de confirmar el tipo de acero grado inoxidable.

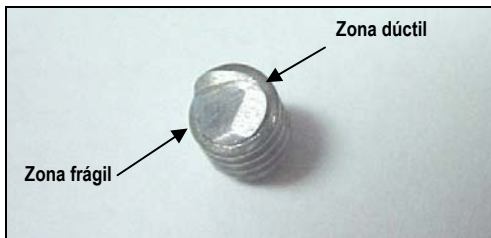


Fig. 3 Tornillo compresor en la zona de falla.

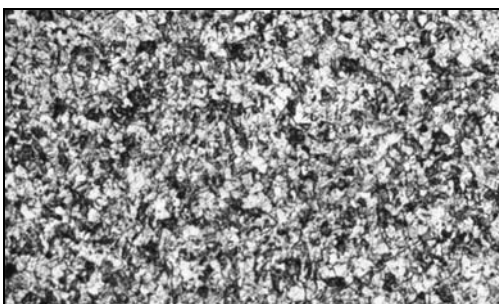


Fig. 4 Micrografía del tornillo en la zona de fractura, 100 X.

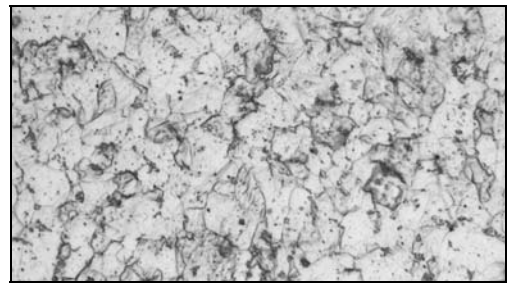


Fig. 5 Micrografía del tornillo en la zona de fractura, 500 X.

**2.2 Determinación del esfuerzo de cedencia del material por medio de mecánica de la fractura**

La mecánica de la fractura se basa en el cálculo de los esfuerzos y deformaciones a lo largo de una grieta, los cuales en conjunto, provocan el desplazamiento relativo de las superficies del cuerpo en un punto; ocasionando la fractura.

En el caso particular del componente fracturado (tornillo compresor), éste es sometido en servicio a un esfuerzo de tensión uniaxial. Con esto, es posible proponer el modo de desplazamiento que sufre la fractura.

Dentro de los modos básicos de desplazamiento de superficies agrietadas; se encuentra el Modo I, es decir la apertura de la grieta en dirección perpendicular al plano de fractura [4].

Considerando el tornillo como una placa con grietas laterales, éstas se pueden unificar en una sola sumando las longitudes de las mismas (Fig. 6).

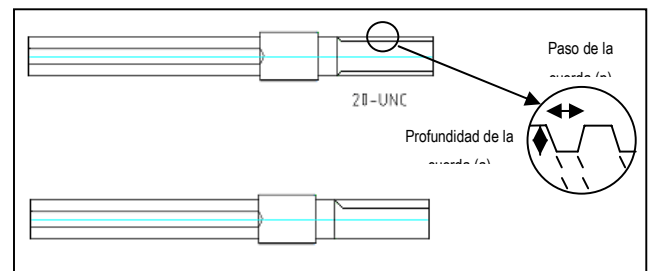


Fig. 6 Tornillo compresor con grietas cordales, el cual puede representarse con una grieta unificada.

Las ecuaciones [4] que definen a cualquier elemento mecánico en estado de esfuerzo uniaxial con grieta lateral son:

$$a' = \frac{a}{W} \dots(1)$$

$$Y_t = 1.99 - 0.4 a' + 18.7 a'^2 - 34.8 a'^3 + 53.85 a'^4 \dots (2)$$

$$K_{IC} = Y_t \sigma_f \sqrt{a} \dots (3)$$

donde:

- a.- Longitud de la grieta
- W.- Longitud de la placa (diámetro nominal del tornillo)
- Y<sub>f</sub>.- Factor geométrico de la grieta
- σ<sub>f</sub>.- Esfuerzo de fractura del material

El tornillo al ser de dimensiones normalizadas, presenta una cuerda 20 UNC (veinte hilos por pulgada). Con esto es posible determinar el paso (p) con la siguiente expresión:

$$p = \frac{1}{n_c} \dots\dots(4)$$

$$p = a = 0.05 \text{ in} = 1.2 \text{ mm}$$

n<sub>c</sub>.- Número de hilos por pulgada.

El tipo de cuerda que presenta mayores concentraciones de esfuerzo es de tipo cuadrado, ya que la terminación de los bordes de los hilos son ángulos rectos, y que propician la propagación de la apertura de grietas. Es por ello que la profundidad de la cuerda (longitud de la grieta), se considera igual al paso calculado.

Ya que el objetivo es determinar el material que sufrió la fractura para las condiciones de servicio en que se opera la herramienta, se define la tenacidad a la fractura (K<sub>IC</sub>) de aceros aleados:

$$K_{IC} = 60 \text{ MPa} \sqrt{m} \quad ; \quad \sigma_f = 300 \text{ MPa}$$

Una vez calculado el esfuerzo de fractura (σ<sub>f</sub>), se determina a partir de este; el esfuerzo de cedencia (σ<sub>0</sub>). Este parámetro es de gran relevancia para complementar la información de las propiedades mecánicas del material. El esfuerzo de cedencia (σ<sub>0</sub>) está definido por la siguiente ecuación [4]:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_f}{1 - \frac{a}{W}} \dots\dots (5)$$

$$\sigma_0 = 500 \text{ MPa}$$

Finalmente la carga de fractura (P<sub>c</sub>), también llamada resistencia residual [7], se define a partir del esfuerzo de fractura sobre el área transversal (A<sub>t</sub>) del componente estudiado:

$$P_c = \sigma_f A_t \dots\dots (6)$$

$$P_c = 9.5 \text{ KN} = 968 \text{ Kgf}$$

donde:

- P<sub>c</sub>.- carga de fractura
- A<sub>t</sub>.- área transversal del componente

### 2.3 Resistencia residual (Curva CRR) y tamaño mínimo de grieta

La principal aportación de la mecánica de la fractura es que permite analizar la relación existente entre tenacidad (K<sub>IC</sub>), la carga aplicada (P<sub>c</sub>) y el tamaño de la grieta (a) de un componente mecánico.

Si se grafica el esfuerzo a la fractura en función del tamaño de grieta (σ<sub>f</sub> - a), se obtiene un diagrama denominado *Curva de Resistencia Residual (CRR)*, esquematizado en la Fig. 7, que es un registro adicional para la comprensión del comportamiento de la ruptura del material.



Fig. 7 Esquema de la Curva de Resistencia Residual.

La zona de tolerancias de grietas es la que se encuentra por debajo de las curvas de esfuerzo de fractura. Cualquier combinación que quede por arriba de este límite significa la ruptura de la estructura.

Para delimitar la zona de tolerancia de grietas en la cual la herramienta será operable, se debe calcular el tamaño máximo permisible conocido como *tamaño crítico de grieta* (a<sub>c</sub>) definido por el esfuerzo normal de servicio (σ<sub>T</sub>) [4].

$$a_c = \left( \frac{K_{IC}}{Y\sigma_T} \right)^2 \dots\dots(7)$$

$$a_c = 2.85 \text{ mm}$$

donde:

- a<sub>c</sub>.- tamaño crítico de grieta
- σ<sub>T</sub>.- esfuerzo normal de servicio

También es de interés conocer que tamaño de grieta implicaría un riesgo de fractura si durante el servicio ocurriese una carga súbitamente alta, pero menor que la de diseño.

A éste se el conoce como *tamaño mínimo de grieta* ( $a_{min}$ ). Recibe este nombre debido a que si es posible detectar una hendidura de esta magnitud, la estructura está en riesgo de fractura.

El tamaño mínimo de grieta se puede calcular sustituyendo el esfuerzo máximo de servicio. Si el esfuerzo máximo de operación se propone al *esfuerzo último de tensión* ( $\sigma_U$ ):

$$a_{min} = \left( \frac{K_{IC}}{Y\sigma_U} \right)^2 \dots (8)$$

$$a_{min} = 1.27 \text{ mm}$$

donde:

$a_{min}$  - tamaño mínimo de grieta

$\sigma_U$  - esfuerzo último a tensión

Establecidos los límites de la zona de tolerancia de grietas, y tabulando los valores acorde a la ecuación de intensidad de esfuerzos se grafica la Curva de Resistencia Residual del tornillo compresor (Fig. 8).

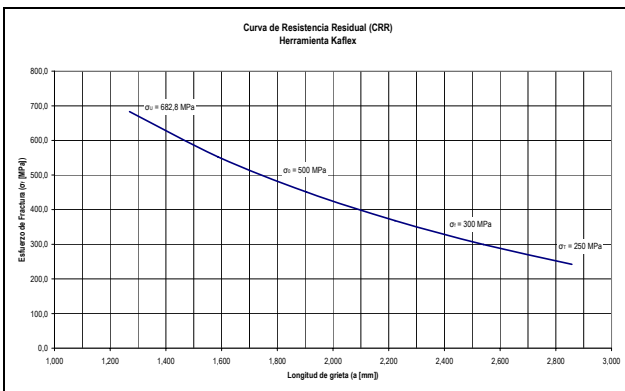


Fig. 8 Curva de Resistencia Residual para la Herramienta Kaflex

#### 2.4 Estudio del tornillo compresor por el Método del Elemento Finito

Conforme a las especificaciones enunciadas dentro del Manual General de Mantenimiento del helicóptero Bell 407 [2], la herramienta Kaflex fue modelada dentro de un ambiente de diseño asistido por computadora (Fig. 9).

Las dimensiones nominales de cada uno de sus componentes fueron verificadas con mediciones prácticas utilizando calibradores vernier y tornillos micrométricos.

Las condiciones de frontera con las cuales se simula la falla de la herramienta Kaflex, provenientes tanto de la metalografía como del análisis de mecánica de la fractura, son:

Tabla 1 Parámetros utilizados para simular la falla del tornillo compresor de la herramienta Kaflex.

$\sigma_0$	500 MPa	Esfuerzo de cedencia
$\sigma_U$	682 MPa	Esfuerzo último a tensión
$P_{crit}$	968 kgf	Carga crítica
$E^{[8]}$	207 GPa	Módulo de Elasticidad
$\nu^{[8]}$	0.3	Módulo de Poisson

Inicialmente el modelo de la herramienta Kaflex dibujado en el software Mechanical Desktop® se exporta a la plataforma de ANSYS™ como archivo de extensión (\*.sat), como se ilustra en la Fig. 10.

Se asignan las propiedades mecánicas y estructurales del tornillo compresor. El modelo se malla con elementos finitos Brick Solid 45, que describieron el comportamiento de la herramienta Kaflex en condiciones de servicio.

Se restringen los grados de libertad en los tres ejes de la sección cordal (empotramiento del tornillo) y se aplica la carga crítica calculada en el extremo libre.

Con las condiciones de frontera citadas, se soluciona el sistema matricial y se despliegan los esfuerzos a lo largo de la geometría del tornillo. La Fig. 11 muestra una escala gráfica y numérica (KPa) de los mismos.

La fractura es simulada para su comparación con los valores analíticos.

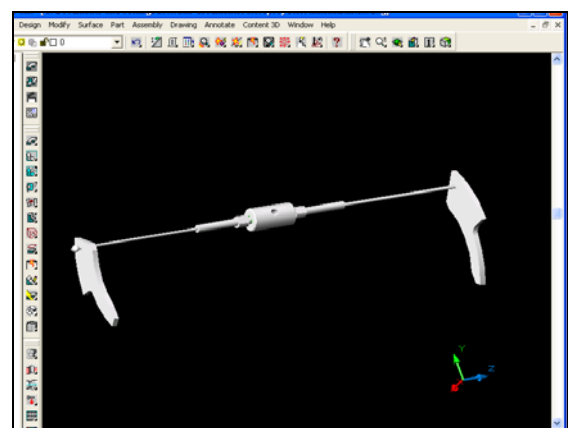


Fig. 9 Modelo de la herramienta Kaflex utilizando el diseño asistido por computadora, empleando el software Mechanical Desktop®.

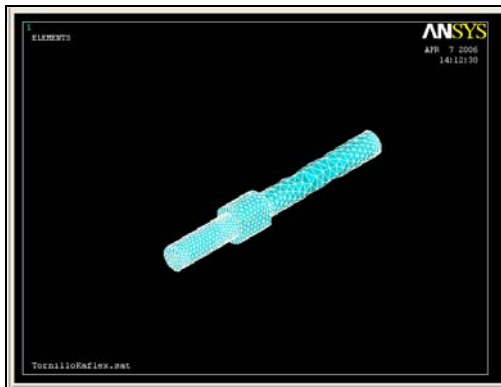


Fig. 10 Mallado del tornillo compresor con elementos finitos.

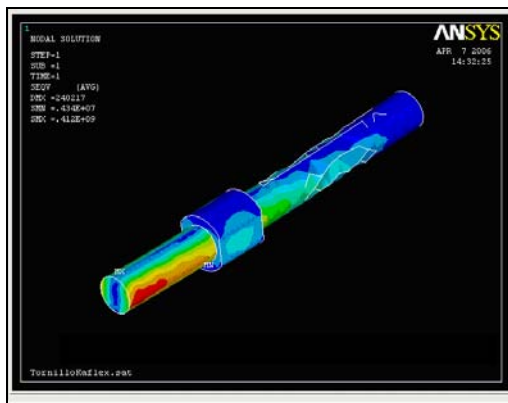


Fig. 11 Simulación animada de la fractura del tornillo compresor de la herramienta Kaflex.

### 2.5 Microestructura y propiedades mecánicas del tornillo compresor

La micrografía obtenida mediante microscopía digital del tornillo compresor en la zona de fractura muestra un acero inoxidable de matriz ferrítica con una distribución de finos carburos en ella (Fig. 4 y 5).

Para afirmar dicho enunciado se realiza un análisis cualitativo comparando la imagen con fotografías publicadas en la bibliografía [5], y que refieren la microestructura que se observó en la pieza fracturada (Fig. 12).

Debido a su reacción, el reactivo de Vilella es un agente que muestra las fases de ferrita ( $\alpha$ ) y martensita de la matriz de los aceros inoxidables, adicional a que revela los carburos precipitados en ella.

El alto contenido de cromo (Cr) de este tipo de materiales evita que el reactivo desintegre la muestra; lo cual es un argumento más para afirmar que se estudia un acero inoxidable ferrítico. La atracción magnética positiva también es un indicador que confirma el enunciado anterior.

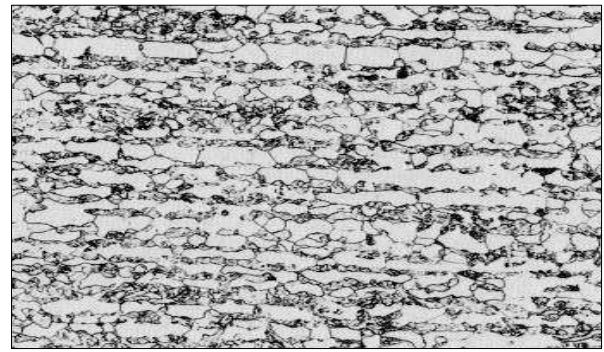


Fig. 12 Microestructura del acero inoxidable ferrítico 430. La estructura es una sección longitudinal de hojuelas de ferrita (blanco). Muestra atacada con Glyceregia, 100 X. [10]

Las propiedades mecánicas del tornillo compresor obtenidas por medio de Mecánica de la Fractura se resumen en la siguiente tabla. Éstas se comparan con las del acero inoxidable 430.

Acero	BH	VH	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_U$ (MPa)
<b>Tornillo</b>	200	190	500	682
<b>430 [11]</b>	205	195	525	700
<b>%Aprox</b>	97	97	95	97

Tabla 2 Comparativa de las propiedades mecánicas del acero inoxidable ferrítico para la herramienta Kaflex.

El porcentaje de error para la dureza, el esfuerzo último a tensión y el esfuerzo de cedencia es menor al 5 %.

Al ser la dureza un parámetro que varía respecto al tratamiento térmico, éste valor indica que el acero fue recocido a muy alta temperatura, esperando que el maquinado endureciera el tornillo mediante acritud; resultado que no se logró. La composición del material propuesto y su relación con el diagrama de fases Fe – C, confirma el enunciado anterior.

En la gráfica CRR, se aprecia que la zona plástica del material decrece desde el esfuerzo último de tensión ( $\sigma_U = 682 MPa$ ) hasta el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_0 = 500 MPa$ ). Esta área es definida por los defectos microscópicos propios del material y las microgrietas presentes tienen un efecto mínimo en la concentración de esfuerzos.

Ubicando la cedencia del material, es en este punto donde el maquinado del tornillo es realizado hasta obtener un tamaño de cuerda nominal de 20 UNC. Con este tamaño de grieta, la resistencia residual se ve disminuida considerablemente, presentándose el esfuerzo a la fractura ( $\sigma_f = 300 MPa$ ) ya calculado.

Por último el área de servicio de la herramienta Kaflex está comprendida desde la longitud de cuerda estipulada por el fabricante hasta el tamaño crítico de grieta, regida por el esfuerzo de servicio.

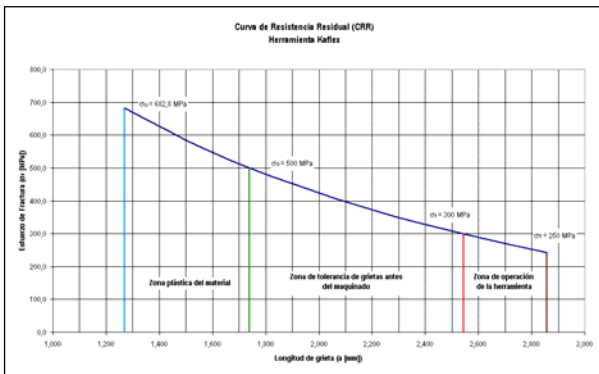


Fig. 13 Gráfica de la vida útil de la herramienta Kaflex. Se destacan los esfuerzos de tensión, cedencia, fractura y falla

Es por ello que la energía de deformación presente en esta zona es limitada, por tanto la ruptura de la herramienta durante las tareas de mantenimiento ocurre de manera inminente.

La simulación de la ruptura de la herramienta Kaflex, mediante el método de elemento finito, demuestra que el esfuerzo de tensión uniaxial en el tornillo compresor alcanza el límite de cedencia del material.

Tanto las propiedades mecánicas del material, así como las condiciones de carga establecidas mediante mecánica de fractura se verificaron en la simulación. El esfuerzo de cedencia calculado ( $\sigma_0 = 500 \text{ MPa}$ ) se presenta en la zona de grietas cordales.

La zona de falla se muestra al inicio de la cuerda del tornillo, lo que hace más vulnerable a la herramienta a sufrir un colapso súbito ya que es la zona donde los grados de libertad están restringidos, es decir donde el tornillo se empotra con la rosca de compresión.

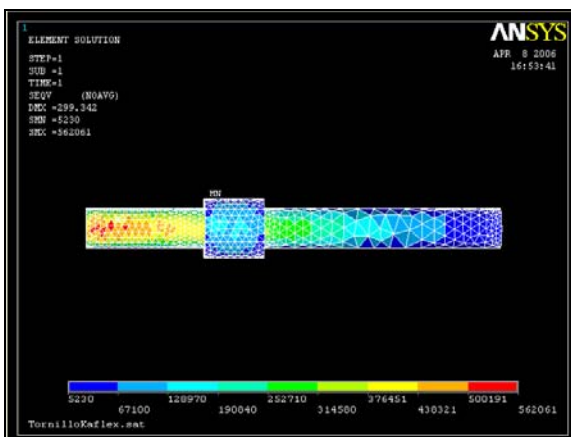


Fig. 14 Esfuerzos de operación en el tornillo compresor. En la zona de maquinado de la cuerda se denota que el esfuerzo sobrepasa el límite de cedencia del material, por ende la fractura ocurre.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del presente trabajo finaliza con las siguientes conclusiones:

La herramienta Kaflex sufre una disminución de su resistencia debido a la concentración de esfuerzos en la cercanía de la cuerda del tornillo compresor, ya que esta se comporta como una discontinuidad tipo grieta.

Se determinó que el material de fabricación nacional corresponde a un acero inoxidable ferrítico AISI 430, con microestructura y propiedades mecánicas equivalentes al material original (Tabla 2).

Las propiedades mecánicas calculadas por Mecánica de la Fractura Lineal Elástica, esfuerzo de cedencia ( $\sigma_0 = 500 \text{ MPa}$ ) y esfuerzo último a tensión ( $\sigma_U = 682 \text{ MPa}$ ), tienen una aproximación del 95 % comparadas con el acero grado inoxidable AISI Serie 430

La energía de deformación descrita por la curva de resistencia residual es mínima y no permite que el componente absorba la energía de tensión producida por la carga crítica, acorde a la gráfica de la Fig. 13.

La dureza de la muestra, 190 HV, se puede atribuir a que el acero fue recocido en un rango de temperatura elevado, por encima de la temperatura crítica de transformación eutectoide ( $T_c \geq 980^\circ\text{C}$ ) [11] y la acritud no se alcanzó con el proceso de conformación plástica utilizado.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bell 407 Product Data Manual, Textron – Lycoming Inc. Bell Helicopter, 2003
- [2] Bell 407 General Maintenance Manual, Textron – Lycoming Inc. Bell Helicopter, 2003
- [3] Metallography of Microstructures, ASTM D 648, E.U.A., 1998
- [4] González, *Mecánica de la Fractura Bases y Aplicaciones*, Politécnica, México, 1998.
- [5] Metallography, Metals Handbook XI, E.U.A, 1996
- [6] Davies, et al, *Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers*, Cambridge, E.U.A., 2005
- [7] Matías, *El Método de Elemento Finito Mediante el Software ANSYS*, Politécnica, México, 2004
- [8] Schaffer, et al, *Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería, CECSA*, E.U.A., 2002
- [9] Anderson, *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Ed. CRC Press, E.U.A., 1991
- [10] Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Wiley & Sons, E.U.A., 1998
- [11] Inchaurrea, *Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor*, Limusa, España, 1996.
- [12] Audelo, Villa, et. al., “*Determinación de Factores de Intensidad de Esfuerzos en Placas Agrietadas Utilizando el Método Fotoelástico*”, *Científica*, Num. 24, 19-23. 2000