



INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA
Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

**ANÁLISIS DE ROTURA DEL ESPÁRRAGO SITUADO EN EL CÁRTER
DE LOS MOTORES MAN DE LA UNIDAD EMPRESARIAL DE BASE
GENERACIÓN MOTORES FUEL-OIL DE MOA.**

Autor: Angel Gainza Legrá

Tutor: Prof. Asit., Ing. Murpis Pompa Larrazabal

MOA, 2016

“AÑO 58 DE LA REVOLUCIÓN”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

No: Angel Gainza Legrá

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Angel Gainza Legrá

Ing. Murpis Pompa Larrazabal



PENSAMIENTO

"Debe evitarse hablar a los jóvenes del éxito como si se tratase del principal objetivo en la vida. La razón más importante para trabajar en la escuela y en la vida es el placer de trabajar, el placer de su resultado y el conocimiento del valor de su resultado".

Albert Einstein.



AGRADECIMIENTOS

Gracias:

Primeramente a mi Dios grande y poderoso que me cuida desde el cielo, pues Él me ha dado la dirección y la constancia para llegar hasta aquí, porque en medio de todas las circunstancias y acontecimientos buenos y malos ha puesto su mano para guiarme por los buenos pasos de la vida.

A las personas que más han deseado que logre mis sueños:

Mis padres: Magalis y Angel, les regalo este momento, los cuales siempre fueron mi fuente de inspiración.

A mis hermanos: Sahyli y Gustavo por ayudarme y aconsejarme en esta larga tarea.

A mi novia: Rosi por estar a mi lado y quererme constantemente.

A mi prima Yanet y su esposo Antonio por prestarme su computadora y tenerme en su casa cada mañana.

A mi querida abuela Milka por haberme cuidado todos estos años desde niño y por alentarme sin lugar a duda para lograr mi sueño de ser un buen Ingeniero Mecánico.

A mi adorada tía Sarita y su esposo Carmelo Nucera allá en Italia que siempre me brindaron su ayuda incondicional y apoyo para lograr esto.

A mi tutor Ing. Murpis Pompa Larrazabal por su paciencia, entrega y mucha persistencia para que esto fuera posible.

A mis amigos del barrio, en donde estén, por su apoyo y por resistir todos estos años todas las cosas que hemos hecho.

A mis compañeros de aula, por compartir conmigo estos cinco años de locuras, fiestas y estudio.

A mi costurera personal Mabel, la cual gracias a ella he podido vestir realmente como quiero.

A todos los que de una forma u otra me han ayudado y brindado sus servicios para que este, mi deseo, se hiciera realidad.

A todos, muchas gracias.



DEDICATORIA

En especial, le dedico esto a mi mamá Magalis Legrá Matos, mi guía indiscutible, por brindarme la oportunidad y la dicha de la vida, así como las fuerzas, regaños y consejos necesarios para continuar mi formación profesional.

A mi papá Angel Gainza, del cual llevo su mismo nombre, por haberme concebido y por darme en 23 años tanta seguridad y cuidado para lograr ser el hombre que soy actualmente.

A mi tía Sarita y su esposo Carmelo que viven en Italia, los cuales fueron en todos estos años un pilar fundamental en mi desarrollo como estudiante y como persona.

A las nuevas generaciones que les sirva de ejemplo para emprender sus desafíos.

A nuestra Revolución, por las posibilidades que me ofrece.

Y por supuesto, a nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz por llevar adelante y encaminar nuestro país en estos 58 años.



RESUMEN

Se realiza el análisis y propuesta de solución a la rotura del espárrago situado en la tapa del cárter del motor MAN 18V48/60B de la UEB de Generación de Motores Fuel-oil de Moa. Se muestran los resultados de las causas que provocan las reiteradas fracturas de dichos espárragos a partir del establecimiento de un procedimiento de investigación. Dicho procedimiento contempla primeramente la verificación del correcto diseño de la pieza, la recolección de la información teórica necesaria para su estudio en general y a partir de ahí; la realización de un cabal análisis del comportamiento histórico de estos elementos roscados, realizando ensayos químico, metalográfico y de dureza al material de dichos espárragos.

Además se efectúa una simulación en el Software ANSYS Workbench 12.1, donde se observó el comportamiento físico-mecánico del espárrago bajo condiciones de cargas dinámicas. Finalmente es desarrollado un estudio del impacto económico-social y medioambiental asociado al empleo de estos elementos de máquinas.



ABSTRACTS

Analysis and proposed solution is done breakage stud on the cover crankcase MAN 18V48 / 60B engine UEB Generation Engines Fuel-oil Moa. The results of the causes of such repeated fractures asparagus from the establishment of an investigative procedure is. Said first procedure includes verification of the correct design of the part, the collection of theoretical information needed for study in general and from there; performing a thorough analysis of the historical behavior of these threaded elements, performing chemical, metallographic and material hardness testing said studs.

In addition, a simulation in ANSYS Workbench Software 12.1, where the asparagus physical-mechanical behavior under dynamic loading conditions was observed is made. It is finally developed a study of the socioeconomic and environmental impact associated with the use of these machine elements.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Flujo tecnológico de la UEB Generación de Motores Fuel-oil	4
1.3. Generalidades de los motores MAN 18V48/60B.....	6
1.4. Rotura de materiales de ingeniería	8
1.4.1. Fundamentos de la fractura de	8
1.4.2. Fenómeno de fatiga.....	9
1.5. Aleaciones metálicas. Propiedades elementales	11
1.6. Generalidades de los aceros.....	12
1.6.1. Aceros simples	13
1.6.2. Aceros aleados.....	14
1.6.3. Aceros de alta aleación	14
1.7. Influencia de los elementos de aleación en las propiedades de los aceros	15
1.8. Tipos de uniones. Características principales	17
1.8.1. Uniones roscadas. Principales nociones y definiciones.....	18
1.8.2. Aplicaciones en la ingeniería de las roscas	19
1.8.3. Ventajas y desventajas de las uniones roscadas	19
1.8.4. Piezas de sujeción. Materiales de fabricación de las uniones roscadas.....	20
1.9. Peculiaridades acerca de los espárragos.....	20
1.9.1. Utilización de los espárragos.....	21
1.9.2. Clasificación de los espárragos	21
1.9.3. Tratamiento térmico de los espárragos	22
1.10. Conclusiones del capítulo 1	23
II. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Introducción.....	24
2.2. Metodología para el desarrollo de la investigación	24
2.2.1. Análisis químico de los diferentes materiales empleados.....	24
2.2.2. Metodología de cálculo para el diseño del espárrago.....	25
2.2.4. Análisis macroscópico del espárrago en la zona de rotura.....	31



2.2.5. Toma y preparación de muestras de los materiales analizados	31
2.2.6. Análisis metalográfico	32
2.2.7. Ensayos de dureza a los materiales analizados	33
2.3. Variables para el proceso de simulación	33
2.4. Conclusiones del capítulo 2	35
III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	36
3.1. Introducción	36
3.2. Análisis químico de los diferentes materiales empleados	36
3.4. Metodología de cálculo para la comprobación del diseño del espárrago	37
3.5. Análisis macroscópico del espárrago en la zona de rotura	42
3.1. Análisis microestructural de los materiales empleados	43
3.2. Análisis de dureza	46
3.2.1. Ensayo de dureza aplicado a las muestras	46
3.3. Simulación por el Método de Elementos Finitos	47
3.4. Valoración económica	51
3.5. Impacto medioambiental	51
3.6. Conclusiones del capítulo 3	54
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	



INTRODUCCIÓN GENERAL

Resulta imprescindible en la situación actual de la economía cubana la reducción de la demanda del consumo de energía, de los costos asociados con ellos y con las inversiones capitales en los equipos eléctricos utilizados en las instalaciones industriales y de servicios. Esta necesidad está potenciada por el impacto medioambiental de las tecnologías energéticas. No existe duda alguna que la energía es la fuerza que mueve al mundo de la industria; y para hacer un uso más racional de la misma, en Cuba se han llevado a cabo vigentes esfuerzos encaminados a elevar la eficiencia de los procesos productivos de las diferentes ramas industriales, dada a la gran importancia que tiene el ahorro de la energía eléctrica expresándolo en la revolución energética que ha llevado a cabo por varios años nuestro país con vista a alcanzar los más altos rendimientos económicos.

Un ejemplo de esto es la Unidad Empresarial de Base Generación de Motores Fuel-oil de Moa (UEB Generación de Motores Fuel-oil), reciente inversión llevada a cabo en nuestro municipio Moa, la cual se encuentra dentro de la estructura organizativa de la Empresa Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” (ETE “Lidio Ramón Pérez”). Con una capacidad de generación de 184 MW, se destaca como el mayor grupo electrógeno de fuel-oil instalado en nuestro país con el objetivo de mejorar el voltaje en la región oriental y satisfacer la demanda energética, asegurando una confiabilidad de servicio de un 98,8% de servicio ininterrumpido y con la posibilidad de generar por sí misma en isla para el municipio y otros.

La instalación cuenta con diferentes áreas de trabajo, importantes para la generación de energía eléctrica: Zona de explotación de los motores, Planta de Tratamiento Químico del Agua (TQA), Isla de Combustible, Calderas (caldera auxiliar y calderas recuperativas) y el Sistema de Enfriamiento de los motores que incluye las torres de enfriamiento y los intercambiadores de calor de placas.

Dentro de estas áreas, la zona de explotación de los motores constituye uno de los eslabones fundamentales de la cadena, ya que es en ella donde se localizan los diez enormes motores mecánicos de combustión interna acoplados cada uno, a un generador de energía eléctrica divididos en dos naves de generación, los cuales son los encargados

de generar la tensión eléctrica necesaria para el desarrollo energético del país y en especial el de nuestro municipio Moa. Este complejo procedimiento de generación se efectúa bajo condiciones específicas y apropiadas de operación como son: temperatura, viscosidad, presión y otros factores que influyen y determinan la eficiencia de estos equipos.

De todo lo mencionado con anterioridad surge como **situación problemática**:

En la zona de explotación de los motogeneradores de energía eléctrica perteneciente a la UEB Generación de Motores Fuel-oil se han percibido problemas en la estructura mecánica de dichos motores, provocando el paro general inmediato de estos y por consiguiente la interrupción en varias ocasiones del flujo tecnológico del área. Se conoce que las averías están dirigidas a los espárragos situados en la tapa del cárter de los motores, los cuales están presentando fracturas reiteradas lo que induce un gasto frecuente del capital de la empresa con vista a sus reparaciones y puesta en marcha de estas grandes maquinarias de combustión interna.

En tal caso el **problema** lo constituye:

El desconocimiento de las causas que provocan la rotura de los espárragos situados en la tapa del cárter de los motores.

Como **objeto de estudio** de la investigación se establece:

Los espárragos situados en la tapa del cárter de los motores.

Se define como **objetivo general** del trabajo:

Investigar las causas principales que propiciaron la rotura de los espárragos.

Y **campo de acción**:

Diseño mecánico del espárrago para motores de generación.

Sobre la base del problema a resolver se presenta la siguiente **hipótesis**:

Mediante el estudio y análisis integral de las características y propiedades mecánicas del material de los espárragos y la verificación de los parámetros de diseño vinculados al sistema de explotación de los motores, se podrán determinar las principales causas que provocan su imprevista rotura y conjuntamente con esto, se logrará eliminar

permanentemente dichas fallas, lo que conlleva a una provechosa disminución de los costos de reparación y mantenimiento de la instalación.

A continuación se definen los **objetivos específicos**:

1. Verificar el diseño de los espárragos.
2. Realizar ensayos no destructivos al material de fabricación de la pieza para determinar sus propiedades químicas y mecánicas.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las **tareas del trabajo** siguientes:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Verificación del diseño de los espárragos.
3. Realización del análisis químico del material de la pieza.
4. Ejecución de los ensayos metalográfico y de dureza del material de la pieza.
5. Realización de una simulación por el Método de Elementos Finitos para el análisis del comportamiento dinámico de las tensiones y cargas que actúan.
6. Determinación de las causas principales que provocan la rotura de los espárragos y dar una propuesta de solución para erradicar este problema.
7. Planteamiento de las incidencias económicas y de impacto ambiental.

I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1. Introducción

La construcción de máquinas se perfecciona continuamente de acuerdo con las nuevas exigencias que imponen las condiciones de explotación y producción y las nuevas posibilidades que se abren con el desarrollo de la ciencia, la aparición de nuevos materiales, así como con los nuevos procedimientos de dar a éstos una forma conveniente y las propiedades requeridas. La tendencia actual hacia la racionalización y mejor aprovechamiento de esquemas e instalaciones de procesos industriales impone la necesidad de una correcta utilización de la energía. Es por eso que la UEB Generación de Motores Fuel-oil de Moa alcanza una gran importancia en el contexto técnico actual de nuestro país en general. Esta empresa opera con unidades motrices fabricadas en Alemania de marca MAN Diésel & Turbo SE, las cuales son corporaciones virtuosas y muy lucrativas en lo que es el desarrollo tecnológico-industrial de accionamiento de motores tanto eléctricos como mecánicos. Estos además se pueden utilizar también como generadores de energía en barcos y centrales generadoras estacionarias.

En tal sentido se tiene como objetivo del capítulo realizar un análisis de la literatura existente que proporcione información sobre las uniones roscadas y en especial sobre los espárragos, así como las particularidades y características principales de los materiales con que son fabricados dichos espárragos.

1.2. Flujo tecnológico de la UEB Generación de Motores Fuel-oil

La Central Diésel Eléctrica de Moa es una de las industrias encargadas de producir energía eléctrica para el sistema electro-energético nacional (SEN), usando diez motores de combustión interna de cuatro tiempos (MAN 18V48/60B) acoplados a generadores de 18,4 MW, trabajan con combustible pesado Fuel-oil aunque su arranque y parada se realiza con combustible Diésel. Para poder operar dentro de la instalación se necesita varios requisitos que conforman una gama de normas a cumplir estrictamente.

Algunas de estas son:

- Primeramente se necesitan de los medios de seguridad, refiérase a casco, botas de seguridad, taponcillos de oídos para amortiguar el ruido de los motores, guantes de

goma para poder maniobrar cerca de las líneas de corriente de 110 000 y 120 000 V, entre otros.

- Todo el personal de la entidad debe de estar capacitado física y mentalmente para trabajar.
- Por medio de cursos de preparación o alguna otra fuente de información los obreros requerirán de una formación exhaustiva previa antes de operar dentro de la zona de explotación o cualquier zona de peligro, ya que las personas sin formación pueden causar graves daños personales, materiales y para el medio ambiente.
- Debe prohibirse el acceso y actuación por parte de personas no autorizadas o ajenas a la entidad.
- El personal de dirección y las personas que realicen los trabajos de mantenimiento y revisión deben estar familiarizados con las instrucciones de servicio y de trabajo.
- Las tareas asignadas deben de realizarse por personal formado y con experiencia y conocimientos técnicos.

Los motores están ubicados en la zona de explotación donde necesitan de un grupo de áreas necesarias para su trabajo las cuáles son:

- **Sala de control**

Lugar ubicado en el tercer piso entre las dos naves de generación que ofrece una vista de lo que ocurre en los motores mediante cristalerías a ambos lados del local. Desde allí se realiza el trabajo coordinado de operación de la central y con el Despacho Nacional de Carga que es quien rige la política de operación. Consta de un grupo de paneles propios y comunes de control de los motogeneradores y sus equipos.

- **Isla de combustible**

Aquí es donde se realizan la mayoría de los procesos con los combustibles en el trasiego para los diferentes procesos. En el caso del fuel-oil se recibe mediante las bombas P081 A, B y C con destino hacia los tanques T059 A y B, que posteriormente las centrífugas A, B, C, D, y E purifican para los tanques T022 A y B donde las bombas P018 A o B y C o D succionan el combustible pasándolo por un módulo de filtro automático MOD-009 recirculando para el mismo tanque al pasar por un cabezal para cada nave de donde toman para su consumo. El diésel es recibido por las bombas P082 A y B, y enviado para

el tanque T003 de donde lo succionan las bombas P008 A o B y C o D las cuales lo impulsan pasándolo por un módulo de filtro MOD-003 A y B, y recirculando al mismo tanque mediante dos cabezales, uno para cada nave. En el caso del aceite lo reciben las bombas P083, lo envían para el tanque T012 hasta que se vaya a usar para el relleno de algún cárter de los motores, puesto que en operación normal sin averías el aceite a éstos no se les cambia, para ello se usan las bombas P012 A o B.

- **Calderas**

En ésta área se encuentran ubicadas las diez calderas recuperativas que usan los gases de escape de los motores para la producción de vapor de agua, con el objetivo de usarlo para el trabajo de las centrífugas y en la viscosidad del fuel-oil. Además de estas calderas existe también una Caldera Auxiliar de dos etapas para el comienzo de la generación de vapor cuando no hay motores en servicio.

- **Planta de tratamiento químico del agua (TQA)**

El agua industrial proveniente de la potabilizadora de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” Moa Nickel S.A que llega al emplazamiento mediante 15 km de tubería de 200 mm de diámetro y se almacena en una cisterna de 100 000 m³ para de ahí iniciar su tratamiento en la planta TQA la que consta de tres equipos o procesos fundamentales en el siguiente orden:

1. Actiflos 1 y 2 encargados de clarificar el agua.
2. Filtros de arena 1 y 2 encargados de filtrar el agua.
3. Osmosis inversa 1 y 2 encargadas de la desmineralización del agua.

Estos motores se encuentran divididos en dos naves de generación: los primeros cinco en la nave No.1 y los cinco restantes en la nave No.2, donde en cada nave se encuentran los operadores y especialistas que velan por el buen funcionamiento de dichas maquinarias.

1.3. Generalidades de los motores MAN 18V48/60B.

El motor con la denominación 48/60 B es un miembro importante de la familia de motores de velocidad media (Manual técnico de motores MAN, 2011). Son motores sobrealimentados de 4 tiempos con estructura en serie o en V, con orificio cilíndrico de 480 mm y 600 mm de carrera de pistón (figura 1.1). Los motores en V 48/60 B se



componen fundamentalmente de elementos estáticos como el cárter de los cilindros, los casquillos del cilindro y las culatas, y de elementos en movimiento como el cigüeñal con bielas y pistones, el tren de engranaje y el árbol de levas así como el accionamiento de las bombas de carburante y de las válvulas. El turbocompresor sirve para comprimir el aire fresco. Las tuberías del aire de admisión se encuentran delante de las culatas; la tubería central de gas de escape se encuentra entre las líneas de cilindros. Los árboles de levas se encuentran en cámaras en los lados externos del motor. Sirven para accionar las válvulas de admisión y de escape y las bombas de inyección. Con un dispositivo eléctrico de ajuste es posible modificar el momento de inyección. El turbo-compresor y el refrigerador del aire de admisión se encuentran generalmente en el lado del acoplamiento en caso de funcionamiento en modo propulsor y en el lado opuesto al acoplamiento, en caso de funcionamiento en modo generador.

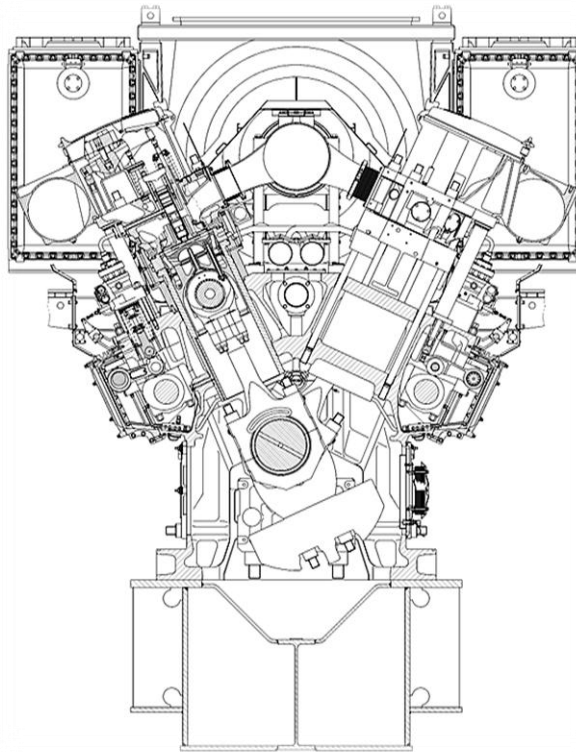


Figura 1.1. Sección transversal de un motor V 48/60 B contemplado desde el lado del embrague.



1.4. Rotura de los materiales de ingeniería

La rotura de los materiales de ingeniería es casi siempre un hecho no deseado por varias razones; entre éstas cabe resaltar las posibles pérdidas de vidas humanas, las pérdidas materiales y su incidencia en el suministro de productos y servicios. Aun cuando las causas de rotura y el comportamiento de los materiales sean conocidos, la prevención de las roturas es muy difícil de garantizar. Las causas usuales son la selección y la conformación inapropiadas de los materiales, el diseño inadecuado del componente, o bien su mala utilización en servicio. Es responsabilidad del ingeniero desarrollar planes de contingencia para el caso de una posible rotura y, si ésta ocurre, estudiar su causa y tomarse las medidas preventivas apropiadas contra futuros incidentes (Keyser, 1992).

1.4.1. Fundamentos de la fractura

Según Callister (2003) la fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada estática (es decir, constante o que cambia lentamente en el tiempo) y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. La tensión aplicada puede ser de tracción, de compresión y de cizalladura o torsión.

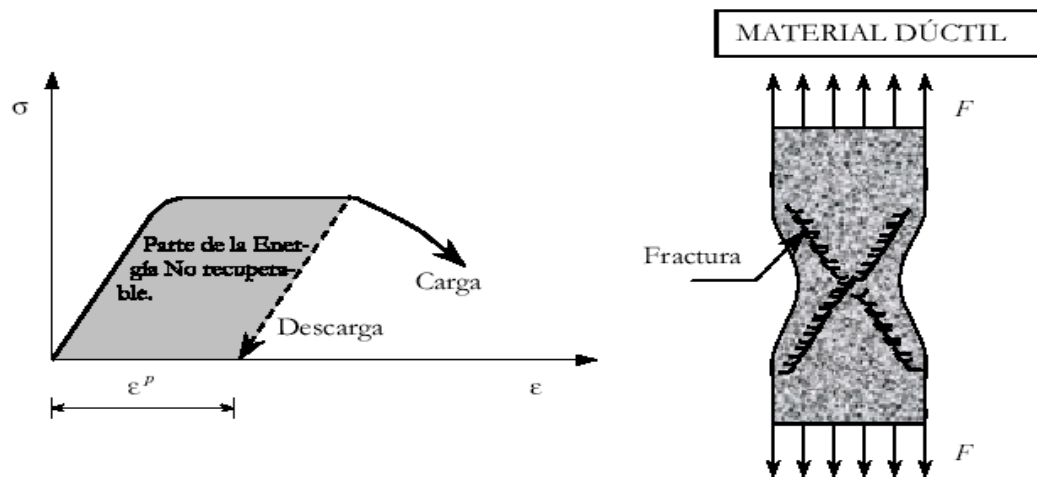


Figura 1.2. Comportamiento esquemático de un material dúctil.

En los materiales de ingeniería existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. Los

materiales dúctiles exhiben normalmente deformación plástica substancial con muy alta absorción de energía antes de la fractura.

Rotura dúctil: debido a una excesiva deformación plástica, que conduce a la formación de cuellos y que se identificará como una rotura dúctil. Es decir es una rotura que pre-avisa su advenimiento (figura 1.2). Esta fractura normalmente se desarrolla bajo estados tensionales tangenciales y por ello su aspecto describe bandas de 45° respecto del eje de carga. Este fenómeno produce rotura bajo cargas cíclicas y también se desarrolla bajo mecanismos plásticos, pero siempre muestra indicios de fragilidad.

Rotura frágil: debido a una deformación pequeña que conduce a la propagación de fisuras por el cuerpo del sólido, sin que alcancen a desarrollarse mecanismos plásticos (figura 1.3). El aspecto de esta fisura es plana y motivada fundamentalmente por tensiones axiales dirigidas en la dirección de la acción.

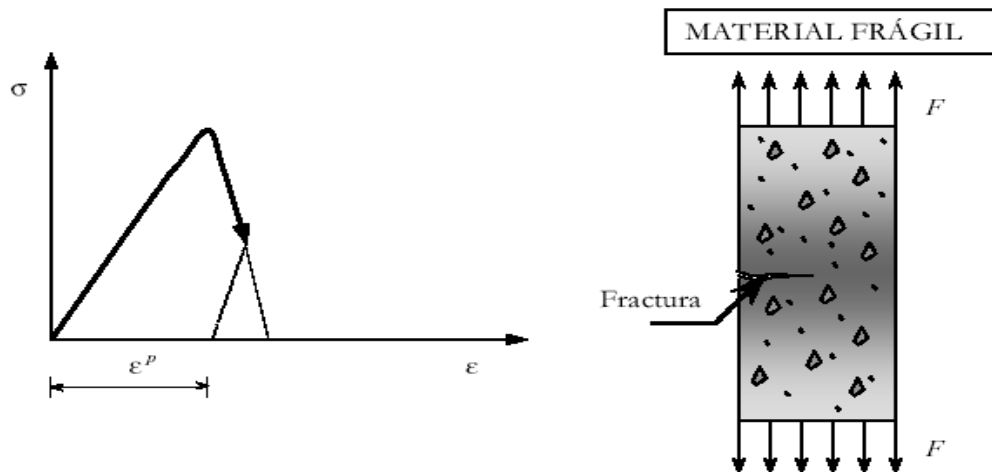


Figura 1.3. Comportamiento esquemático de un material frágil.

1.4.2. Fenómeno de fatiga

A menudo, se encuentra que los elementos de máquinas han fallado bajo la acción de esfuerzos repetidos o fluctuantes; no obstante, el análisis más cuidadoso revela que los esfuerzos máximos reales estuvieron por debajo de la resistencia última del material y con mucha frecuencia incluso por debajo de la resistencia a la fluencia. La característica más notable de estas fallas consiste en que los esfuerzos se repitieron un gran número de veces. Por lo tanto, a la falla se le llama falla por fatiga (Shigley, 2008).



La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes (por ejemplo en puentes, aviones, componentes de máquinas). En estas circunstancias, la fractura puede ocurrir a un nivel de tensión sensiblemente menor que la resistencia a la tracción o el límite elástico correspondiente a una carga estática. El término “fatiga” se utiliza debido a que este tipo de fractura normalmente ocurre después de un periodo largo de tensiones repetidas o de deformaciones cíclicas. La fatiga es importante ya que es la primera causa de rotura de los materiales; se estima que la fatiga es la causa de aproximadamente el 90 % de las roturas metálicas (Guliáev 1983; Callister 2003). Además, es catastrófica e insidiosa, y ocurre súbitamente sin aviso. La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aún en metales que son normalmente dúctiles, en el sentido de que no hay deformación plástica importante asociada con la rotura. El proceso ocurre por la iniciación y la propagación de fisuras, y ordinariamente la superficie de fractura es perpendicular a la dirección de una tracción aplicada.

El proceso de rotura por fatiga está caracterizado por tres etapas distintas.

1. Iniciación de la grieta:

Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre nuclean sobre la superficie en un punto donde existe alta concentración de tensiones, (originadas por diseño o acabados). Las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de escalones producidos por deslizamiento de dislocaciones, los cuales actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como lugares de nucleación de grietas. Normalmente, las grietas no pueden verse a simple vista.

2. Propagación de la grieta:

Etapas I: Una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y, en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.

Etapas II: La velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera vertiginosa y en este punto la grieta deja de crecer en el eje del esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta crece por un proceso de enromamiento y agudizamiento de la punta a causa de los ciclos de tensión.



Entonces la microgrieta se convierte en macrogrieta y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales. Por lo general, las mesetas son suaves y normales a la dirección del esfuerzo máximo en tensión. Durante las cargas cíclicas, estas superficies con grietas se abren y cierran, frotándose entre sí, y la aparición de las marcas de playa dependen de los cambios en el nivel de la frecuencia de carga y la naturaleza corrosiva del entorno (Shigley, 2008).

3. Rotura final:

Ocurre durante el ciclo de esfuerzo final cuando el material restante no puede soportar las cargas, lo que resulta en una fractura súbita y rápida. Al mismo tiempo que la grieta aumenta en anchura, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura hasta que alcanza una configuración enromada. Se alcanza una dimensión crítica de la grieta y se produce la rotura. La región de una superficie de fractura que se formó durante la Etapa II de propagación puede caracterizarse por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estrías. Ambas indican la posición del extremo de la grieta en diferentes instantes y tienen el aspecto de crestas concéntricas que se expanden desde los puntos de iniciación. Las marcas de playa son macroscópicas y pueden verse a simple vista. Las marcas de playa y estrías no aparecen en roturas rápidas.

Una fractura en esta etapa puede ser frágil, dúctil o una combinación de ambas. Con mucha frecuencia las marcas de playa, si existen, y los patrones posibles de fractura llamados líneas chevron, apuntan hacia los orígenes de las grietas iniciales (Shigley, 2008).

1.5. Aleaciones metálicas. Propiedades elementales

Una aleación metálica es aquella sustancia obtenida por fusión de dos o más elementos, uno de los cuales al menos debe de ser un elemento metálico (Callister 2003). Como es natural la estructura de una aleación metálica será más compleja que la de un metal puro y depende principalmente de las interacciones en que intervienen los componentes de la aleación.

Las aleaciones presentan brillo metálico y alta conductividad eléctrica y térmica, aunque usualmente menor que los metales puros. Las propiedades físicas y químicas son, en general, similares a la de los metales, sin embargo las propiedades mecánicas tales como

dureza, ductilidad, tenacidad y otras pueden ser muy diferentes, de ahí el interés que despiertan estos materiales (Guliáev 1983).

1.6. Generalidades sobre aceros

Se define como acero a aquel término que corresponde a un gran número de aleaciones que contienen hierro, como componente principal, y pequeñas cantidades de carbono, como principal elemento de aleación. Estas aleaciones pueden llamarse con mayor propiedad aceros al carbono, y representan más del 90% de la producción total de aceros en el mundo. También puede haber en los aceros pequeñas cantidades, generalmente del orden de uno puntos porcentuales, de otros elementos, como manganeso, silicio, cromo, molibdeno y níquel. Sin embargo, cuando aumenta el contenido de los aleantes agregados al hierro, éste adquiere propiedades especiales, y se emplean otras designaciones para la descripción de estas aleaciones. Por ejemplo, un mayor contenido de cromo, del orden de 12%, se agrega para producir el importante grupo de aleaciones conocidas como aceros inoxidables.

De acuerdo con los autores (Lajtin1973; Guliáev 1983; Pero-Sanz 2000), los aceros al carbono representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería. Son aleaciones Fe – C donde el contenido de carbono no supera el 1,00 %, el manganeso no supera el 1,65 %, el cobre y el silicio no superan el 0,60 % y en los que el fósforo y el azufre aparecen solo como impurezas.

Plantea Callister (2003), que la característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. En estos aceros, los principales factores que afectan a sus propiedades mecánicas son el contenido de carbono y la microestructura. Básicamente, la resistencia a la tensión, a la cadencia y la dureza, se incrementan al aumentar el contenido de carbono; por el contrario, la elongación, la reducción de área y la tenacidad disminuyen notablemente condicho incremento.

Dentro de este tipo de aceros se encuentran los denominados endurecibles por temple para los cuales el contenido de carbono debe ser al menos de un 0,25%, aceros con un contenido de carbono aproximado a un 0,4 – 0,5 %, son usados ampliamente para la construcción de estructuras y diversas partes de maquinaria, como pernos, tornillos, ejes,

engranajes (Bengton, 1991), debido a su alta resistencia mecánica, a su resistencia al desgaste a su elevada dureza y a sus favorables condiciones económicas como son su bajo coste y la garantía de abastecimiento.

Los aceros dependiendo de su contenido de carbono y de otros elementos de aleación se clasifican en:

- Aceros simples.
- Aceros aleados.
- Aceros de alta aleación.

1.6.1. Aceros simples

Los aceros simples se pueden definir como una aleación de hierro con carbono, con un contenido de éste último en el rango de 0,02 hasta el 2% con pequeñas cantidades de varios elementos que se consideran como impurezas tales como P, S, Mn, Cu, Si y otros. Estos tipos de aceros son muy baratos, es decir, que son muy fáciles de adquirirlos.

Los aceros simples se clasifican de acuerdo a su contenido de carbono en:

- Aceros de bajo carbono.
- Aceros de medio carbono.
- Aceros de alto carbono.

1.6.1.1. Características de los aceros al carbono

Los aceros de bajo carbono, conocidos en ocasiones como aceros suaves, contienen normalmente entre 0,02 y 0,3 % de contenido de carbono. Estos aceros se trabajan fácilmente en caliente y se producen en grandes cantidades para la fabricación de vigas y otros productos estructurales. Son dúctiles, puesto que también son maquinables. Son soldables, y no se pueden tratar térmicamente; y además poseen una resistencia mecánica moderada (Castillo, 2011).

Los aceros de medio carbono contienen entre 0,3 y 0,65% de carbono; se emplean más frecuentemente en componentes de máquinas que requieren resistencia mecánica alta y,



en especial, buena resistencia a la fatiga. Por lo tanto son aceros templables y pueden ser sometidos a temple y revenido.

Los aceros de alto carbono contienen más de 0,80% de carbono y constituyen una categoría especial a causa de su dureza alta y tenacidad baja. Esta combinación de propiedades hace que los aceros de alto carbono sean ideales, por ejemplo en los cojinetes, donde se requiere una resistencia alta al desgaste y las cargas compresivas disminuyen la posibilidad de que se produzca una fractura frágil, al contrario de lo que sucede con cargas de tensión. También son aceros templables.

Entre las principales aplicaciones de los aceros simples se pueden mencionar a las siguientes:

- Estructuras.
- Elementos de máquinas (ejes, resortes, engranes y otros).
- Tornillos (piezas de sujeción).
- Herramientas de mano.

1.6.2. Aceros aleados

Los aceros aleados son aceros simples a los que se les agrega de manera intencional ciertos elementos de aleación, entre los que se pueden mencionar a los siguientes: cromo, molibdeno, níquel, tungsteno, vanadio, silicio, manganeso, y otros, debiendo ser la suma de todos los elementos antes mencionados menor o igual al 5 %.

Los objetivos perseguidos son los siguientes:

- Aumentar la resistencia mecánica.
- Mejorar su templabilidad.
- Aumentar su resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Para designar a los aceros simples y aleados se utiliza un sistema de identificación de cuatro dígitos desarrollado por AISI (*American Iron and Steel Institute*) y SAE (*Society of Automotive Engineers*) y que en México fue adoptado por NOM (Norma Oficial Mexicana).

1.6.3. Aceros de alta aleación

Los aceros de alta aleación se clasifican en dos grandes grupos: 1) Aceros inoxidables, 2) Aceros para herramientas.

1.6.3.1. Aceros inoxidables

Son básicamente aleaciones Fe-Cr o Fe-Cr-Ni con un contenido de al menos 10 % de cromo y el menor contenido posible de carbono y que poseen una buena resistencia a la corrosión y a la oxidación conferida por una capa de óxido de cromo que se forma sobre su superficie y que origina la pasivación de ésta. Los aceros inoxidables se clasifican de acuerdo a la microestructura que se obtiene en ellos, tal y como se muestra a continuación:

- Aceros inoxidables martensíticos.
- Aceros inoxidables ferríticos.
- Aceros inoxidables austeníticos.

1.6.3.2. Aceros para herramientas

Son otro grupo importante de aceros y como su nombre lo indica se utilizan fundamentalmente para la fabricación de herramientas que se utilizan para darle forma a otros materiales. Los principales elementos de aleación de los aceros para herramienta son: carbono, tungsteno, molibdeno, manganeso, vanadio, níquel, cobalto, y otros (Castillo, 2011).

Los aceros para herramienta deben mostrar las siguientes cualidades:

- Deben poseer una alta dureza y resistencia al desgaste.
- También deben mostrar una excelente templabilidad.
- Deben sufrir una deformación mínima durante el tratamiento térmico.
- Deben retener su dureza a altas temperaturas (dureza al rojo).

1.7. Influencia de los elementos de aleación en las propiedades de los aceros

De acuerdo a Askeland (2005), los elementos de aleación se agregan a los aceros para:

1. Proporcionar endurecimiento por solución sólida de la ferrita.
2. Causar la precipitación de carburos de aleación en vez de Fe₃C (cementita).
3. Mejorar la resistencia a la corrosión y otras características especiales del acero.
4. Mejorar la templabilidad, de máxima importancia en aceros aleados y para herramientas.

Según Castillo (2007), los principales elementos que conforman los aceros son los siguientes:

Carbono: Es el ingrediente fundamental en el acero, ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Además el carbono, poseer un potente carácter gammágeno, contribuye a mejorar el límite elástico. Sin embargo, una cantidad excesiva de carbono provocar un efecto negativo sobre la ductilidad, la tenacidad, y el riesgo de sensibilización y consecuentemente, la disminución de la resistencia a la corrosión intergranular. El carbono, hasta contenidos ligeramente superiores a 1,00 % proporciona elevada resistencia mecánica, incrementa la dureza, el límite de fluencia (hasta aproximadamente 350 MPa), la capacidad de endurecimiento y la resistencia al desgaste abrasivo; disminuyendo en contraposición los valores de resistencia al impacto y de la elongación relativa.

Cromo: la adición del elemento cromo origina la formación de diversos carburos de cromo que son muy duros; sin embargo, el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza producido simplemente al incrementar su contenido de carbono. Comunica al acero mayor dureza, resistencia y tenacidad a cualquier temperatura. Solo o aleado con otros elementos, mejora la resistencia a la corrosión. Aumenta la profundidad de penetración del endurecimiento por tratamiento termoquímico como la carburación o la nitruración. Se usa en aceros inoxidable, aceros para herramientas y refractarios. También se utiliza en revestimientos embellecedores o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste.

Níquel: la adición de níquel al acero amplía el nivel crítico de temperatura, no forma carburos u óxidos. Esto aumenta la resistencia sin disminuir la ductilidad. El cromo se utiliza con frecuencia junto con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que aporta el cromo. En la deformación en frío aumenta la resistencia y conformabilidad del acero. La adicción del níquel al acero le proporciona propiedades como maleabilidad, soldabilidad,



magnetismo, aumenta la resistencia a la corrosión y a la fatiga, la resiliencia, la ductilidad, entre otros.

Manganeso: el manganeso se agrega a todos los aceros como agente de desoxidación y desulfuración, pero si el contenido de manganeso es superior a 1%, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso. Reduce el intervalo crítico de temperaturas, elemento que inhibe la fragilidad en caliente al formar sulfuro de manganeso.

Molibdeno: el molibdeno forma carburos y también se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad. El molibdeno abate sustancialmente el punto de transformación. Debido a este abatimiento, el molibdeno es de lo más eficaz para impartir propiedades deseables de templabilidad en aceite o en aire. Exceptuando al carbono, es el que tiene el mayor efecto endurecedor y un alto grado de tenacidad.

Silicio: aumenta moderadamente la templabilidad. Se usa como elemento desoxidante.

1.8. Tipos de uniones. Características principales

Con el objetivo de que las máquinas cumplan las funciones específicas, las piezas que la componen, se unen entre sí formando uniones (ensambladuras) móviles. Dichas uniones se utilizan cuando las construcciones tecnológicas las exige, para facilitar el desmontaje garantizando la intercambiabilidad y el mantenimiento de las mismas. Mientras que las uniones móviles se determinan solamente por la cinemática de la máquina, la introducción de uniones fijas obliga a disgregar la máquina en grupos y conjuntos, y estos últimos, en piezas y elementos para proveer la fabricación de la máquina, su transporte y reparación. En la práctica de la construcción de maquinaria, en realidad se llaman sólo uniones las fijas. Según sean las causas que hacen indispensable la desarticulación de las construcciones, se emplean tanto las uniones separables o desmontables como las inseparables o fijas (Dobrovolski, 1990).

La proyección de las uniones es una tarea de construcción de mucha responsabilidad, ya que las roturas en las máquinas tienen lugar, en la mayoría de los casos, precisamente, en los sitios de ensambladura. Junto con las exigencias generales desde el punto de vista económico, las uniones deben reunir requisitos, según sus designaciones de resistencia mecánica, de estanquidad (hermeticidad), de rigidez y en casos especiales también de

conductividad térmica y eléctrica. Si un tipo de unión no satisface todas las exigencias encomendadas, entonces se emplean las uniones combinadas.

En la actualidad existen diferentes tipos de uniones tales como: roscadas, soldadas y roblonadas. Pueden aparecer además uniones combinadas entre ellas.

1.8.1. Uniones roscadas. Principales nociones y definiciones

Según Reshetov (1985), se llaman uniones roscadas a las uniones desmontables, mediante piezas de unión a rosca: tornillos, pernos, espárragos, tuercas o bien por la rosca tallada directamente en las piezas a unir.

Roscas. Según sea la superficie en que se encuentra la rosca se clasifican en roscas cilíndricas y en roscas cónicas. La rosca se puede cortar tanto en la superficie exterior como en la interior de un cilindro o de un cono. En el primer caso se llama rosca exterior, en el segundo, interior. De acuerdo con el sentido de rotación del contorno plano que forma la rosca, se distinguen las roscas dextrorsa o derecha y sinistrorsa o izquierda (Dobrovolski, 1990).

Según sea la forma del contorno plano que determina el perfil de la rosca en el plano que pasa por el eje, se distinguen las roscas:

- Triangular y trapecial.
- De diente de sierra.
- Cuadrada.
- Redonda.

La rosca que tiene un filete helicoidal se llama de una entrada; la rosca que tiene dos, tres filetes helicoidales se llama, correspondientemente, de doble, de triple entradas, las demás, rosca múltiple.

Según el destino las roscas se pueden definir:

- De sujeción.
- De avance (trapeciales y cuadradas).

Para fines de sujeción se emplean principalmente las roscas de una entrada de perfil triangular. Dichas roscas tienen elevada resistencia mecánica de sus filetes y pueden

asegurar una estabilidad superior de apretadura en comparación con otras roscas a causa de que tienen un coeficiente de rozamiento mayor (Marín, 2006).

1.8.2. Aplicaciones en la ingeniería de las roscas

Las uniones roscadas tienen innumerables aplicaciones en la construcción de maquinarias. En las máquinas modernas las piezas con rosca constituyen más del 60 % de la cantidad total de las piezas. A ellas pertenecen las piezas de sujeción (pernos, tornillos, tuercas), la mayoría de las piezas armazones, ya que ellas mismas se sujetan y a ellas se fijan otras piezas con tornillos (Reshetov, 1985).

Por su aplicación, las roscas se dividen en los grupos siguientes:

1. Roscas de sujeción que se destinan a fijar las piezas.
2. Roscas de sujeción y estancas que sirven tanto para afianzar las piezas como para evitar la salida de gases o líquidos.
3. Roscas para transmisión de movimientos.

Cada una de estas roscas es creada en función de sus aplicaciones, como por ejemplo:

- Para transmitir potencia e incrementar la fuerza – como en los gatos de automóviles o los tornillos conductores (trapezoidal, cuadrada, trapezoidal asimétrica, tornillo sinfín).
- Para controlar el movimiento – como en los tornillos para controlar la alineación horizontal en las bombas.
- Para transportar materiales – como en las máquinas de moler (roscas fundidas en espiral).
- Para mantener partes unidas – con el uso de pernos, espárragos, tuercas y tornillos, etc.
- Para formar una unión a presión - rosca cónica de tuberías.
- Para medir – como en los micrómetros (rosca en forma de V).

1.8.3. Ventajas y desventajas de las uniones roscadas

Las ventajas principales de las uniones roscadas que contribuyen a su amplia aplicación en la construcción de maquinaria, son las siguientes:

- Alta capacidad portante y fiabilidad.
- Comodidad de montaje y desmontaje.

- Existencia de gran nomenclatura de piezas roscadas, apropiadas a diferentes condiciones de aplicación.
- Precio relativamente pequeño a causa de la estandarización y del uso de los procesos tecnológicos de alta productividad de fabricación.

Los principales inconvenientes que tienen estas uniones son:

- La considerable cantidad de concentradores de tensiones en las superficies de los elementos roscados, lo que los hace sensibles a las cargas que producen las tensiones alternativas y obliga a buscar métodos especiales para elevar su resistencia a la fatiga.
- Las malas propiedades tecnológicas de algunas construcciones especiales de elementos roscados que aseguran, sin embargo, la máxima resistencia mecánica.

1.8.4. Piezas de sujeción. Materiales de fabricación de las uniones roscadas

Según Dobrovolski (1990), los elementos principales de las uniones roscadas son los tornillos, los pernos, las tuercas y los espárragos, donde estos últimos se utilizan para realizar uniones indistintas pero el elemento de unión es roscado por ambos extremos. Las piezas de sujeción se fabrican de aceros pobres en carbono y con 0,3 %, aproximadamente, de carbono de calidad corriente (CT3, CT4, CT5), los de calidad al carbono (A12, 35, 45), los aleados (38XA u otros), los inoxidables (1X17H2 u otros), los metales no ferrosos y aleaciones.

1.9. Peculiaridades acerca de los espárragos

Los espárragos son tornillos sin cabeza que van roscados en sus dos extremos con diferente longitud roscada, entre los cuales, hay una porción de vástago sin roscar. El extremo roscado corto permanece atornillado en la pieza que se considera fija, mientras que en el otro extremo se atornilla la tuerca que proporciona la unión. Se emplean cuando en la construcción de la unión no tiene lugar para la cabeza del perno o si no hay la posibilidad de mecanizar (taladrar) el agujero pasante para perno.

Los espárragos son tornillos de sujeción que se utilizan en caso de resistencia suficiente del material de la pieza a unir y de suficiente espesor, de falta de sitio para colocar la tuerca y exigencias severas a la masa de unión, pero además se usan cuando el material

de las piezas a unir no asegura la longevidad suficiente de las roscas y cuando se necesita a menudo armar y desarmar las uniones. (Reshetov, 1985).



Figura 1.4. Espárragos.

1.9.1. Utilización de los espárragos

Se emplean principalmente para asegurar piezas acopladas, que no deban desplazarse longitudinalmente ni girar, no habiendo espacio suficiente para disponer la cabeza de un tornillo. La longitud del extremo atornillado es inversamente proporcional a la resistencia del material de la pieza. Así pues, se aplicarán los espárragos con extremo atornillado corto en materiales de gran resistencia, con extremo atornillado medio en materiales de resistencia media, y con extremo atornillado largo cuando la resistencia del material sea baja. (Dobrovolski, 1990).

1.9.2. Clasificación de los espárragos

Existen diferentes tipos de espárragos, cada uno de ellos para unas aplicaciones determinadas. Unos están roscados en toda su longitud, otros disponen una parte del vástago sin roscar. Para facilitar su manipulación con la ayuda de una herramienta, pueden disponer en uno de sus extremos una ranura o un taladro de sección hexagonal embutido. Se suelen utilizar para asegurar la posición de piezas, después del montaje.

Otro tipo de espárragos se caracterizan por presentar doblada, según diferentes formas, la parte del vástago no roscada, y de este modo facilitar su empotramiento en cualquier tipo de cimentación de hormigón. Se utilizan para el anclaje de maquinaria, armarios, báculos y postes, a sus bases de cimentación.

Otro tipo de espárragos se caracterizan por presentar doblada, según diferentes formas, la parte del vástago no roscada, y de este modo facilitar su empotramiento en cualquier tipo de cimentación de hormigón. Se utilizan para el anclaje de maquinaria, armarios, báculos, postes, etc., a sus bases de cimentación.

1.9.3. Tratamiento térmico de los espárragos

De acuerdo a lo planteado por Dobrovolski (1990), de forma específica, se puede señalar que para mejorar las características mecánicas de los espárragos de acero, éstos deben exponerse al tratamiento térmico, al laminado por rodillos de la rosca y del sector de transición del núcleo a los extremos. Con motivo de aumentar las propiedades anticorrosivas de los elementos roscados, la norma rusa GOST 1759-70 prevé la aplicación de recubrimientos metálicos y capas de óxido a sus superficies (zincado, cadmiado cromatizado, de níquel en capas múltiples u otros). Dentro de los tratamientos termoquímicos más difundidos en esta rama de la industria se encuentran la nitruración, cianuración, carbonitruración y la cementación. Los espárragos se someten a la cementación en sus extremos logrando aumentar el contenido de carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temple y revenidos, una gran dureza superficial, resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.



1.10. Conclusiones del capítulo 1

- Se fundamentaron las teorías que abordan el comportamiento de la fractura de los materiales, fundamentalmente el fenómeno de la fatiga; el cual es el factor principal que propicia considerablemente la rotura de los espárragos.
- Existen disímiles tipos de aleaciones fabricadas de acero, cada una de ellas establecidas para circunstancias específicas; por lo que es de valiosa importancia conocerlas a fondo y utilizarlas donde verdaderamente puedan cumplir con las condiciones de trabajo a las que serán sometidas.
- El análisis bibliográfico realizado posibilitó profundizar en la síntesis teórica de las uniones roscadas empleadas en la industria mecánica actual. Fueron expuestas esencialmente las características de los espárragos y las peculiaridades con que se diferencian de otros elementos de rosca.



II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La realización de experimentos ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas presentes en elementos y equipamientos industriales; por esta razón se requiere de la implementación de los mismos para tales propósitos. Estrechamente enlazados con éstos se encuentra la correcta selección de los materiales con que son fabricados estos dispositivos poniéndose en función de las exigencias que se planteen para su empleo. Para ello es importante conocer la utilización y las propiedades más significativas que precisa el material presente para dar una respuesta apropiada cuando está bajo condiciones reales de trabajo.

Por tales razones el presente capítulo tiene como **objetivo** fundamentar las propiedades a investigar y aplicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema manifestado.

2.2. Metodología para el desarrollo de la investigación

Con el propósito de dar solución al problema planteado, verificar la hipótesis y cumplir el objetivo, se estableció un plan experimental, el cual contempla los siguientes aspectos:

1. Análisis químico de los diferentes materiales empleados para la fabricación del objeto de estudio.
2. Realización y verificación de la metodología de cálculo para el diseño del espárrago en cuestión.
3. Análisis macroscópico de la situación alrededor de la zona de fractura.
4. Análisis microestructural de cada uno de ellos.
5. Realización de ensayos de dureza a los materiales analizados.
6. Simulación por el Método de Elementos Finitos del comportamiento de la resistencia mecánica de la pieza sometida a tensiones variables.

2.2.1. Análisis químico de los diferentes materiales empleados

Se comprobó la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con los elementos teóricos ya estudiados. El análisis

químico se realizó empleando un espectrómetro de masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel (anexo 1).

Este equipo basa su funcionamiento en una chispa generada por la energía eléctrica, la cual provoca la excitación de los átomos en una atmósfera inherente de argón. Este haz de luz pasa a través de un cable de fibra óptica hacia un prisma donde se producen las líneas espectrales de cada elemento analítico, las cuales son leídas por un fototubo que a su vez transforma las señales ópticas en eléctricas que son procesadas por el equipo determinando la curva de calibración de alta y baja concentraciones para cada elemento químico.

El espectrómetro es insensible a las fluctuaciones de temperatura, vibraciones y suciedad que se pueda colocar cerca de la producción, reduciendo el tiempo requerido para ir de la toma de muestra hasta la obtención de un análisis completo. Los procesos de toma de la muestra son extremadamente importantes para la obtención de análisis precisos. El personal debe ser cuidadosamente entrenado en ambos procesos para lograr resultados correctos y reproducibles.

Luego con ayuda del software llamado “Key of Steel” (Llave de Acero, 2005) pudimos comparar estos elementos y semejarlos a los del software, determinando así el verdadero material del espárrago y sus propiedades mecánicas.

2.2.2. Metodología de cálculo para el diseño del espárrago

La siguiente metodología de cálculo mostrada a continuación muestra las ecuaciones necesarias para el diseño del espárrago situado en la tapa del cárter del motor MAN (anexo 2), teniendo en cuenta las dimensiones específicas de la pieza y sus propiedades mecánicas. El procedimiento expuesto se ha adquirido por medio de (Dobrovolski, 1990) y se verificará para los dos materiales investigados haciéndose así una comparación entre éstos. Para los elementos roscados cargados por fuerzas que provocan tensiones alternativas se emplean, generalmente, las uniones montadas con tensado previo. A continuación se presentarán los principales parámetros que se valoran para el diseño de la resistencia mecánica de las uniones roscadas cargas estáticas que se montan con tensado previo.

2.2.2.1. Procedimiento para la determinación de la carga de trabajo

La carga de trabajo se determinó considerando aplicada directamente a los elementos roscados y que una presión excesiva sobre la tapa y sobre los espárragos todos los espárragos estuvieron igualmente cargados.

$$P = \frac{Q}{z} = p \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot z} \quad (2.1)$$

Donde:

P: carga de trabajo; N

D: diámetro de la tapa del cárter del motor; mm

z: cantidad de espárragos; adimensional.

p: presión interna de la tapa del cárter del motor; MPa

2.2.2.2. Procedimiento para la determinación de la fuerza residual del tensado

La fuerza de residual de tensado se estableció de acuerdo con la magnitud de la carga de trabajo por la ecuación:

$$V' = P \cdot \gamma \quad (2.2)$$

Donde:

V': tensado residual; N

γ : coeficiente experimental; adimensional. Se toma en los cálculos, igual a $0,2 \div 1,8$ según sean las condiciones de trabajo del conjunto.

P: carga de trabajo; N

2.2.2.3. Procedimiento para la determinación de la carga axial teórica

La carga axial teórica se determinó a partir de la condición de equilibrio, la fuerza que recae sobre el espárrago es igual a la suma de la carga de trabajo y la fuerza residual de tensado.

$$P_0 = P + V' = P(1 + \gamma) \quad (2.3)$$

Donde:

P₀: carga axial teórica; N



P: carga de trabajo: N

V': tensado residual: N

2.2.2.4. Procedimiento para la determinación del diámetro interior del roscado

El diámetro interior del roscado se determinó en función de la influencia de momento de roscado, que tuerce la caña del espárrago, si se toma en cuenta el área de esfuerzo de tracción (trabajo) para los perfiles de rosca, el diámetro interior para la parte roscada del espárrago se definió por la fórmula siguiente:

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3 P_0}{\pi \cdot [\sigma_{rot}]}} \quad (2.4)$$

Donde:

d_1 : Diámetro interior del roscado; mm

P_0 : carga axial teórica; N

$[\sigma_{rot}]$: tensión de rotura admisible; MPa

Siendo:

$$[\sigma_{rot}] = 0,3 \cdot \sigma_T \quad (2.4.1)$$

Donde:

σ_T : resistencia a la tracción del material del espárrago; MPa

2.2.2.5. Procedimiento para la determinación del coeficiente de rigidez

La mayoría de las veces es necesario sujetar varios elementos o piezas simultáneamente, y se hace necesario determinar la constante de rigidez resultante o total de los elementos unidos. Puesto que las piezas del sistema del espárrago forman un sistema de elementos elásticos unidos en serie, el coeficiente de rigidez se determinó por la condición:

$$C_{esp} = \frac{E_{esp} \cdot F_{esp}}{l_{esp}} \quad (2.5)$$

Donde:

C_{esp} : coeficiente de rigidez del espárrago; MPa

E_{esp} : módulo de elasticidad del material del espárrago; MPa



l_{esp} : longitud de cálculo respectiva del espárrago; mm

Siendo:

$$l_{esp} = l + 0,3 \cdot d \quad (2.5.1)$$

F_{esp} : área de la sección transversal del espárrago de sección constante; mm

$$F_{esp} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.5.2)$$

Donde:

d: diámetro de la rosca; mm

2.2.2.6. Procedimiento para la determinación de la fuerza de tensado previo

La fuerza de tensado previo se determinó atendiendo a la exigencias de esta uniones, en este caso debe satisfacer requisitos de hermeticidad entre la tapa y el cárter del motor de combustión interna.

$$V = P \left(\gamma + \frac{C_{piez}}{C_{esp} + C_{piez}} \right) \quad (2.6)$$

Donde:

V: fuerza del tensado previo; N

γ : coeficiente experimental considera el tensado residual; (adimensional).

C_{piez} : Coeficiente de rigidez de la pieza a ensamblar; MPa, Se toma en los cálculos, igual a $5,0 \div 6,5 \cdot 10^5$ MPa, según las condiciones de trabajo.

C_{esp} : coeficiente de rigidez del espárrago; MPa

2.2.2.7. Procedimiento para la determinación del esfuerzo de tensado previo

El esfuerzo de tensado previo se determinó considerando que el trabajo de la unión se realiza con tensado previo, cuyas piezas se encuentran bajo la acción de cargas de trabajo axiales y poseen igual magnitud. Teniendo en cuenta esto el esfuerzo por tensado previo se calculó por la fórmula:

$$\sigma_{ten} = \frac{V}{F_{esp}} \quad (2.7)$$

Donde:

σ_{ten} : esfuerzo de tensado previo; MPa

V: fuerza de tensado previo; N

F_{esp} : área de la sección transversal del espárrago; mm²

2.2.2.8. Procedimiento para la determinación de la fuerza sobre el espárrago

La fuerza que actúa sobre el espárrago ateniendo que las uniones montadas con tensado previo, después de aplicar la carga de trabajo, la fuerza que actúa sobre el espárrago crece en la magnitud

$$P_z = P \cdot \frac{C_{esp}}{C_{esp} + C_{piez}} < P_0 \quad (2.8)$$

O bien del siguiente modo,

$$P_0 = V + P_z$$

Luego despejando P_z , obtenemos:

$$P_z = P_0 - V \quad (2.9)$$

Donde:

P_z : fuerza que actúa sobre el espárrago; N

V: fuerza de tensado previo; N

P_0 : carga axial teórica; N

Luego comprobamos si el coeficiente de rigidez de la pieza fue tomado correctamente de los catálogos. De la siguiente manera procesamos al cálculo, despejando el factor C_{piez} de la ecuación 2.8 quedando:

$$C_{piez} = P \cdot \frac{C_{esp}}{P_z} - C_{esp} \quad (2.10)$$

2.2.2.9. Procedimiento para la determinación del coeficiente de seguridad

Para los elementos roscados cargados por fuerzas que provocan tensiones alternativas se emplean, generalmente, las uniones montadas con tensado previo. El cálculo de proyecto de resistencia mecánica a cargas variables o cíclicas del factor de seguridad en un ciclo simétrico se realiza según la expresión siguiente:



$$n_a = \frac{(\sigma_{-1})_{esp}}{\sigma_a} = \frac{(\sigma_{-1})_{esp}}{\frac{P_z}{2F_{esp}}} \geq [n_a] \quad (2.11)$$

Donde:

n_a : coeficiente de seguridad; adimensional

$[n_a] \geq 2,5$: coeficiente de seguridad admisible; adimensional

$(\sigma_{-1})_{esp}$: límite de fatiga de la unión roscada: MPa

P_z : fuerza que actúa sobre el espárrago; N

F_{esp} : área de la sección transversal del espárrago; mm²

Si el valor de $(\sigma_{-1})_{esp}$ es desconocido, el límite de fatiga de la unión roscada se determina por la fórmula:

$$(\sigma_{-1})_{esp} = \frac{(\sigma_{-1})_{trac}}{K_\sigma} \quad (2.11.1)$$

Donde:

$(\sigma_{-1})_{esp}$: límite de fatiga de la unión roscada; MPa

$(\sigma_{-1})_{trac}$: límite de fatiga del material del tornillo a tracción y compresión con ciclo simétrico; MPa

K_σ : coeficiente efectivo de concentraciones de tensiones; adimensional. Para aceros aleados, iguala 4,0÷5,5

2.2.3. Equipos y materiales empleados en la experimentación

Dentro de los procesos de diseños, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección adecuada de cada máquina, para ensayos microestructurales la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia, ya que el cambio de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener.

2.2.3.1. Pulidora metalográfica MONTASUPAL

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se

desbastaron con papeles abrasivos del tipo 100, 120, 150, 180, 220 y 280, las características de la máquina son:

Voltaje	250 V
Corriente	2,5 A
Número de revoluciones	300 - 1 000 rev/min
Potencia del motor	3,72 kW

2.2.3.2. Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe, que refleja la fotografía en el computador (anexo 3). Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. Se utilizaron distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener imágenes de 100 y 200 aumentos.

2.2.4. Análisis macroscópico del espárrago en la zona de rotura

Normalmente todos los objetos visibles a simple vista son a todos los efectos macroscópicos. Para la realización de este análisis se limpió la pieza con paños y una brocha pequeña, de forma tal que no quedaran restos o partículas de suciedad o aceite de motor en su superficie. Luego se colocó encima de una hoja en blanco para tirar la foto con más claridad y poder ejercer el trabajo exacto con una cámara fotográfica marca Sony con calidad de imagen de 8.0 megapíxeles.

2.2.5. Selección y preparación de muestras

Siguiendo las normas ASTM E 3-95, se tomaron muestras pertenecientes al material de los espárragos que se encontraban ya fracturados, de las cuales se pudieron obtener ejemplares del material original desde su puesta en explotación. Además se tomaron muestras del nuevo material a recomendar para la fabricación de estos elementos roscados.

- **Corte:** Las operaciones de corte se realizaron con una cortadora de metales aplicando refrigeración intensa con emulsión refrigerante para evitar transformaciones adicionales en la estructura producto del calentamiento durante el corte.
- **Pulido:** El pulido de las muestras fue realizado inicialmente de forma manual sobre una superficie de cristal empleando papel abrasivo de las series 100, 150, 300, 350, 500, 600, 800,1000 y finalmente en los laboratorios del ISMMM en una Pulidora Metalográfica modelo MONTASUPAL empleando paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de cromo con granulometría de 3 μm .
- **Limpieza, lavado y secado:** Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con tetracloruro de carbono para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad.

2.2.6. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico de las muestras se realizó según las Normas NC 10-55:86 y NC 10-56:86.

Ataque de las superficies a investigar: Las superficies ya preparadas se atacaron químicamente con Nital, una solución de alcohol y Ácido Nítrico, según ASTM E 407. En la norma ASTM E 407 se identifica al Nital con el número 74 y su composición se indica como: 1÷5 mL HNO_3 + 100 mL de metanol o etanol al 99 %.

- Para el primer caso (espárrago fracturado), se empleó Nital al 4 % (2 mL HNO_3 + 100 mL etanol) rebajado en un 5 % con agua destilada. El tiempo de ataque sobre la superficie pulida fue de 5 segundos aproximadamente.
- Para el segundo caso (espárrago nuevo), se empleó Nital al 4 % (5 mL HNO_3 + 100 mL etanol). El tiempo de ataque sobre la superficie pulida fue de 10 segundos aproximadamente.
- **Limpieza y secado:** Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavaron con agua destilada y posteriormente en alcohol para finalmente secarlas en aire caliente.



- **Observación:** Para la observación de las microestructuras se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100, ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa.

2.2.7. Ensayos de dureza

El ensayo de dureza es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado (Guliáev, 1983). En la medición de la dureza se siguieron los procedimientos de la norma NC 10 – 56: 86, por lo que se utilizó un microdurómetro modelo PMT – 3 No 168, que tiene acoplado un objetivo acromático con compensación libre trinocular de tubo inclinado a 30°, perteneciente al laboratorio de Ciencias de los Materiales de la Facultad de Minas del ISMM Moa. La superficie de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido). Se realizaron cuatro mediciones en varias zonas alrededor del espárrago con un penetrador en forma de bola con una carga de 100 kgf de compresión sobre la superficie del material según la norma ASTM E 92 – 82.

2.3. Variables para el proceso de simulación

El proceso de generación de la solución mediante el análisis por elementos finitos se realiza en el software Ansys Workbench versión 12.1 mediante varios pasos: definición de la geometría objeto de estudio, especificación del régimen a estudiar, asignación de las propiedades físicas de los materiales, asignación de las condiciones de contorno, aplicación de las cargas, mallado de la geometría, resolución del problema y análisis de la solución. Las variables y parámetros perpetuados para la realización de la simulación por el Método de Elementos Finitos (MEF) son aquellos factores que pueden definir el comportamiento y distribución de las tensiones en el análisis tridimensional del espárrago. Para obtener los mejores resultados en el proceso, es necesario conocer el efecto de cada variable sobre las diversas características o propiedades vinculadas a dicho proceso.

En la Figura 2.1 que se muestra a continuación, se exponen las condiciones de fronteras y limitaciones en la geometría del espárrago que se utilizarán para el modelo de elementos finitos y el mallado correspondiente al modelo.



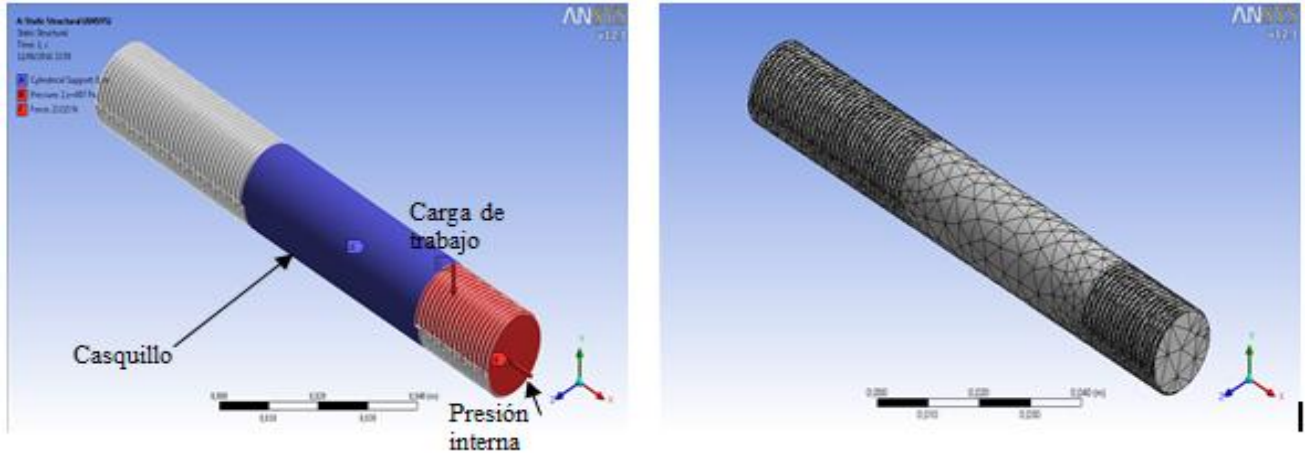


Figura 2.1: Mallado y condiciones de fronteras del espárrago.



2.4. Conclusiones del capítulo 2

1. Atendiendo los elementos empleados en la ensambladura de la unión roscada y las características del material, se establece la metodología de cálculo para la evaluación y verificación del diseño del objeto de estudio investigado.
2. Quedaron descritas cada una de las técnicas y procedimientos prácticos y experimentales, que darán arribo a los resultados necesarios en la solución del problema.
3. El equipamiento y tecnologías a utilizar cuentan con una minuciosa y detallada información de las mismas, brindando confiabilidad y precisión en cada uno de sus resultados.



III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La realización de un correcto análisis de los resultados alcanzados mediante una investigación, constituye un punto clave en la puesta en práctica de la solución más acertada para un determinado problema. Luego de dejar establecidos el Estado del Arte, la fundamentación de los factores a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para los análisis en la solución del problema, se procede a la discusión de los resultados a partir de la sistematización de los criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de la hipótesis planteada.

Este capítulo tiene como **objetivos específicos**:

1. Efectuar la valoración crítica de los resultados obtenidos y con ello explicar los fundamentos científicos que surgen como solución al problema planteado.
2. Analizar detalladamente el impacto económico y medioambiental que proporciona la instalación de los espárragos en los motores.

3.2. Resultado del análisis químico

El promedio de las mediciones de composición química como resultado del análisis químico realizado a los dos materiales investigados, según el espectrómetro, se muestran en las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1. Composición química promedio (% en masa) de la pieza fracturada.

Material 1	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
Probeta	0,425	0,273	0,782	0,0137	0,0224	0,9907	0,2021	0,103	96,91
AISI 4140	0,38÷0,43	0,15÷0,35	0,75÷1	≤0,025	≤0,025	0,80÷1,1	0,15÷0,25	≤0,25	balance

Tabla 3.2. Composición química promedio (% en masa) de la pieza nueva.

Material 2	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
Probeta	0,525	0,260	0,861	0,0182	0,0351	1,1389	0,2007	0,1729	96,37
AISI 4150	0,48÷0,53	0,15÷0,35	0,75÷1	≤0,035	≤0,04	0,80÷1,1	0,15÷0,25	≤0,25	balance

La composición química expuesta en la tabla 3.1 y 3.2, se aprecia que el material 1 del espárrago fracturado es un acero del tipo AISI 4140 y que el material 2 del espárrago fabricado en la UEB Empresa de Mantenimiento a Centrales Eléctricas (EMCE) de Felton es un acero del tipo AISI 4150.

Según los elementos que se relacionan del material de la pieza analizada, la composición química se corresponde con que este espárrago constituye un acero bajo aleado con mayor porcentaje en el elemento cromo.

3.3. Comprobación del diseño del espárrago

El cálculo verificativo del diseño se le desarrolló para las dos piezas en estudio, tanto para el espárrago que experimentó la rotura, como para el fabricado como pieza de repuesto en la EMCE de Felton y se realizó atendiendo a la resistencia mecánica a cargas estáticas con tensado previo.

A partir de la sustitución de los datos expuestos en las ecuaciones planteadas anteriormente en la metodología de cálculo del capítulo 2, se obtuvieron los resultados para cada material respectivamente.

Verificación del diseño para el espárrago fabricado de acero AISI 4140:

- **Carga de trabajo**

Teniendo en cuenta que el diámetro de la tapa del cárter del motor 85 mm y una presión de trabajo dentro de la tapa del cárter es de 19,5 MPa, al sustituirlos en la ecuación 2.1, la carga de trabajo aplicada en el espárrago obtenida es:

$$P = 22119,34 \text{ N}$$

- **Fuerza residual del tensado**

Considerando el coeficiente experimental para el tensado residual como 0,25; sustituyéndolo en la ecuación 2.2, el tensado necesario para garantizar la hermeticidad en la unión tiene un valor de:

$$V' = 5529,84 \text{ N}$$



- **Carga axial teórica**

Con la sustitución de la carga de trabajo y la fuerza residual de tensado respectivamente en la ecuación 2.3, se determinó que la carga axial teórica a la que estará sometido el espárrago tuvo un valor de:

$$P_0 = 27649,18 \text{ N.}$$

- **Diámetro interior del roscado**

Para realizar este cálculo fue necesario obtener el valor de la ecuación 2.4.1 inicialmente, resultando que la tensión de rotura admisible es de 348 MPa, con una resistencia a la tensión del material del espárrago fracturado (acero AISI 4140) de 1160 MPa según (Mott, 2006), se obtuvo los valores en la ecuación 2.4 y se determina que el diámetro interior del roscado es:

$$d_1 = 11,47 \text{ mm.}$$

Seguidamente pasamos a comparar y buscar un semejante de este resultado mayor o igual que el obtenido en el Atlas de Diseño de Elementos de Máquinas Tomo 1, donde se pudo especificar que para el diseño se necesitará un diámetro de 19,188 mm que satisfaga las condiciones de resistencia mecánica de la unión. Entonces se elegirá un espárrago **M20X0,75** con un diámetro medio de la rosca de 19,513 mm, 0,75 mm de paso fino y área de la sección transversal del espárrago por d_{nom} de 2,86 cm².

- **Coefficiente de rigidez del espárrago**

El cálculo del coeficiente de rigidez se realizó a partir de la ecuación 2.5.1 y 2.5.2 respectivamente, obteniendo como resultado que la longitud de cálculo del espárrago de 20 mm de diámetro es de 118 mm y el área transversal de sección constante correspondiente con éste, posee un valor de 314 mm². Considerando el módulo de elasticidad de $2,1 \cdot 10^5$ MPa para los aceros, sustituyendo los valores en la ecuación 2.5 el coeficiente de rigidez del espárrago es de:

$$C_{esp} = 5,58 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$



- **Fuerza de tensado previo**

Considerando como coeficiente de rigidez de la pieza a ensamblar $6,0 \cdot 10^5$ MPa en la ecuación 2.6, la fuerza del tensado previo es de:

$$V = 16990,6 \text{ N}$$

- **Esfuerzo de tensado previo**

De acuerdo a la ecuación 2.7 la división entre la fuerza del tensado previo y el área de la sección transversal del espárrago da lugar al esfuerzo del tensado previo:

$$\sigma_{\text{ten}} = 54,11 \text{ MPa.}$$

- **Fuerza que actúa sobre el espárrago**

Al despejar el término P_z (fuerza que actúa sobre el espárrago) en la ecuación 2.9 se alcanza como resultado:

$$P_z = 10658,58 \text{ N}$$

Luego se comprobó el coeficiente de rigidez de la pieza a ensamblar tomado de los catálogos, obtuvo la ecuación 2.10 por un despeje desarrollado a partir de la expresión 2.8, el cual introdujo un valor de $5,999 \cdot 10^5$ MPa lo que corresponde aproximadamente a $6,0 \cdot 10^5$ MPa; se concluyó que el C_{piez} asumido y ajustado a las condiciones de diseño de la pieza está correctamente seleccionado.

- **Coficiente de seguridad**

A continuación se calculó el coeficiente de seguridad de la pieza a partir de la ecuación 2.11, pero para efectuar este cálculo fue importante desarrollar la ecuación 2.11.1 inicialmente, de lo que resultó que el límite de fatiga de la unión roscada fue de 63,27 MPa, atendiendo que el coeficiente efectivo de concentraciones de tensiones para acero aleado K_σ es de 5,5. Ya considerado esto se obtiene que el coeficiente de seguridad del espárrago es de:

$$n_a = 2,42.$$

Donde $n_a < [n_a]$, es decir, $2,42 < 2,5$ (es menor que el admisible).

Luego se verificó el diseño del espárrago fabricado con el material AISI 4150.

Verificación del diseño para el espárrago fabricado de acero AISI 4150:

- **Carga de trabajo**

Teniendo en cuenta el diámetro de la tapa del cárter del motor 85 mm y una presión de trabajo dentro de la tapa del cárter de 19,5 MPa, sustituyendo lo valores en la ecuación 2.1, la carga de trabajo aplicada a un espárrago es:

$$P = 22119,34 \text{ N}$$

- **Fuerza residual del tensado**

Considerando el coeficiente experimental del tensado residual como 0,25; de acuerdo a la ecuación 2.2, el tensado necesario para garantizar la hermeticidad en la unión tiene un valor de:

$$V' = 5529,84 \text{ N}$$

- **Carga axial teórica**

Sustituyendo la carga de trabajo y tensado residual respectivamente en la ecuación 2.3, la carga axial teórica a la que estará sometido el espárrago tiene un valor de:

$$P_0 = 27649,18 \text{ N}$$

- **Diámetro interior del roscado**

En este cálculo fue necesario desarrollar la ecuación 2.4.1 primeramente, del cual resultó que la tensión de rotura admisible es de 348 MPa, con una resistencia a la tensión del material del espárrago fracturado (acero AISI 4150) de 1360 MPa según (Mott, 2006). Luego se sustituyeron los valores en la ecuación 2.4 y se determinó que el diámetro interior del roscado es de:

$$d_1 = 10,59 \text{ mm}$$

Seguidamente se comprobó y buscó un resultado mayor o igual que el obtenido en el Atlas de Diseño de Elementos de Máquinas Tomo 1, donde se pudo especificar que para el diseño se necesita un diámetro de 18,918 mm para que satisfaga las condiciones de resistencia mecánica de la unión. Entonces se elegirá un espárrago **M20X1** con un

diámetro medio de la rosca de 19,350 mm, 1 mm de paso fino y área de la sección transversal del espárrago por d_{nom} de 2,77 cm².

- **Coeficiente de rigidez**

El cálculo del coeficiente de rigidez se desarrolló a partir de la ecuación 2.5.1 y 2.5.2 respectivamente, obteniendo como resultado que la longitud de cálculo del espárrago de 20 mm de diámetro es de 118 mm y el área transversal de sección constante correspondiente con este, posee un valor de 314 mm². Luego sustituyendo los valores en la ecuación 2.5 y considerando el módulo de elasticidad de $2,1 \cdot 10^5$ MPa para los aceros, el coeficiente de rigidez del espárrago es de:

$$C_{esp} = 5,58 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

- **Fuerza de tensado previo**

Considerado como coeficiente de rigidez de la pieza a ensamblar $6,0 \cdot 10^5$ MPa se obtuvo como resultado a partir de la ecuación 2.6 que la fuerza del tensado previo es de:

$$V = 16990,6 \text{ N}$$

- **Esfuerzo de tensado previo**

De acuerdo a la ecuación 2.7 la división entre la fuerza del tensado previo y el área de la sección transversal del espárrago introduce un valor de esfuerzo de tensado de:

$$\sigma_{ten} = 54,11 \text{ MPa,}$$

El cual da lugar al esfuerzo al que estará sometido al tensarlo previamente.

- **Fuerza sobre el espárrago**

Se despejó el término P_z (fuerza que actúa sobre el espárrago) en la ecuación 2.9 y se obtuvo como resultado:

$$P_z = 10658,58 \text{ N}$$

A continuación se comprobó el coeficiente de rigidez de la pieza a ensamblar tomado de los catálogos, obteniéndose a partir de la ecuación 2.10 del despeje desarrollado de la expresión 2.8, un valor de $5,999 \cdot 10^5$ MPa lo que corresponde aproximadamente a $6,0 \cdot 10^5$

MPa. A lo que concluimos que el C_{piez} asumido y ajustado a las condiciones de diseño de la pieza está correctamente seleccionado.

- **Coefficiente de seguridad**

El coeficiente de seguridad de la pieza se determinó a partir de la ecuación 2.11, pero para efectuar este cálculo fue importante desarrollar la ecuación 2.11.1 previamente, del cual resultó que el límite de fatiga de la unión roscada fue de 74,18 MPa y teniendo en cuenta que el coeficiente efectivo de concentraciones de tensiones para acero aleado K_σ es de 5,5. Sustituyendo los resultados se obtuvo que el coeficiente de seguridad del espárrago es de:

$$n_a = 2,84$$

Donde $n_a > [n_a]$, es decir, $2,84 > 2,5$ (es mayor que el admisible).

3.4. Análisis macroscópico del espárrago en la zona de rotura

Observando el espárrago que presenta la falla, se pudieron hacer las siguientes apreciaciones:

1. La zona de falla coincide con la sección de la rosca donde se une la pieza, la cual constituye una zona de alta concentración de tensiones. (figura 3.1).



Figura 3.1. Diagrama del espárrago mostrando la zona de falla.

2. En los alrededores de la fractura se aprecia deformación plástica, lo que nos lleva a pensar en una fractura dúctil.
3. En la parte superior izquierda se aprecia, la formación de la grieta en el borde. La región lisa que se observa en centro de la pieza corresponde al área en la cual la grieta se propagó débilmente. La zona más rugosa y de textura fibrosa comprende la región donde ocurrió la rotura final. Planteado esto se puede percibir la existencia del fenómeno de fatiga en la pieza, lo que da lugar a la falla por cizallamiento del espárrago. (figura 3.2).

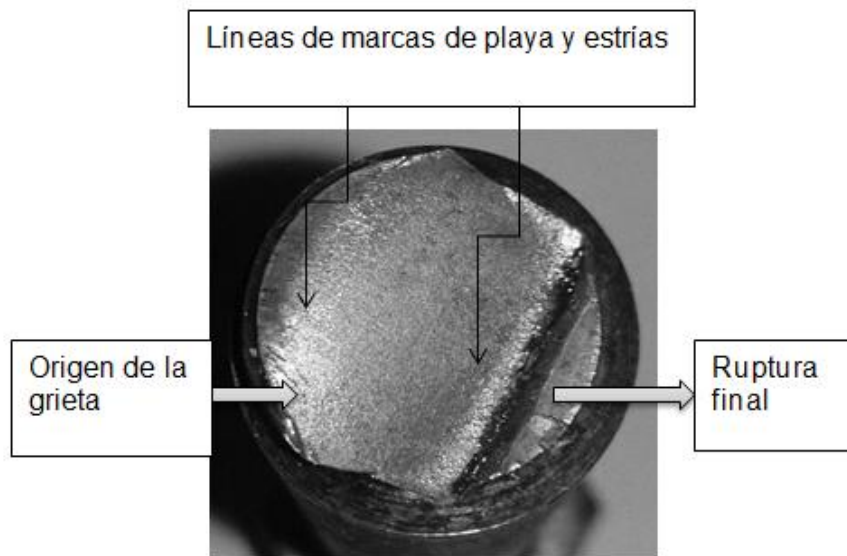
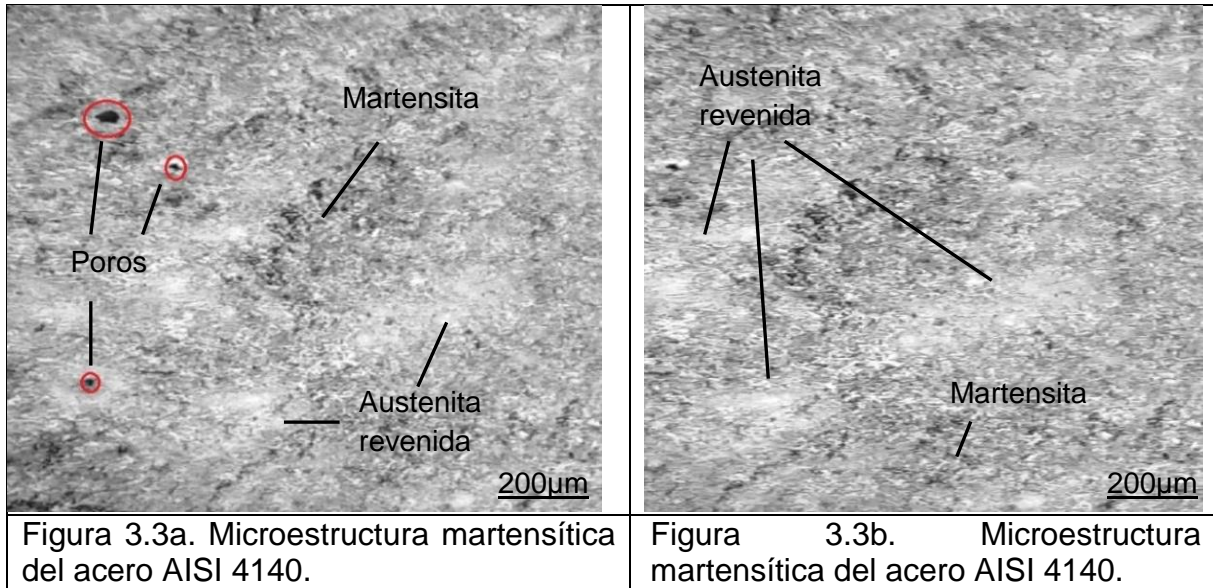


Figura 3.2. Superficie de fractura por fatiga del espárrago.

3.5. Análisis microestructural de los materiales empleados

En las figuras siguientes se presentan las microestructuras de los dos materiales utilizados en la fabricación de la pieza los cuales se arribaron en microscopio marca Novel modelo NIM – 100 del laboratorio de Ciencias de los Materiales perteneciente a la Facultad de Minas del ISMMM. Como se observa en la figura 3.3, el material original del espárrago posee una estructura martensítica con austenita revenida en los límites de grano con varias porosidades en su microestructura, las cuales proporcionan el agrietamiento del material y consecuentemente la fractura temporal de la pieza.



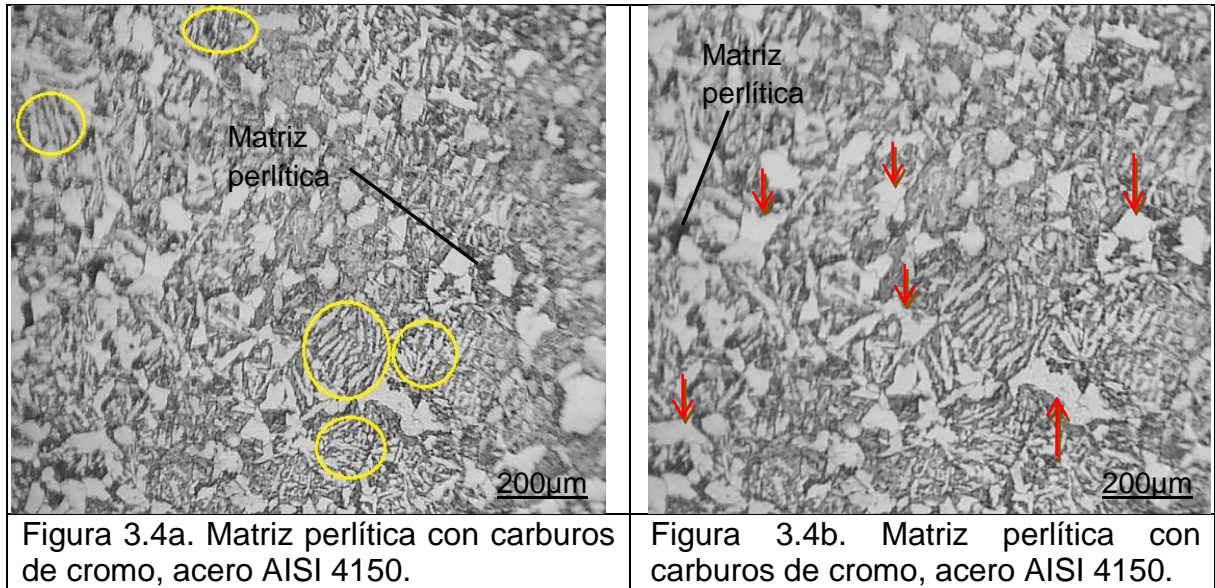


En la figura 3.3.a presentada se muestran las porosidades existentes en la microestructura dentro de círculos rojos, lo que determina que este material es susceptible al agrietamiento. Estos poros originan la aparición de microgrietas que se extienden por toda la superficie del material que constituye al acero investigado. Estas microgrietas benefician claramente la fractura del material que está presentándose en los espárragos. En la parte superior de la figura 3.3.b se puede observar que debido al esfuerzo físico del cizallamiento, es decir, al fallar la pieza, los granos se deforman de acuerdo a la dirección de la microgrieta.

También se indican fases blancas por toda la región las cuales se corresponden con la austenita residual que queda producto de la no transformación durante el tratamiento térmico realizado (temple rápido), es decir, que no existe equilibrio en la transformación sin difusión de la austenita.

Observando la figura 3.4 que se presenta a continuación se puede percibir la formación de carburos dispersos de cromo en una matriz perlítica y estructuras en formas de agujas (aciculares) que se forman presumiblemente después de un tratamiento térmico no controlado (termomejorado).





La región limitada con círculos amarillos mostrada en la figura 3.4.a se corresponde a diversos elementos con configuración acicular (formas de agujas), formados mediante el calentamiento a través de altas temperaturas de flamas incontrolables en un termomejorado impuesto, es decir, sin tiempo de operación registrado al fabricar las piezas. La matriz perlítica (zona oscura) también le aporta al material dureza y más ductilidad.

En la figura 3.4.b se indican los carburos de cromo formados con las flechas rojas. Esta precipitación de carburos de cromo es debida al tratamiento térmico expuesto al material luego de un laminado por toda su superficie. El elemento "cromo" en la microestructura le proporciona al material considerable dureza en conjunto con el carbono, pero a la vez le atribuye alta tenacidad lo que revela buena ductilidad para ser maquinado y además mejora la resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas.

Este tipo de acero brinda la ventaja, además, de ser fabricado en la UEB Empresa de Mantenimiento a Centrales Eléctricas (EMCE) de donde puede ser adquirida sin mayores problemas, la cual al igual que la UEB Grupo Fuel-oil de Moa pertenece también a la CTE "Lidio Ramón Pérez" de Felton. Las características tecnológicas y detalles de fabricación para el espárrago a confeccionar, ya están establecidas en la Empresa y se salen del marco y objetivo de este trabajo.



3.6. Análisis de dureza

De acuerdo a lo planteado por (Mott, 2010) la dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella. Existen dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido), y un penetrador cónico de diamante el cual se utiliza para los materiales más duros.

3.6.1. Ensayo de dureza aplicado a las muestras

En la figura 3.5 se ilustran los puntos donde se realizó el ensayo de dureza Rockwell con bola (HRB) al espárrago. También se ejecutó para los dos materiales.

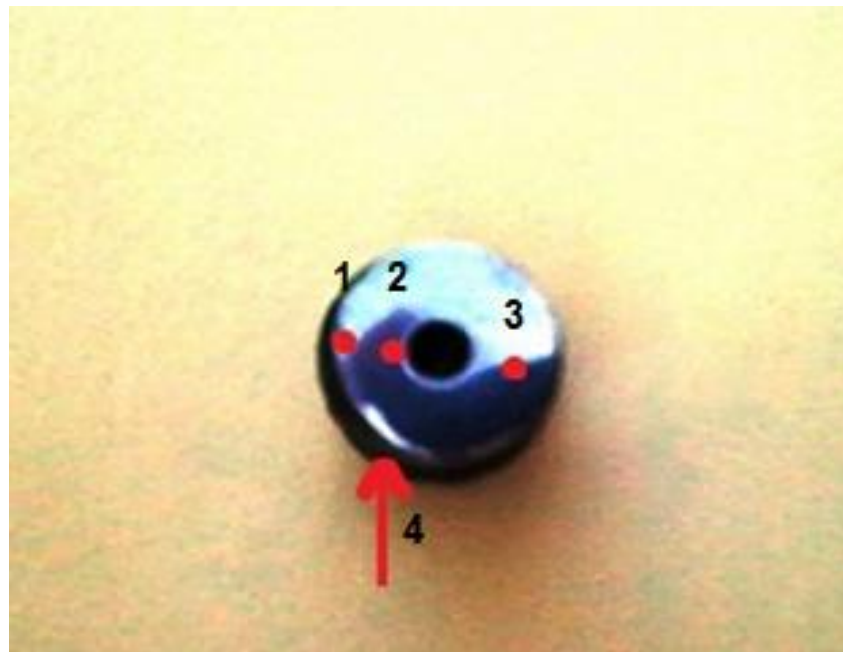


Figura 3.5. Puntos donde se toman la dureza de las muestras.

Los resultados del promedio del ensayo de dureza y el valor promedio total se muestran en la tabla 3.3:

Tabla 3.3. Mediciones de dureza realizadas a los materiales. (Carga de compresión de 100 kg).

Mediciones realizadas	Valores de dureza de los materiales (HRB)			
	AISI 4140		AISI 4150	
1	106,0	105,8	97,3	97,075
2	105,6		97,1	
3	105,9		96,9	
4	105,7		97,2	
Promedio total		105,8		97,075

Al efectuar el cálculo del promedio de muestras ($n=4$), se obtuvo la dureza que realmente poseen dichos materiales. Con estos valores, averiguamos además la equivalencia en otras escalas de medición tales como HV, HB y HRC en el caso del acero del tipo AISI 4140, según la norma UTP, en la tabla orientativa de “Conversión de Dureza” estandarizada del laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMMM de la Facultad de Minas.

Para el caso del acero AISI 4140 las escalas equivalentes de dureza son 290 HV, 276 HB y 28,5 HRC.

Para este material se recomienda no hacerse en la escala Rockwell con bola (HRB), puesto que es muy duro. Se exhorta a realizarse en la escala Rockwell con cono de diamante (HRC) con carga de compresión de 150 kg.

Para el caso del acero AISI 4150 las escalas equivalentes de dureza son 230 HV y 219 HB.

3.7. Simulación por el método de elementos finitos

Al darle solución al problema físico de la investigación se arribaron a distintos resultados por medio del software ANSYS, Workbench 12.1. A continuación en la figura 3.6 se presentan las deformaciones totales del modelo geométrico del sólido en 3D para el acero AISI 4140 instalado con un casquillo de fijación en el centro, con una presión de 19,5 MPa dentro de la tapa del cárter del motor y una carga de trabajo de 22119,34 N en la superficie del material. Como se puede observar existe una distribución de tales



deformaciones en conjunto, teniendo así una deformación total máxima de $9,429 \cdot 10^{-7}$ m y una deformación total mínima de $1,0477 \cdot 10^{-7}$ m.

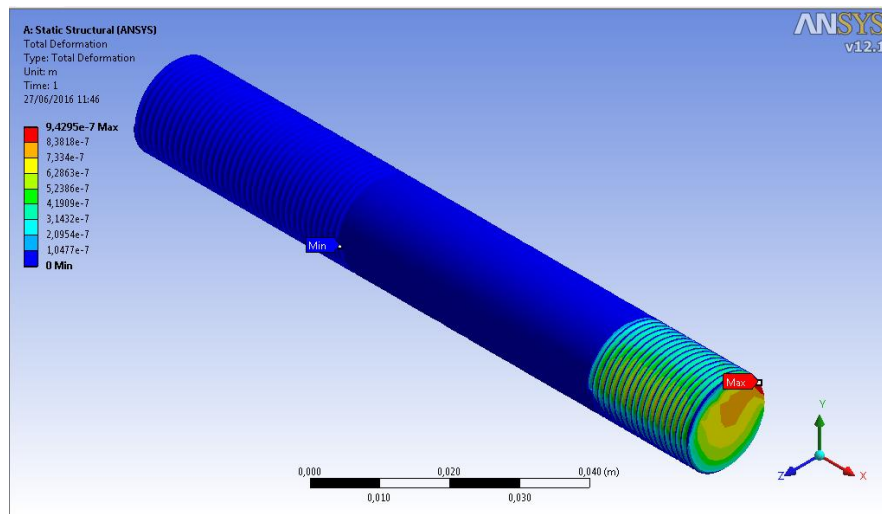


Figura 3.6. Comportamiento de la distribución de la deformación total.

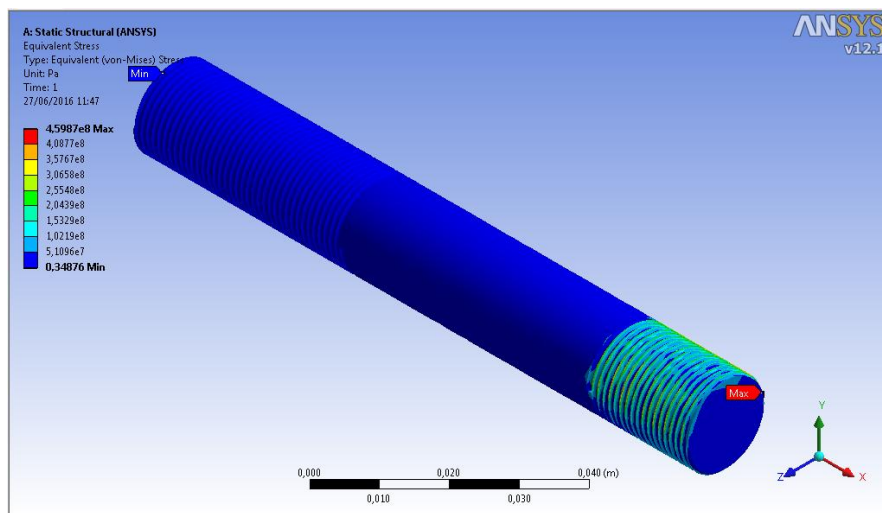


Figura 3.7. Comportamiento de la distribución de las tensiones equivalentes (Von Mises).

Según lo planteado por (Stiopin, 1985) el límite elástico o límite de fluencia, es la tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Con un límite de fluencia de 670 MPa el material está sometido a varios esfuerzos deformables los cuales son los causantes de que el espárrago sufra de roturas inminentemente temporales. En la figura 3.7 se indica la distribución de las tensiones elásticas equivalentes, llamadas tensiones de Von Mises. Dichas tensiones adquieren valores máximos de 459,87 MPa y valores mínimos de 0,34876 Pa, lo que demuestra lo



antes mencionado, deduciendo que el material resistirá dichas tensiones adquiriendo deformaciones constantes.

De acuerdo a la figura 3.8 las tensiones normales presentes en toda la sección transversal del espárrago en cuestión se han distribuido de forma perpendicular sobre dicha superficie. Con un valor de casi 8,3313 MPa por todo el cuerpo se puede apreciar que la zona donde hay mayor concentración de estas tensiones normales corresponde a la zona roscada. El valor adquirido por las tensiones normales máximas se encuentra en el rango de 158,01 MPa y 187,94 MPa.

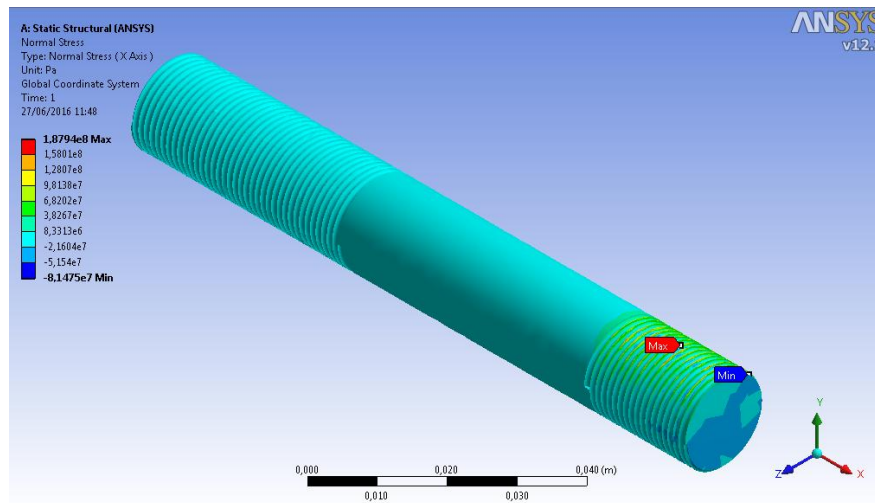


Figura 3.8. Comportamiento de la distribución de las tensiones normales.

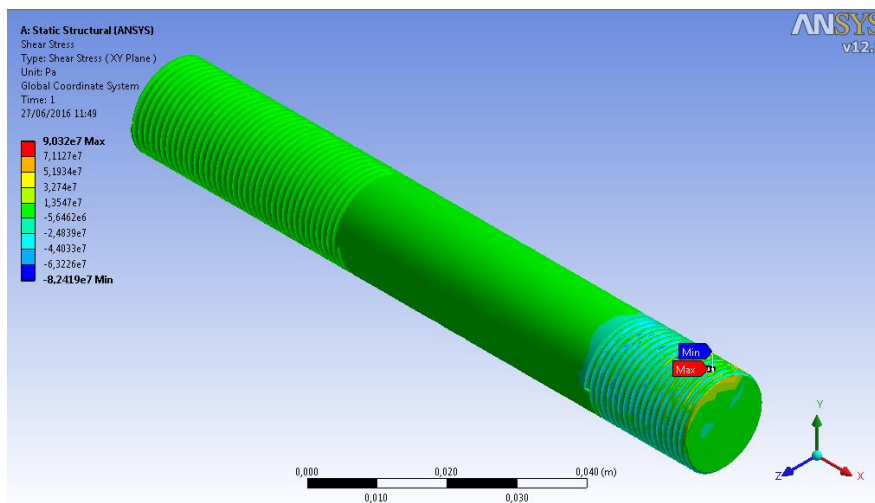


Figura 3.9. Comportamiento de la distribución de las tensiones tangenciales.



Además de estas tensiones normales el espárrago también está sometido a tensiones tangenciales que actúan sobre la superficie, las cuales mostradas arriba en la figura 3.9 están dadas por el esfuerzo de cizallamiento existente en la pieza. Estas tensiones tangenciales alcanzan valores máximos de 90,72 MPa y valores mínimos de -82,419 MPa.

Al observar la figura 3.10 mostrada a continuación se puede apreciar el comportamiento del factor de seguridad a la resistencia mecánica al ser sometida a diferentes esfuerzos y sollicitaciones. El valor mínimo puntual varía entre 1,45 y 5.

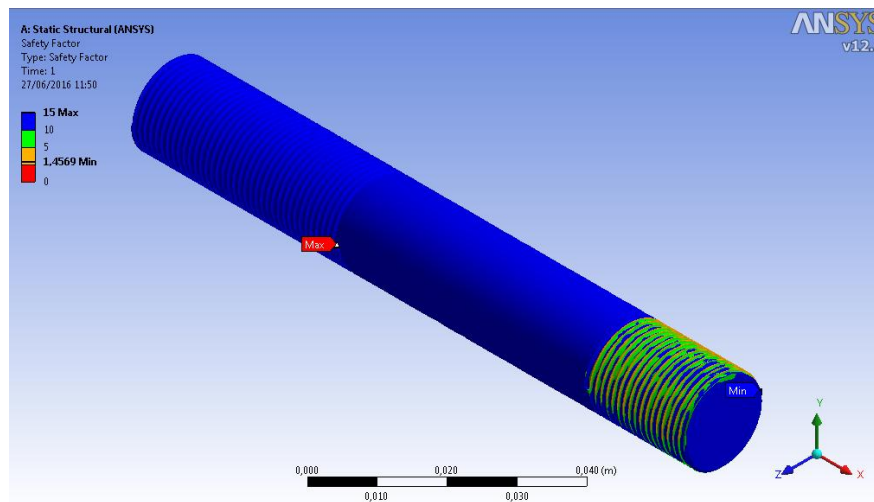


Figura 3.10. Comportamiento del factor de seguridad a la resistencia mecánica.

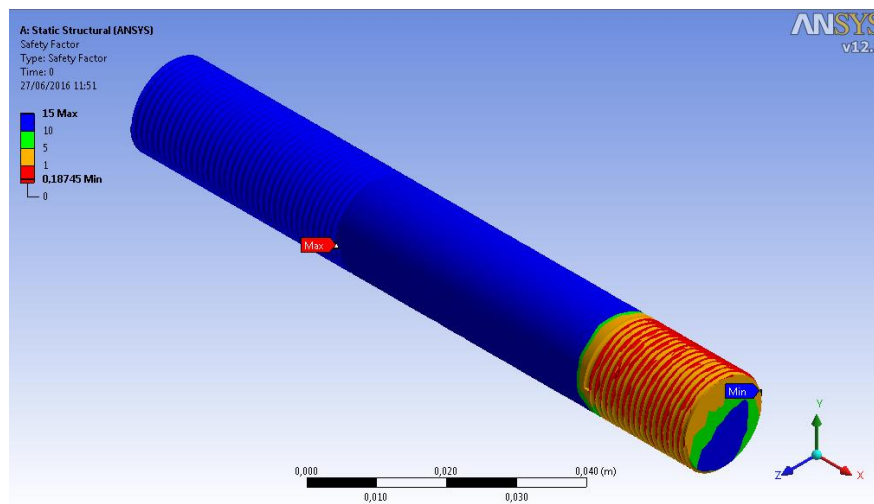


Figura 3.11. Comportamiento del factor de seguridad a la fatiga.



La figura 3.11 presentada anteriormente muestra el comportamiento del modelo físico solucionado para el fenómeno de fatiga expuesto a la pieza. Al contemplar detenidamente se puede valorar que el espárrago no garantiza la resistencia a la fatiga bajo desviaciones aleatorias de los requerimientos previstos, lo que conlleva a que no exista un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas condiciones estrictamente necesarias. Con un factor muy bajo de seguridad de 0,18745, el espárrago sufre la rotura en la zona roscada (mayor concentración de tensiones) directamente debido a la fatiga incidida por las altas vibraciones de los motores.

3.8. Valoración económica

Con la minuciosa verificación de los resultados de los cálculos efectuados y el análisis detallado de la microestructura de cada material, así como la valoración de los parámetros obtenidos, se puede apreciar que desde el punto de vista económico estos espárragos no presentan un elevado precio dentro del régimen económico social de nuestro país, ya que pueden fabricarse en la UEB Empresa de Mantenimiento a Centrales Eléctricas (EMCE) asociada al igual que la UEB Generación Motores Fuel-oil de Moa a la ETE “Lidio Ramón Pérez” de Felton, asegurando así el sistema de mantenimiento y la producción de energía eléctrica, lo cual favorece la economía de la empresa y por consecuente la del país. Dicho esto, al investigar la parte económica se pudo designar que la fabricación de los espárragos adquiere un coste de 13,98 CUP por cada espárrago. Para trasladar todas las piezas desde la EMCE de Felton en una rastra internacional marca DAF con un índice de consumo de 2,5 km/litros por cada 100 km, sabiendo que existe una distancia real de 107 km de Felton hasta Moa y que el precio del combustible (diésel regular) está a 0,58 CUC (pesos convertibles), precio que equivale a unos 14,50 CUP a nivel empresarial según la Resolución No. 117/16 del Ministerio de Finanzas y Precios; se puede precisar que el costo de trasportación es de 620,60 CUP Al adicionar el costo de transportación con el costo de fabricación que corresponde a cada pieza se determina que el costo total de la pieza es de 634,58 CUP.

3.9. Impacto medioambiental

La protección del medio ambiente es uno de los problemas científico-técnicos más complejos que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria



en los últimos años ha llevado a niveles sin precedentes, la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas.

En Cuba, donde desde el triunfo de la Revolución se ha desarrollado notablemente la industria, no está exento de esta problemática, aunque la contaminación ambiental no alcanza aún los niveles de los países altamente industrializados. A nivel mundial los motores de combustión interna consumen más de la tercera parte de la cantidad total del combustible extraído, por lo que ejercen gran influencia sobre el medio ambiente.

En nuestra instalación esto es verídico ya que cada motor consume 3,8 m³/h de combustible por lo que trae consigo los siguientes factores:

- La emisión a la atmósfera de gran cantidad de gases dañinos y partículas producto a la combustión del combustible en los motogeneradores. (óxidos de azufre y nitrógeno, partículas de ceniza, pentóxido de vanadio, hidrocarburos tipo CH₄ y C₂H₄ y monóxido de carbono).
- La contaminación física, química y térmica de aguas superficiales y subterráneas de ríos, mares y lagos con los consiguientes efectos secundarios sobre los ecosistemas acuáticos y sobre el hombre.

De todas las formas de actividad humana, quizás la más contaminante y degradante del medio ambiente es la relativa al manejo de los recursos energéticos, es decir, su extracción, conversión, transporte y consumo. Independientemente de todo esto, la rotura de los espárragos situados en la tapa de revisión del cárter de los motores MAN de la UEB Grupo Fuel-oil de Moa también induce una gama de problemas medioambientales.

Al fracturarse la pieza, es decir, el espárrago, la tapa de revisión del cárter del motor puede desplomarse y ocasionarle al operario golpes graves innecesariamente, además de la dolencia consecuente que se manifestará después. Si el aceite sale a las afueras del cárter puede producir quemaduras y lesiones terribles en la piel del individuo. Sin embargo no solo afecta al hombre sino a la superficie terrenal ya que puede contaminar los suelos y mares si llega a desviarse por algún acueducto o alcantarilla de depósito.

Medidas constructivas para eliminar estos problemas

- Dar mantenimiento y conservación de todo el sistema mecánico de los motores.

- Mantener la cultura industrial, eliminando toda la sedimentación de polvo de cola derramado en la planta.
- Efectuar chequeo médico periódicamente y pruebas especializadas (audiometría) para conocer el estado de salud de todo el personal que opera en la zona de explotación de los motores.
- Corregir todos los salideros de combustible en toda la instalación (principalmente en la salida de las bombas de inyección de aceite y viscosímetros).
- Garantizar la adquisición de orejeras o tapones de goma para los trabajadores y especialistas del campo y así contrarrestar el ruido persistente debido a las altas vibraciones y número de revoluciones que poseen estos grandes equipos.



3.10. Conclusiones del capítulo 3

- Las reiteradas fracturas que presentan los espárragos situados en la tapa de revisión del cárter de los motores MAN se deben al equívoco diseño mecánico y a la mala selección del material empleado en ellos.
- El nuevo material propuesto para la fabricación de los espárragos cumple con los requerimientos necesarios para aumentar considerablemente la vida útil de éstos y de esta forma extender el tiempo de operación y trabajo de los motores.
- La simulación realizada fomenta más aún que el fenómeno de fatiga inducido por las altas vibraciones en los motores constituye el factor de origen de la falla de los espárragos.
- La valoración económica desarrollada arrojó valores de los costos más significativos de la investigación, donde se determinó que la compra de estos espárragos por 13,98 CUP cada uno es muy factible para el mantenimiento sistemático de los motores aunque su costo total de fabricación sea un poco costoso producto del elevado precio que posee el combustible en el mercado industrial del país, el cual es de 0,58 CUC.



CONCLUSIONES GENERALES

1. Se determinó que la causa o factor principal que propicia la falla de los espárragos es la fatiga del material, producto a que se encuentra sometido sistemáticamente a cargas alternas al cizallamiento que originan las altas vibraciones presentes durante la operación en los motores.
2. La verificación del diseño del espárrago arrojó la necesidad de un incremento del diámetro nominal del espárrago desde un valor de 16 mm hasta 20 mm para mejorar su resistencia mecánica a la fatiga.
3. Mediante la simulación por el método de elementos finitos del modelo físico del espárrago pudimos afirmar que éste, no posee buena resistencia mecánica al ser sometido por el fenómeno de fatiga, presentando un factor de seguridad muy bajo de 0,18745.



RECOMENDACIONES

1. Sugerir a la Dirección de la Empresa que realice una valoración exhaustiva sobre la posibilidad de seguir fabricando estos espárragos con el acero AISI 4150 con composición química de (C=0,53; Mn=0,86; Cr=1,13; Mo=0,20; Fe= 96,37) en % de masa.
2. Realizar un cambio de geometría en la unión aumentando el diámetro a 20 mm, es decir, pasando una broca de mismo diámetro y luego un macho en cada agujero donde va instalado el espárrago para que de esa forma aumente su resistencia a la fatiga y con ella su vida útil.
3. Si fuese posible realizar una parada a los motores y desarrollar un análisis específico de las vibraciones para saber si se encuentran dentro de sus propios regímenes de funcionalidad y así poder trabajar según su comportamiento.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Askeland Donald R., Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ra Edición. Universidad de Missouri-Rolla, México. 2005.
2. Atlas de Diseño de Elementos de Máquinas. Tomo 1. 4ta Edición, 2002. Madrid, España. Selección tomada de “Construcción de partes de maquinarias” traducido del ruso (Reshetov, 1976).
3. Avner., Introducción a la Metalurgia Física. 2da Edición. Universidad de New York. Impreso en México, 1995.
4. Bengton, U., Design requirements materials properties a basic for materials selection. American society for testing. USA. 1991.
5. Callister, W. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2003.
6. Castillo, F. Diseño de elementos de máquinas. Departamento de Ingeniería. Laboratorio de Tecnología de Materiales. Cuautitlán Izcalli. 2011.
7. Clasificación Aceros SAE-AISI. Servicio Industrial, S.A. de C.V. Estado de México. 2008.
8. Dobrovolski., Elementos de Máquinas. 1ra Edición. Editorial Mir Moscú. 1990.
9. Durán Aguilera, L.A. Análisis y propuesta de solución al deterioro de la voluta de las bombas DENVER de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”- Moa Nickel S.A. 2014.
10. Escribano Ródenas M. El Análisis por Elementos Finitos: una metodología muy reciente en economía. Departamento de Economía Financiera y Contabilidad I. Escuela Universitaria de Estudios Empresariales. Universidad Complutense de Madrid. 2009.
11. Fernández Cruz, J.J. “Comportamiento de depósitos de soldaduras en ejes de giro de las Excavadoras Э4А6/45 recuperadas en la Mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”. 2013.
12. Guliaev, A. Metalografía. Tomos I y II. Moscú. Editorial MIR. 1983.

13. Jaramillo H. E., Suárez M. “Análisis de falla de un eje de reductor de velocidad”. Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería de Materiales, Dpto. de Energética y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM). Universidad Autónoma de Occidente, Colombia. 2007.
14. Keyser, C. Ciencia de materiales para Ingeniería. Ed. Limusa. México. 1992.
15. Lajtin, Y., Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 4ta Edición. Editorial Mir Moscú. 1985.
16. Manual técnico de motores MAN, 2011.
17. Marín, Juan M. Apuntes de Elementos de Máquinas, 2006.
18. Molina Borges, R. “Reacondicionamiento de las estrías del árbol perteneciente al mecanismo de una bomba hidráulica de un camión grúa”. 2014.
19. Mott, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. 4ta Edición (2006) y 6ta Edición (2010).
20. Normas Cubanas:
NC 10-55:86. Metalografía. Microfotografías. Escala de las Imágenes.
NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.
21. Normas internacionales:
ASTM E 3-95. Preparation of Metallographic Specimens.
ASTM E 92-82. Harness Testing.
22. Reshetov, Diseño de Elementos de Máquinas 1985.
23. Shigley. Diseño en Ingeniería Mecánica. 8va Edición. Colaboración de Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. 2008.
24. Stiopin. Resistencia de los Materiales. 3ra Edición. Editorial Mir Moscú (1979). Traducción en español, 1985.
25. Zamora Ávila, Y. “Caracterización del Mecanismo de rotura de las líneas fría y caliente de recirculación, para el transporte de Amoniaco”. 2008.

ANEXOS



Anexo 1:



Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230.

Anexo 2:



Figura 3.3. Ubicación de los espárragos en el cárter del motor (flechas azules).

Anexo 3:



Microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100.