

# UNA APLICACIÓN PRÁCTICA DEL ESTUDIO DE MATERIALES EN EL MANTENIMIENTO DE EQUIPOS CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

**Edith Gareca**, Facultad de Ingeniería-UNJU, [agareca@gmail.com](mailto:agareca@gmail.com)

**Teresa Antequera**, Facultad de Ingeniería-UNJU, [teantequera@yahoo.com.ar](mailto:teantequera@yahoo.com.ar)

**Edmundo Tolabín**, Facultad de Ingeniería-UNJU, [etolabin@gmail.com](mailto:etolabin@gmail.com)

**Resumen**— En los últimos años, el mantenimiento de equipos ha cambiado sustancialmente, habiéndose modificado la filosofía de las responsabilidades que se establecen en el proceso productivo. Se advierte, cada vez más, la conexión entre un mantenimiento adecuado y la calidad del producto, la seguridad de las personas y el cuidado del ambiente. Actualmente, toma fuerza el concepto de Mantenimiento centrado en la Confiabilidad. Entre sus principios, se tiene la existencia de fallas funcionales, que ocurren cuando un bien es incapaz de cumplir una función a un nivel de desempeño que sea aceptable por el usuario. Es decir, no es necesario que el bien quede fuera de uso, basta con que no rinda con las condiciones requeridas. Otro principio es que existen dos elementos para manejar cualquier bien físico: este debe ser mantenido y cada tanto, modificado. Teniendo en cuenta estos principios y que la confiabilidad del equipo depende de la confiabilidad de sus componentes, este trabajo efectúa el análisis del material de las placas de una trituradora primaria que han presentado fallas funcionales. El estudio realizado permite sugerir modificaciones del material, para lograr mejoras en la durabilidad del equipo y consecuentemente, en la confiabilidad de su funcionamiento.

**Palabras clave**— *mantenimiento de equipos, confiabilidad, materiales.*

## 1. Introducción

### 1.1 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

En muchas plantas industriales, el mantenimiento de equipos se realiza siguiendo métodos convencionales, que se basan en recomendaciones del fabricante, determinados periodos fijos, políticas internas de la planta o bien simplemente aplicando un mantenimiento correctivo, es decir, reparando daños ya producidos. Sin embargo, esta concepción del mantenimiento ha ido cambiando en estas últimas décadas, adquiriendo un mayor énfasis en la misión de mantener los equipos o activos en la máxima disponibilidad y confiabilidad, a fin de poder garantizar una producción continua [1]. El cambio responde a numerosos factores, entre ellos, el enorme incremento en el número y variedad de bienes físicos (plantas, equipos, edificios), diseños mucho más complejos,

**Una aplicación práctica del estudio de materiales en el mantenimiento de equipos centrado en confiabilidad.**

nuevas técnicas de mantenimiento, y particularmente, una cambiante ideología con respecto a la organización y responsabilidades del mantenimiento en el sistema productivo. Sumado a esto, está también la evidencia de que las fallas en los equipos afectan la seguridad y el medioambiente, como así también una conciencia creciente de la conexión entre mantenimiento y calidad del producto, y una presión cada vez mayor de alcanzar un alto rendimiento de las plantas y controlar los costos [2]. Las expectativas sobre los resultados del mantenimiento son hoy en día mucho mayores, haciendo que esta disciplina de gerenciamiento haya evolucionado desde la acción meramente reactiva en sus inicios, a la actual aplicación de criterios de riesgo y confiabilidad, con la utilización de técnicas de mantenimiento de avanzada y con filosofías de punta que logran romper los paradigmas tradicionales en todo su contexto. Así, se espera que el mantenimiento incluya cada uno de los factores antes mencionados y deba en todo momento lograr la reducción de las averías imprevistas y de los tiempos de reparación, prolongar la vida útil de componentes y equipos, obtener los efectos del ahorro de recursos y reducir los costos de mantenimiento de las instalaciones, contribuyendo a mejorar la calidad de los productos [3]. La Figura 1 muestra como evolucionaron las expectativas del mantenimiento.

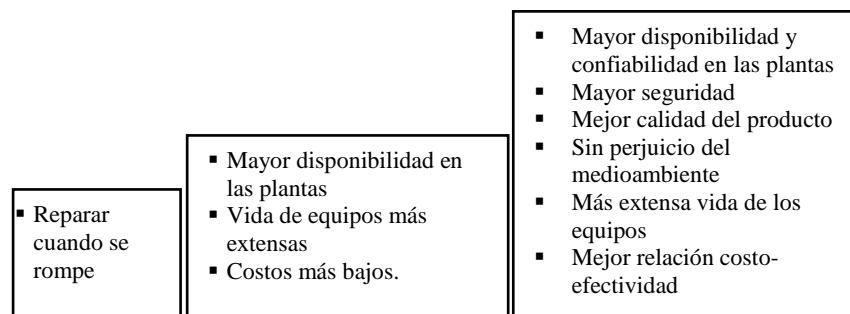


Figura 1. Evolución de las expectativas del mantenimiento  
Fuente: Mantenimiento centrado en confiabilidad (John Moubray)

Surge así, como una de las respuestas a estas evoluciones, el Mantenimiento centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés: *Reliability Centered Maintenance*). El RCM es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual. La idea esencial del mantenimiento centrado en confiabilidad es que los esfuerzos de mantenimiento deben ser dirigidos a mantener la función que realizan los equipos más que a los equipos mismos [2]. En este marco, el RCM basa su metodología en responder las siguientes siete preguntas:

- 1.- ¿Cuáles son las funciones y los respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo?
- 2.- ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?
- 3.-¿ Que ocasiona cada falla funcional?
- 4.-¿ Qué sucede cuando se produce cada falla en particular?
- 5.-¿De qué modo afecta cada falla?
- 6.-¿ Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- 7.-¿ Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado?

De esta forma se tiene en cuenta lo que se espera que haga el activo, cuál es la falla, qué es lo que produce esa falla, qué ocurre cuando falla y porque importa que haya fallado. En definitiva, estaremos determinando la función del equipo, identificando cada falla, estableciendo la causa de cada falla, sus efectos y sus consecuencias, para poder actuar posteriormente en forma preventiva o predictiva.

Resulta importante aclarar el concepto de falla funcional, en el marco del RCM. Se pueden identificar dos diferentes estados de falla, con pérdidas totales o parciales. En el primero, un activo simplemente deja de funcionar. En el segundo, el activo no cumple su función conforme a un nivel de desempeño aceptable o bien, conforme a las necesidades que el usuario tiene, pero no necesariamente deja de funcionar. El RCM engloba ambos casos en lo que considera una falla funcional. Sin embargo se trabaja fundamentalmente con la segunda situación, de allí la importancia de definir con claridad las funciones y desempeño estándares del equipo a mantener.

Un punto central en la metodología RCM es la determinación del modo de falla. Para el RCM el modo de falla implica determinar tanto la forma en que el equipo falla como la causa de la misma. Los modos de falla deben incluir las fallas que ya ocurrieron en el equipo que se trata, o en equipos similares en condiciones similares, fallas que están siendo prevenidas por los mantenimientos sistemáticos y fallas potenciales que aún no ocurrieron, pero que tienen posibilidad cierta de presentarse. De esta manera, los modos de fallas que se consideran primariamente están asociados al deterioro y desgaste normal. Sin embargo también puede incluir fallas causadas por errores humanos (en parte por operarios y personal de mantenimiento) o por desperfectos de diseño. Es sumamente importante realizar un análisis de causa adecuado, que permita tratar las cuestiones de fondo, asegurar que se tratan las causas en sí y no los síntomas [3].

## **1.2 El estudio de materiales**

Es en la determinación del modo de falla que el estudio de materiales cobra fuerza. Una falla funcional puede asociarse a cuestiones que tienen relación directa con el material de componentes. Así puede tenerse casos de una selección inadecuada del material, que presentan características no apropiadas para las condiciones de operación; envejecimiento de materiales, que lleva a tener propiedades muy diferentes a las que se tenían inicialmente; presencia de defectos superficiales y sub-superficiales por errores en los procesos de fabricación, entre muchos otros factores, que hacen que el equipo no cumpla los requerimientos en servicio. Por lo tanto, es de gran importancia para que la gestión de mantenimiento sea lo suficientemente técnica, que incorpore el estudio de materiales para el análisis de fallas de los componentes y piezas de recambio, para lo cual se debe recurrir a las herramientas que brinda la Ingeniería de Materiales [4].

Debido a lo expuesto, en este trabajo se presenta el análisis de falla en el material de las placas de una trituradora de materias primas para la producción de cemento. En este caso se trata de placas que han sufrido fractura y no han alcanzado a cubrir la durabilidad esperada. El análisis realizado a través del estudio de su material, permite detectar la causa fehaciente de falla y proponer mejoras en cuanto a las especificaciones del material para lograr alcanzar los estándares propuestos de calidad y rendimiento del equipo en cuestión.

## **1.3 Trituración primaria de materiales**

Para el tratamiento industrial de rocas y minerales, es necesario realizar una preparación de los mismos y dentro de esa preparación, normalmente se requiere efectuar una reducción de tamaño. Las operaciones mediante las que se efectúan dichas reducciones de tamaño por medios físicos se denominan trituración y molienda. Las operaciones citadas se realizan con el objeto de facilitar el transporte de los materiales, las operaciones físicas (tales como mezclado, dosificación, aglomeración o disolución) y facilitar o permitir las reacciones químicas [5].

La trituración se realiza en distintas etapas y en una gran diversidad de máquinas. Se identifica como etapa de trituración primaria cuando el material que se trata en una trituradora es el extraído de la cantera. En el caso del presente trabajo, los aceros a estudiar constituyen el sistema de recubrimiento de la trituradora.

El mecanismo de abrasión presente es el de impacto, que a su vez puede dividirse en impacto percusivo e impacto erosivo. La percusión ocurre por impactos repetidos de cuerpos sólidos de mayor tamaño. La erosión puede ocurrir por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas, transportadas por un fluido, en general aire o agua [6]. En las Figuras 2 y 3 se muestran estos mecanismos.

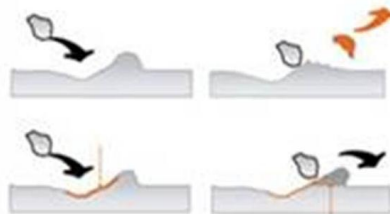


Figura 2.- Desgaste por impacto percusivo.  
Fuente: AcelorMittal

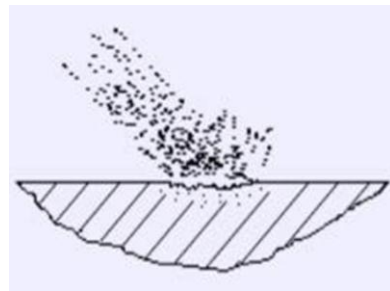


Figura 3.- Desgaste por impacto erosivo.  
Fuente AcelorMittal

En el caso de la trituradora, los trozos de material ingresan impactando contra un martillo, produciéndose una primera desintegración, Luego estos nuevos trozos más pequeños chocan contra las placas de las paredes donde vuelven a fracturarse y reducir su tamaño, cayendo para golpear nuevamente en el martillo siguiente, luego con la placa adyacente, repitiendo sucesivamente esta secuencia hasta que el material que sale de la trituradora se encuentra visiblemente reducido de tamaño. En la Figura 4 se puede apreciar el esquema de placas y martillos en la trituradora y en la Figura 5 la interacción de estos elementos con el material que se tritura.

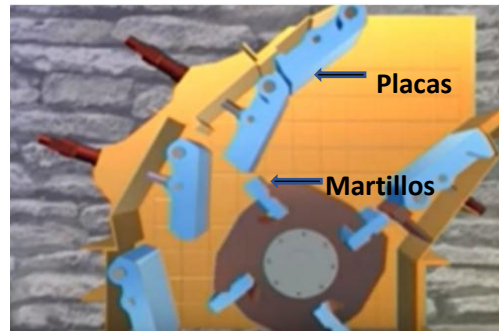


Figura 3. Esquema de la trituradora. Fuente: Hazemag.

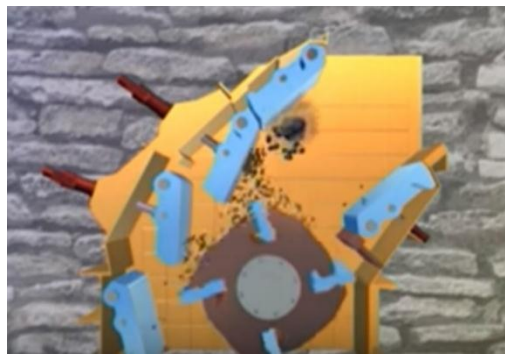


Figura 4. Se muestra el impacto del material contra las placas. Fuente: Hazemag.

#### **1.4 Situación y componentes de estudio**

Como se ha planteado en el Punto 1.2, los componentes objeto de estudio son las placas del equipo de trituración primaria. El estándar de desempeño para estas piezas, de acuerdo al requerimiento del usuario, se traduce en un rendimiento en la trituración no menor a las 200.000 Tn de materias primas

En un trabajo anterior ya se había realizado un análisis del material de estos componentes, un acero SAE 4140, llegando a la conclusión de que se presentaba mayor durabilidad cuando éste había sido sometido a un tratamiento térmico de normalizado. En esta condición el acero adquiere una microestructura intermedia (bainítica), con tamaño de grano muy fino, con muy buena resistencia al impacto y con un valor de dureza que ronda los 340 HB [7]. A partir de este trabajo, las piezas comenzaron a utilizarse de ésta manera, lográndose alcanzar el desempeño propuesto.

Sin embargo a principios del corriente año, se produjo una falla a las 60.000 Tn de producción, produciéndose una rotura de todas las placas centrales, lo que llevó nuevamente a la realización de análisis para determinar la causa de falla.

El estudio realizado permite determinar la forma y la causa de falla y recomendar acciones para evitar su repetición. Adicionalmente se efectúan sugerencias relacionadas a modificaciones del material en relación al proceso de fabricación de las placas y también, del método de fijación, con lo cual se podría lograr un aumento de la performance de estos componentes, contribuyendo a mejorar la durabilidad del equipo y consecuentemente, la confiabilidad de su funcionamiento.

## **2. Materiales y Métodos**

Para realizar el estudio de las placas se comenzó con una inspección visual en campo de las piezas afectadas. Posteriormente se seleccionaron las muestras para realizar los estudios de laboratorio, que consistieron en la determinación de la composición química, análisis metalográfico y ensayos de dureza.

El análisis de las placas con fallas se efectuó mediante Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X marca ARL 2000-SMS y Analizador Leco en Vacío de Carbono y Azufre.

La microestructura se observó en un microscopio óptico Metalux II (LEITZ WETZLAR). Para la preparación de las muestras se efectuó un pulido mecánico, usando pulidoras de disco y papel abrasivo N° 200, 320, 400 y 600. Para finalizar esta etapa se realizó el pulido en paño con alúmina de granulometría en el orden del micrón. Para el revelado de la microestructura se atacó químicamente las probetas con Nital 4 (solución de ácido nítrico en alcohol al 4 %).

La determinación de la dureza se realizó en un Durómetro de Banco marca Prazis, utilizando la escala Rocwell (HRC). En el ensayo se utilizó un indentador con punta de diamante.

## **3. Resultados y Discusión**

### **3.1 Descripción del componente de estudio.**

Las placas de la trituradora tienen una medida aproximada de 1,15 m de largo por 0,45 m de ancho y un espesor de 5 cm. Están fabricadas por un procedimiento de moldeo. Para la fijación de las placas se utiliza oxicorte y soldadura. Esto se realiza sin un procedimiento establecido, generando daños en las piezas (fisuras). En la Figura 5 se presentan fotografías de las placas objeto de estudio. Se puede observar la indicación del material como acero 4140 y el efecto producido por el método inadecuado utilizado para la fijación de las placas.



Figura 5. Placas de la trituradora.

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Análisis químico

La composición química se muestra en la Tabla 1. En la tabla también se consigna la composición química normalizada para un acero SAE 4140. En principio, puede observarse que los tenores de carbono y silicio superan el límite establecido.

Tabla1. Composición química de las placas

Composición química (% en peso)					
Elementos	C	Mn	Si	Cr	Mo
Acero Placas fracturada	0.47	0.95	0.58	1.02	0.25
SAE 4140 según Norma	0.38-0.43	0.75-1.00	0.20-0.35	0.80-1.10	0.15-0.25

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Análisis metalográfico

Para evaluar la microestructura obtenida durante la solidificación del moldeo, se estudió la microestructura presente a distintos niveles de profundidad (periferia,  $\frac{1}{4}$  del espesor y el núcleo). También se encontraron diversas fisuras, determinándose zonas de inicio y propagación. Se muestran los resultados obtenidos en las Figuras presentadas a continuación:

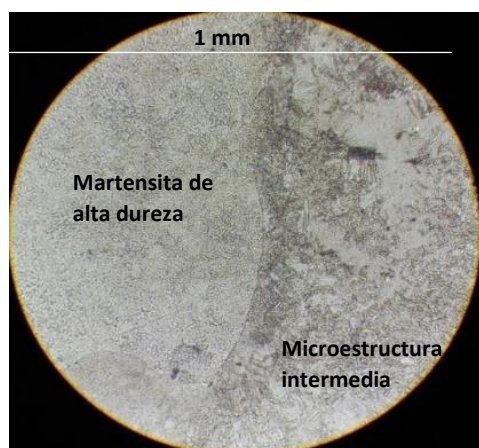


Figura 7. Microestructura en la periferia  
Fuente: elaboración propia

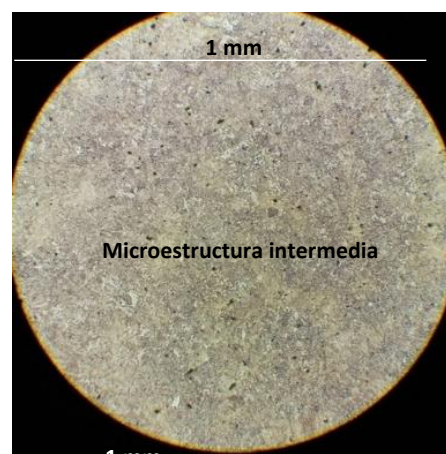


Figura 8. Microestructura a  $\frac{1}{4}$  del espesor  
Fuente: elaboración propia

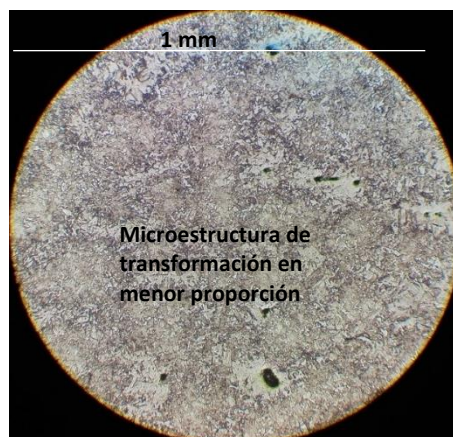


Figura 9. Microestructura a del núcleo de la pieza  
Fuente: elaboración propia

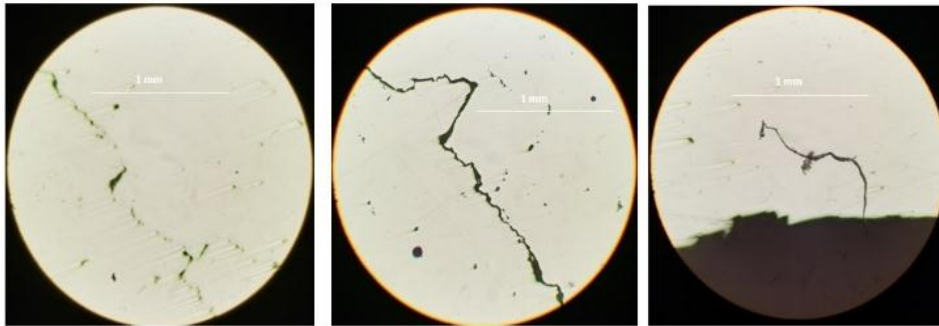


Figura 10. Inicio y propagación de la fisura. En la tercera fotografía se puede ver que la propagación es del interior a la periferia.

Fuente: elaboración propia

## 2.4 Medición de dureza

Se realizó la medición de dureza en los mismos sectores donde se efectuó el estudio metalográfico. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2. Valores de dureza

Sectores de Medición	Valores obtenidos (HRc)
Periferia	52
¼ del espesor	46
Núcleo de la pieza	44

Fuente: elaboración propia

## 2.5 Discusión

El problema central se da en la composición química del acero de las placas falladas. En este caso el contenido de carbono supera el límite establecido, lo que resulta muy perjudicial, ya que propende al acero a la obtención de microestructuras de una mayor dureza y un comportamiento más frágil, lo cual no es conveniente debido a que la condición de servicio involucra impactos. Otro punto a tener en cuenta es la presencia en exceso de silicio. Éste elemento produce microfases de tipo silicatos de forma alargada, que por Norma ASTM 45, se clasifican teniendo en cuenta su longitud, en niveles 1, 2 y 3, siendo el nivel 1 el óptimo y el nivel 3, inaceptable. Por otra parte, esta norma tiene en cuenta también, si estos silicatos se presentan finos o gruesos, siendo más inconvenientes éstos últimos. En general, cuando el silicio se encuentra por encima del 0,35 % permitido por la especificación de la Norma SAE, los silicatos se desarrollan en series alargadas y gruesas, aumentando la dureza del acero. Esto agrava el problema de comportamiento frágil del material de las placas. Resulta fundamental lograr una solución, a partir del estricto cumplimiento de la Norma SAE. Para este caso específico, incluso sería preferible que el tenor de carbono se encuentre más próximo al límite inferior que al superior de lo que la citada norma especifica.

La microestructura obtenida no es homogénea. Como se puede observar en las microfotografías presentadas, en la periferia se tiene martensita, que es una microestructura típica del tratamiento térmico de temple. El acero 4140 tiene alta templabilidad, por lo cual es probable que impulse la formación de microestructuras de temple aun mediante enfriamiento al aire. Hacia el interior de la pieza se tiene estructuras de transformación intermedias y en el núcleo la proporción de transformaciones es menor.



La heterogeneidad marcada en la microestructura trae como consecuencia, heterogeneidades en las propiedades mecánicas. Las fisuras detectadas tienen una componente importante de clivaje (fractura frágil, transgranular) y solo en algunas zonas se presentan de forma dúctil (por borde de grano), lo cual es consistente con las microestructuras relevadas.

Consecuentemente con lo anterior, las durezas disminuyen hacia el interior de la pieza, pero aún son elevadas para sostener en forma satisfactoria los requerimientos de resistencia al impacto. Se han obtenido para la periferia valores de 52 HRc, cuando lo conveniente es que este valor ronde los 36 -37 HRc. Es conocido que los materiales muy duros no son recomendables cuando están sometidos a impactos percusivos severos, ya que en servicio tienden a fracturarse sin deformación, provocando roturas sin previo aviso.

Los resultados confirman lo determinado en un trabajo previo [7], con respecto a la conveniencia de que, en caso de utilizar un acero SAE 4140, éste no estuviera templado, sino normalizado, lo que evita la aparición de estructuras martensíticas.

Un problema particular que se encuentra en los componentes estudiados, tiene que ver con el método de soldadura utilizado para el sistema de fijación. Debido al alto contenido de carbono, al no realizarse mediante un procedimiento que contemple una preparación de la pieza para evitar enfriamientos rápidos, se impulsa la formación de microestructuras fragilizantes altamente tensionadas que provocan la aparición de fisuras, lo cual daña las piezas, afectando seriamente la integridad del material y consecuentemente su durabilidad. En esta condición las placas inician el servicio con microfisuras que se extienden fácilmente ante la repetición de impactos, llevándolas a una rotura prematura.

Por otra parte, en esta oportunidad se analiza adicionalmente, la fabricación de las piezas problema. En este caso, se tratan de piezas moldeadas, donde como es lógico, las velocidades de enfriamiento varían desde la periferia al centro, lo cual es consistente con la aparición de distintos grados de transformación de microestructuras. Con respecto a esto último debiera considerarse la posibilidad de que las piezas a utilizar sean laminadas, en lugar de moldeadas. Esto daría microestructuras más homogénea, con mejores resultados en servicio.

#### **4. Conclusiones y recomendaciones**

Los estudios realizados permiten conocer en forma concreta el modo de falla en las placas de la trituradora.

El acero que constituye las piezas no cumple con la especificación SAE. En la actual condición el acero de la placa fracturada (tipo SAE 4140 con alto nivel de carbono y de silicio, por encima de la especificación), es altamente incidente en la aparición de microestructuras de temple y de microfases fragilizantes, no adecuadas para servicio de alto impacto que es la función específica del componente. Los altos valores de dureza, tanto en la periferia como en el centro de las piezas, tampoco son adecuados para estas condiciones de servicio.

Las microestructuras encontradas en las distintas zonas del espesor de las placas, y las durezas correspondientes, no presentan homogeneidad, lo que probablemente puede atribuirse al método de fabricación por colado.

La situación se agrava con el método de fijación de las placas. Se puede mejorar sustancialmente los aspectos de integridad y durabilidad, si se prevé un procedimiento de soldadura adecuado para la colocación de sujeciones y fijado de los pernos. Este procedimiento debe ser específico para el tipo de material utilizado, contemplando aspectos tales como el contenido de carbono equivalente y la utilización de precalentamientos para evitar altas velocidades de enfriamiento. Se debería contemplar también la capacitación de los soldadores.

Para lograr una mejor performance de las piezas, se puede recurrir al uso de material laminado en lugar de colado. Esto es factible ya que se fabrica regularmente acero SAE 4140 laminado con el espesor requerido de 50 mm. El mecanizado de los agujeros para fijación y corte de las placas se deberá realizar con sistema plasma a fin de evitar daño en los componentes por generación de grandes zonas afectadas por el calor que generan crecimiento de grano, fragilidad y oxidación.

Una forma de prevenir futuras fallas potenciales y por lo tanto, aumentar la confiabilidad del equipo, es fijar controles previos a la colocación de las placas. Un control efectivo podría ser el ensayo de dureza, fijando límites de aceptabilidad (37 HRc, por ejemplo). Este ensayo se lleva a cabo de forma relativamente sencilla y rápida, siendo posible su realización en campo con el instrumental adecuado. Este control evitaría la colocación de placas que no cumplan con las condiciones requeridas.

Resulta altamente probable que con las medidas indicadas se logre un mayor rendimiento y seguridad en la operación de la trituradora, extendiendo su vida útil y mejorando la relación costo–efectividad, al evitar la generación de fallas prematuras. Esto contribuiría a una mayor disponibilidad y confiabilidad del equipo, cumpliendo con uno de los principales principios del RCM.

## **5. Referencias**

- [1] AGUILAR OTERO, J.; TORRES ARCIQUE, R; MAGAÑA JIMENEZ, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación [en línea, sin mes]*. ISSN 0186-6036.
- [2] HUNG, A. (2009). Mantenimiento centrado en confiabilidad como estrategia para apoyar los indicadores de disponibilidad y paradas forzadas en la Planta Oscar A. Machado EDC. *Ingeniería Energética [en línea, Vol XXX, N° Mayo-Agosto]*. Redalyc. p 12-18.
- [3] MOUBRAY; JOHN (2000). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reability – centred Maintenance), 1° Edición en español, Ed. Aldon Ltd. ISBN 09519603-2-3, Madrid. 348 p.
- [4] VELEZ MEJÍA, J. (2003). El análisis de fallas como una técnica de mantenimiento preventivo, en *Indisa On Line, N° 5*. Disponible en <http://www.indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20line%205.pdf>

- [5] FUEYO, L.(1999) Molinos de Impactos. Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación: Tecnología, Diseño y Aplicación, 2da. Edición. Revisada y actualizada. Editorial Rocas y Minerales. España.
- [6] RABINOWICZ, E. (1984). Friction and wear of materials, Ed. John Wiley and son. Inc, New York.
- [7] TOLABÍN, E.; ANTEQUERA, T.; GARECA, E. (2016) - Comparación del rendimiento de aceros en condiciones de alto desgaste por impacto, *Revista Investigaciones de Facultades de Ingeniería del NOA, EdiUNJU*. ISSN 1853-6662.