

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARIA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS FISICAS Y

FORMALES

PROGRAMA PROFESIONAL: INGENIERIA MECANICA

ELECTRICA Y MECATRONICA



**“INSPECCION Y ANALISIS DEL EJE PRINCIPAL DE UNA PERFORADORA
MARCA P&H MODELO 120A POR MEDIO DE UN ANALIZADOR DE
ULTRASONIDO Y MODELAMIENTO CON ELEMENTOS FINITOS”**

TESIS PRESENTADA POR LOS BACHILLERES:

- **GERALD HUMBERTO ALVAREZ YEPEZ**
- **FELIPE MANUEL ORDOÑO GALLEGOS**

AREQUIPA- PERU

2013

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A Dios, creador del universo por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida, por llenarme de sabiduría, paciencia y valentía para asumir los retos de la vida.
- ❖ A mi familia que gracias a sus consejos y palabras de aliento crecí como persona. A mis padres y hermanos por su apoyo, confianza y amor. Gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante. A mi padre por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre. A mi madre por hacer de mí una mejor persona a través de sus enseñanzas y amor. A mis hermanos por estar siempre brindándome su aliento.
- ❖ A nuestro estimado asesor el ingeniero Emilio Chire por la colaboración y asesoramiento prestado en el desarrollo del proyecto de tesis.
- ❖ A tu paciencia y comprensión, preferiste sacrificar tu tiempo para que yo pudiera cumplir con el mío. Por tu bondad y sacrificio me inspiraste a ser mejor para ti, gracias por estar siempre a mi lado, Ana María.
- ❖ Además quiero agradecer a todo el personal de mantenimiento de Shouthern Perú Copper Corporation quienes siempre me apoyaron en los trabajos propuestos.

Felipe Manuel Ordoño Gallegos

AGRADECIMIENTOS

- ❖ En primer lugar a Dios, mi padre, gran amigo y guía por todos los caminos que me han tocado caminar, infinitas gracias por haber estado conmigo siempre, sobre todo en los momentos más difíciles en que iluminaste mi sendero y me ayudaste a continuar.
- ❖ A mis amados padres y mi querida familia, que con su cariño e incondicional apoyo, me ayudaron en cada paso de mi vida, gracias por su apoyo durante todo este tiempo.
- ❖ A Yamila, mi pareja, que con sus ánimos y persistencia contribuyó para la realización de este objetivo, gracias por estar junto a mí, por haber aparecido en mi vida y por idealizar un futuro juntos.
- ❖ A todas las personas que nos apoyaron en el logro de este objetivo y no han sido mencionadas en estas páginas, infinitas gracias, mención especial a nuestro asesor Ing. Emilio Chire Ramírez y al Director de nuestro Programa Profesional Ing Jorge Castro.

Gerald Humberto Álvarez Yépez

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPITULO I: GENERALIDADES	
1.1 Objetivos (General y Específicos)	5
1.2 Descripción de la Empresa	5
1.3 Proceso de Producción	12
CAPITULO II: CONFIABILIDAD	
2.1 Introducción	13
2.2 Propósito de la Confiabilidad	13
2.3 Balance de la Confiabilidad	13
2.4 Ingeniería de Confiabilidad	14
2.5 Modelos Probabilísticos	14
2.5.1 Introducción a los modelos probabilísticos	14
2.5.2 Modelos probabilísticos de Confiabilidad	15
2.5.3 Modelo Weibull	15
2.5.4 Expresiones Matemáticas	16
2.5.5 Estimación de Parámetros	20
CAPITULO III: FATIGA EN LOS MATERIALES	
3.1 Ejes móviles y fijos	23

3.2 Fatiga	24
3.2.1 Física de la Fatiga	26
3.2.2 Etapas del proceso	27
3.2.3 Factores que lo afectan	29
3.2.4 Cargas Cíclicas	29
3.2.5 Daños por fatiga	33
3.2.6 Diagrama de tensión – número de ciclos (S – N)	36

CAPITULO IV: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

4.1 Introducción	38
4.2 Tipos de ensayo no destructivos (E.N.D)	39
4.2.1 Líquidos Penetrantes	39
4.2.2 Inspección Visual	39
4.2.3 Ensayos radiográficos	40
4.2.4 Análisis de vibraciones	41
4.2.5 Termografía	42
4.2.6 Ultrasonido	43

CAPITULO V: ULTRASONIDO

5.1 Introducción	44
5.2 Definición	45
5.2.1 Principio Físico	45
5.2.2 Tipos de ondas ultrasónicas	47
5.3 Generación del ultrasonido	49

5.4 Partes del equipo de ultrasonido	51
--------------------------------------	----

CAPÍTULO VI: PARAMETRIZACIÓN DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO

6.1 Calibración del equipo	56
6.2 Calibración longitudinal	56
6.3 Inspección general del eje de perforadora 120A	59

CAPITULO VII: MODELAMIENTO DEL EJE

7.1 Modelamiento por elementos finitos	67
7.2 Análisis de probabilidad de falla con software weibull 7	73
7.2.1 Análisis de datos de vida en eje P&H	73
7.2.2 Análisis de datos de vida en eje HOFFMAN	80
7.3 Cuadros de comparación de ejes marca P&H e HOFFMAN	86
7.3.1 Confiabilidad ideal en los ejes	87

CONCLUSIONES	90
---------------------	----

RECOMENDACIONES	91
------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	92
---------------------	----

ANEXOS	94
---------------	----

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Tajo Abierto Mina de Toquepala	7
Fig. 1.2 Instalaciones de Mina Toquepala	7
Fig. 1.3 Operaciones Mina Toquepala	8
Fig. 1.4 Molinos de Planta Concentradora	9
Fig. 1.5 Talleres de Mantenimiento	10
Fig. 1.6 Mantenimiento de la Pala Bucyrus 495HR	10
Fig. 1.7 Cátodos de Cobre producidos en Planta LESDE	11
Fig. 1.8 Proceso de Producción	12
Fig. 2.1 Modelo Weibull	16
Fig. 2.2 Función Densidad de Probabilidad	17
Fig. 2.3 Función de Distribución de Falla	18
Fig. 2.4 Función de Riesgo	19
Fig. 2.5 Función Distribución Acumulada	19
Fig. 2.6 Parámetro de forma Beta	21
Fig. 2.7 Parámetro de forma escala	22
Fig. 3.1 Fractura por fatiga torsional de un eje de acero AISI 1030	24
Fig. 3.2 Micro deformación	25

Fig. 3.3 Inicio y fin de la fractura por fatiga	27
Fig. 3.4 Etapa de un elemento sometido a fatiga	27
Fig. 3.5 Concentrador de Esfuerzos eje AISI 1050	28
Fig. 3.6 Ciclo invertido	30
Fig. 3.7 Ciclo estrés repetido	30
Fig. 3.8 Ciclo combinado	31
Fig. 3.9 Clases de tensiones cíclicas	32
Fig. 3.10 Determinación de resistencia a la fatiga mediante probeta	33
Fig. 3.11 Curva S-N	36
Fig. 4.1 Tipos de ensayos no destructivos	38
Fig. 4.2 Ensayo líquidos penetrantes	39
Fig. 4.3 Ensayo Inspección visual	40
Fig. 4.4 Ensayo Radiográfico- Placa radiográfica	40
Fig. 4.5 Análisis vibracional	41
Fig. 4.6 Ensayo de termografía	42
Fig. 4.7 Ensayo de Ultrasonido	43
Fig. 5.1 Características de una onda sonora	46
Fig. 5.2 Transformación de señales en la prueba de ultrasonido	46

Fig. 5.3 Direccionamiento de las ondas ultrasónicas	48
Fig. 5.4 Desplazamiento longitudinal	48
Fig. 5.5 Desplazamiento transversal	49
Fig. 5.6 Desplazamiento Superficial	49
Fig. 5.7 Detectores de ultrasonido	50
Fig. 5.8 Diseño de un detector de ultrasonido	51
Fig. 5.9 Técnica Pulso – Eco	53
Fig. 5.10 Técnica “A través”	54
Fig. 5.11 Técnica con haz angular	54
Fig. 5.12 Técnica Transductores duales	55
Fig. 6.1 Patrón de calibración	56
Fig. 6.2 Pantalla de calibración 1	57
Fig. 6.3 Inspección calibración 1	57
Fig. 6.4 Pantalla de calibración 2	58
Fig. 6.5 Inspección calibración 2	58
Fig. 6.6 Perforadora P&H 120 A	59
Fig. 6.7 Plano de eje principal	59
Fig. 6.8 Despiece del eje principal	60

Fig. 6.9 Eje principal lado izquierdo	60
Fig. 6.10 Eje principal lado derecho	60
Fig. 6.11 Pantalla de Inspección 1 lado derecho	61
Fig. 6.12 Inspección 1	61
Fig. 6.13 Pantalla de Inspección 2 lado derecho	62
Fig. 6.14 Inspección 2	62
Fig. 6.15 Pantalla de Inspección 1 lado izquierdo	63
Fig. 6.16 Inspección 3	63
Fig. 6.17 Pantalla de Inspección 2 lado izquierdo	64
Fig. 6.18 Inspección 4	64
Fig. 6.19 Pantalla de Inspección 1	65
Fig. 6.20 Pantalla de Inspección 2	66
Fig. 7.1 Tensiones sobre el eje	71
Fig. 7.2 Desplazamientos en el eje	72
Fig. 7.3 Deformaciones unitarias	72
Fig. 7.4 Selección de tipos de datos de vida para el análisis	74
Fig. 7.5 Ingreso de datos y especificación del tipo (F o S)	75
Fig. 7.6 Selección de modelo a utilizar	75

Fig. 7.7 Tipos de datos de vida para ejes P&H	76
Fig. 7.8 Gráfico de probabilidad de Falla en Weibull	77
Fig. 7.9 Gráfico de confiabilidad en el tiempo	78
Fig. 7.10 Gráfico de probabilidad acumulada de falla	79
Fig. 7.11 Ingreso de datos y especificación del tipo (F)	80
Fig. 7.12 Selección de modelo a utilizar	81
Fig. 7.13 Tipos de datos de vida para ejes CAT	82
Fig. 7.14 Gráfico de probabilidad de Falla en Weibull	83
Fig. 7.15 Gráfico de confiabilidad en el tiempo	84
Fig. 7.16 Gráfico de probabilidad acumulada de falla	85
Fig. 7.17 Gráfico de confiabilidad al 65% en eje P&H	87
Fig. 7.18 Gráfico de confiabilidad 65% eje HOFFMAN	85
Fig. A1 Despiece y locación del eje de la perforadora P&H modelo 120A	99

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1 Propiedades de la simulación realizada	67
Tabla N°2 Unidades utilizadas	68
Tabla N°3 Propiedades del material a analizar	68
Tabla N°4 Especificaciones del acero en el software	68
Tabla N°5 Coeficientes y módulos utilizados	69
Tabla N°6 Fuerzas de reacción	69
Tabla N°7 Fuerzas de cuerpo libre	70
Tabla N°8 Momentos de cuerpo libre	70
Tabla N°9 Resultados obtenidos	71
Tabla N°10 Historial de datos de vida para ejes P&H	74
Tabla N°11 Historial de datos de vida para ejes CAT	80
Tabla N°12 Comparación de eje marca P&H e HOFFMAN	86
Tabla N°13 Velocidades de Propagación del sonido	94
Tabla N°14 Características de los materiales en los palpadores	96
Tabla N°15 Ventajas y desventajas de materiales para transductores	97

RESUMEN

Mediante un análisis por ultrasonido y el modelamiento por elementos finitos, se trata de hacer un diagnóstico al eje de una perforadora marca P&H modelo 120A, propiedad de la minera Southern Perú Copper Corporation, el cual nos permita identificar las fallas prematuras que esta pieza pueda presentar y anticipar un fallo catastrófico que implique la detención inesperada del equipo de perforación.

Posteriormente al diagnóstico, se ha realizado también un análisis de confiabilidad, el cual busca hacer una comparación de la performance de dos marcas distintas de ejes, las cuales han venido siendo utilizadas en las diferentes perforadoras de la empresa. Con los datos de duración y fechas de cambio, se ha creado una pequeña base de datos por cada fabricante de la pieza, lo que nos permite evaluar el rendimiento mediante el análisis estadístico de weibull.

Esta prueba, nos permitirá saber que marca de eje es la que ofrece una mayor confiabilidad y por ende una mejor garantía de buen funcionamiento durante el período establecido como el más adecuado para el reemplazo del componente que es objeto de nuestro estudio.

ABSTRACT

By ultrasound analysis and modeling by finite elements, we want to make a diagnosis of the drill brand P&H Model 120A main shaft, owned by the mining company Southern Peru Copper Corporation, which allows us to identify premature failures that this piece can present and anticipating catastrophic failures involving unexpected equipment shutdowns.

Following the diagnosis, we have also conducted a reliability analysis, which aims to make a comparison of the performance of two different brands of main shafts, which have been used in different drillers of the company. With durability data and replacement dates, we have created a small database for each manufacturer, allowing us to evaluate performance by Weibull statistical analysis.

This test will allow us to know which brand has the best main shaft which offers higher reliability and thus a better guarantee of good performance, for the period specified as the most suitable for the replacement of the component that is the subject of our study.

INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos se definen como aquellos ensayos basados en fenómenos físicos, cuyo objetivo es obtener información sobre los defectos o estado de un material, sin provocar daños químicos, mecánicos o dimensionales al propio material.

Se emplean para detectar materiales defectuosos antes de ser formados o maquinados, para localizar defectos antes de la puesta en servicio de una máquina, para detectar componentes defectuosos antes de ensamblar los componentes, para medir espesores de los materiales, para determinar el nivel de sólido o líquido en recipientes opacos, para identificar y clasificar materiales y para descubrir defectos que pudieran desarrollarse durante el procesamiento o el uso.

Las partes también se pueden examinar cuando están en servicio, lo que permitirá su remoción previa a la ocurrencia de una falla. Los métodos principales de Ensayos no destructivos son los siguientes:

- ❖ ENSAYO VISUAL
- ❖ RADIOGRAFIA INDUSTRIAL
- ❖ PARTICULAS MAGNETIZABLES
- ❖ LIQUIDOS PENETRANTES
- ❖ CORRIENTES PARASITAS
- ❖ ULTRASONIDO
- ❖ METALOGRAFIA DE REPLICA

En el presente trabajo, haremos uso del método de ultrasonido para identificar las áreas más probables de falla por fatiga en el eje principal de una perforadora P&H modelo 120A. Este método, como se explicará más adelante, se basa en la utilización de ondas

ultrasónicas a altas frecuencias, las cuales podrán indicarnos mediante el uso de un osciloscopio, la presencia de defectos internos.



CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- ❖ Inspeccionar y modelar el eje principal de una perforadora marca P&H modelo 120A, por medio de un análisis de elementos finitos y un posterior ensayo de ultrasonido.

1.1.2 Objetivos específicos

- ❖ Identificar imperfecciones en el eje con la asistencia de un equipo de ultrasonido portátil.
- ❖ Modelar el eje principal de la perforadora 120A, sometiéndolo a cargas variables por medio del software Solidworks de modelamiento mecánico.
- ❖ Analizar y encontrar las áreas con mayor probabilidad de falla por fatiga.
- ❖ Realizar un análisis estadístico de probabilidad de falla, que nos permita identificar la mejor alternativa entre dos ejes de diferentes marcas.

1.2 Descripción de la empresa

1.2.1 Mina Toquepala - Southern Copper Corporation

Southern Copper Corporation es uno de los productores integrados de cobre más grandes del mundo, destacando en la producción de cobre, molibdeno, zinc, plomo, carbón y plata. Todas sus operaciones de minado, fundición, y refinación están ubicadas en Perú y México y conduce actividades de

exploración en estos países y en Chile. Las operaciones de cobre en Perú comprenden la extracción, molienda y flotación de mineral de cobre para producir concentrados de cobre y de molibdeno; la fundición de concentrados de cobre para producir ánodos de cobre; y la refinación de ánodos de cobre para producir cátodos de cobre. Como parte de este proceso de producción produce cantidades significativas de concentrados de molibdeno y plata refinada. También produce cobre refinado usando tecnología de extracción por solventes y electrodeposición (LESDE). SCC opera las minas de Toquepala y Cuajone en las alturas de la cordillera de los Andes, a unos 860 kilómetros al sureste de la ciudad de Lima, Perú. También opera una fundición y una refinería al oeste de las minas de Toquepala y Cuajone en la ciudad costeña de Ilo, Perú.

La explotación de la mina de Toquepala es llevada a cabo por Southern Perú Copper Corporation. Junto con la mina de Cuajone y la refinería de Ilo, la mina de Toquepala es uno de los tres enclaves de dicha empresa en el sur del Perú.

Toquepala es un yacimiento Porfirítico, el mineral se presenta en forma disseminada, relleno de cavidades y en venillas. La producción minera es principalmente cobre y sulfuros de cobre: Calcosíta, Bornita, Calcopirita y Molibdenita. También se producen cantidades (en menor escala) de molibdeno y otros minerales.



Fig.1.1 Tajo Abierto Mina de Toquepala

Fuente www.southernperu.com/ESP/Pages/Jobs.aspx



Fig. 1.2 Instalaciones de Mina Toquepala

Fuente www.southernperu.com/ESP/Pages/Jobs.aspx

En la Mina de Toquepala existen 4 Gerencias las cuales controlan sus propias operaciones y se menciona a continuación:

a. Gerencia Mina

Los trabajos de minado se iniciaron en 1957 y la producción de mineral en 1960. Dicha gerencia se encarga de las Operaciones Mina las cuales incluyen el dinamitado del mineral, la remoción de mineral y traslado del material, en este proceso el mineral es traslado a 3 lugares.

❖ Mineral de Alta ley

Se trasladan mediante locomotoras a la chancadora primaria que pertenece a la Planta Concentradora.

❖ Mineral de Baja Ley

Son trasladados mediante Volquetes a 2 lugares, a los botaderos de Lixiviación y a un Chancadora que después de triturar el mineral este es enviado a los botaderos de lixiviación mediante una faja transportadora de 7 kilómetros de distancia.

❖ Escombros

Es trasladado mediante Volquetes a grandes zonas de botaderos los cuales sirven para tapar botaderos llenos de material inservible

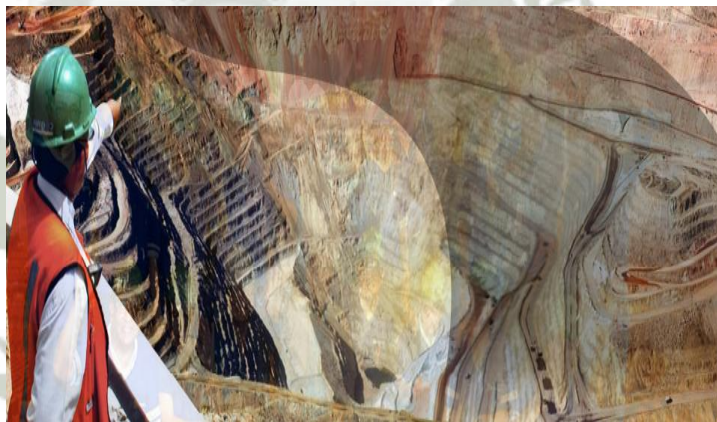


Fig. 1.3 Operaciones Mina Toquepala

Fuente www.southernperu.com/ESP/Pages/Jobs.aspx

b. Gerencia Concentradora

Utiliza sistemas computarizados de monitoreo de última generación con el fin de coordinar el flujo de insumos y optimizar las operaciones. El material con una ley de cobre de más de 0.40% se carga en los vagones y se envía al

circuito de molienda, donde chancadoras rotatorias gigantes reducen el tamaño de las rocas a aproximadamente 85% menos que media pulgada. Luego el mineral se envía a los molinos de bolas y de barras, que lo trituran en una mezcla de agua hasta que tenga la consistencia de un polvo fino. El polvo fino se mezcla con agua y se transporta a las celdas de flotación. Se bombea aire a las celdas produciendo una espuma, que lleva el mineral de cobre hacia la superficie más no el material residual, o relaves.

El concentrado en bruto, que tiene un contenido importante de molibdeno, es procesado para recuperar molibdeno mediante flotación inversa. El concentrado final de cobre va como relaves a la planta de molibdeno. Este concentrado final que tiene un contenido promedio de cobre de 27.5% aproximadamente es filtrado para extraer 8.5% de humedad. Luego, los concentrados se envían por ferrocarril hasta la fundición en Ilo.

Los relaves restantes se envían a la represa de Quebrada Honda, principal planta de almacenamiento de relaves



Fig. 1.4 Molinos de Planta Concentradora

Fuente <http://www.southernperu.com/ESP/opinte/Pages/default.aspx>

En la mina de Toquepala la Gerencia de Mantenimiento es la encargada de realizar el mantenimiento a todas las áreas de operaciones y producción de la división de Toquepala como son Operaciones Mina, Talleres, Área de Mantenimiento, Concentradora, Maestranza, Locomotoras y Quebrada Honda, menos de la Gerencia LESDE que es la única que cuenta con su propio personal de Mantenimiento esto se debe a las políticas de la Empresa Southern Perú.



Fig. 1.5 Talleres de Mantenimiento

Fuente www.southernperu.com/ESP/opinte/Pages/default.aspx



Fig. 1.6 Mantenimiento de la Pala Bucyrus 495HR

Fuente www.southernperu.com/ESP/opinte/Pages/default.aspx

c. Gerencia LESDE

La planta de LESDE de Toquepala produce cátodos de cobre por electrodeposición con una pureza de 99.999% a partir de soluciones obtenidas mediante la lixiviación de mineral de baja ley de cobre de menos de 0.40% almacenado en las minas de Toquepala y Cuajone. La planta de lixiviación comenzó sus operaciones en 1995 con una capacidad original de 35,629 toneladas de cátodos de cobre al año. En 1999 se amplió su capacidad a 56,000 toneladas por año.

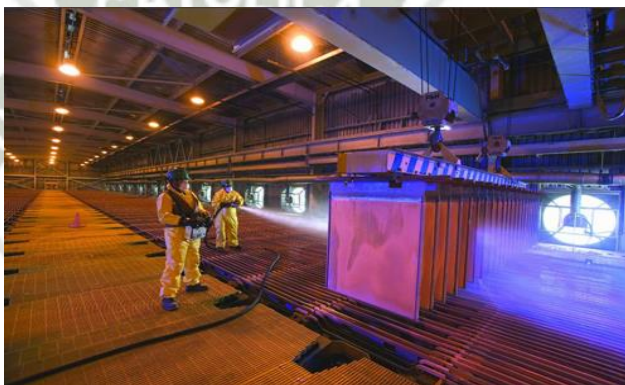


Fig. 1.7 Cátodos de Cobre producidos en Planta LESDE

Fuente www.southernperu.com/ESP/Pages/Jobs.aspx

1.3 Proceso de Producción

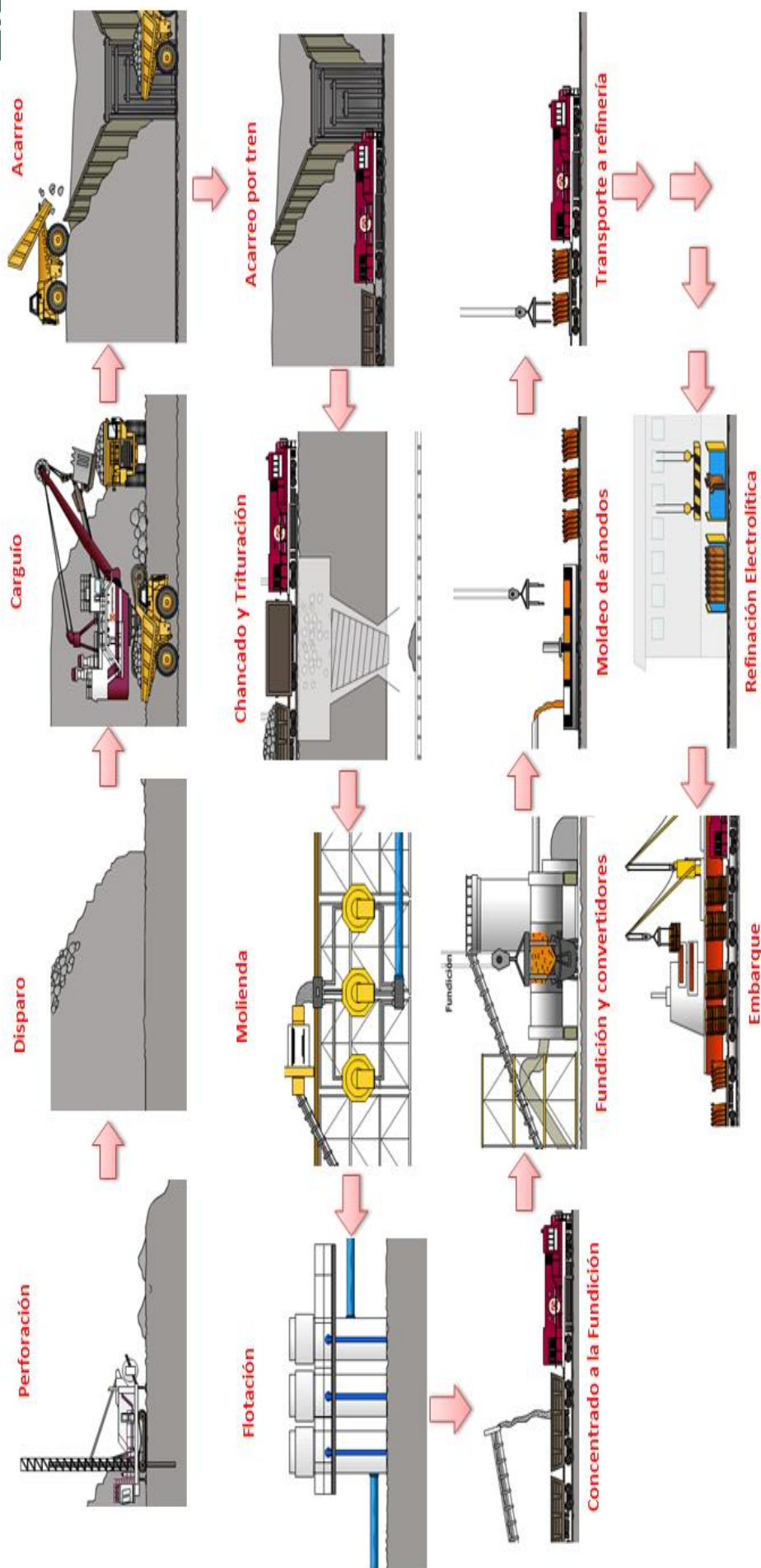


Fig. 1.8 Proceso de Producción

Fuente Folleto de Southern Peru Copper Corporation

CAPITULO II

CONFIABILIDAD

2.1 Introducción

La confiabilidad es metodología científica para conocer el desempeño de vida de productos, equipos, procesos, para asegurar que estos ejecuten su función, sin fallar, por un periodo de tiempo en una condición específica. La confiabilidad de un componente en el instante t , $R(t)$, es la probabilidad de que un elemento no falle en el intervalo $(0,t)$, dado que era nuevo o como nuevo en el instante $t=0$. Un componente puede presentar diferentes tipos de confiabilidades, asociadas a diferentes funciones. La confiabilidad se relaciona básicamente con la tasa de fallas (cantidad de fallas) y con el tiempo medio de operación y el tiempo de operación. Mientras el número de fallas de un determinado equipo vaya en aumento o mientras el tiempo medio de operación de un equipo disminuya, la confiabilidad del mismo será menor (variable a modelar en Tiempos Operativos)

2.2 Propósito de la Confiabilidad

- ❖ Conocer la confiabilidad de los productos y ser capaces de controlarla.
- ❖ Nivel óptimo de Confiabilidad permitirá gasto mínimo durante el ciclo de vida y costo mínimo de producción, sin comprometer la confiabilidad y la calidad.

2.3 Balance de la Confiabilidad

La confiabilidad debe estar balanceada con los otros aspectos de negocio de la empresa, como costos de producción, ventas, características del producto y satisfacción del cliente.

2.4 Ingeniería de Confiabilidad

La Ingeniería de Confiabilidad es un área de estudio fundamental para la evaluación de los procesos de producción, ya que la misma mejora la capacidad para predecir la ocurrencia de eventos no deseados y la capacidad para identificar acciones que minimicen y/o mitiguen sus efectos; habilidades básicas para un gerente o negociador moderno que debe entender que una de las más importantes formas de agregar valor es evitar que se destruya. La Ingeniería de Confiabilidad está dedicada al estudio de los aspectos físicos y aleatorios del fenómeno falla. Las dos escuelas que con enfoques muy específicos, coexisten dentro de la Ingeniería de Confiabilidad son la Confiabilidad basada en el análisis Probabilístico del tiempo para la falla o historial de fallas y Confiabilidad basada en el análisis Probabilístico del deterioro o física de la falla.

2.5 Modelos Probabilísticos

2.5.1 Introducción a los modelos probabilísticos

El diseño de un programa eficiente de mantenimiento (en términos de costo global de mantenimiento) implica la comprensión de los fenómenos de falla de los equipos.

Dado que las fallas de los equipos son eventos aleatorios, estudiaremos conceptos y modelos estadísticos que nos permitan controlar y mejorar la confiabilidad, y con ello los costos.

La mayor dificultad que enfrentaremos será el alto grado de incertidumbre de los estudios y los efectos de condiciones cambiantes ambientales y de operación en el comportamiento de los equipos.

2.5.2 Modelos probabilísticos de Confiabilidad

Los modelos que permiten el estudio de las fallas y confiabilidad son:

❖ Modelo Exponencial $R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$

❖ Modelo logarítmico Normal $R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma \cdot t} \right)^2} \cdot dt$

❖ Modelo Weibull $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$

El cual utilizaremos es el Modelo Weibull.

2.5.3 Modelo Weibull

El modelo probabilístico de Weibull es muy flexible, pues la ley tiene tres parámetros que permiten “ajustar” correctamente toda clase de resultados experimentales y operacionales. Contrariamente al modelo exponencial, la ley de Weibull cubre los casos en que la tasa de fallo (λ) es variable y permite por tanto ajustarse a los períodos de “juventud” y a las diferentes formas de “envejecimiento”. Es decir se aplica a equipos en cualquier etapa de su vida. Recordemos la curva de Davies o de la “bañera”, para su utilización se precisan los resultados de ensayo de muestras o la toma de datos de funcionamiento (TBF = tiempo entre fallos).

Estos resultados permiten estimar la función de repartición $F(t)$ que corresponde a cada instante t . La Determinación de los tres parámetros permite, evaluar la MTBF y la desviación típica.

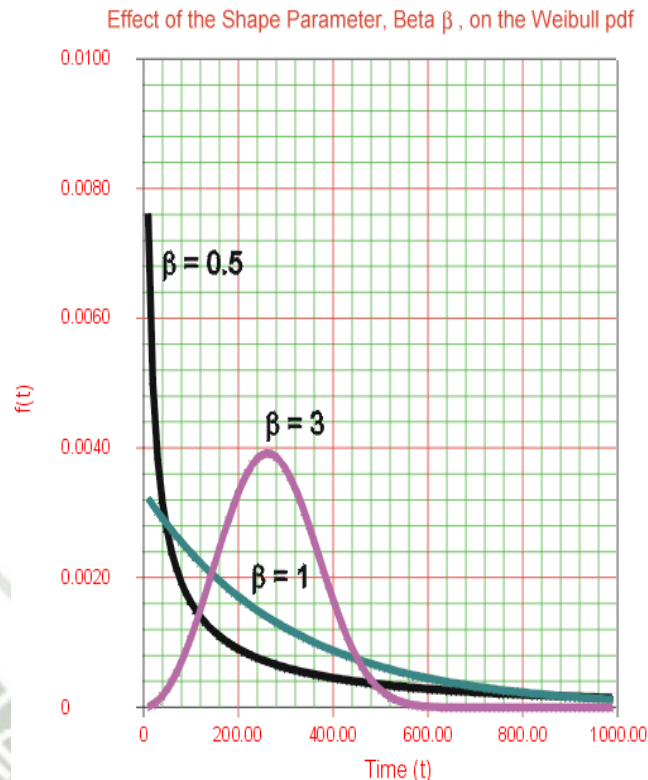


Fig. 2.1 Modelo Weibull

Fuente www.weibull.com/basics/parameters.htm

2.5.4 Expresiones Matemáticas

a) La Función Densidad de Probabilidad $f(t)$

La función de densidad nos da la probabilidad que ocurra una falla en un tiempo específico. Sus unidades son falla/ítem-tiempo. Así, para cualquier punto da la probabilidad que una falla ocurra durante la siguiente unidad de tiempo.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^\beta} \text{ siendo } t \geq \gamma$$

Dónde:

β : Parámetro de forma o inclinación.

η : Parámetro de Escala o vida característica, es el periodo de operación en el que existe una probabilidad de falla del 63.2%

γ : Parámetro de Ubicación o localización $-\infty < t < \infty$

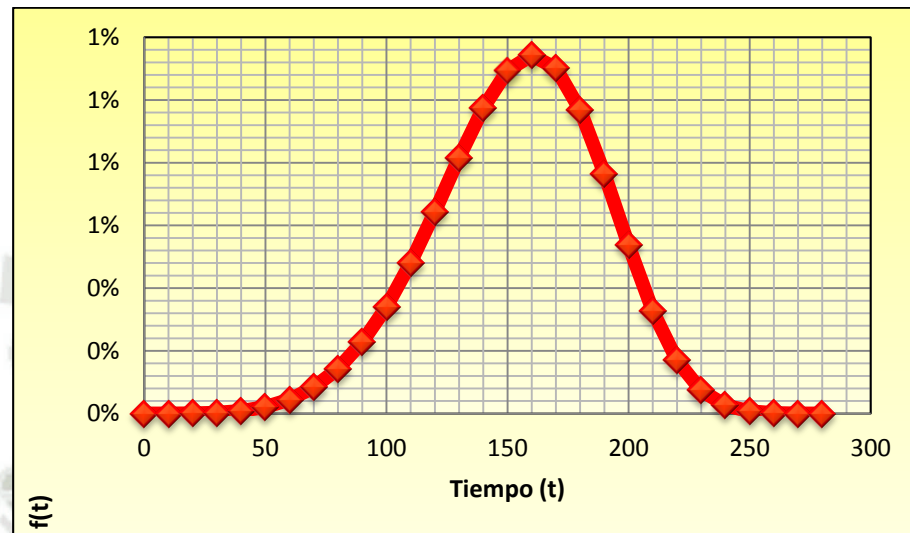


Fig. 2.2 Función Densidad de Probabilidad

Fuente Propia

b) Función de Distribución de Falla

Esta función nos da la probabilidad acumulada de falla representa la probabilidad que una falla ha ocurrido antes de cierto tiempo.

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta}$$

Observación para $t=0$ y $\beta=1$, se vuelve a encontrar la distribución exponencial, caso particular del modelo de Weibull.

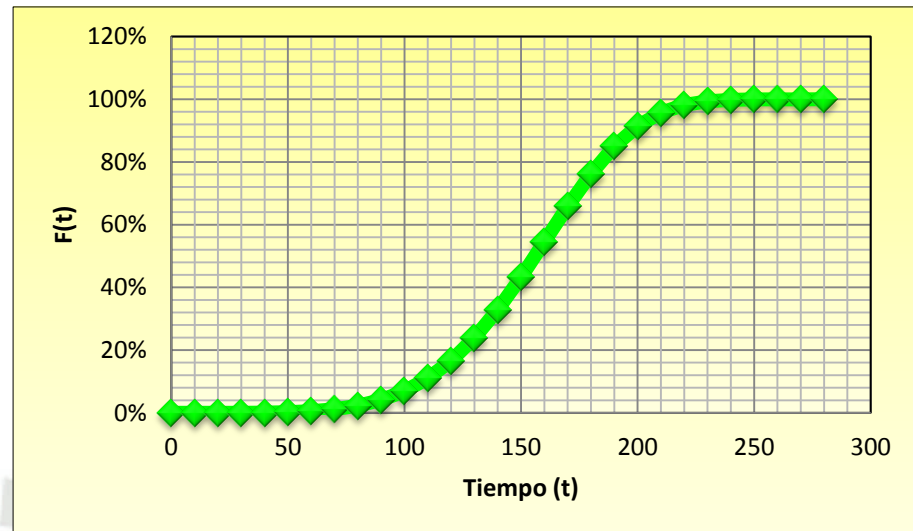


Fig. 2.3 Función de Distribución de Falla

Fuente Propia

c) Función de Riesgo

Es la función más importante en la teoría de la renovación, la forma de la función de riesgo sobre una gran magnitud determine que estrategia se usara para mantener un componente específico.

$$r(t) = \frac{1}{n(t)} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Dónde:

Δn =Número de fallas en un intervalo de tiempo $[t, t + \Delta]$

Δt =Ancho de intervalo de tiempo.

$n(t)$ =Poblacion sobreviviente en el tiempo t .

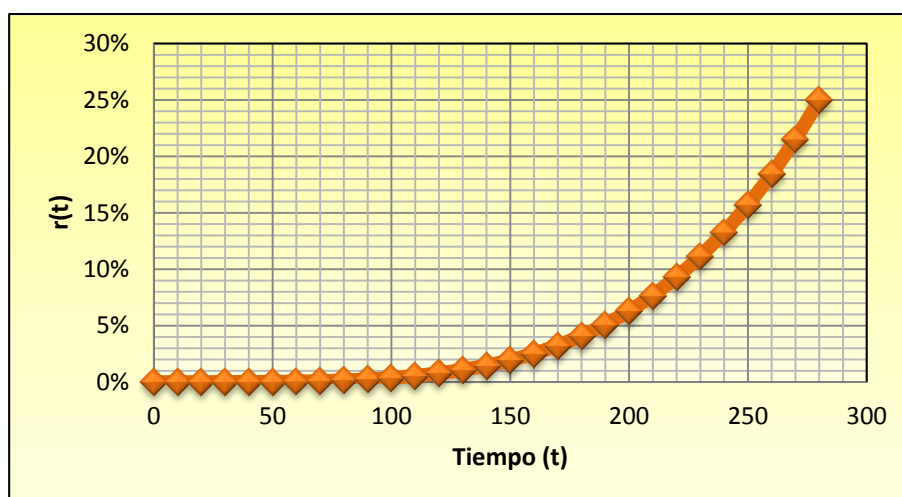


Fig. 2.4 Función de Riesgo

Fuente Propia

d) Función de Supervivencia o Confiabilidad

La función de supervivencia o confiabilidad nos da la probabilidad de supervivencia para cualquier tiempo específico.

$$R(t) = 1 - F(t)$$

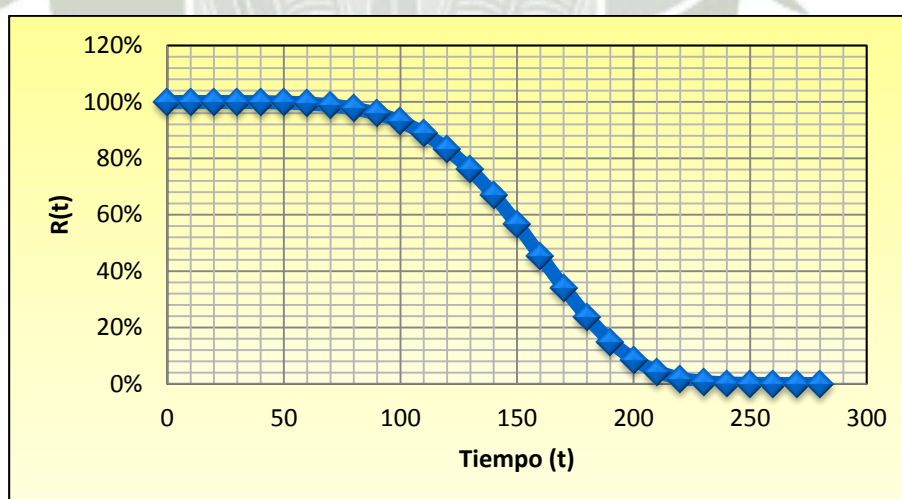


Fig. 2.5 Función Distribución Acumulada

Fuente Propia

2.5.5 Estimación de Parámetros

Para ajustar un modelo a los datos, es necesario realizar una estimación de los parámetros. La estimación se realiza basándose en el conjunto de datos.

Tipos de parámetros:

Las distribuciones pueden tener cualquier número de parámetros. A más parámetros, más datos requeridos. Generalmente se emplean tres parámetros.

a. Parámetro forma (β)

Este parámetro ayuda a definir la forma de una distribución y tiene la forma de una campana. Si $\beta < 1$, la tasa de fallos disminuye con la edad sin llegar a cero, por lo que podemos suponer que nos encontramos en la juventud del componente con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura. Si $\beta = 1$, la tasa de fallos se mantiene constante siempre, lo que nos indica una característica de fallos aleatoria. En este caso nos encontramos que la distribución de Weibull es igual a la exponencial.

Si $\beta > 1$, la tasa de fallo incrementa con la edad de forma continua lo que indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.

$1,5 < \beta < 2,5$ fenómeno de fatiga.

$3 < \beta < 4$ fenómeno de desgaste, de corrosión

$\beta = 3,44$ $f(t)$ es simétrica, la distribución es “normal”.

Este es el modelo a emplear ya que no se posee un fecha límite o de garantía que determine la duración del sistema.

Si $\beta < 1$ hay fatiga u otro tipo de desgaste en el que la tasa de fallo disminuye con el tiempo. Cuando β es aproximadamente 0.5 pueden asociarse con ciclos de fatigas bajos y los valores de β más elevados (aproximadamente 0.8) con ciclos más altos.

Si $\beta > 1$ hay una erosión o desgaste similar en la que la constante de duración de carga disminuye continuamente con el incremento de la carga.

$\beta < 0$: indica que el mecanismo fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar la toma de datos.

Si $\beta < 1$ podría tratarse de una fallo de juventud antes de su puesta en servicio.

Si $\beta > 1$ se trata de un desgaste por una disminución constante de la resistencia iniciado antes de su puesta en servicio.

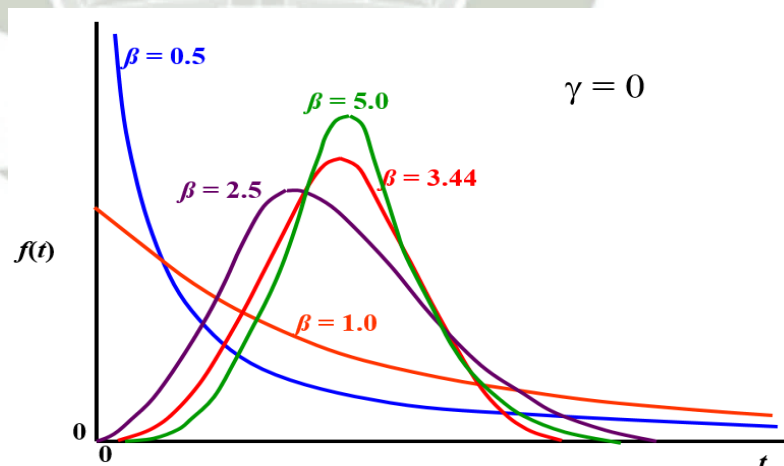


Fig. 2.6 Parámetro de forma Beta

Fuente www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14.htm

b. Parámetro de escala (η)

Este parámetro de escala define donde cae el lomo de la distribución o cuan estirada esta la distribución.

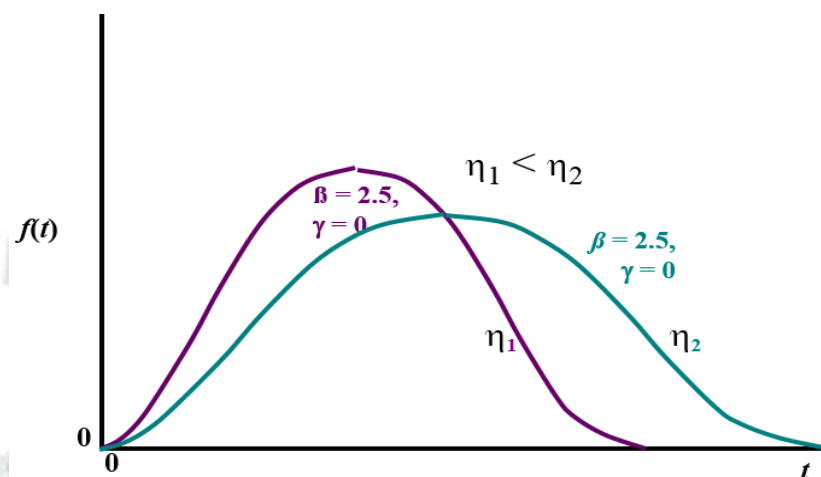


Fig. 2.7 Parámetro de forma escala

Fuente www.weibull.com/hotwire/issue15/re basics14.htm

c. Parámetro de localización o ubicación (γ)

Se usa para cambiar una distribución en una dirección u otra e indica el origen de la distribución y puede ser positivo o negativo.

CAPITULO III

FATIGA EN LOS MATERIALES

3.1 Ejes móviles y fijos

Eje móvil es un elemento que generalmente es de sección transversal circular, cuya función principal es transmitir movimiento y potencia, el eje fijo es un elemento no rotatorio o estático que solo sirve para sostener piezas rotatorias.

Los nombres que se les puede dar a los ejes móviles pueden ser: árbol, eje principal, eje de transmisión, contra eje de transmisión, contra eje, eje flexible, entre otros.

Para el diseño de un eje se debe estudiar previamente los siguientes puntos:

A. Deformación y rigidez

- ❖ Deformación por torsión
- ❖ Deformación por flexión
- ❖ Deformación por cortante debida a cargas transversales en ejes cortos.

B. Esfuerzo y resistencia

- ❖ Resistencia estática
- ❖ Resistencia a la fatiga
- ❖ Confiabilidad

En el diseño de ejes es posible localizar áreas críticas, dar un tamaño adecuado para obtener la resistencia adecuada y así finalmente configurar las dimensiones que llevara el eje, antes de hacer un análisis de deformación es necesario tener todas las características del eje, ya que la deformación es función de la configuración geométrica en todas sus partes.

No existe una única fórmula para determinar las dimensiones de un eje para cualquier caso de diseño, la mejor forma de hacerlo es estudiar los diseños ya existentes a fin de ver como se resolvieron los problemas preliminares y combinar lo mejor de ellos para solucionar el problema propio.

3.2 Fatiga

El fenómeno por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de esfuerzos variables en el tiempo, se denomina “Fatiga”.

Esto ocurre porque hay deformaciones plásticas cíclicas que provocan cambios irreversibles en la dislocación de la microestructura de los materiales.

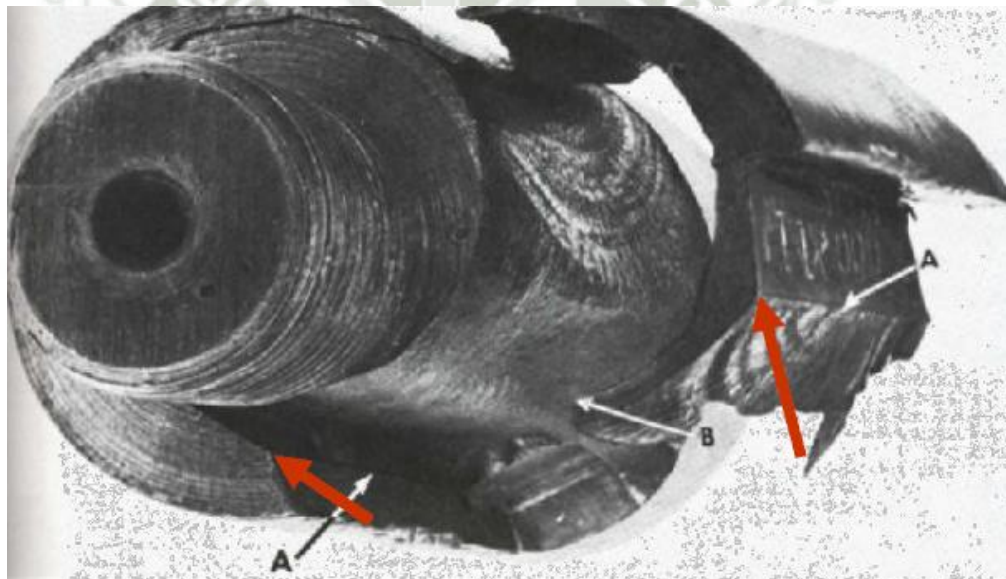


Fig. 3.1 Fractura por fatiga torsional de un eje de acero AISI 1030

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

En el año 1860, Wohler desarrollo diversas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno de fatiga, de dichos ensayos se pueden extraer dos conclusiones:

- ❖ Las fuerzas necesarias para provocar la ruptura con cargas dinámicas son inferiores a las necesarias en el caso estático.
- ❖ Existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompen, de hecho se conoce como el límite de fatiga.

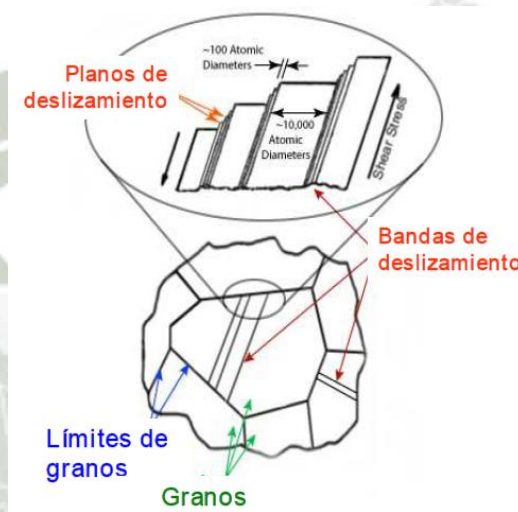


Fig. 3.2 Micro deformación

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

Este fenómeno, por lo general, se produce en zonas donde el material es más propenso a sufrir deformaciones plásticas, esto se debe a la presencia de efectos como: las inclusiones, porosidades o concentraciones de esfuerzos, los cuales aumentan las probabilidades de formación de fisuras o micro grietas por el efecto repetitivo de cargas.

La teoría más exacta propuesta hasta la fecha para explicar la naturaleza de la falla por fatiga se denomina teoría de la duración hasta la deformación, se puede aplicar para determinar valores de resistencia a la fatiga, pero cuando se le da este uso es necesario reunir varias idealizaciones; así que existirán algunas incertidumbres en los resultados.

En las zonas donde se inicia la formación de grietas, los materiales pueden soportar cargas internas mientras no sea excedido el límite elástico de esfuerzo, de lo contrario, se produce una deformación localizada, en este último caso la grieta puede ser tratada como una perturbación si sus efectos son mínimos, pero si el ataque es severo, bajo la acción de esfuerzos aplicados, se puede llegar a formar una zona plástica donde la fragilidad de la misma conduce a la propagación de grietas y falla de las piezas o estructuras mecánicas.

3.2.1 Física de la fatiga

Desde el año 1830 se ha reconocido que el metal bajo una carga repetitiva o fluctuante fallará a un nivel de tensión más bajo que el requerido en el diseño.

En la figura N° 3.3 se ve que después de un cierto tiempo una grieta que se inicia en la circunferencia del agujero, se propagará a través del elemento hasta que el resto de la sección no pueda soportar tal fuerza y por consiguiente el mecanismo falle.



Fig. 3.3 Inicio y fin de la fractura por fatiga

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

3.2.2 Etapas del proceso

La historia de una grieta o fisura que se desarrolla en un elemento sometido a fatiga tiene típicamente tres etapas: iniciación, propagación estable y finalmente una propagación acelerada que conduce a la falla del elemento.

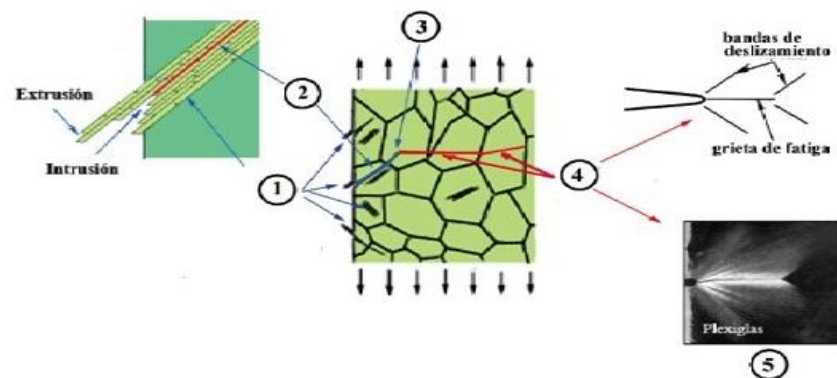


Fig. 3.4 Etapa de un elemento sometido a fatiga

Fuente www.machinerylubrication.com/sp/mecanismos-basicos_de_desgaste.asp

- ❖ La primera corresponde a una fase donde se producen los primeros cambios micro estructural.

- ❖ En la segunda etapa se inician las macro grietas y la formación de fisuras con tamaños similares al tamaño del grano del material.
- ❖ En la última etapa se produce un proceso de propagación inestable, provocando la fractura o falla total del elemento.

La duración de cada una de las etapas descritas anteriormente puede variar considerablemente en función del tipo de material, carga actuante, geometría, temperatura e irregularidades.

Cuando la grieta ha crecido aproximadamente 3 granos, cambian su dirección de propagación, en la primera etapa de crecimiento sigue la dirección del máximo plano de esfuerzo al corte de 45° para la dirección de carga; durante la segunda etapa ocurren cambios físicos para los de mecanismos fatiga, ahora la grieta es suficientemente grande para formar una concentración geométrica de esfuerzo. Una zona plástica de tensión se crea en la punta de la grieta como se muestra en la figura N° 3.5 después de esta etapa, la grieta se propaga perpendicularmente en la dirección de la carga aplicada.

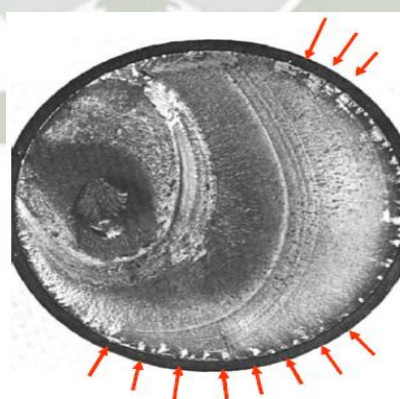


Fig. 3.5 Concentrador de Esfuerzos eje AISI 1050

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

Como el mecanismo físico en la fatiga esta generalmente dividido en dos etapas, los métodos de análisis también están normalmente divididos en dos etapas. La primera etapa es típicamente analizada utilizando la aproximación local de esfuerzo (E-N), mientras que la segunda etapa es analizada usando la mecánica de la fractura basada en la aproximación.

3.2.3 Factores que la afectan

Diversos factores afectan el valor de la resistencia a la fatiga de un elemento mecánico, como ser el tipo de material, su grado de aleación, método de fabricación, condiciones y atmosfera de trabajo, presencia de entallas entre otras. Todos estos factores se tienen en cuenta con coeficientes de corrección que se aplican al valor de resistencia a la fatiga obtenido para la pieza ensayada en condiciones de laboratorio.

Algunos factores son:

- a. Resistencia del material
- b. La presencia de concentraciones de tensión p inclusiones en un material.
- c. Temperatura de funcionamiento.
- d. Tamaño y forma de la parte.
- e. Condiciones de superficie de la parte.
- f. Historia de la carga de la parte.
- g. Magnitud y dirección de las tensiones, tanto tensiones residuales y aplicadas.

3.2.4 Cargas Cíclicas

3.2.4.1 Tipos de Modos de Ciclo de Fatiga:

a. Ciclo de fatiga invertido

Ciclo de fatiga invertido este tipo de ciclo de estrés tiene una amplitud simétrica respecto al eje x. Los valores máximos y mínimos de tensiones son iguales, pero de signo opuesto.

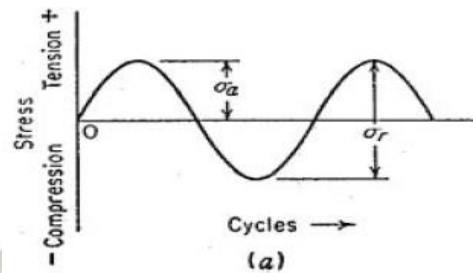


Fig. 3.6 Ciclo invertido

Fuente Libro de León y Ruso

b. Ciclo de fatiga estrés repetido

Ocurre con mayor frecuencia en aplicaciones de ingeniería que el ciclo de fatiga invertido. El ciclo de fatiga repetido es una onda sinusoidal que es asimétrica del eje x. Los valores máximos y mínimos de tensiones no son iguales y de signo opuesto.

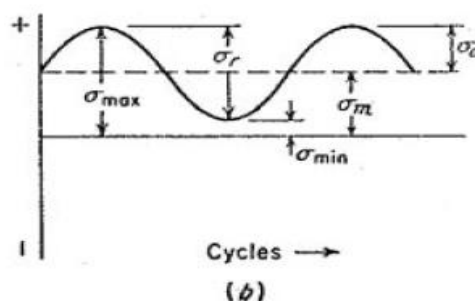


Fig. 3.7 Ciclo estrés repetido

Fuente Libro de León y Ruso

c. Ciclo de fatiga combinado

Un último tipo de modo de ciclo es donde el estrés y la frecuencia varían aleatoriamente.

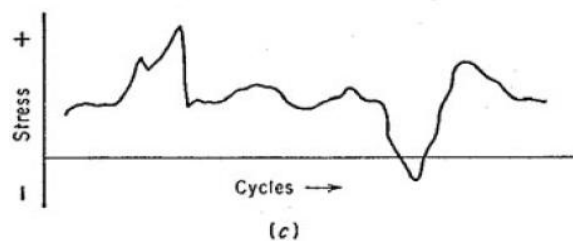


Fig. 3.8 Ciclo combinado

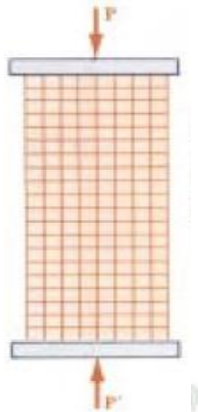
Fuente Libro de León y Ruso

3.2.4.2 Tensiones Cíclicas

Las cargas variables se puede presentar como una continuación entre cargas dinámicas alternas actuando simultáneamente con cargas estáticas.

Hay tres maneras comunes en que las tensiones cíclicas pueden aplicarse:

a. Axial



b. Torsión



c. Flexión



Fig. 3.9 Clases de tensiones cíclicas

Fuente Libro de León y Ruso

3.2.4.3 Determinación de la resistencia a la fatiga

Existe solo una prueba para medir la resistencia a la fatiga por flexión que es usando una carga de flexión conocida y de valor constante a una muestra de material (probeta). Cuando gira la muestra, la tensión aplicada a las fibras en la superficie exterior de la probeta va de un valor máximo de tensión a cero hacia el interior a máxima compresión y es repetida. El mecanismo de prueba cuenta el número de rotaciones (ciclos) hasta que la probeta falle. Un gran número de pruebas se ejecuta en cada nivel de estrés de interés y los resultados son estadísticamente anotados para determinar el número esperado de ciclos para presente la falla a un nivel de fatiga.

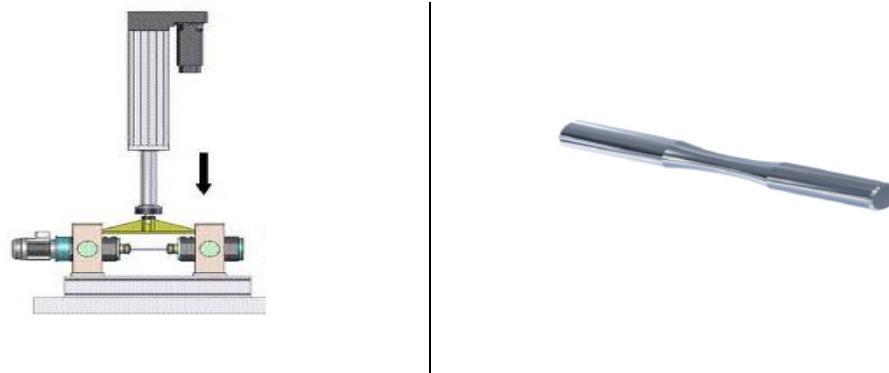


Fig. 3.10 Determinación de resistencia a la fatiga mediante probeta

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

3.2.5 Daños por fatiga

En la vida real se observa que repetidos ciclos de carga y descarga debilitan las piezas a lo largo del tiempo incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo de la tensión de rotura estática e incluso del límite elástico del material. Cada ciclo de fluctuación de la tensión deteriora o daña la pieza un poco. Tras un n° de ciclos determinado, la pieza está tan debilitada que rompe por Fatiga. Para complicar el tema también se observa en piezas metálicas que por debajo de un cierto valor de la tensión no se produce la rotura por elevado que sea el n° de ciclos de trabajo de la pieza. Todo esto hace que la Fatiga sea realmente compleja y por desgracia para el ingeniero de diseño una de las primeras causas de fallo en muchas piezas construidas con materiales férricos. Ejemplos de fallo por fatiga los tenemos en máquinas rotativas, tornillos, alas de aviones, productos de consumo, ruedas de ferrocarril, plataformas marítimas, barcos, vehículos y puentes.

La vida a fatiga se puede definir como el **"fallo debido a cargas repetitivas, que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura"**. El análisis de fatiga estructural es una herramienta para

evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio. Los resultados del análisis de fatiga se representan mediante contornos en color que muestran la duración de los ciclos de carga que la estructura puede soportar antes de que se inicie cualquier grieta.

Los estudios estructurales lineales y no lineales no predicen los fallos por fatiga. Calculan la respuesta de un diseño sujeto a un entorno específico de cargas y restricciones. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible el ingeniero proyectista puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de solicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga. Los resultados de los estudios estructurales (estáticos y dinámicos, lineales y no lineales) se usan como los datos básicos de partida para definir el estudio de fatiga. El nº de ciclos requeridos para que el fallo por fatiga ocurra en un punto depende del material y de la fluctuación de las tensiones. Esta información, para ciertos tipos de materiales férricos, nos la proporciona la llamada Curva S-N.

Las grietas por Fatiga se inician en la superficie del material. Por ello debe evitarse en lo posible ralladuras y arañazos en las superficies de buen acabado (por ejemplo, grabar el nombre comercial en la pieza), sobre todo en zonas con elevado nivel de tensión. Cualquier tratamiento superficial (térmico o mecánico) que produzcan un estado de tensiones residuales de compresión en la superficie de las piezas aumentando la dureza de la superficie (por ejemplo, el temple, granallado o laminado superficial) incrementará la vida a fatiga de la pieza.

El análisis de fatiga se basa en la regla de Miner de daño acumulado para estimar la vida a fatiga a partir de una historia de tensiones o deformaciones. La estimación se

realiza reduciendo los datos de carga a una secuencia de picos y valles, contando los ciclos y calculando la vida a fatiga. Para realizar un análisis a Fatiga o de durabilidad, se debe proporcionar información específica para el análisis de fatiga:

- ❖ Propiedades a fatiga de los materiales
- ❖ Variación de las cargas a fatiga
- ❖ Opciones de análisis a fatiga

Fases de un Fallo por Fatiga

Los fallos por Fatiga se producen en tres fases:

Fase 1 (Iniciación): Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, ralladuras, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación. En materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas.

Fase 2 (Propagación): Alguna o todas las grietas crecen por efecto de las cargas. Además, las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.

Fase 3 (Rotura): La pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde

un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

3.2.6 Diagrama de tensión – número de ciclos (S – N)

La curva S-N de un material define los valores de tensión alternos frente a la cantidad de ciclos requerida para causar fallos en un factor de tensión dado. La figura muestra una curva S-N típica. El eje Y representa la tensión alterna (S) y el eje X representa el número de ciclos (N). Una curva SN se basa en un factor de tensión o en una tensión media. Puede definir curvas SN múltiples con factores de tensión diferentes para un material. El software utiliza la interpolación lineal para extraer datos cuando se definen curvas SN para un material.

Las curvas SN se basan en el ciclo de vida medio de la fatiga o en una probabilidad de fallo determinada.

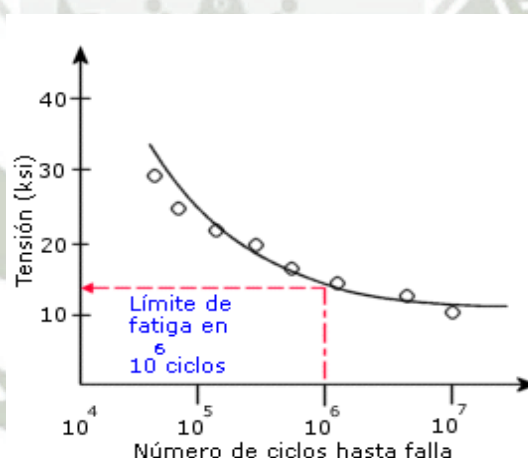


Fig. 3.11 Curva S-N

Fuente Libro de León y Ruso

Las curvas S-N se basan en la vida a fatiga media o en una probabilidad de fallo dada. La generación de la curva S-N de un material requiere muchos ensayos para de una forma

estadística variar las tensiones alternas, las tensiones medias (o ratio de tensión) y contar el nº de ciclos.

Para caracterizar un material se toma un conjunto de probetas y se las somete a sollicitaciones variables con diferentes niveles de tensión, contándose el nº de ciclos que resiste hasta la rotura. Debido a la elevada dispersión estadística propia de la fatiga los resultados se agrupan en una banda de roturas. Una parte de esta dispersión puede atribuirse a errores del ensayo, pero es una propiedad del fenómeno físico lo cual obliga a realizar un gran nº de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Por tanto, caracterizar un material a fatiga supone un coste muy importante.



CAPITULO IV

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

4.1 Introducción

Las pruebas mecánicas fueron creadas como respuesta a la necesidad de conocer el estado de los materiales, sin embargo, tienen el inconveniente que terminan con la vida útil de los elementos sujetos a prueba. Fue entonces que surgieron los ensayos no destructivos, con los cuales se puede determinar el estado de los materiales sin inutilizar a los mismos, además estos ensayos son capaces de detectar, sin dañar el material, discontinuidades superficiales e internas en materiales, indicaciones en soldaduras, componentes y partes fabricadas. Hoy en día se conocen algunos tipos de ensayos que no dañan el material, entre los que se pueden nombrar, mediciones de espesores por ultrasonido, ensayos radiográficos, líquidos penetrantes, inspección visual, análisis de vibraciones, termografía y ultrasonido para la detección de fallas.



Fig. 4.1 Tipos de ensayos no destructivos

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

4.2 Tipos de ensayo no destructivos (E.N.D)

4.2.1 Líquidos Penetrantes

Es un ensayo de rápidos resultados que se realiza sobre piezas. Un inconveniente que presenta es ensuciar las superficies de las piezas ensayadas. La aplicación de este tipo de ensayo se realiza en aceros y en materiales no magnéticos como aluminio, magnesio, aceros inoxidables, cobres, bronce, latones entre otros.



Fig. 4.2 Ensayo líquidos penetrantes

Fuente www.globaltechltda.cl/paginas/mostrar_menu_servicios.php?id=167

4.2.2 Inspección Visual

Es un ensayo no destructivo que se emplea lámparas de luz, lentes de aumentos, cámara de fotos, cámara de video entre otros. Algunas veces un componente puede ser rechazado durante la inspección visual.



Fig. 4.3 Ensayo Inspección visual

Fuente www.endicontrol.com.co/inspeccion-visual/

4.2.3 Ensayos radiográficos

La radiografía industrial se usa para detectar variaciones de una región de un determinado material, que presentan una diferencia en espesor o densidad comparada con una región vecina; es decir, la radiografía es un método capaz de detectar con buena sensibilidad, defectos volumétricos de la zona inspeccionada.

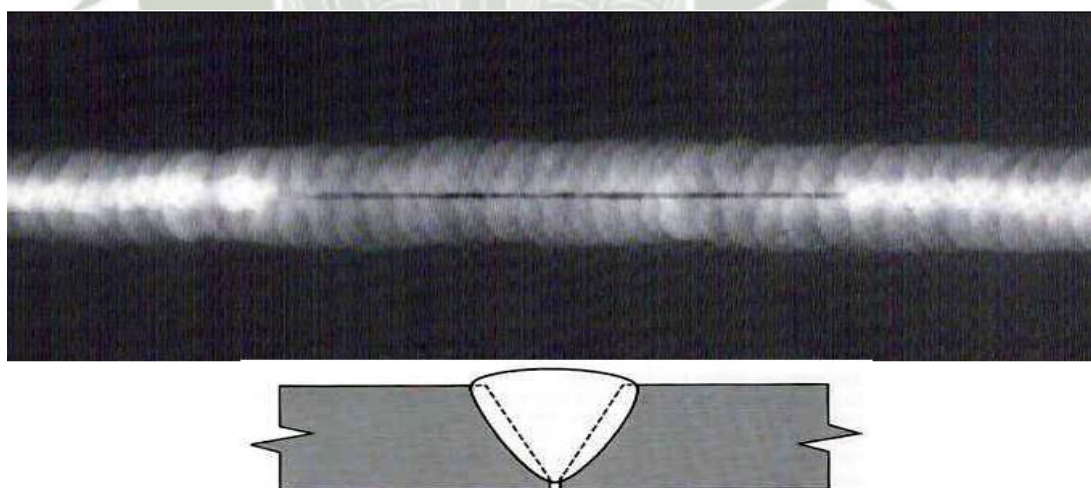


Fig. 4.4 Ensayo Radiográfico- Placa radiográfica

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

4.2.4 Análisis de vibraciones

La medición y análisis de vibraciones como técnica de prevención y diagnóstico de fallas mecánicas de máquinas en operación, constituye actualmente, la técnica fundamental de todo plan de mantenimiento predictivo.

En este tipo de ensayo se busca.

- ❖ Determinar cuándo se requiere un trabajo de mantenimiento en alguna pieza específica de un equipo en operación.
- ❖ Incrementar el tiempo de disponibilidad de los equipos.
- ❖ Aumentar la confiabilidad de los equipos o línea de producción.
- ❖ Aprovechar los componentes de los mismos durante toda su vida útil.
- ❖ Determinar previo a un paro programado de planta cuales equipos requieran mantenimiento, consiguiendo así óptimos resultados en la gestión, ya que solo se realizaran las reparaciones necesarias.

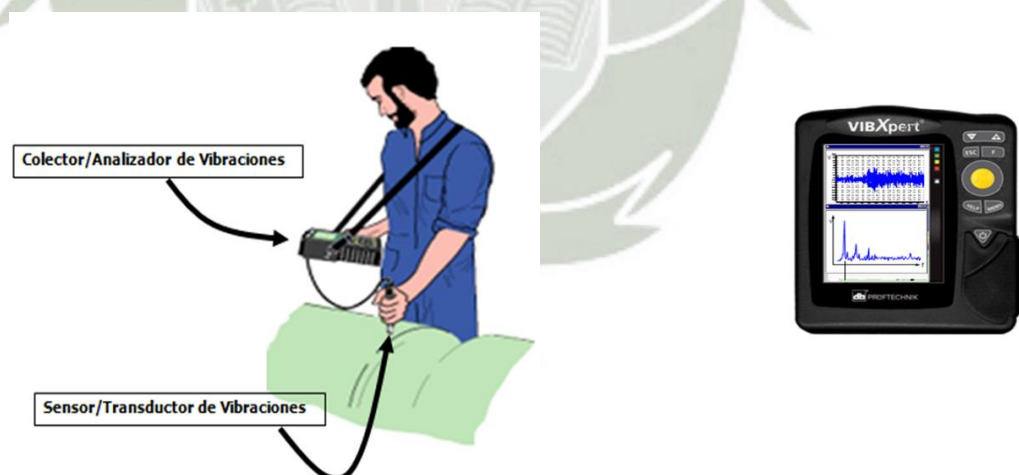


Fig. 4.5 Análisis vibracional

Fuente Libro de análisis de fallas componentes mecánicos PUCP

4.2.5 Termografía

La Termografía infrarroja es una técnica que permite ver la temperatura de una superficie con precisión sin tener que tener ningún contacto con ella. Gracias a la Física podemos convertir las mediciones de la radiación infrarroja en mediciones de temperatura, esto es posible midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas.

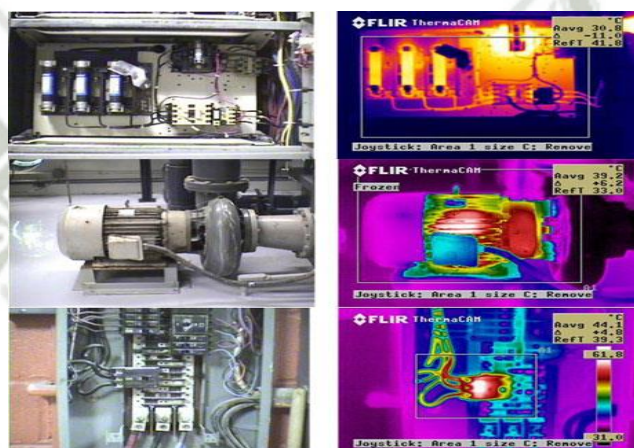


Fig. 4.6 Ensayo de termografía

Fuente www.serviciostermograficos.blogspot.com/

4.2.6 Ultrasonido

El ultrasonido es una onda mecánica cuya frecuencia de oscilación es mayor que 20000 Hz. El ultrasonido se produce aplicando una carga eléctrica a un material con características piezoeléctricas el cuál sufre una deformación física y produce una presión sonora desde su superficie.

Si conseguimos introducir un ultrasonido producido un material piezoeléctrico dentro del material a verificar, habremos conseguido un primer paso en nuestro cometido.

Para conseguirlo se utiliza un acoplamiento acústico, es decir, una materia que permita la transmisión de las oscilaciones producidas por el cristal. Este acoplamiento tiene como finalidad eliminar el aire, y, generalmente, se suele utilizar gel acoplante, aceite fluido o grasa consistente, dependiendo del grado de rugosidad de la pieza.

Cuando el ultrasonido “INSONIFICA” el material a inspeccionar viaja uniformemente hasta encontrar el fondo del material y se refleja, viajando en un camino de retorno hacia el palpador; este eco de fondo ultrasónico produce un “Pico” en la imagen “A”. Si existiera un defecto o una falla en el material que produzca una diferencia de densidad con respecto al material inspeccionado, entonces el defecto o falla funciona como un reflector. El ultrasonido se refleja en esta falla o defecto y aparece en la pantalla como “otro pico” en la Imagen “A”.



Fig. 4.7 Ensayo de Ultrasonido

Fuente www.olympus-ims.com/es/ut-flaw/

CAPITULO V

ULTRASONIDO

5.1 Introducción

A través de los siglos, el hombre ha intentado utilizar el sonido para evaluar la robustez y calidad de materiales, golpeando las piezas mediante algún instrumento como o desafilado, y escuchando las diferencias de tono, que puedan evidenciar la presencia de discontinuidades. Esta forma de ensayo se considera como la precursora de lo que conocemos hoy en día, como ultrasonido. En años recientes, los avances en la instrumentación y la tecnología electrónica, han suplido las herramientas necesarias para lograr el desarrollo de la técnica ultrasónica, tal y como la conocemos hoy en día. El ultrasonido es un confiable y rápido instrumento de aseguramiento y control de calidad.

El mantenimiento predictivo es una importante herramienta para el desarrollo de la industria nacional, ya que permite detectar y localizar los problemas en los equipos mucho antes de que éstos ocasionen interrupciones en la producción que acarrearán grandes pérdidas económicas.

Uno de los métodos que utiliza el mantenimiento predictivo para detectar fallas en las plantas de producción, es el ultrasonido, el cual es un método de fácil, rápido, económico y eficaz en ambientes de mucho ruido. El ultrasonido sirve para localizar con exactitud aquellos puntos en donde existen problemas incipientes permitiendo la programación adecuada del mantenimiento de los equipos sin entorpecer el desarrollo normal de la empresa.

Todos los problemas mecánicos, eléctricos, así como las fugas de presión o vacío generan ondas ultrasónica las cuales se detectan mediante medidores de ultrasonido con el fin de ubicar el problema y tomar las acciones correctivas pertinentes para su solución.

5.2 Definición

La detección de ultrasonido es una técnica de mantenimiento predictivo que aprovecha las propiedades de las ondas sonoras para detectar los problemas de los equipos de las plantas industriales de una forma rápida, exacta y segura.

5.2.1 Principio Físico:

El sonido está conformado por un conjunto de ondas mecánicas longitudinales producidas por la vibración de los objetos y propagadas a través de un medio elástico. Este tipo de ondas pueden estimular el oído humano y generar una sensación sonora.

Las características de una onda de sonido son:

- a. **Ciclo:** Es el movimiento completo de la onda.
- b. **Longitud:** Es la distancia necesaria para completar un ciclo. Por lo general se denota como λ .
- c. **Amplitud:** Es el valor máximo en sentido positivo y negativo que alcanza la onda sonora.
- d. **Frecuencia:** Es el número de ciclos por unidad de tiempo.

En la siguiente figura se muestra una onda sonora en función del tiempo con algunas características.

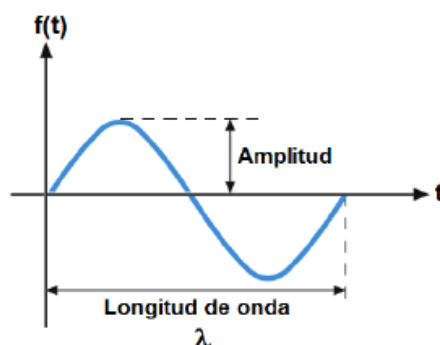


Fig. 5.1 Características de una onda sonora

Fuente Curso de ultrasonido básico – nivel 1

La prueba de Ultrasonido es una herramienta útil para conocer e interpretar el estado físico de determinado material mediante una onda acústica o sonora cuya frecuencia está por encima del espectro audible del oído del ser humano (aproximadamente 20.000 Hz) la reflexión del sonido es causada por las discontinuidades en el material las cuales se manifiestan en una pantalla en forma de señales (ecos).

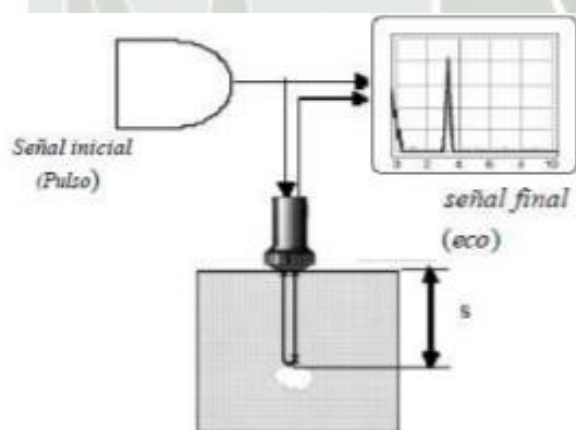


Fig. 5.2 Transformación de señales en la prueba de ultrasonido

Fuente Curso de ultrasonido básico – nivel 1

Cualquier sonido puede describirse en su totalidad especificando tres características en su percepción: El tono, la intensidad y el timbre. Estas tres corresponden exactamente a tres características físicas: la frecuencia, la amplitud y la composición armónica también denominada forma de onda.

A continuación algunos conceptos adicionales para la mejor comprensión de los fundamentos físicos:

- ❖ **Impedancia acústica específica (Resistencia):** Depende de la densidad de masa y de la velocidad de propagación. A mayor densidad, mayor absorción; a mayor absorción, mayor frecuencia. $Z = \rho v$
- ❖ **Reflexión:** Se produce en los límites dentro de los metales. Depende de la geometría del mismo.
- ❖ **Refracción:** El haz ultrasónico se desvía dependiendo de la velocidad de propagación y de la densidad del material.
- ❖ **Efecto piezoeléctrico:** Fenómeno físico por el cual aparece una diferencia de potencial eléctrico entre las caras de un cristal cuando éste se somete a una presión mecánica.
- ❖ **Transductores piezoeléctricos:** Convierten un cambio en la magnitud que se va a medir en un cambio en la carga electrostática o tensión generada a ciertos materiales cuando se encuentran sometidos.

5.2.2 Tipos de ondas ultrasónicas:

Es una onda cuyas partículas se mueven en forma paralela a su dirección de propagación.

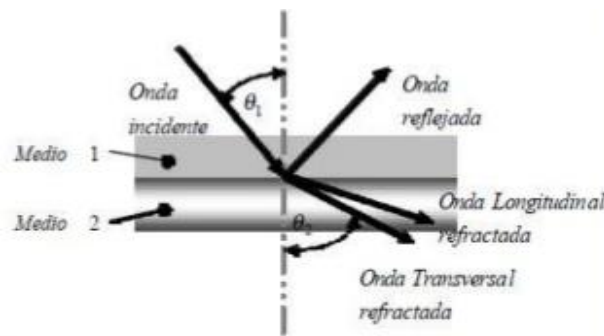


Fig. 5.3 Direccionamiento de las ondas ultrasónicas

Fuente Curso de ultrasonido básico – nivel 1

Longitudinales: Los desplazamientos de las partículas son paralelos a la prolongación del sonido.

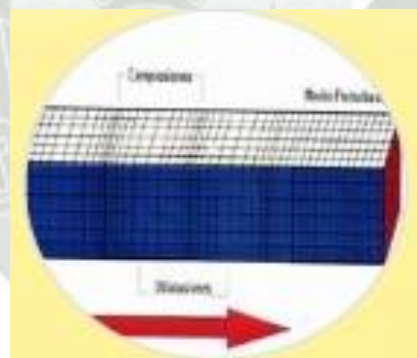


Fig. 5.4 Desplazamiento longitudinal

Fuente Curso de ultrasonido básico – nivel 1

Transversales: Los desplazamientos de las partículas son en forma perpendicular a la dirección del haz ultrasónico, se propagan en sólidos.

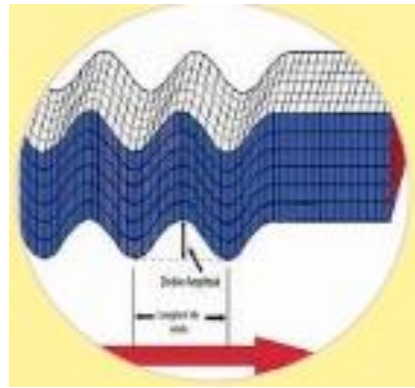


Fig. 5.5 Desplazamiento transversal

Fuente Curso de ultrasonido básico – nivel 1

Superficiales: Son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, también es conocida como ondas rayleigh y se propaga solo en sólidos.

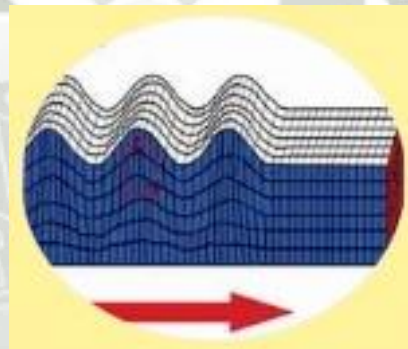


Fig. 5.6 Desplazamiento Superficial

Fuente Curso de ultrasonido básico – nivel 1

5.3 Generación del ultrasonido

Para detectar el ultrasonido, se utiliza un instrumento llamado detector de ultrasonidos el cual está diseñado para capturar ondas ultrasónicas y convertirlas en señales con frecuencias dentro del rango de audición humana. Este dispositivo cuenta con la tecnología necesaria para que una vez convertidas las ondas de ultrasonido puedan

escucharse a través de audífonos o visualizarse en un display por medio de un aumento de su intensidad.



**Detector de Ultrasonido
con Audifonos**



**Detector de Ultrasonido con
Display**

Fig. 5.7 Detectores de ultrasonido

Fuente www.endases.mex.tl/ULTRASONIDO-INDUSTRIAL.html

Los detectores de ultrasonido son equipos fáciles de utilizar, gracias a que el comportamiento del sonido es direccional, el operador puede verificar cualquier área ubicando la fuente del problema el cual se manifiesta como con un sonido mucho más fuerte que en los demás puntos. Estos detectores cuentan con un selector de frecuencias que le permite al usuario filtrar el ruido del ambiente y escuchar la onda ultrasónica con total claridad.

El diseño interno de un detector ultrasónico se muestra en la figura siguiente:

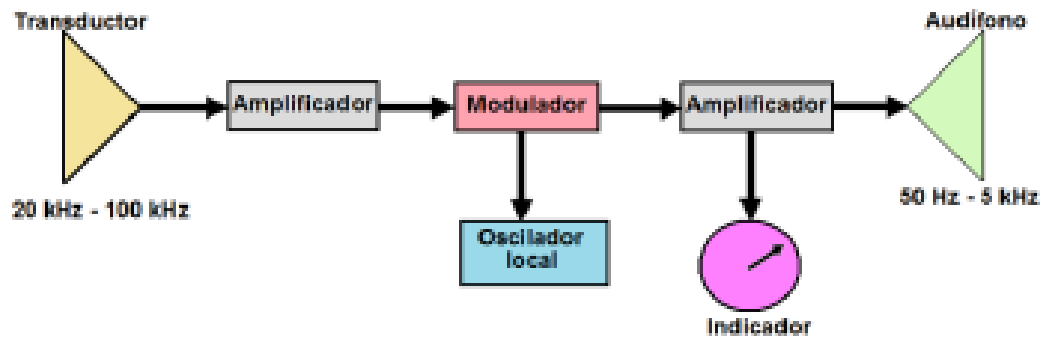


Fig. 5.8 Diseño de un detector de ultrasonido

Fuente www.olympus-ims.com/es/epoch-xt/

La selección del equipo de inspección ultrasónica de pulso eco, deberá ser de acuerdo a las necesidades de inspección y al sistema de transmisión apropiado. Sin embargo, el sistema de transmisión pulso-eco es el más utilizado en la actualidad.

5.4. Partes del equipo de ultrasonido.

Son las siguientes:

Transductor: Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida. El nombre del transductor ya nos indica cual es la transformación que realiza, aunque no necesariamente la dirección de la misma. Es el sitio donde se encuentran los cristales que se mueven para emitir las ondas ultrasónicas. Estos transductores también reciben los ecos, para transformarlos en energía eléctrica.

Los transductores pueden ser clasificados en los siguientes grupos:

- a) Forma de propagar el haz ultrasónico: Haz recto y haz angular.

- b) Técnica de inspección: De contacto y de inmersión.
- c) Número de cristales: Un cristal, dos cristales o dual y de cristales múltiples.
- d) Grado de amortiguamiento: De banda ancha, banda angosta y de amortiguamiento interno.
- e) Aplicaciones especiales: Transductores libres, súper amortiguados, puntuales, periscópicos y con línea de retardo.

Cable coaxial: Un accesorio del sistema de ultrasonido es el cable coaxial, el cual en sus extremos posee conectores los cuales unen al instrumento y al transductor. Los tipos de conectores más comunes son:

- a) Microdot: Para transductores muy pequeños (con rosca).
- b) BNC: De medio giro.
- c) UHF: Para muy alta frecuencia (con rosca), usado en inmersión.
- d) Lemo: De media presión.
- e) Tuchel: En la actualidad fuera de uso.

Acoplantes: Los acoplantes normalmente usados para la inspección por contacto son agua, aceites, glicerina, grasas de petróleo, grasa de silicón, pasta de tapiz y otras sustancias comerciales tipo pasta. La técnica ultrasónica necesita de un acoplante adecuado para transmitir el ultrasonido entre el transductor y la pieza de prueba. El acoplante puede ser líquido, semilíquido o pastoso.

Bloque De Calibración: Los bloques patrones son usados para estandarizar la calibración del equipo y evaluar en forma comparativa las indicaciones obtenidas de la pieza de ensayo. Los patrones de referencia están hechos de materiales debidamente seleccionados para garantizar su sanidad interna y que satisfagan los requisitos de atenuación, tamaño de grano y tratamiento térmico.

5.5 Técnicas de ensayo por Ultrasonido

Técnica Pulso – Eco: Se utiliza un solo transductor que envía y recibe el pulso (transmisor – receptor) por lo que requiere acceso a una sola superficie.

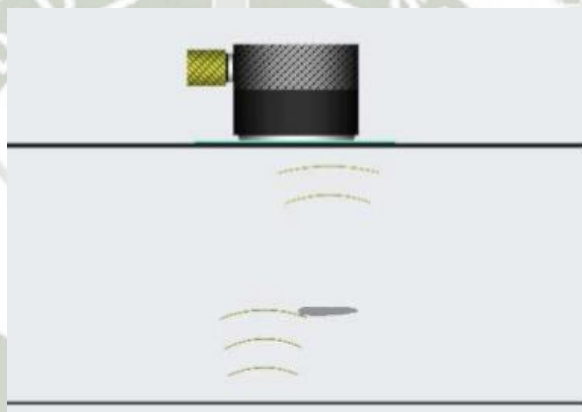


Fig. 5.9 Técnica Pulso – Eco

Fuente www.docstoc.com/docs/112479233/Deteccion-de-fallas-con-ultrasonido

Técnica de transmisión a través: También se utiliza un transmisor y un receptor, solo que en este caso se encuentran localizados en superficies opuestas.

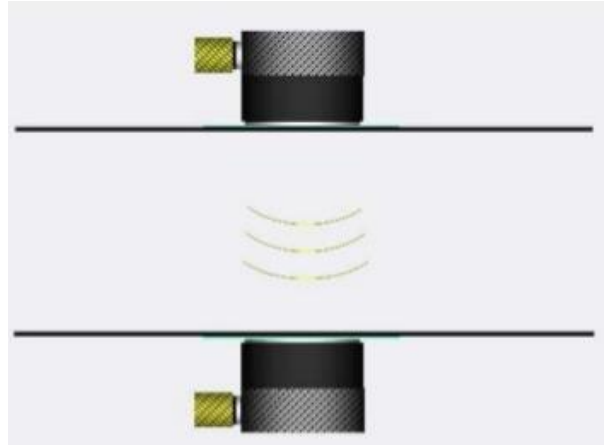


Fig. 5.10 Técnica A través

Fuente www.docstoc.com/docs/112479233/Deteccion-de-fallas-con-ultrasonido

Técnica con haz angular: El método de inspección por haz angular es utilizado para transmitir un haz angular predeterminado de prueba, de acuerdo al ángulo de incidencia es el tipo de ondas producidas dentro del material (transversal, longitudinal y superficial).



Fig. 5.11 Técnica con haz angular

Fuente www.docstoc.com/docs/112479233/Deteccion-de-fallas-con-ultrasonido

Técnica con transductores duales: Esta técnica proporciona un método para incrementar la resolución, el elemento doble permite que la función del cristal receptor se encuentre electrónica y acústicamente aislado de los efectos del pulso de excitación. Estos transductores miden el espesor y descubren defectos y corrosión en materiales delgados.



Fig. 5.12 Técnica Transductores duales

Fuente www.docstoc.com/docs/112479233/Deteccion-de-fallas-con-ultrasonido

CAPÍTULO VI

PARAMETRIZACIÓN DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO

La calibración es el proceso de ajustar el instrumento ultrasónico para que mida exactamente en un material particular, usando un transductor particular a una temperatura particular. Específicamente, durante la calibración deben ser ajustados los parámetros de desplazamiento y velocidad del material. El desplazamiento de cero (a veces llamados retardos del transductor) compensa el tiempo muerto entre la generación del disparo principal y la entrada del sonido en la pieza inspeccionada.

6.1 Calibración del equipo

Para llevar a cabo la calibración de haz recto use un palpador S10W4C que y un diámetro de 10 MM. La calibración requiere al usuario contar con un bloque de prueba de espesores conocidos, fabricado con el mismo material el que será conocido y medido.

6.2 Calibración longitudinal

La calibración longitudinal del equipo se utilizó un bloque de patrón tipo IIW SAE 1080, el cual sirve de parámetro para las mediciones las que dependerán del espesor de elemento a inspeccionar, además del transductor de contacto con un palpador S10W4C con un diámetro 10 mm y como acoplante se utilizó gel.



Fig. 6.1 Patrón de calibración

Fuente Southern Peru Copper Corporation



Fig. 6.3 Inspección calibración 1
Fuente Southern Peru Copper Corporation

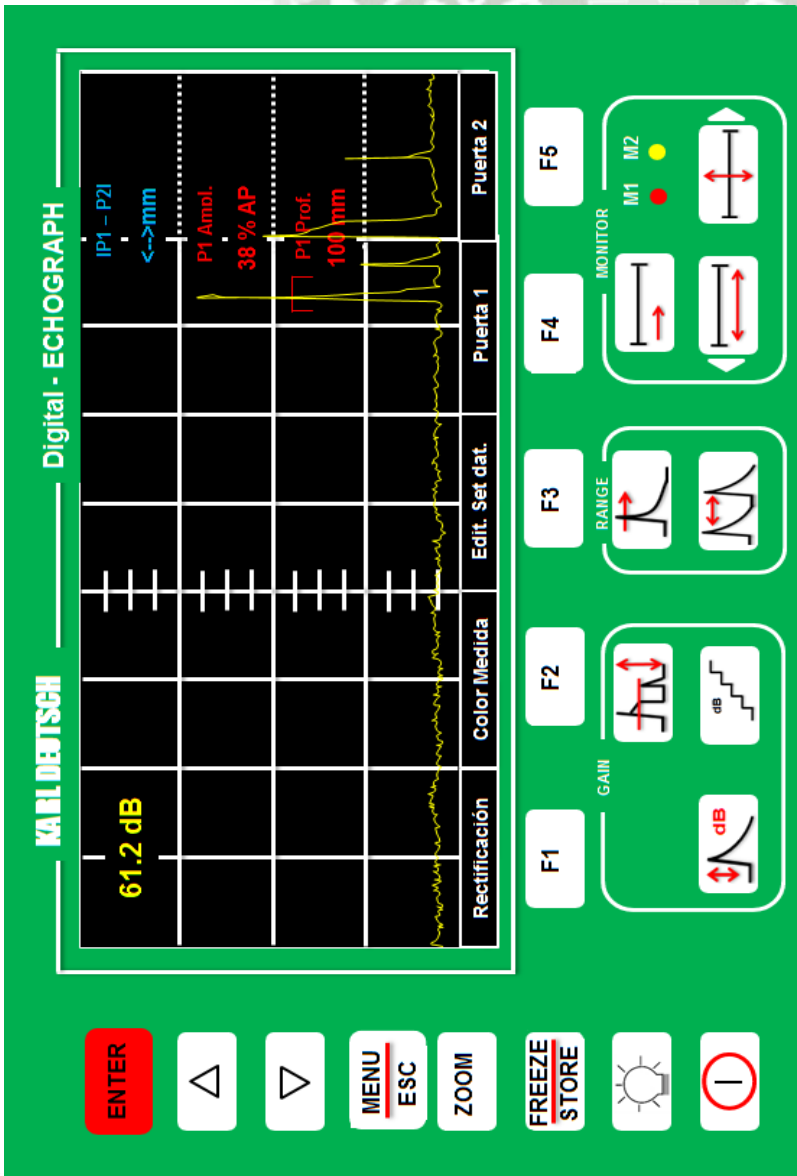


Fig. 6.2 Pantalla de calibración 1
Fuente Southern Peru Copper Corporation

En la figura 6.2 se puede observar que los picos coinciden con la altura de la probeta debido a que se calibro a 100 mm.



Fig. 6.5 Inspección calibración 2

Fuente Southern Peru Copper Corporation

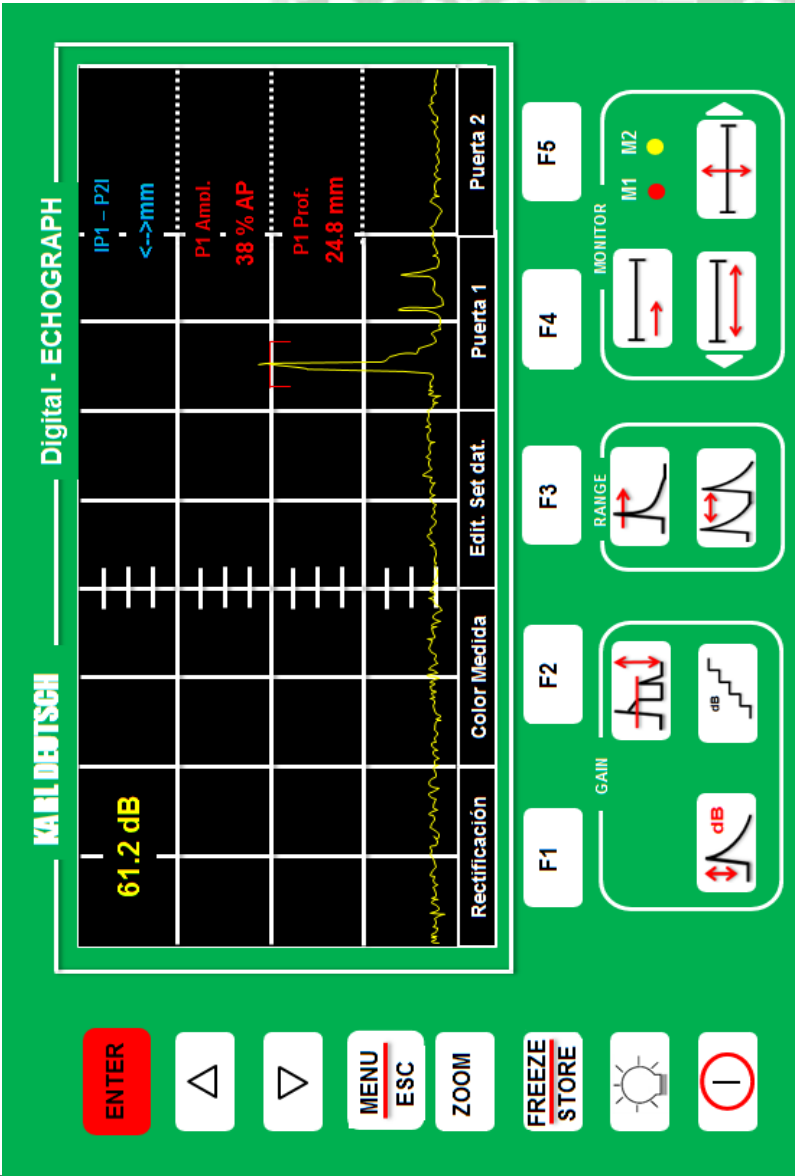


Fig. 6.4 Pantalla de calibración 2

Fuente Southern Peru Copper Corporation

En la figura 6.4 se puede observar que los picos coinciden con el espesor de la probeta debido a que se calibro a 25 mm. Teniendo el equipo calibrado se puede proceder a realizar la inspección de ultrasonido del eje de la perforadora.

6.3 Inspección general del eje de perforadora 120A

Para inspeccionar eje por el ensayo de ultrasonido es necesario hacerlo por los dos lados tanto derecho e izquierdo para obtener una información acerca de su estado, ya que deseamos saber el estado actual del eje principal de la perforadora.

Inspección del eje principal de la perforadora 120A

La inspección se lleva a cabo en la mina de Toquepala

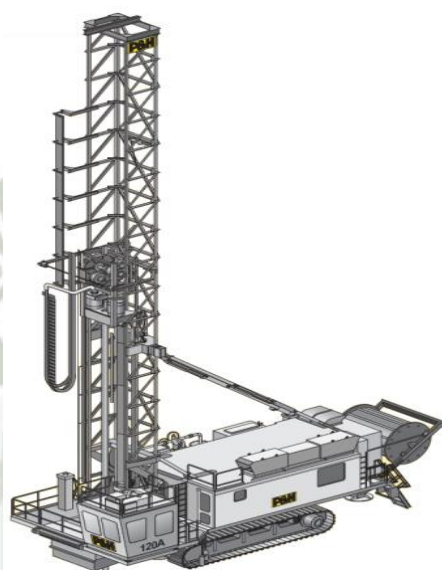


Fig. 6.6 Perforadora P&H 120 A

Fuente Manual de Operación Perforadora 120 A

El plano general se puede apreciar con sus dimensiones en la siguiente figura:

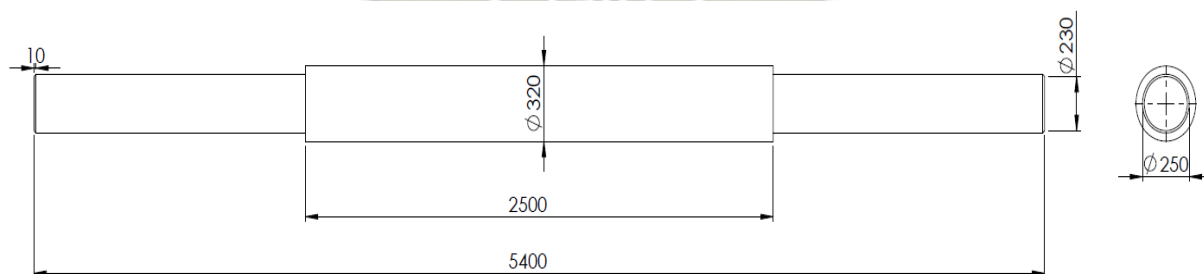


Fig.6.7 Plano de eje principal

Fuente Propia

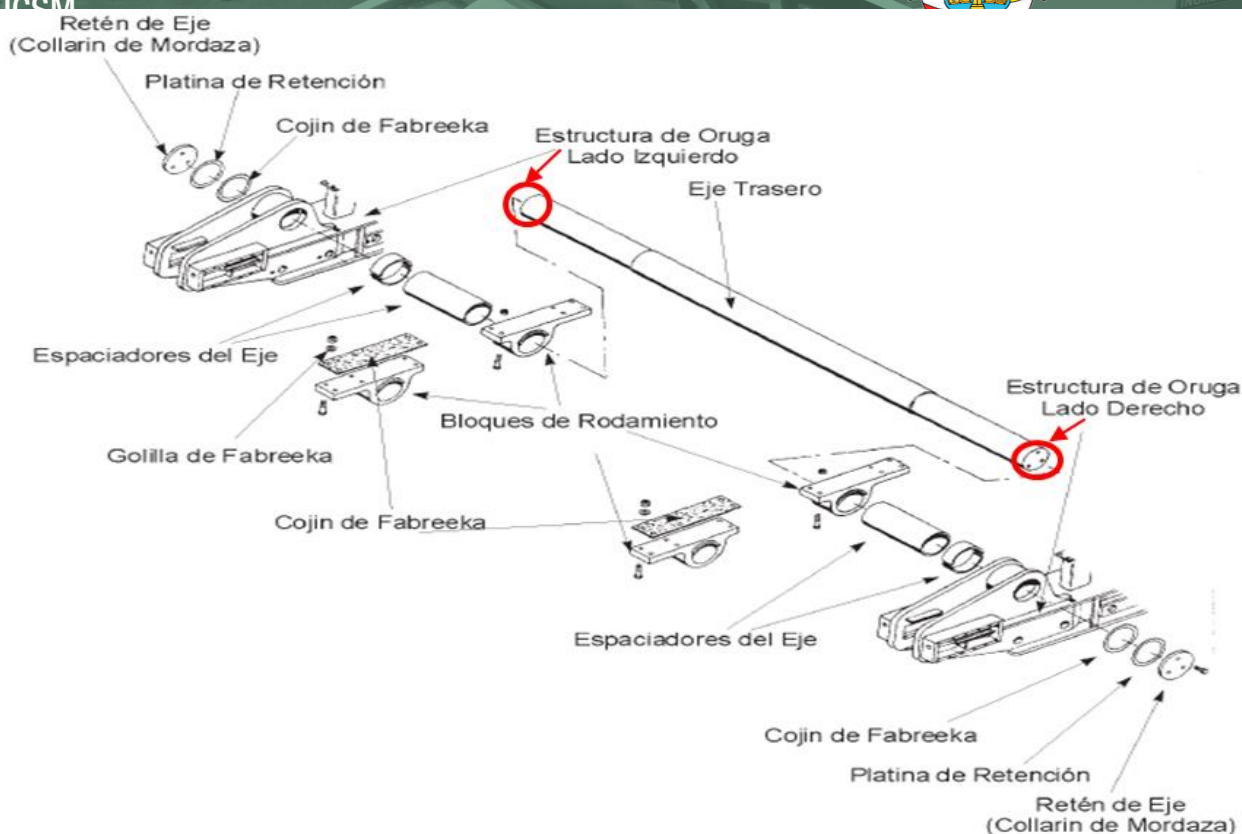


Fig.6.8 Despiece del eje principal

Fuente Manual de Partes Perforadora 120 A

Para comenzar a realizar la inspección se debe realizar una inspección visual luego se procede a limpiar la superficie de contacto para tener un buen acoplamiento entre la pieza y el transductor.



Fig. 6.9 Eje principal lado izquierdo

Fuente Southern Peru Copper Corporation



Fig. 6.10 Eje principal lado derecho

Fuente Southern Peru Copper Corporation

- Inspeccion de ultrasonido eje P&H

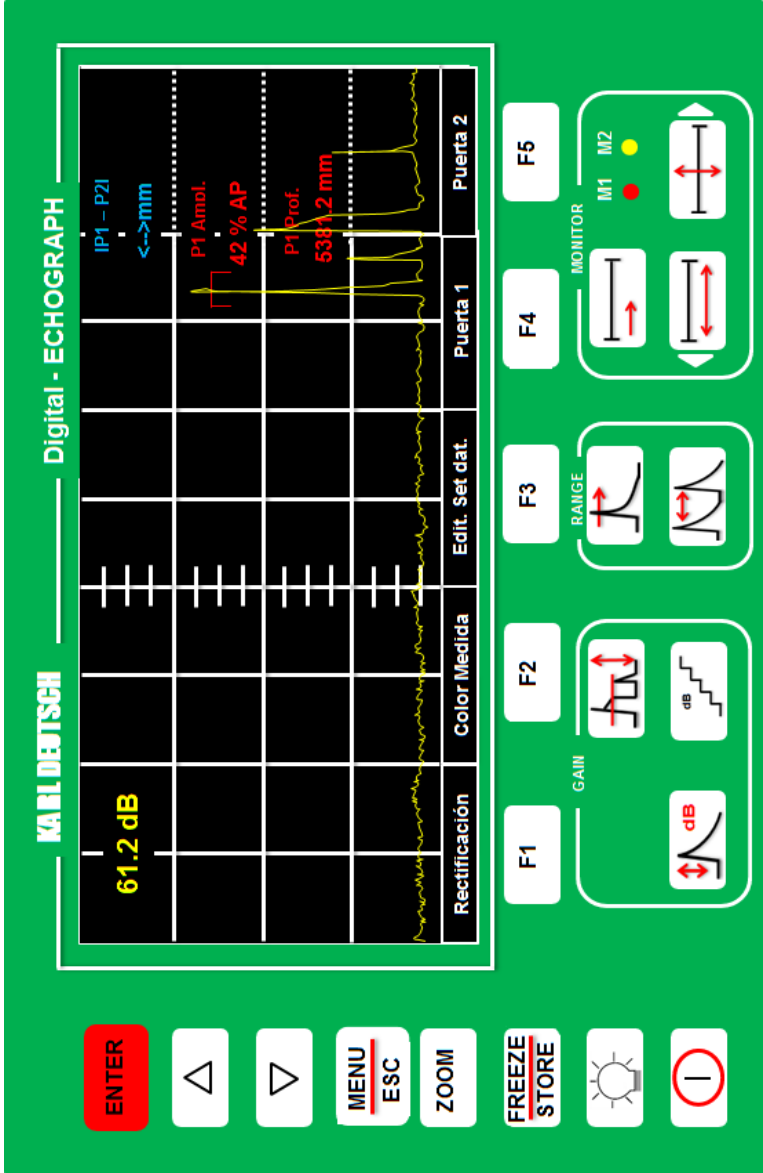


Fig. 6.11 Pantalla de Inspección 1 lado derecho

Fuente SPCC

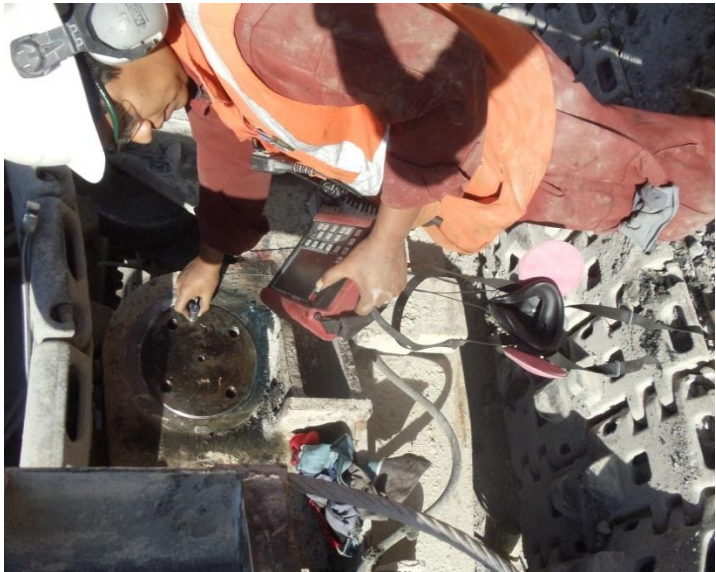


Fig. 6.12 Inspección 1

Fuente SPCC

En la figura 6.11 se puede observar que los picos son de la detección de los tornillos de ajuste de las tapas del eje principal del extremo opuesto

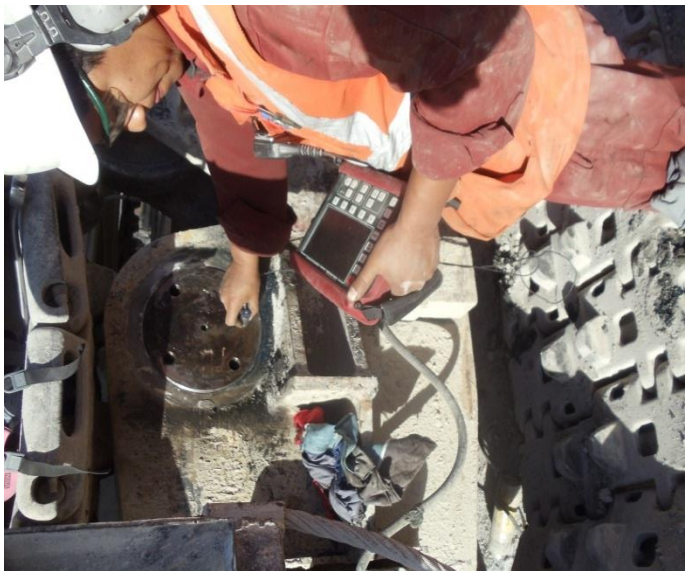


Fig. 6.14 Inspección 3 Fuente SPCC

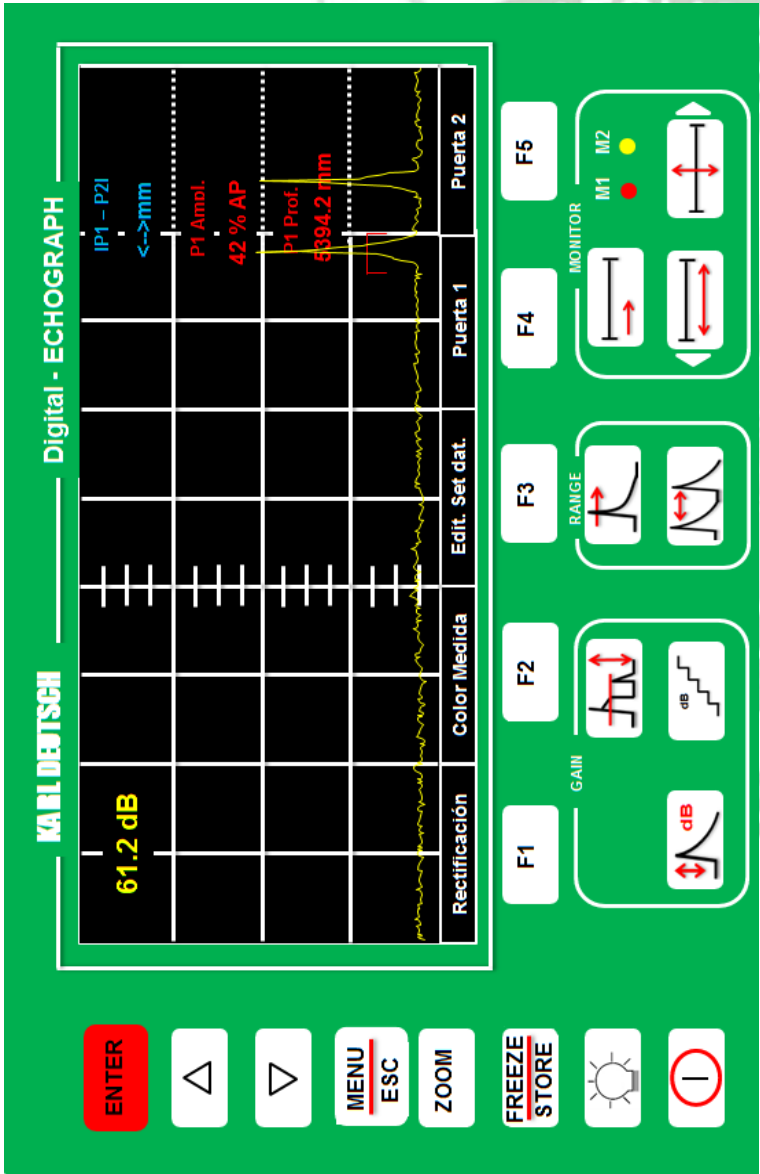


Fig. 6.13 Pantalla de Inspección 2 lado derecho Fuente SPCC

En la figura 6.13 se puede observar que los picos encontrados a 5394.2 mm es correspondiente al pico de fondo del eje principal de la perforadora.



Fig. 6.16 Inspección 4 Fuente SPCC

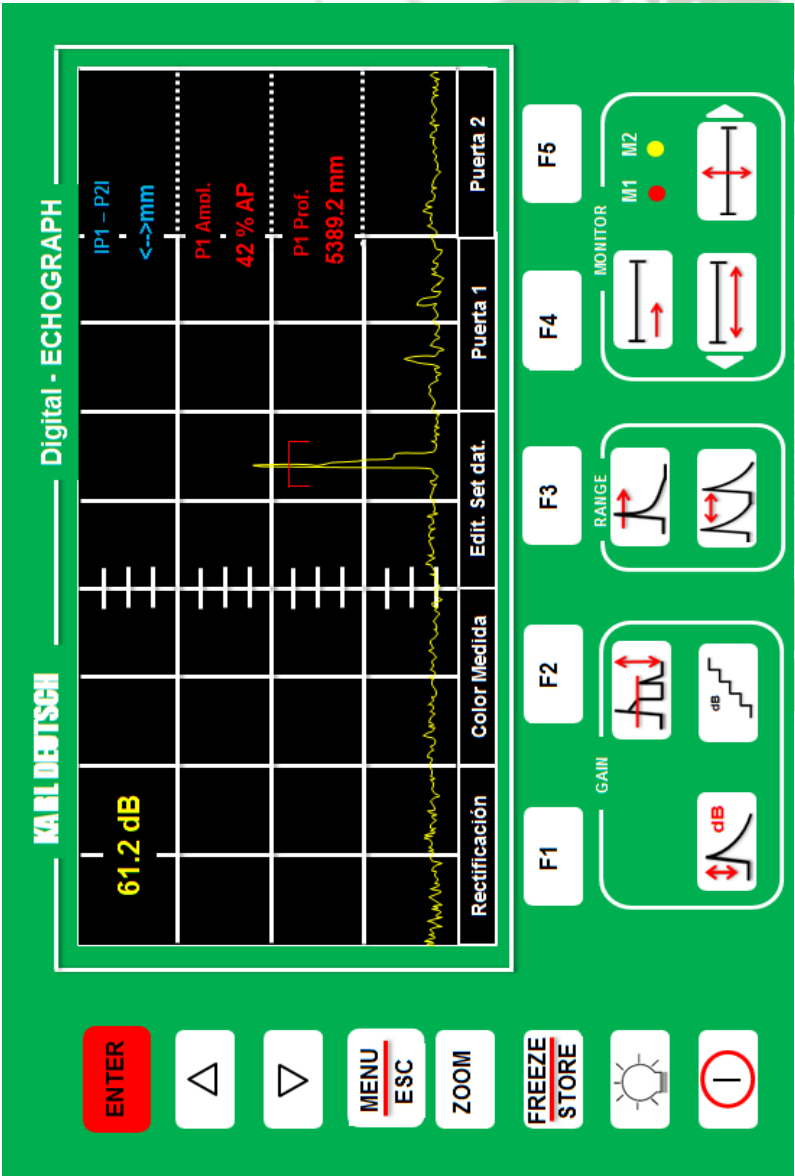


Fig. 6.15 Pantalla de Inspección 1 lado izquierdo Fuente SPCC

En la figura 6.15 se puede observar que son los picos de la detección de los tornillos de ajuste de la tapa del eje principal del extremo opuesto.

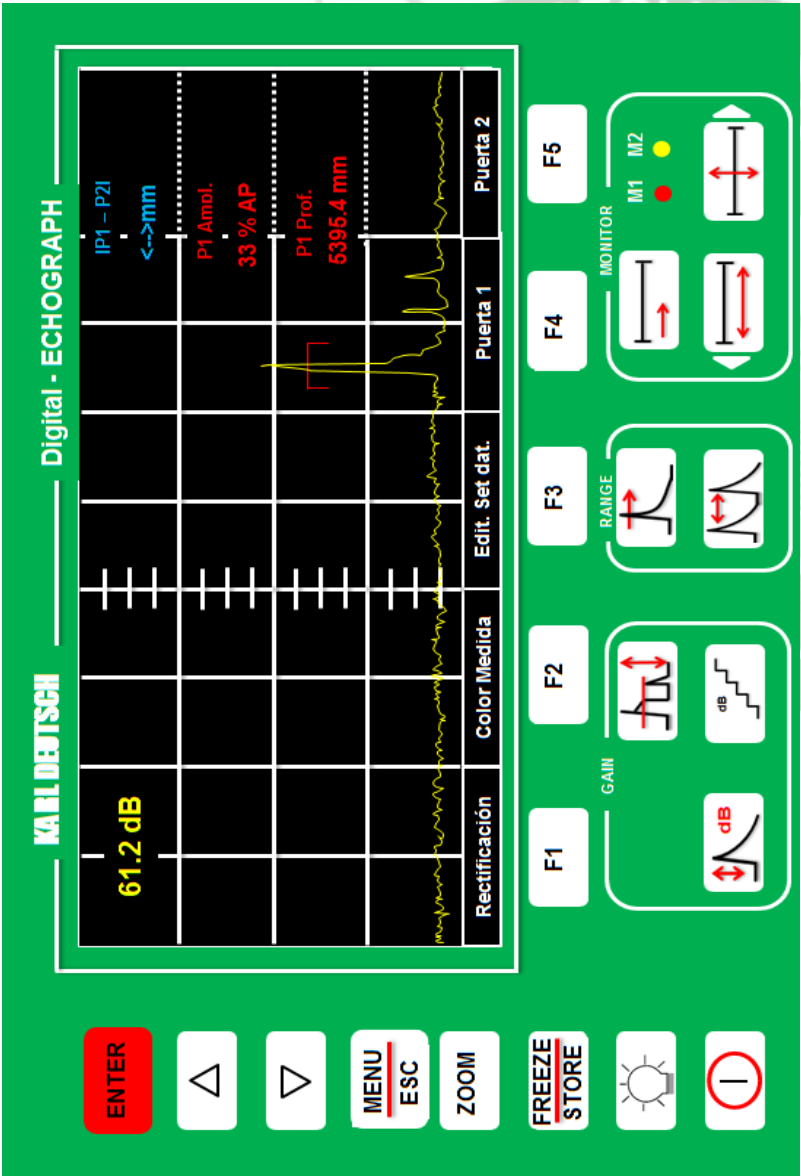


Fig. 6.17 Pantalla de Inspección 2 lado izquierdo

Fuente SPCC



Fig. 6.18 Inspección 5

Fuente SPCC

En la figura 6.17 se puede observar que los pico encontrado a 5395.4 mm es correspondiente al pico de fondo del eje principal de la perforadora.

- Inspeccion de ultrasonido eje HOFFMAN

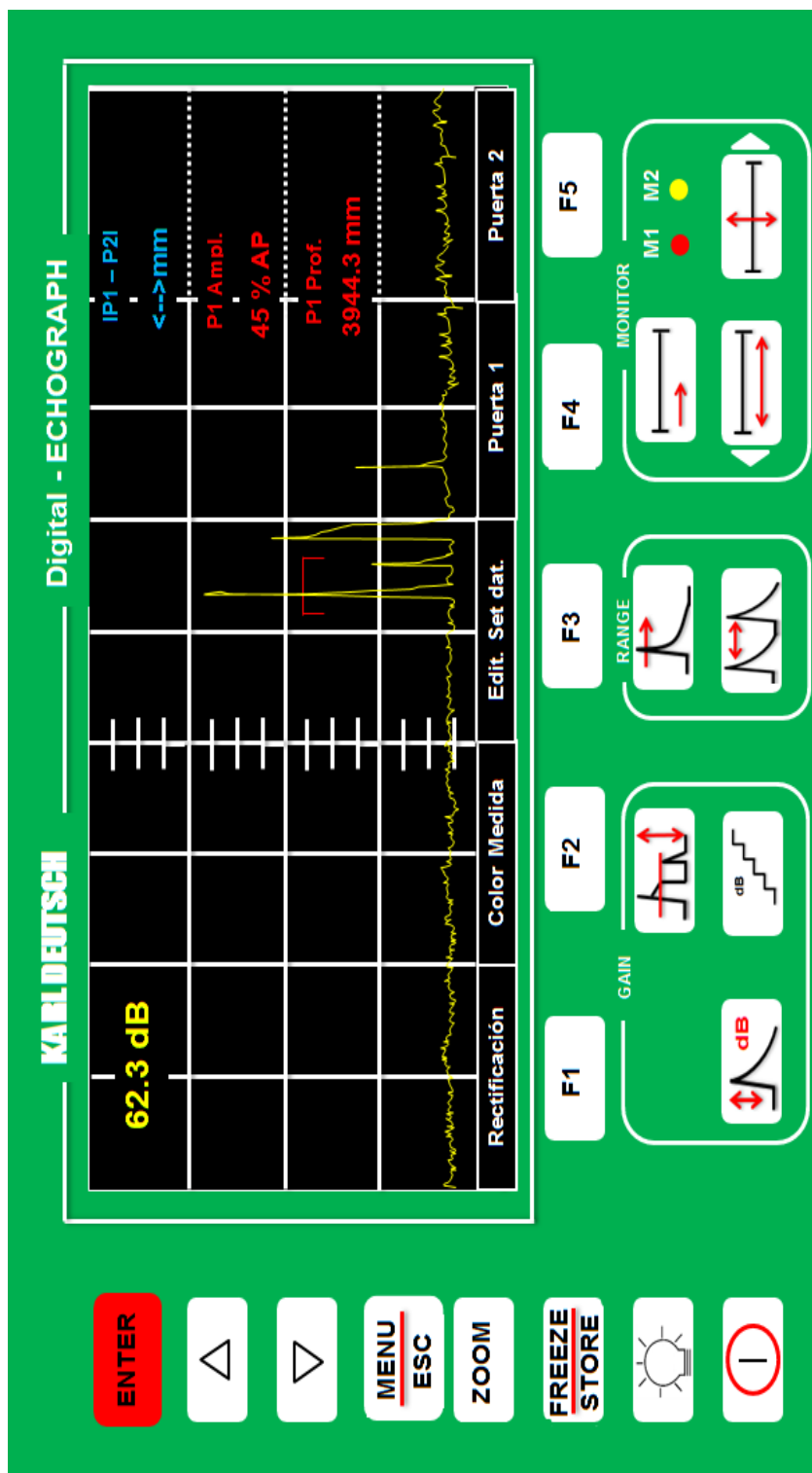
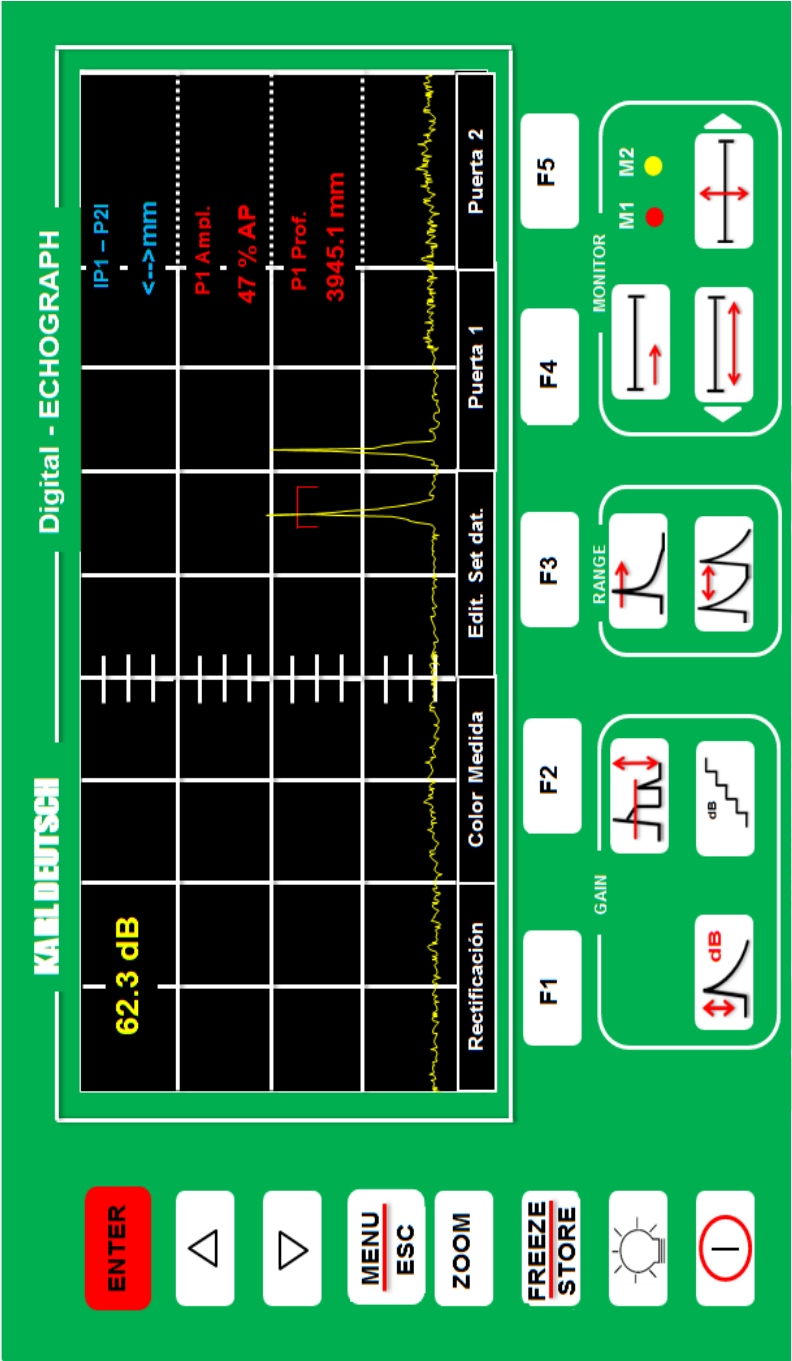


Fig. 6.19 Pantalla de Inspección 1 Fuente SPCC

En la figura 6.19 se puede observar la fractura del eje ocurrió a 3944.3 mm debido a que la longitud total del eje es 5400 mm.



Fuente SPCC

Fig. 6.20 Pantalla de Inspección 2

En la figura 6.20 se puede observar la fractura del eje ocurrido a 3945.1 mm debido a que la longitud total del eje es 5400 mm debido a fatiga y a que era un punto de concentrador de esfuerzo.

CAPITULO VII

MODELAMIENTO DEL EJE

7.1 Modelamiento por Elementos Finitos

Descripción

Se realizó una simulación de elementos finitos por medio del software solidworks, el cual es un programa de diseño asistido por computadora para el modelado mecánico de piezas y componentes. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción, funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto.

A continuación se describe toda la información ingresada en el software para la realización del análisis por elementos finitos.

Propiedades del estudio:

Tipo de análisis	Estático
Tipo de malla:	Malla sólida
Tipo de solver	Solver tipo FFEPlus
Temperatura a tensión cero	298
Unidades	Kelvin

Tabla N°1 Propiedades de la simulación realizada

Unidades empleadas:

Sistema de unidades:	SI
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	rad/s
Tensión/Presión	N/m ²

Tabla N°2 Unidades utilizadas

Propiedades de material:

N°	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Sólido 1(Saliente-Extruir1)	AISI 4340 Acero normalizado	119.712 kg	0.01525 m ³

Tabla N°3 Propiedades del material a analizar

Especificaciones del acero:

Nombre de material:	AISI 4340 Acero normalizado
Descripción:	Especial para ejes
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal
Criterio de error predeterminado:	Tensión máxima de Von Mises
Datos de aplicación:	N/A

Tabla N°4 Especificaciones del acero en el software

El software también nos ayuda a determinar todos los coeficientes y módulos de elasticidad del material, los que serán necesarios para la simulación con elementos finitos:

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	2.05e+011	N/m ²	Constante
Coeficiente de Poisson	0.32	NA	Constante
Módulo cortante	8e+010	N/m ²	Constante
Densidad	7850	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	1.11e+009	N/m ²	Constante
Límite elástico	7.1e+008	N/m ²	Constante
Coeficiente de dilatación térmica	1.23e-005	Kelvin	Constante
Conductividad térmica	44.5	W/(m.K)	Constante
Calor específico	475	J/(kg.K)	Constante

Tabla N°5 Coeficientes y módulos utilizados

Las diferentes fuerzas obtenidas luego de la simulación son las siguientes:

Fuerzas de reacción

Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
N	-82.8494	1.46996e+006	-60.4845	1.46996e+006

Tabla N°6 Fuerzas de reacción

Fuerzas de cuerpo libre

Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
N	-0.0962726	0.260361	-0.0222656	0.278482

Tabla N°7 Fuerzas de cuerpo libre

Momentos de cuerpo libre

Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
N-m	0	0	0	1e-033

Tabla N°8 Momentos de cuerpo libre

Resultados del estudio

Luego de la simulación, se encontró que el sector más propenso a la falla es el que corresponde al área del medio de la pieza, la cual como se ve en la tabla siguiente, enfrenta un desplazamiento de 15 mm en el nodo 653 (medio), una tensión máxima de 3093 N/mm² y una deformación unitaria estática de 0.0137 ESTRN.

Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones encontradas	VON: Tensión de von Mises	1.01671e-008 N/mm ² (MPa) Nodo: 15696	(-270 cm, -12.5 cm, 0.5 cm)	3093.83 N/mm ² (MPa) Nodo: 12926	(-122.858 cm, 12.4416 cm, 0.498711 cm)
Desplazamientos	URES:	0 mm	(-270 cm,	15.0515	(0.000102617

encontrados	Desplazami ento resultante	Nodo: 1	-12.5 cm, 0 cm)	mm Nodo: 653	cm, 0.272653 cm, 1.00847 cm)
Deformaciones unitarias encontradas	ESTRN: Deformació n unitaria equivalente	8.16223e- 010 Elemento: 2432	(263.383 cm, -4.46429 cm, 0.25 cm)	0.0137261 Elemento: 4230	(123.536 cm, -12.9528 cm, 0.629373 cm)

Tabla N°9 Resultados obtenidos

El diagrama de tensiones encontradas se muestra en el siguiente esquema:

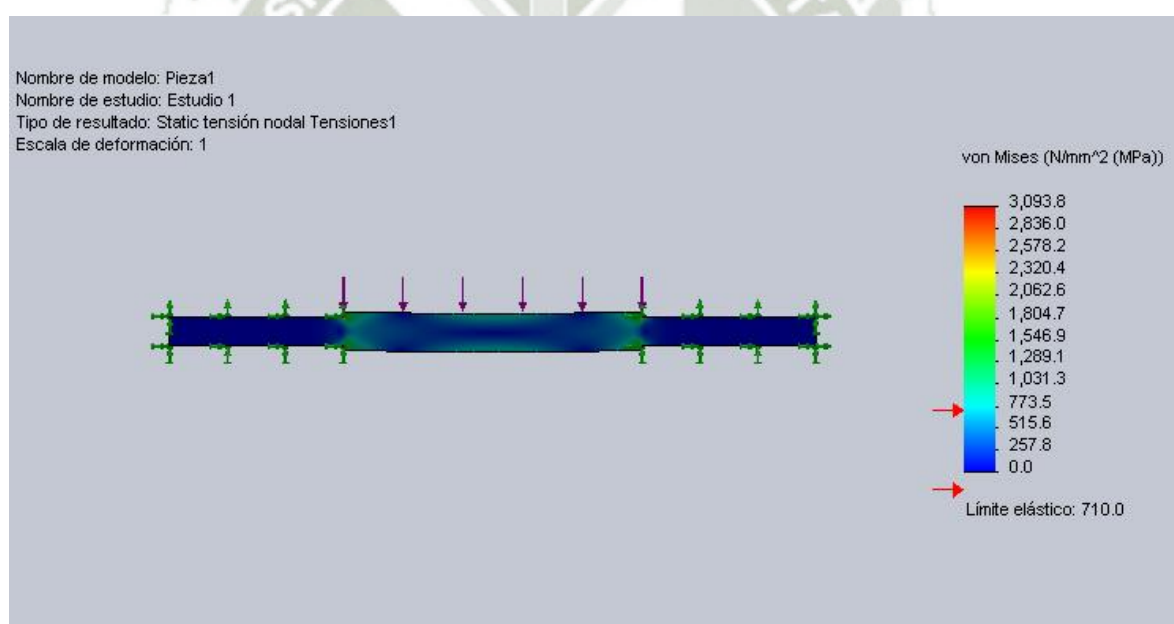


Fig. 7.1 Tensiones sobre el eje

Fuente Solidworks 2013

El diagrama de desplazamientos encontrados se muestra en el siguiente esquema:

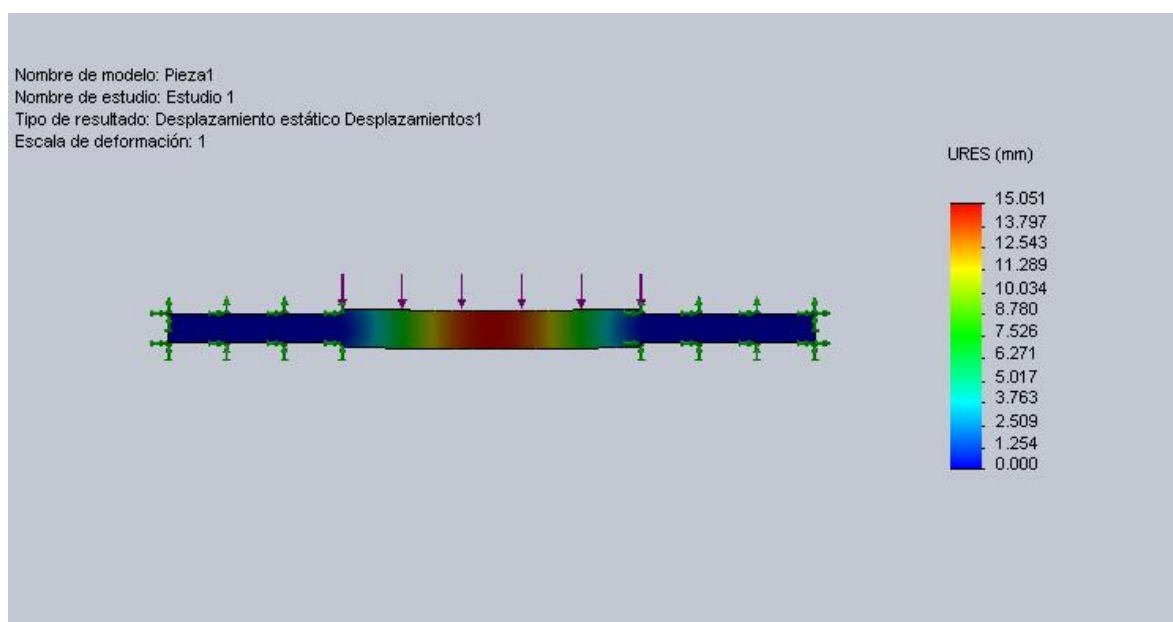


Fig. 7.2 Desplazamientos en el eje

Fuente Solidworks 2013

El diagrama de deformaciones encontradas se muestra en el siguiente esquema:



Fig. 7.3 Deformaciones unitarias

Fuente Solidworks 2013

7.2 Análisis de probabilidad de falla con weibull 7 de reliasoft

7.2.1 Análisis de datos de vida en eje P&H:

Para el análisis Weibull, del capítulo 2, recordamos lo siguiente:

β : Parámetro de forma o inclinación.

η : Parámetro de Escala o vida característica, es el periodo de operación en el que existe una probabilidad de falla del 63.2%

γ : Parámetro de Ubicación o localización $-\infty < t < \infty$

Para la correcta clasificación de los datos, estos se clasifican en dos grandes tipos:

a) Datos Completos: Se conoce el tiempo hasta la falla (F).

b) Datos Censurados: No se conoce el tiempo hasta la falla, estos a su vez se clasifican en:

- Suspensos (S): Items que excedieron el tiempo pronosticado de falla.
- Censurados en intervalo: Items que fallaron entre dos inspecciones realizadas, pero no se conoce el tiempo exacto.
- Censurados a la izquierda: Items que fueron encontrados en estado de falla después de cierto período o que fallaron antes de su primera inspección.

Para el análisis se utilizaron los siguientes datos históricos de ejes marca P&H cambiados en los últimos 15 años en diferentes perforadoras de la mina:

ÍTEM	ESTADO F O S	TIEMPO HASTA F O S	ID EJE
1	F	29000 Hrs	EJE P&H
2	F	34000 Hrs	EJE P&H
3	F	40000 Hrs	EJE P&H
4	F	41500 Hrs	EJE P&H
5	S	43000 Hrs	EJE P&H
6	S	43000 Hrs	EJE P&H

Tabla N°10 Historial de datos de vida para ejes P&H planeamiento Mina Toquepala

Ingresamos al software Weibull 7 de Reliasoft y primeramente escogemos los tipos de datos que vamos a analizar (ya que se trata de un análisis de datos de vida).

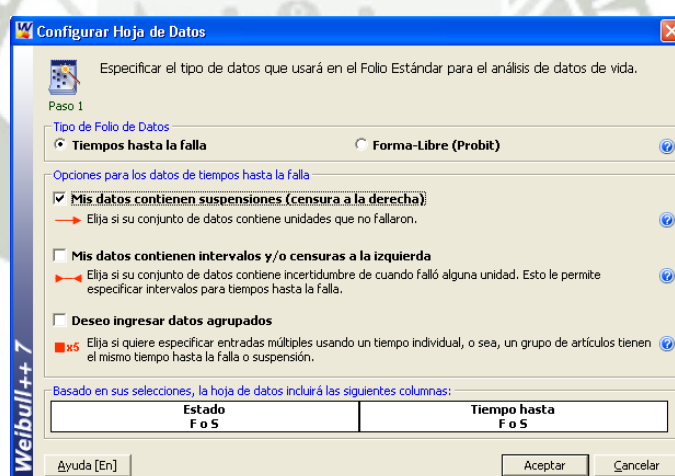
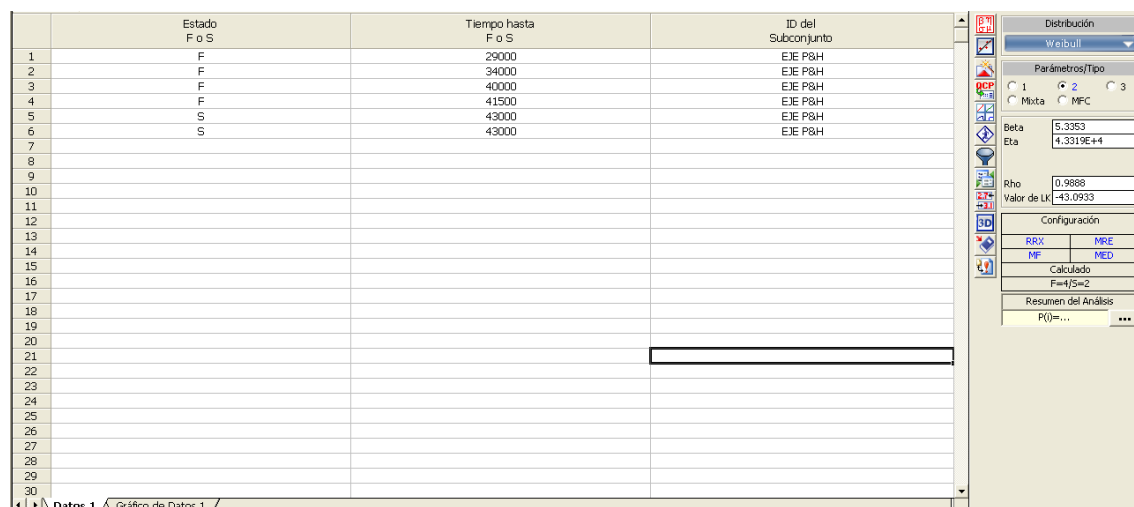


Fig. 7.4 Selección de tipos de datos de vida para el análisis

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Se realiza el ingreso en forma manual de los datos:



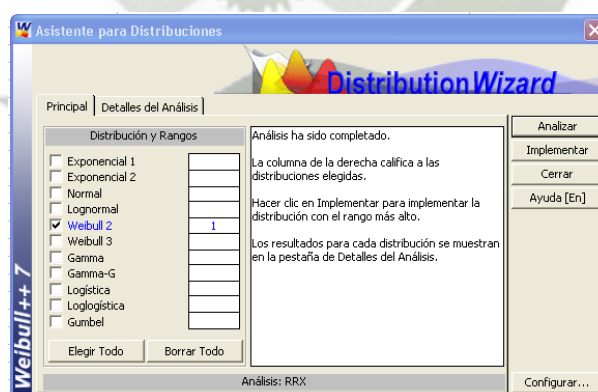
	Estado F o S	Tiempo hasta F o S	ID del Subconjunto
1			
2	F	29000	EJE P&H
3	F	34000	EJE P&H
4	F	40000	EJE P&H
5	F	41500	EJE P&H
6	S	43000	EJE P&H
7	S	43000	EJE P&H
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

Distribución: Weibull
 Parámetros/Tipo: 1 2 3
 Mixta: ☐ MFC: ☐
 Beta: 5.3353
 Eta: 4.3319E+4
 Rho: 0.9888
 Valor de LK: -43.0933
 Configuración: RRX NRE MF MED
 Calculado: F=4/S=2
 Resumen del Análisis: P()=...

Fig. 7.5 Ingreso de datos y especificación del tipo (F o S)

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Procedemos ahora a seleccionar el tipo de análisis estadístico a realizar, el software nos otorga una gama de modelos para aplicar, el modelo probabilístico que escogeremos es el Weibull de 2 parámetros, en vista que no tomaremos en cuenta el parámetro γ porque suponemos que no hubo mortalidad infantil en la instalación de los ejes.



Asistente para Distribuciones

Distribution Wizard

Principal | Detalles del Análisis

Distribución y Rangos

- ☐ Exponencial 1
- ☐ Exponencial 2
- ☐ Normal
- ☐ Lognormal
- ☒ Weibull 2
- ☐ Weibull 3
- ☐ Gamma
- ☐ Gamma-G
- ☐ Logística
- ☐ Loglogística
- ☐ Gumbel

Elegir Todo Borrar Todo

Análisis: RRX

Configurar...

Análisis ha sido completado.

La columna de la derecha califica a las distribuciones elegidas.

Hacer clic en Implementar para implementar la distribución con el rango más alto.

Los resultados para cada distribución se muestran en la pestaña de Detalles del Análisis.

Analizar Implementar Cerrar Ayuda [En]

Fig. 7.6 Selección de modelo a utilizar

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

El siguiente cronograma F/S nos muestra los tipos de datos con los que contamos para hacer el análisis:

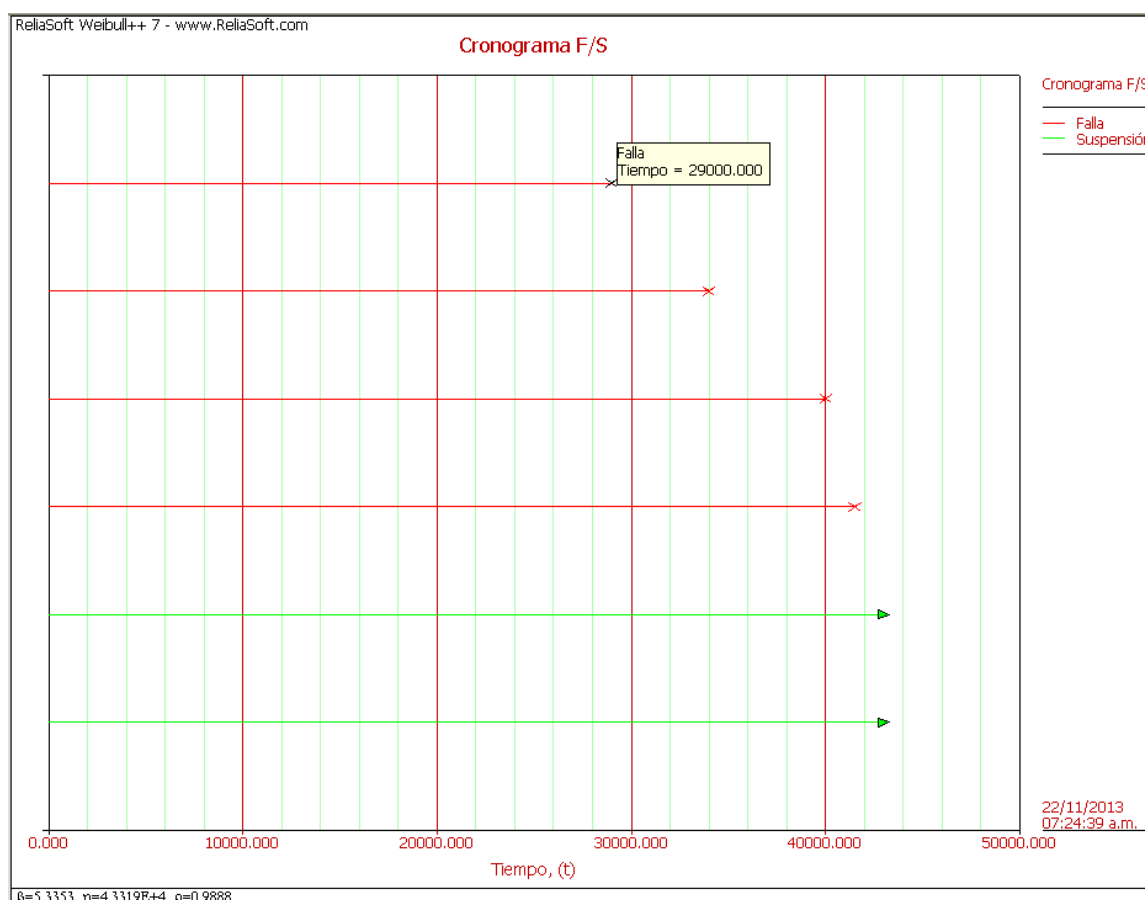


Fig. 7.7 Tipos de datos de vida para ejes P&H

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Gráfico de probabilidad de falla en Weibull de 2 parámetros:

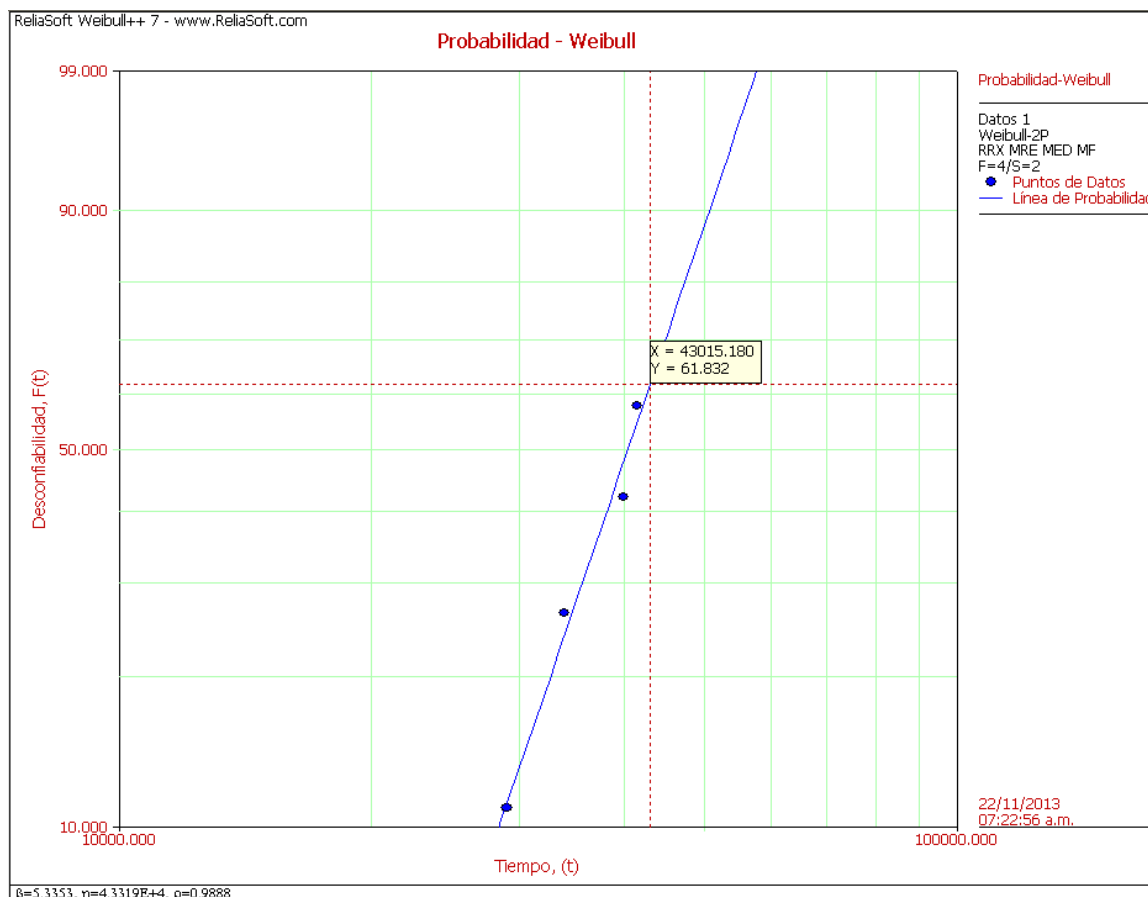


Fig. 7.8 Gráfico de probabilidad de Falla en Weibull

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Sabiendo que el tiempo de vida deseado e indicado por el fabricante del equipo es de 43000 Hrs, obtenemos los siguientes resultados:

La probabilidad de falla o “desconfiabilidad” para un tiempo de 43000 Hrs es de:

$$Q(t) = 61.83\%$$

Por tanto, la confiabilidad para un tiempo de 43000 Hrs, para el eje P&H es de:

$$R(t) = 100 - Q(t)$$

$$R(t) = 100 - 61.83$$

$$R(t) = 38.17\%$$

El gráfico de confiabilidad en el tiempo nos muestra que a las 43000 Hrs la confiabilidad de la pieza será de un 38%:

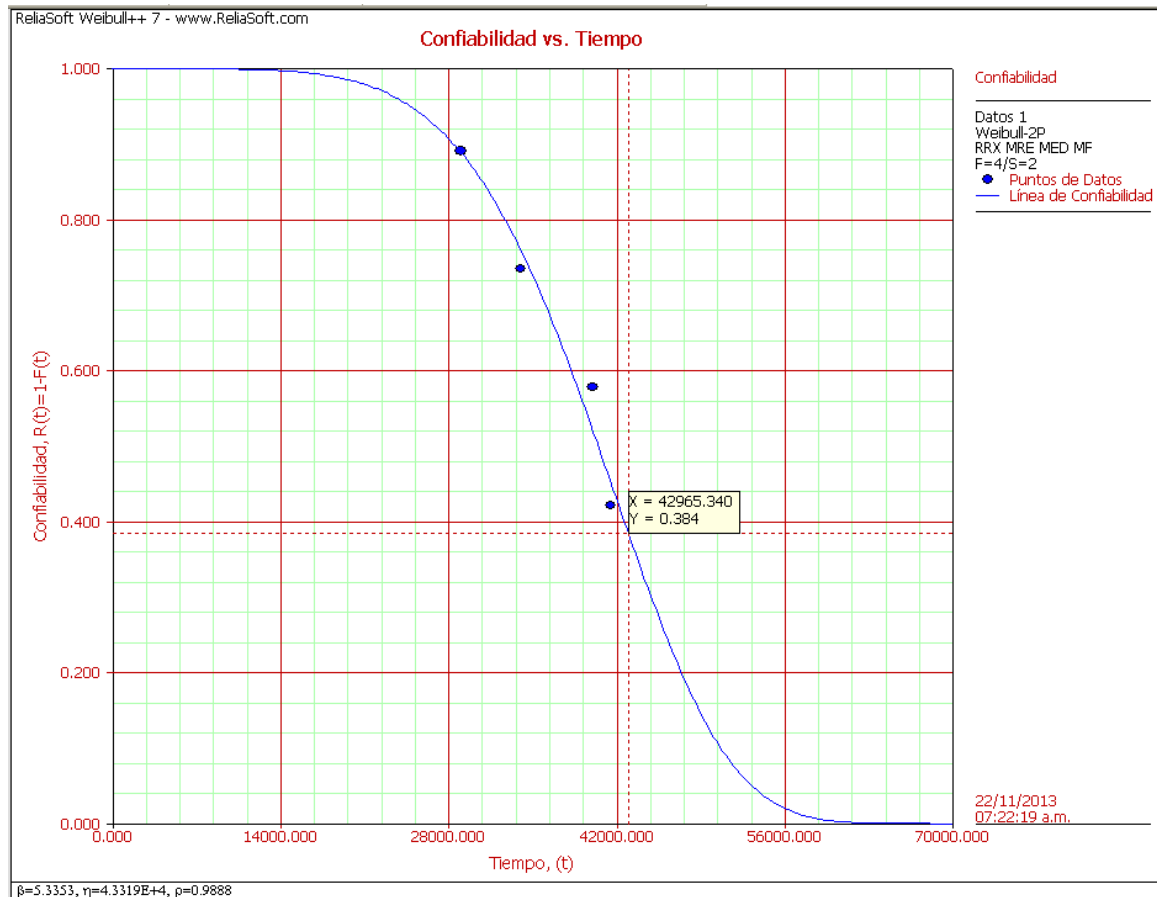


Fig. 7.9 Gráfico de confiabilidad en el tiempo

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Finalmente, para el análisis de los ejes P&H, obtenemos la función densidad o probabilidad acumulada de falla, en donde podemos apreciar que la máxima confiabilidad de la pieza estará en las 41468 Hrs.

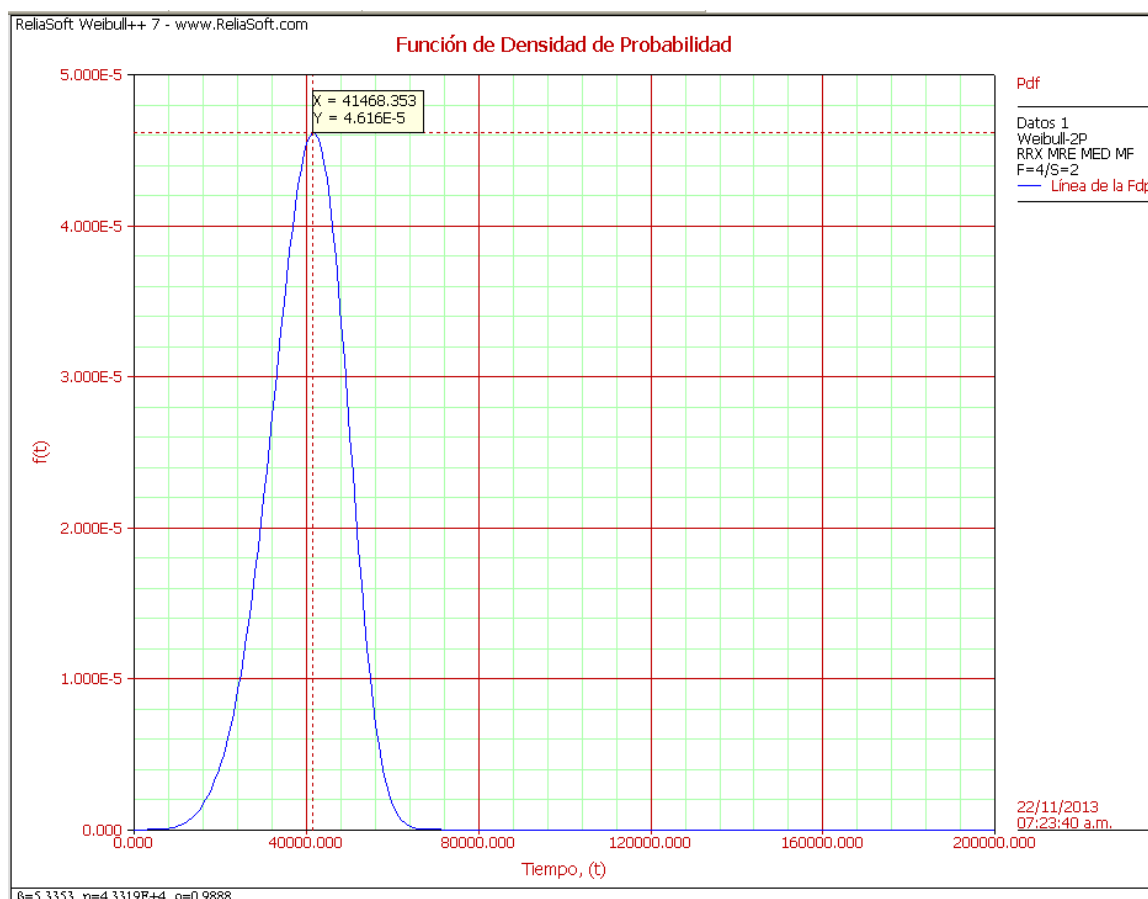


Fig. 7.10 Gráfico de probabilidad acumulada de falla

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Para el análisis del eje P&H, podemos concluir que un cambio a las 41400 Hrs podría prevenir un evento indeseado de falla repentina, tomando en cuenta que habría que hacer un análisis causa raíz del porque ocurrieron los eventos tempranos de ruptura a las 29000 y 34000 Hrs, que posiblemente se debieron a alguna mala conformación de la aleación utilizada en la elaboración del eje.

7.2.2 Análisis de datos de vida en eje HOFFMAN:

Procedemos ahora a analizar los datos históricos de ejes marca HOFFMAN cambiados en los últimos 13 años en diferentes perforadoras de la mina:

ÍTEM	ESTADO F O S	TIEMPO HASTA F O S	ID EJE
1	F	37800 Hrs	EJE HOFFMAN
2	F	39000 Hrs	EJE HOFFMAN
3	F	41250 Hrs	EJE HOFFMAN
4	F	41500 Hrs	EJE HOFFMAN
5	F	42200 Hrs	EJE HOFFMAN
6	F	42900 Hrs	EJE HOFFMAN

Tabla N°11 Historial de datos de vida para ejes HOFFMAN planeamiento Mina Toquepala

Vale la pena resaltar, que no hay datos suspendidos (que no fallaron), en vista que todos los datos obtenidos sugieren cambios por falla antes del tiempo deseado.

Se realiza el ingreso en forma manual de los datos:

	Estado F o S	Tiempo hasta F o S	ID del Subconjunto
1	F	37800	EJE CAT
2	F	39000	EJE CAT
3	F	41250	EJE CAT
4	F	41500	EJE CAT
5	F	42200	EJE CAT
6	F	42900	EJE CAT
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			



Fig. 7.11 Ingreso de datos y especificación del tipo (F)

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Procedemos ahora a seleccionar el tipo de análisis estadístico a realizar, el software nos otorga una gama de modelos para aplicar, el modelo probabilístico que escogeremos es el weibull de 2 parámetros, en vista que no tomaremos en cuenta el parámetro γ porque suponemos que no hubo mortalidad infantil en la instalación de los ejes.

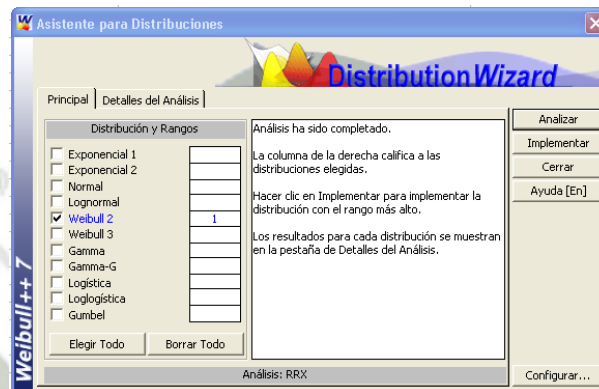


Fig. 7.12 Selección de modelo a utilizar

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

El siguiente cronograma F/S nos muestra los tipos de datos con los que contamos para hacer el análisis:

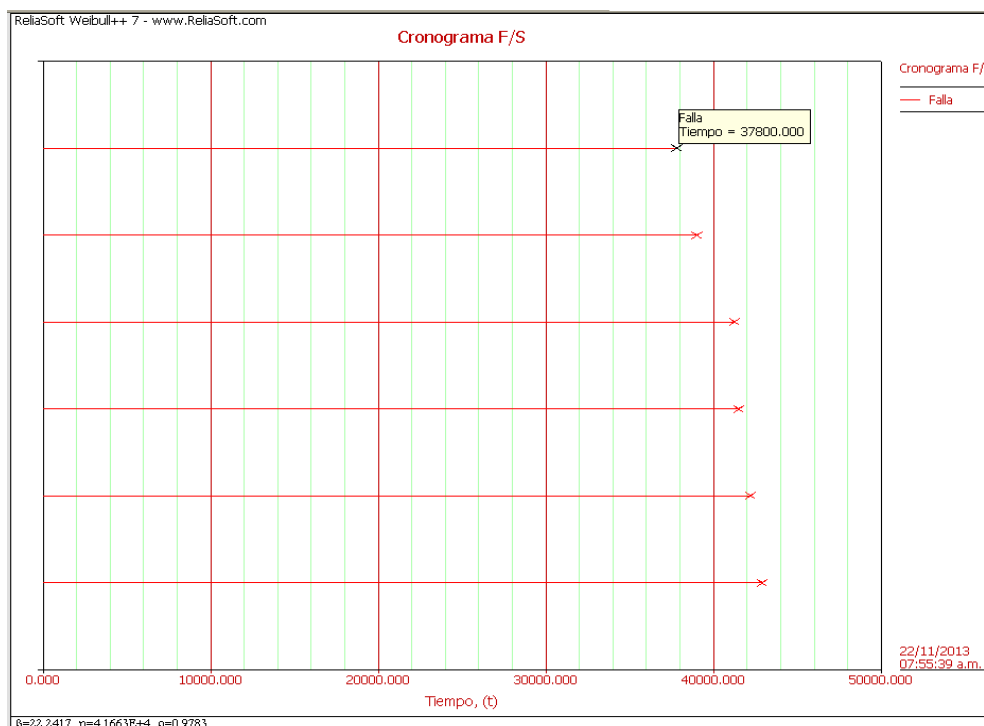


Fig. 7.13 Tipos de datos de vida para ejes HOFFMAN

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Gráfico de probabilidad de falla en Weibull de 2 parámetros:

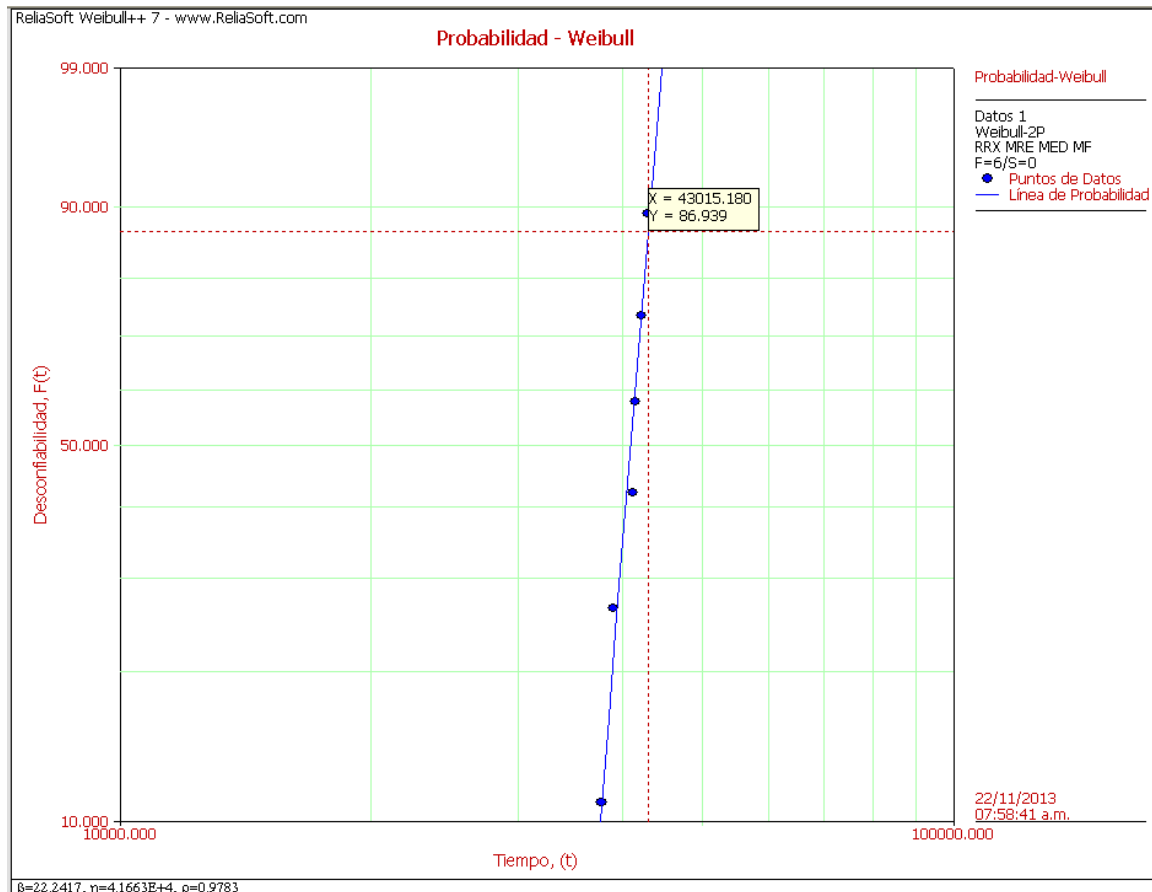


Fig. 7.14 Gráfico de probabilidad de Falla en Weibull

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Sabiendo que el tiempo de vida deseado e indicado por el fabricante del equipo es de 43000 Hrs, obtenemos los siguientes resultados:

La probabilidad de falla o “desconfiabilidad” para un tiempo de 43000 Hrs es de:

$$Q(t) = 86.93\%$$

Por tanto, la confiabilidad para un tiempo de 43000 Hrs, para el eje HOFFMAN es de:

$$R(t) = 100 - Q(t)$$

$$R(t) = 100 - 86.93$$

$$R(t) = 13.07\%$$

El gráfico de confiabilidad en el tiempo nos muestra que a las 43000 Hrs la confiabilidad de la pieza será de un 12.2%:

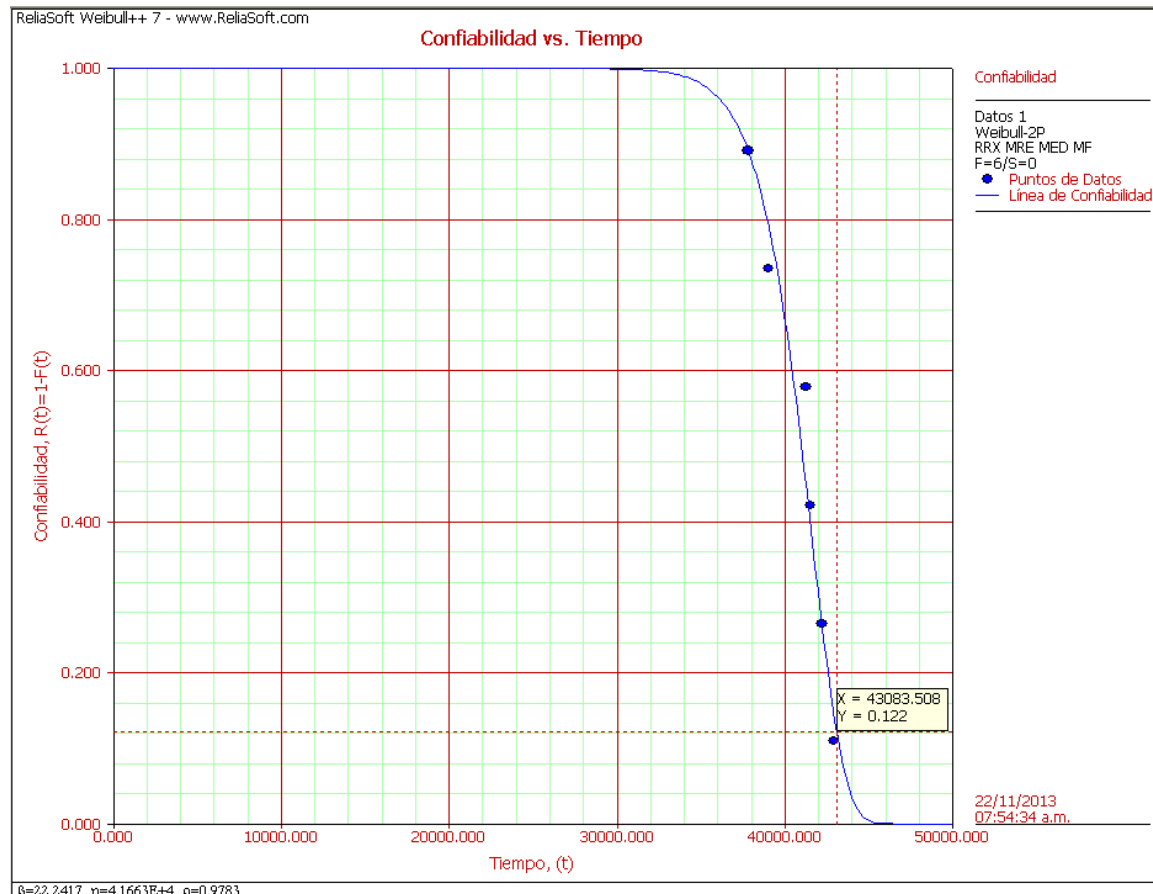


Fig. 7.15 Gráfico de confiabilidad en el tiempo

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Finalmente, para el análisis de los ejes HOFFMAN, obtenemos la función densidad o probabilidad acumulada de falla, en donde podemos apreciar que la máxima confiabilidad de la pieza estará en las 41468 Hrs.

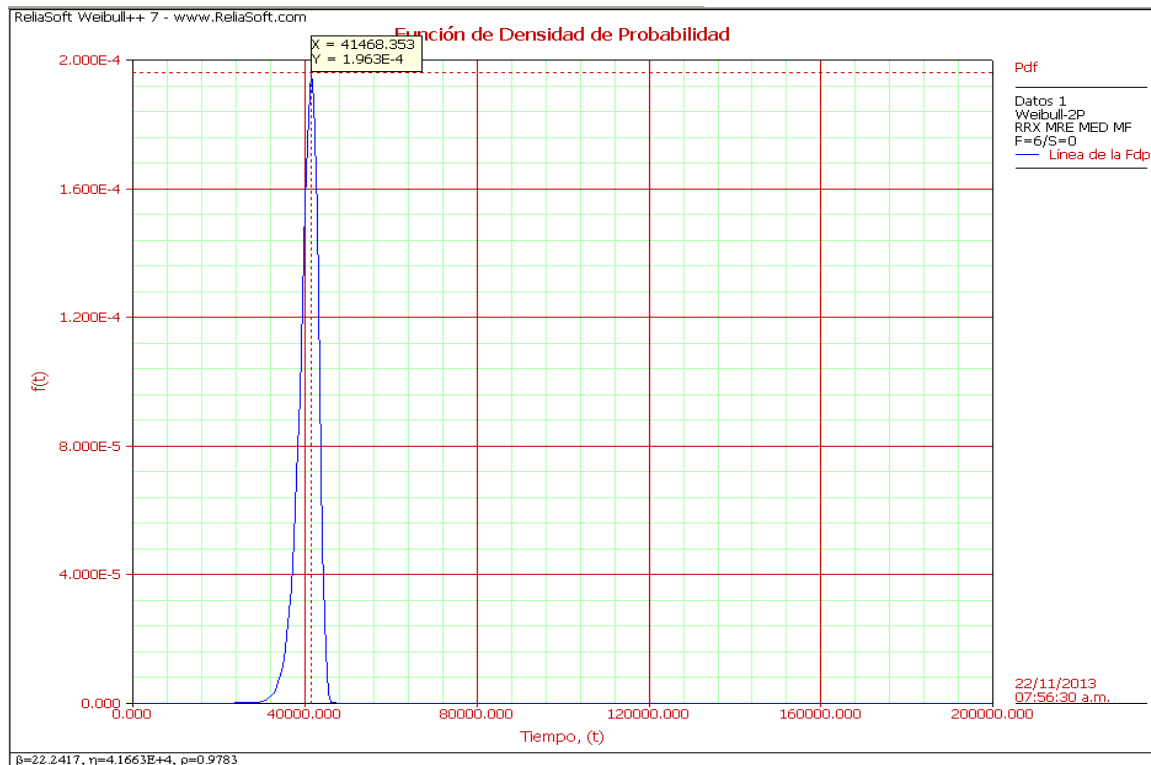


Fig. 7.16 Gráfico de probabilidad acumulada de falla

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Para el análisis del eje HOFFMAN al igual que en el P&H, podemos concluir que un cambio a las 41400 Hrs podría prevenir un evento indeseado de falla repentina, tomando en cuenta que ninguno de los datos históricos superó la barrera de las 43000 Hrs.

7.3 Cuadros de comparación de ejes marca p&h e hoffman

CARACTERÍSTICAS	EJE P&H	EJE HOFFMAN
Total Datos Históricos	6	6
Datos suspendidos	2	0
Max. Duración	43000 Hrs	42900 Hrs
Min. Duración	29000 Hrs	37800 Hrs
R(t) a 43000 Hrs	38.17%	13.07%
Max Confiabilidad	41468 Hrs	
Reemplazo recomendado	41400 Hrs	

Tabla N°12 Comparación de eje marca P&H e HOFFMAN

- ❖ Para ambos ejes, se cuenta con un historial de 6 datos, en el eje P&H se tienen 2 datos suspendidos a la derecha (superaron las 43000 Hrs), mientras que para el Hoffman ninguno, en vista que todos sus ejes fallaron, registrando una máxima duración de 42900 Hrs.
- ❖ La duración mínima registrada en un eje P&H fue de 29000 Hrs, mientras que para el Hoffman fue de 37800. Sería conveniente hacer un estudio del porque el eje P&H registró este intervalo tan corto de falla, en vista que pudo haberse tratado de algún defecto de fabricación y un consecuente reclamo por garantía.
- ❖ La confiabilidad más alta para el tiempo de falla estimado de 43000 Hrs, corresponde al eje P&H, con un 38.17% y por ende una probabilidad de falla del 61.83%, mientras que para el eje HOFFMAN, la confiabilidad para el tiempo de falla es de 13.07% con una probabilidad de falla de 86.93%.

- ❖ El tiempo en el que se recomienda el próximo reemplazo, es de 41400 Hrs, lo cual involucraría cambiar los planes de mantenimiento que asignaban la programación de un cambio a las 43000 Hrs. Esto en vista que la máxima confiabilidad para ambos ejes se aprecia a las 41468 Hrs.

7.3.1 Confiabilidad ideal en los ejes.

Adicionalmente, se debe hacer mención a la confiabilidad ideal a la que la pieza debería trabajar (idealmente), esto con el fin de garantizar más del 65% de confiabilidad en la misma. Primero revisamos el cambio ideal en el eje P&H a una confiabilidad superior al 65%:

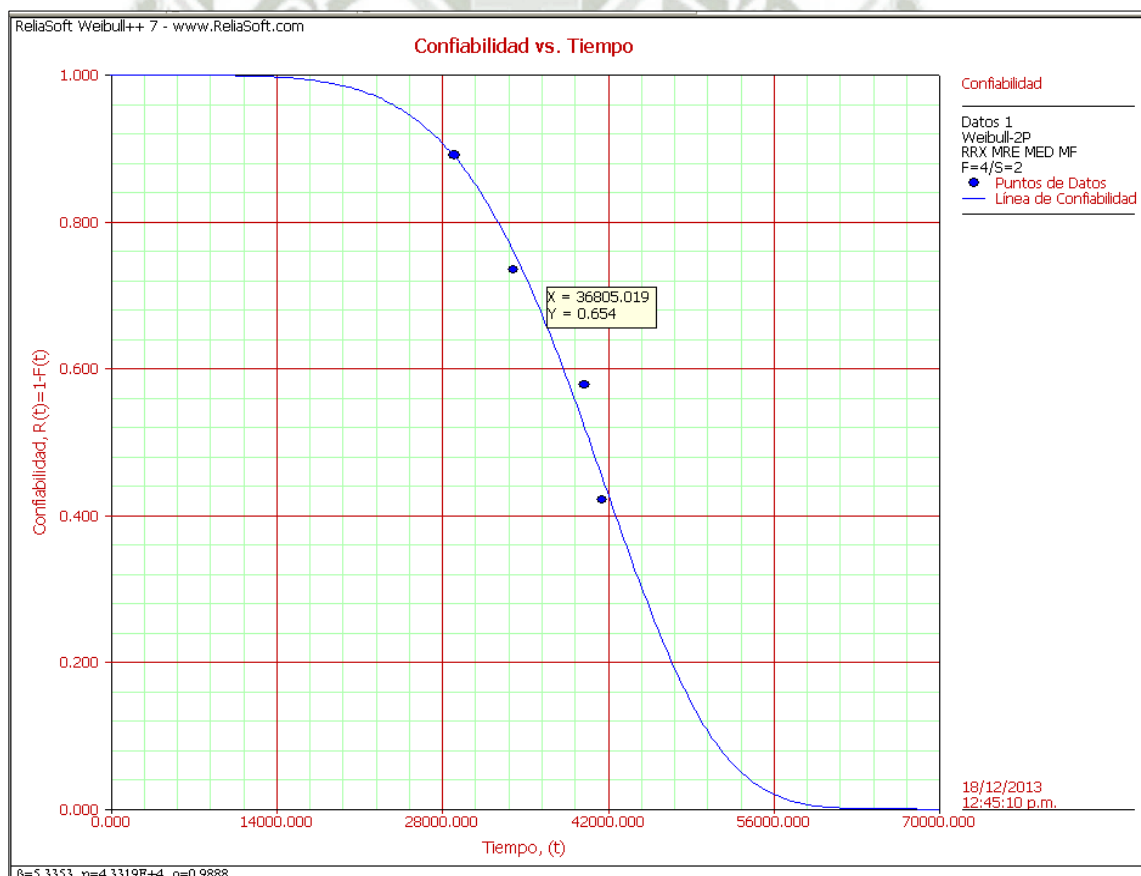


Fig. 7.17 Gráfico de confiabilidad al 65% en eje P&H

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Como se aprecia en el gráfico de confiabilidad para el eje P&H, un valor mayor al 65% nos indicaría que el eje debe reemplazarse a las 36800 Hrs, dato que si bien nos da una mayor seguridad en el funcionamiento del equipo, nos restringe enormemente el tiempo de duración “normal” de la pieza con casi 5000 Hrs de funcionamiento menos que el estimado recomendado para el cambio de 41400 Hrs.

Haciendo el mismo ejercicio para los datos del eje HOFFMAN tenemos el siguiente resultado:

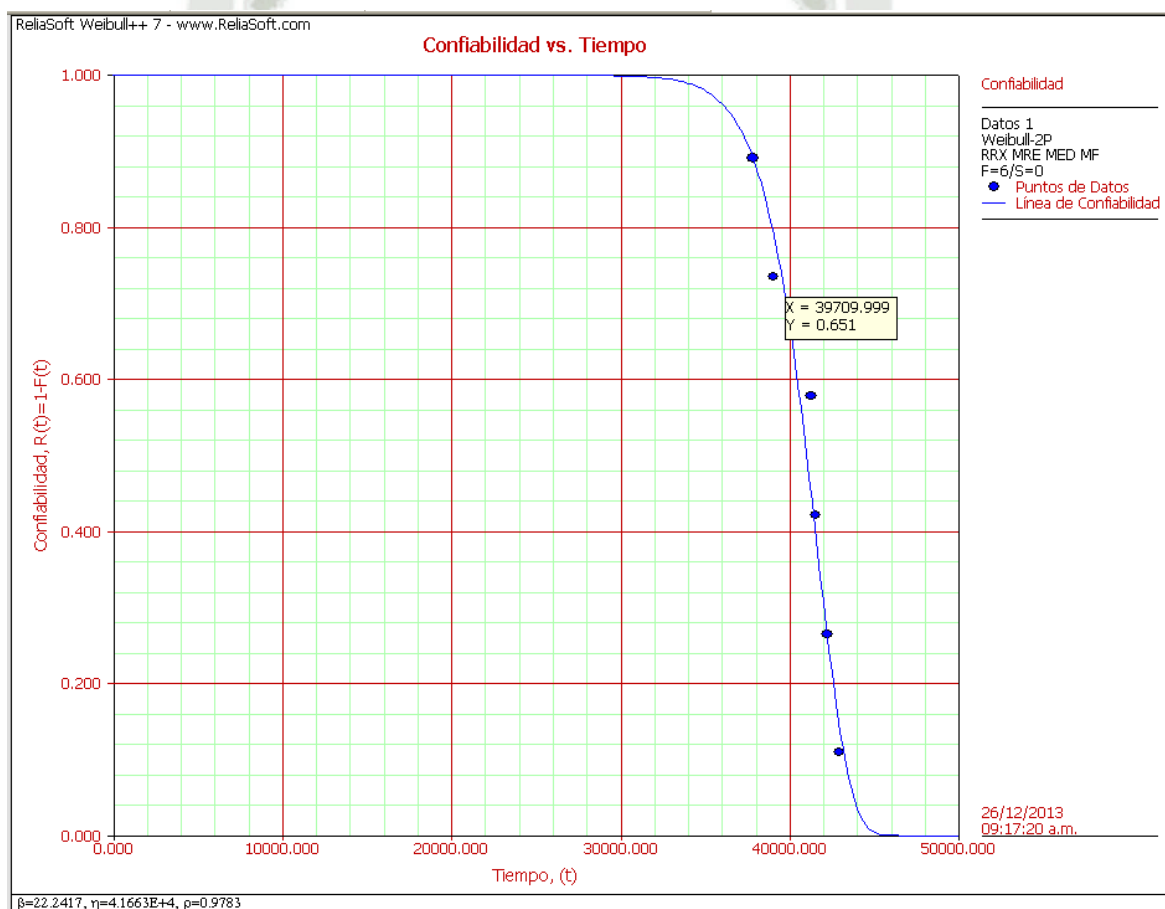


Fig. 7.18 Gráfico de confiabilidad al 65% en eje HOFFMAN

Fuente software Weibull 7 de Reliasoft

Como se aprecia en el gráfico de confiabilidad para el eje HOFFMAN, un valor mayor al 65% nos indicaría que el eje debe reemplazarse a las 39700 Hrs, un valor bastante superior al obtenido para el eje P&H, pero del mismo modo nos restringe el tiempo de duración “normal” de la pieza con casi 2000 Hrs de funcionamiento menos que el estimado recomendado para el cambio de 41400 Hrs. Este último valor nos indica que el eje HOFFMAN nos da una mayor confiabilidad en tiempos cercanos a las 40000 Hrs, con lo que se podría aseverar que esta marca nos otorgará una mejor durabilidad en cambios menores a las 41400 Hrs, aún por encima del fabricante original P&H.



CONCLUSIONES

- 1) La inspección por medio de la técnica de ultrasonido nos permitió conocer el estado del eje de la perforadora modelo 120A marca P&H, identificando todas las imperfecciones existentes en el eje, pudiendo constatar que este se encuentra en buen estado, ya que en la mayoría de casos los espectros muestran el pico de fondo del eje principal.
- 2) Se sometió la pieza a un modelamiento por elementos finitos, descubriendo que el mayor esfuerzo se ejerce en la parte central del eje, mostrando un desplazamiento en este sector mayor a los 10mm al estar sometido a la máxima carga de trabajo de 150 Tn. Esto nos indica que el sector del medio es el más propenso a la falla, pese a que el fabricante indica hacer mediciones en los sectores que van anclados al sistema motriz (orugas).
- 3) Luego del análisis estadístico, se pudo concluir que la mejor opción serían los ejes elaborados por el mismo fabricante de la perforadora, P&H, para tiempos de cambio superiores a las 41000 Hrs, pese a que tuvo dos eventos inesperados bastante cortos, nos ofrece una mejor confiabilidad de la pieza, de un 38.17% frente a un 13.07% de los ejes HOFFMAN, incluso con datos históricos que sobrepasaron el tiempo de Hrs deseado de 43000 Hrs. Mientras que para reemplazos programados antes de las 40000 Hrs, la mejor opción será el eje HOFFMAN, el cual en este tiempo nos ofrece una valor muy cercano al 65% de confiabilidad de la pieza analizada.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda programar revisiones continuas al eje, con una periodicidad no mayor a los 80 días calendarios. El objetivo es mantener el monitoreo constante de las piezas, de modo que se eviten eventos de falla temprana, como los encontrados en los primeros datos de la información histórica utilizada para desarrollar el análisis estadístico.
- 2) Se recomienda realizar un ajuste en el plan de mantenimiento, reduciendo el tiempo de reemplazo de los ejes de 43000 a 41400 Hrs, lo cual nos garantiza que se pueda prever cualquier evento indeseado de ruptura, lo cual sumado al monitoreo constante con el equipo de ultrasonido, nos afianzarían los resultados obtenidos en el análisis desarrollado. Este ajuste en el plan de mantenimiento contribuirá a evitar eventos indeseados pese a que se opte por cualquiera de las marcas como reemplazo para los ejes de las perforadoras de la mina.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS:

1. Dodson, Bryan. The Weibull Analysis Handbook. 2da ed. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2006.
2. Abernethy, Robert B. The New Weibull Handbook. 5ta ed. North Palm Beach, Florida. 2006
3. Walpole, Ronald E y Raymond Meyers. Probabilidad y estadística para ingenieros. 3ra ed. México: Interamericana, 1990
4. Céspedes Zapata, Lucas y Santiago Mejía Isaza. Implementación de un Sistema de Indicadores para la gestión de Mantenimiento de una empresa textilera. Medellín, 2005,194p. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica. Área de mantenimiento.
5. Tamborero del Pino, José María. NPT 331: Fiabilidad: La distribución de Weibull [En línea] Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_331.pdf
6. Estimation of the Weibull parameters [En línea] Disponible en:

<http://www.weibull.com/LifeDataWeb/lifedataweb.htm>
7. Yáñez, Medardo; Perdomo, José L y Gómez de la Vega, Hernando. Ingeniería de Confiabilidad: Pilar fundamental del mantenimiento [En línea] Disponible en:

<http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/#comment-list>

8. Duarte Holguín, Juan Carlos. Mantenimiento centrado en confiabilidad usando métodos de simulación del ciclo de vida [En línea] Disponible en:

<http://www.noria.com/sp/rwla/conferencias/mem/Duarte-paper.pdf>

9. García Palencia, Oliverio. Optimización estadística del mantenimiento industrial [En línea] Disponible en:

<http://www.aciem.org/bancoconocimiento/O/Optimizacionestadisticadelmantenimientoindustr/Optimizacionestadisticadelmantenimientoindustr.asp>

10. Luna, Ana Eugenia. Teoría de la confiabilidad [En línea] Disponible en:

http://focuslab.lfp.uba.ar/public/CursoTErrores2k4/Monografias2005/Ana_E_Luna.pdf





ANEXOS

ANEXO N°1

Velocidades de propagación del sonido



Material	Longitudinal Velocity		Shear Velocity		Acoustic Impedance
	(in/us)*	(m/s)	(in/us)*	(m/s)	Kg/m ² x10 ⁶
Acrylic resin	0,107	2370	0,056	1430	3,22
Aluminium	0,249	6320	0,123	3130	17,06
Beryllium	0,508	12900	0,35	8880	23,50
Brass, naval	0,174	4430	0,083	2120	37,30
Cadmium	0,109	2780	0,059	1500	24,02
Columbium	0,194	4920	0,083	2100	42,16
Copper	0,183	4660	0,089	2260	41,61
Glycerine	0,076	1920	-----	-----	2,42
Gold	0,128	3240	0,047	1200	62,60
Inconel	0,229	5820	0,119	3020	49,47
Iron	0,232	5900	0,127	3230	45,43
Iron, cast (slow)	0,138	3500	0,087	2200	25,00
Iron, cast (fast)	0,22	5600	0,126	3200	40,00
Luceti	0,106	2680	0,05	1260	3,16
Mercury	0,057	1,450	-----	-----	19,56
Molybdenum	0,246	5250	0,132	3350	63,75
Motor Oil SAE 20	0,069	1740	----	----	1,51
Nickel pure	0,222	5630	0,177	2960	49,99
Platinum	0,156	3960	0,066	1,670	84,74
Polyamide	0,087	2200	0,043	1100	2,40
Nylon	0,102	2500	0,047	1200	3,10
Polystyrene	0,092	2340	-----	-----	2,47
Silver	0,142	3600	0,063	1590	37,76
Steel 1020	0,232	5890	0,128	3240	45,41
Steel 4340	0,23	5850	0,128	3240	45,63
Steel 302	0,223	5660	0,123	3120	45,45
Tin	0,131	3320	0,066	1670	24,20
Titanium	0,24	6100	0,123	3120	27,69
Water	0,058	1480	-----	-----	1,48
Zin	0,164	4170	0,095	2140	29,61

Tabla N° 13 Velocidades de Propagación del sonido

(Source: Nondestructive Testing Handbook 2nd Edition Volume 7 Ultrasonic Testing

ASNT 1991 ed. Paul McIntire)

ANEXO N°2

Características, ventajas y desventajas de algunos materiales usados en los palpadores



Material	Eficiencia como Transmisor	Eficiencia como receptor	Sensibilidad	Poder de resolución	Características mecánicas
Cuarzo	Mala	Mediana	Escasa	Optima	Buena
Sulfato de litio	Mediana	Buena	Buena	Optima	Soluble en agua
Titanato de Bario	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Fragil
Metaniobato de Bario	Buena	Mediana	Optima	Optima	Buena
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Buena

Tabla N°14 Características de los materiales usados como transductores en los palpadores

Material	Ventajas	Desventajas
Cuarzo	❖ Se obtiene a partir de cristales naturales ❖ Posee excelentes características estabilidad térmica, química y eléctrica ❖ Es muy duro y resistente al desgaste así como al envejecimiento	❖ Sufre interferencias en el modo de conversión ❖ Es el menos eficiente de los generadores de energía acústica ❖ Requiere alto voltaje para su manejo a baja frecuencias.
Sulfato de Litio	❖ Receptor más eficiente, facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima. ❖ Mejor poder de resolución ❖ No envejece. Es poco afectado por la interferencia en el modo de conversión	❖ Es muy frágil ❖ Soluble al agua ❖ Se debe emplear a temperaturas menores de 75°C
Cerámicos Polarizados	❖ Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación ❖ Prácticamente no son afectados por la humedad ❖ Algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300°C	❖ En algunos casos existe interferencia en el modo de conversión ❖ Presentan tendencia al envejecimiento ❖ Además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo
Metaniobato de Bario	❖ Presenta un módulo piezoeléctrico elevado lo que lo califica como buen emisor ❖ Posee excelente estabilidad térmica, similar al del cuarzo, lo que le permite ser empleado a altas temperaturas.	❖ Presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica. ❖ Presenta interacción entre varios modos de vibración

Tabla N°15 Ventajas y desventajas de diferentes materiales para transductores

ANEXO N°3

Vista general del eje principal perforadora 120A



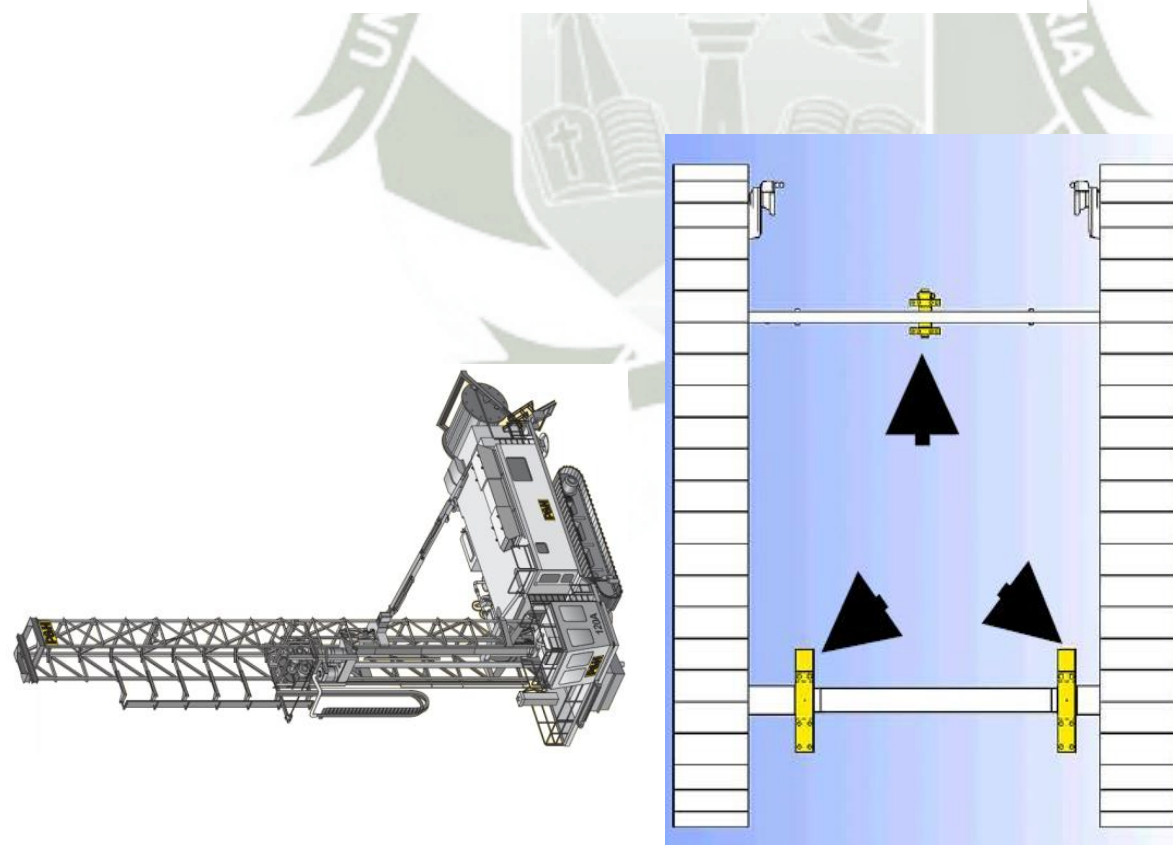
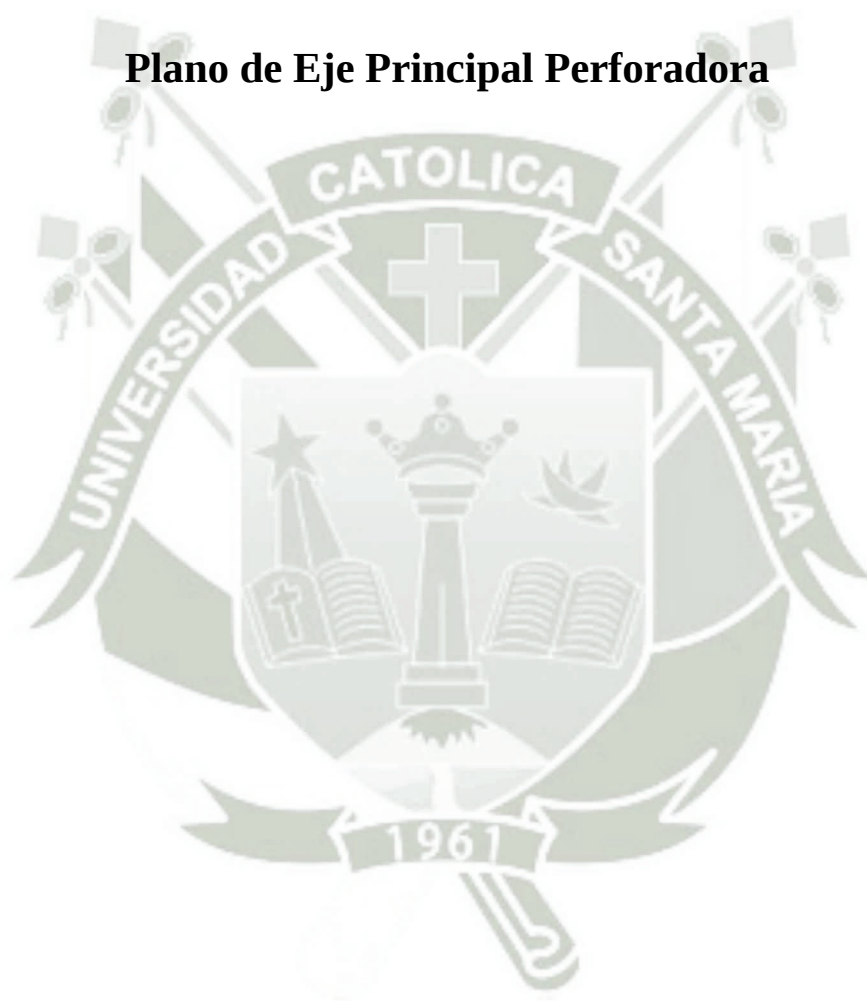
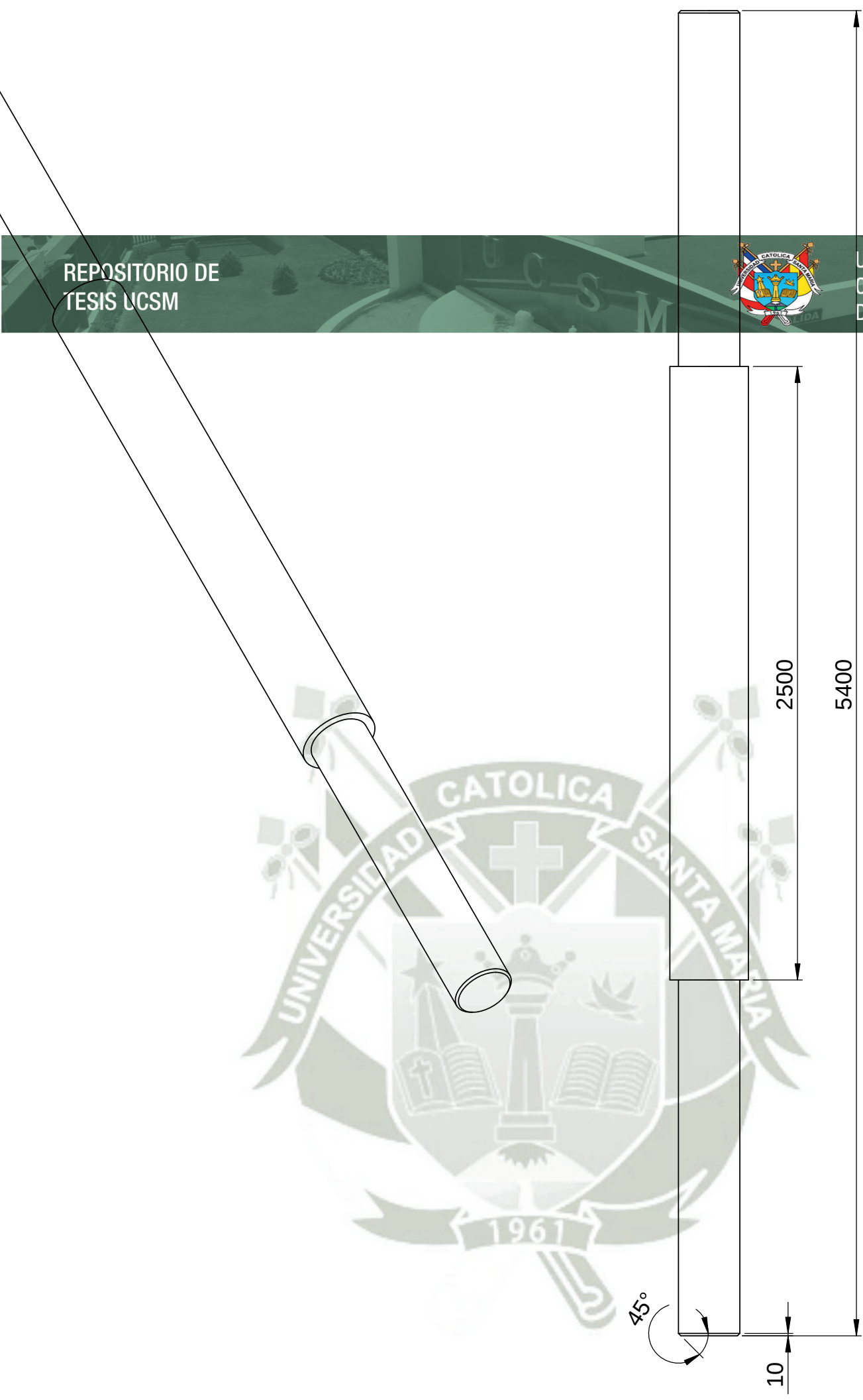


Fig. A1 Despiece y locación del eje de la perforadora P&H modelo 120A Fuente Manual de Partes Perforadora 120 A

ANEXO N°4

Plano de Eje Principal Perforadora





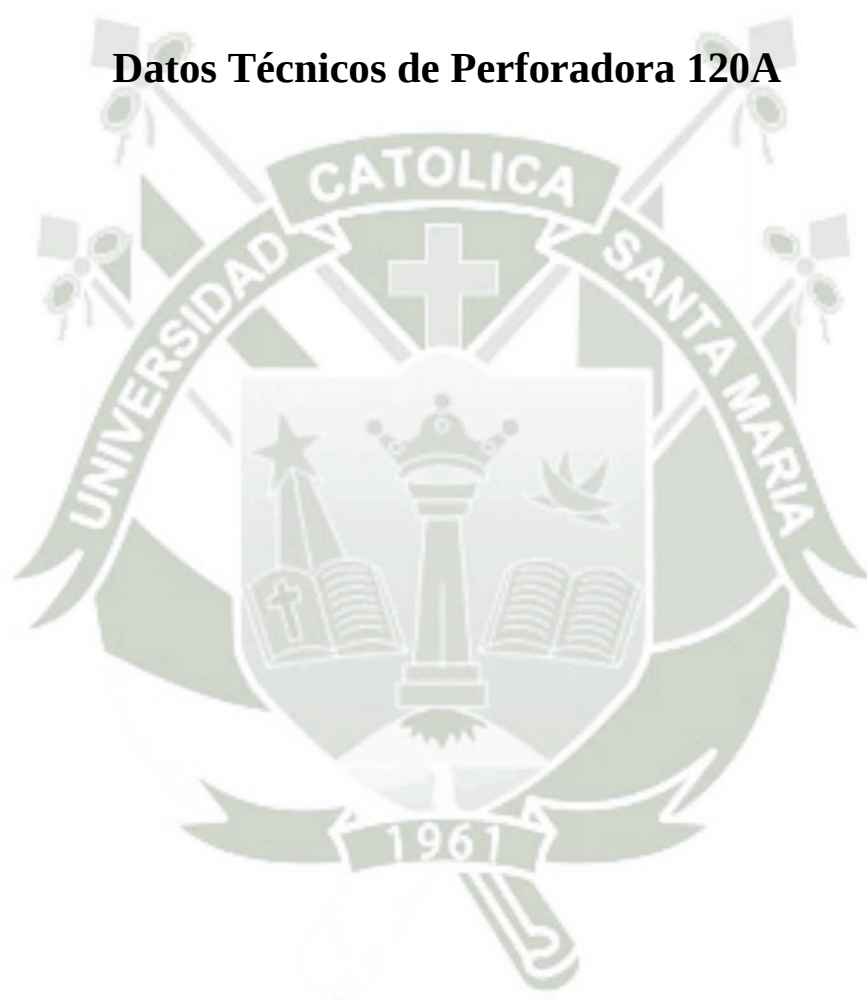
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIA ESCALA		REVISIÓN	
TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:												UNIVERSIDAD CATOLICA SANTA MARIA			
				NOMBRE		FIRMA		FECHA				REALIZADO POR:			
DIBUJ.												Gerald Humberto Alvarez Yepez			
VERIF.												Felipe Manuel Ordoño Gallegos			
APROB.															
FABR.															
CALID.												PLANO		Eje principal de perforadora	
														A3	
												ESCALA: 1:20		HOJA 1 DE 1	



NO CAMBIA ESCALA		REVISIÓN	
REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS			
ACABADO:		TÍTULO:	
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			
NOMBRE		FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			
MATERIAL:			
N.º DE DIBUJO		Eje de Perforadora A3	
ESCALA: 1:50		HOJA 1 DE 1	

ANEXO N°5

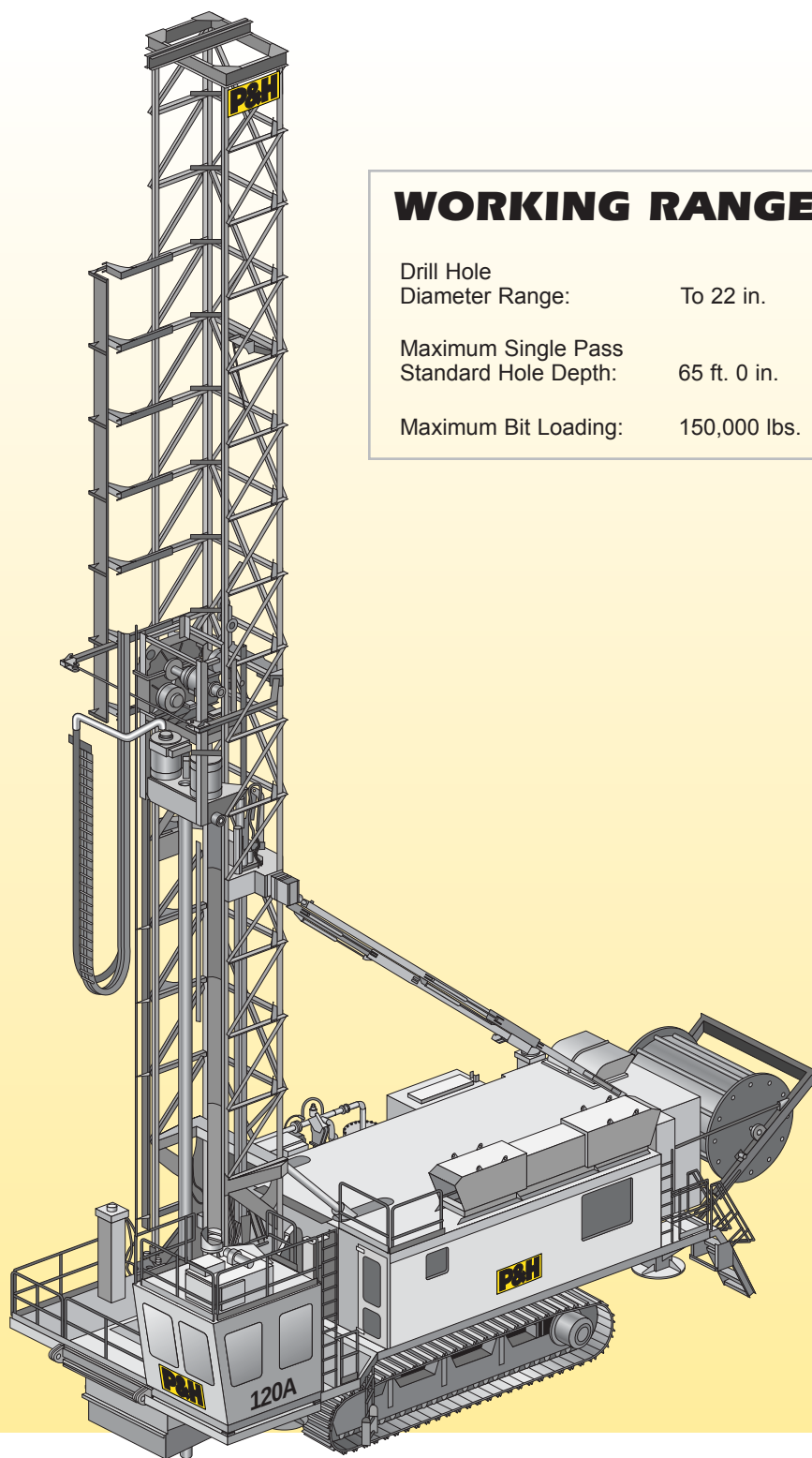
Datos Técnicos de Perforadora 120A



P&H[®] 120A

ROTARY BLASTHOLE DRILL

OPERATING SPECIFICATIONS



WORKING RANGES

Drill Hole Diameter Range:	To 22 in.	559 mm
Maximum Single Pass Standard Hole Depth:	65 ft. 0 in.	19.81 m
Maximum Bit Loading:	150,000 lbs.	68,038 kg



MAST

Construction:	Lattice type using alloy steel structural shapes
Single Pass Drilling Depth:	65 ft. 0 in. (19.81 m), 70 ft. (21.3 m) optional
Raising and Lowering:	Two hydraulic cylinders, 10.5 in. (267 mm) diameter (each)



HOIST / PULLDOWN

Design:	DC electric motor driven chainless rack and pinion design
Bit Loading (maximum):	150,000 lbs. (68,038 kg)
Feed Rate:	To 80 fpm (24.4 m/min)
Hoist Rate:	To 80 fpm (24.4 m/min)
Auxiliary Winch:	Optional, 10,000 lbs. (4,536 kg) capacity



PIPE HANDLING

Type:	Parallelogram style pipe rack, one rack is standard
Pipe Size:	8 5/8 in. - 16 in. (219 mm - 407 mm) diameter
Options:	Additional pipe racks up to four total
Auxiliary Equipment:	Standard deck wrench



ROTARY MACHINERY

Design:	Dual DC electric motor drive
Rotation Speed:	0-119 RPM standard, 0-101 RPM and 0-138 RMP optional
Maximum Torque:	Up to 25,000 ft-lbs. (33,895 NM) for standard gear ratio, up to 22,000 ft-lbs. (29,830 NM) and 30,000 ft-lbs. (40,675 NM) for optional gear ratios

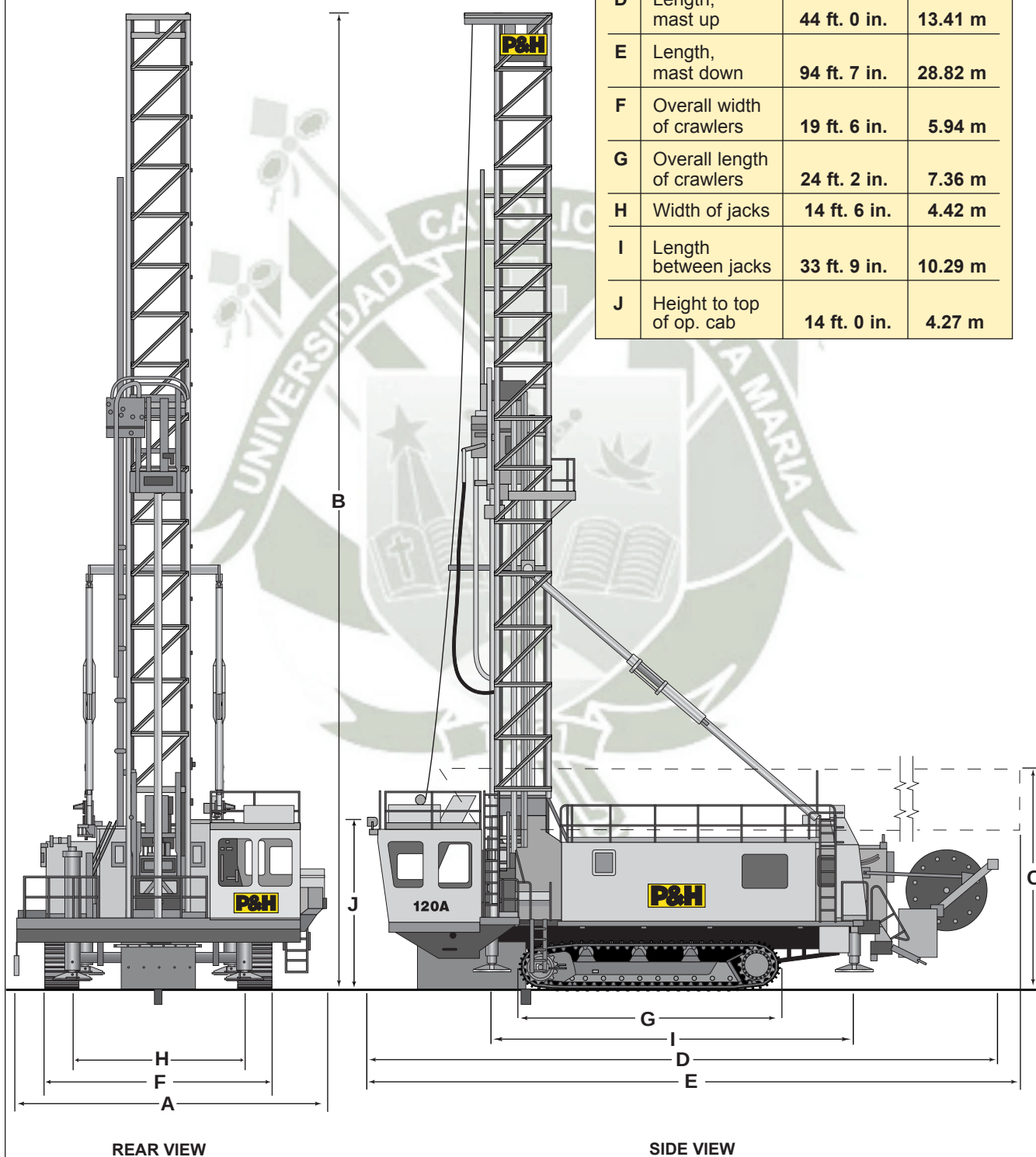


ELECTRICAL CONTROL SYSTEMS

Control System:	Allen Bradley PLC 5/40 - SLC Remote I/O Ladder Logic-Based
GUI (Graphical User Interface)	
Standard:	15" Touch screen including operating parameters
Optional:	15" Advanced Diagnostics/Troubleshooting
Standard and optional operator error protection systems available (over-temperature shut-downs, over-tilt protection, pipe rack interlock protection, pipe protection software, etc.)	

GENERAL DIMENSIONS

A	Width, overall	21 ft. 10 in.	6.66 m
B	Height, mast up	93 ft. 0 in.	28.35 m
C	Height, mast down	20 ft. 0 in.	6.10 m
D	Length, mast up	44 ft. 0 in.	13.41 m
E	Length, mast down	94 ft. 7 in.	28.82 m
F	Overall width of crawlers	19 ft. 6 in.	5.94 m
G	Overall length of crawlers	24 ft. 2 in.	7.36 m
H	Width of jacks	14 ft. 6 in.	4.42 m
I	Length between jacks	33 ft. 9 in.	10.29 m
J	Height to top of op. cab	14 ft. 0 in.	4.27 m





ELECTRICAL SYSTEM

Incoming Power Supply Voltage:	To 7200 V, 3 phase, 60 Hz or 6,600 V, 3 phase 50 Hz
Recommended Supply Transformer:	1 MVA Continuous, 5 MVA Short Circuit
High Voltage Switchgear:	External disconnect at trail cable junction box, high voltage load break disconnect and high voltage vacuum contactor for main drive motor and drives
Main Drive Motor:	700 HP (522 kw)
Compressor Oil Cooler Fan:	30 HP (22.4 kw)
Machinery House Fans:	2 x 7.5 HP (5.6 kw)
Hoist and Rotary Blowers:	2 x 1 HP (.75 kw)
Auxiliary Hydraulic Pump:	1.5 HP (1.1 kw)
Oil Circulation Pump:	10 HP (7.5 kw)



LOWER WORKS

Crawler Type:	Heavy-duty lug and tumbler drive system, P&H design
Shoe Width	
Standard:	36 in. (914 mm)
Optional:	44 in. (1,118 mm), 54 in. (1,372 mm)
Propel Machinery:	Dual hydrostatic planetary drive with spring set, hydraulic release brake, 310 HP (231 kw)
Propel Speed (maximum):	1.0 mph (1.61 kph) High .6 mph (.97 kph) Low
Gradeability:	60%
Take-Up Adjustment:	Jack and shim



WEIGHTS - Approximate

Operating Weight (maximum):	365,000 lbs. (165,564 kg)
Shipping Weight with Mast:	339,400 lbs. (153,949 kg)
Ground Bearing Pressure for Track Pads:	21.0 psi (36" shoes), 17.2 psi (44" shoes), 14.0 psi (36" shoes)
Ground Bearing Pressure for Jacks:	129 psi standard size, 46 psi optional size



LIGHTING

Standard:	Quartz halogen floodlights for work area supplemented by incandescent and fluorescent area and interior lighting
Optional:	High pressure sodium floodlights



AIR SYSTEM

Compressor:	Gardner-Denver SSY Series oil-flooded rotary screw type
Standard Volume:	3,000 cfm (85 cm/min)
Optional Volume:	2,500 cfm (85 cm/min), 3,600 cfm (102 cm/min)
Pressure:	65 psi (448 kpa)
Air Filters:	Dual Donaldson 2-stage, dry type



HYDRAULIC SYSTEM

Main System:	Closed loop design utilizing two variable-displacement piston pumps for propel
Auxiliary System:	Open loop design utilizing vane pumps for mast raising, machine leveling, and pipe handling
Control Valves:	Manifold mounted electro-hydraulic, PLC controlled - PLC 5/40 Discrete 110V DC Solenoid
Hydraulic Lines:	Extensive use of high pressure steel tubing
Filtration:	3-micron return filters, 3-micron charge filters, suction strainers



LEVELING JACKS

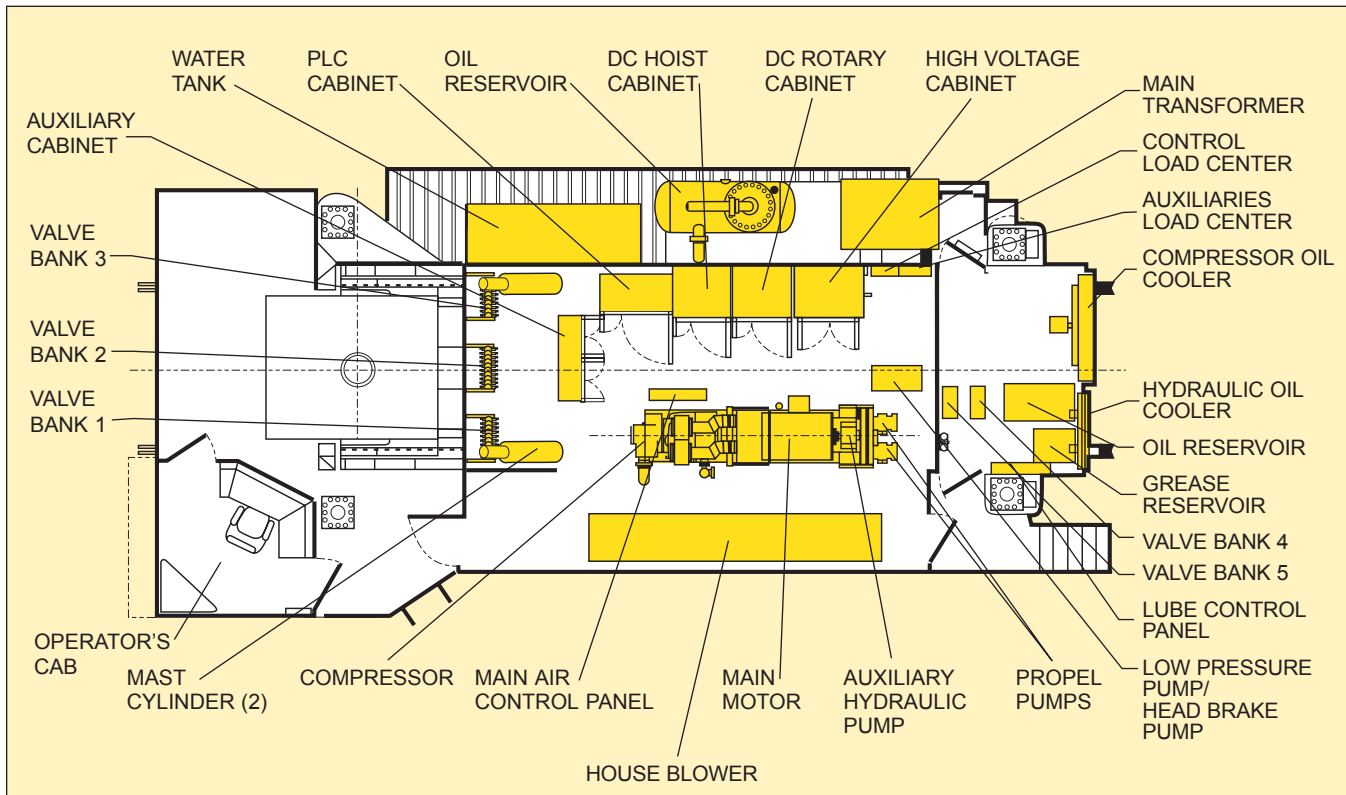
Cylinders:	Four (4) 9 in. (229 mm) diameter x 66 in. (1,676 mm) stroke
Jack Pads:	Two sizes available
Standard:	30 in. (762 mm) diameter
Optional:	50 in. (1,270 mm) diameter
Auto Level:	Optional feature



OPERATOR'S CAB

Type:	Rear mounted with vibration and noise suppression
Controls:	PLC controlled, backlit for night operation
Glazing:	Tinted shatter-resistant, laminated glass on all sides, roof window with guard
Climate Control:	Mine Air Systems or Sigma HVAC unit available, provide pressurization and filtration

MACHINERY DECK PLAN



ADDITIONAL OPTIONAL EQUIPMENT

- 70 ft. (21.3 m) Single Pass
- Dust Suppression (dry or water)
- Dust Curtains
- Cold Weather Package
- Sure Wrench® Breakout Wrench
- Centralized Lubrication
- Remote Propel Controls
- Wiggins Remote 'Fastfil' System
- GPS Interface
- Shock Subadapter
- Deck Bushing (roller type)
- Mast Ladder with Saf-T-Climb®
- Fire Suppression
- Bit Lube
- Cab Window Shades
- Cable Reel

NOTE: All designs, specifications and components of equipment described above are subject to change at manufacturer's sole discretion at any time without advance notice. Data published herein is informational in nature and shall not be construed to warrant suitability of machine for any particular purpose as performance may vary with conditions encountered. The only warranty applicable is our standard written warranty for this machine.



P&H MINING EQUIPMENT
A Joy Global Inc. Company

P&H Mining Equipment ♦ Box 310 ♦ Milwaukee, Wisconsin 53201 USA