

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA



“ANÁLISIS EN PRO/ENGINEER DE UN EJE DE MOTOR Y
UN POLIN PATEADOR DE CELULOSA ARAUCO Y
CONSTITUCIÓN PLANTA VALDIVIA Y POSTERIOR
COMPARACIÓN CON EQUIPO DE ULTRASONIDO”

Trabajo para optar al Título de:

Ingeniero Mecánico

Profesor Patrocinante:

Sr. Milton Lemarie O.

Ingeniero Civil Mecánico

PABLO ALBERTO SANHUEZA ALMONACID

Valdivia - Chile

2007

El presente Trabajo de Titulación ha sido sometido a la revisión y aprobación de la Comisión de Titulación. La tesis aprobada, junto con la nota del Examen de Titulación, le permite al alumno obtener el título de Ingeniero Mecánico.

Nota ponderada del Trabajo de Titulación: _____

Nota promedio del Examen de Titulación: _____

Comisión de Titulación:

La comisión de titulación ha sido integrada por los académicos:

Profesor Patrocinante: Sr. Milton Lemarie O. _____

Profesores Informantes: Sr. Rolando Ríos R. _____

Sr. Claudio Bastidas C. _____

V ° B ° Director de Escuela: Sr. Milton Lemarie O. _____

Fecha de Examen de Titulación:

Agradecimientos.

Al finalizar este trabajo quisiera agradecer primeramente Dios, mi madre y mi familia, los cuales jugaron un papel importante en este primer paso de mi vida profesional, juntamente, agradecer a Celulosa Arauco y Constitución Planta Valdivia, en especial a la Superintendencia de Planificación, don Gastón, Fernando, Rene y don Alejandro, por dejarme desarrollar este trabajo, y por su constante apoyo para lograrlo.

Por supuesto a mis profesores de Universidad, al profe Milton, al profe Claudio, al profe Rolando, los que formaron parte de este trabajo, y todos los profesores que ayudaron en mi formación profesional.

Dedicatoria

A mi hijo Matías

Índice.

Resumen	1
Summary	2
Introducción	3
Hipótesis	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
Metodología de Trabajo	5
Capítulo I: Fatiga en los materiales	7
1.1 Ejes móviles y fijos	7
1.2 Fatiga	8
1.2.1 Etapas del proceso	10
1.2.2 Factores que le afectan	12
1.2.3 Cargas cíclicas	13
1.2.4 Diagrama esfuerzo - número de ciclos (σ -N)	15
1.2.5 Diagrama tensión - número de ciclos (S-N)	16
1.2.6 Daños por Fatiga	19
1.3 Pro/Mechanica Fatigue Advisor.....	20
Capítulo II: Ensayos no destructivos	22
2.1 Introducción.....	22
2.2. Tipos de ensayos no destructivos (E.N.D)	22
2.2.1 Ensayos radiográficos.....	22
2.2.2 Líquidos penetrantes	23
2.2.3 Inspección visual	23

2.2.4 Análisis de vibraciones	23
2.2.5 Termografía	24
2.2.6 Mediciones de espesores por ultrasonido.....	24
Capítulo III: Ultrasonido.....	26
3.1 Introducción.....	26
3.2 Generación del ultrasonido.....	28
3.2.1 Efecto magnetoestrictivo.....	28
3.2.2 Efecto piezoeléctrico.....	28
3.2.3 Características de algunos materiales piezoeléctricos	29
3.3 Transductores	29
3.3.1 Componentes del transductor ultrasónico.....	30
3.3.2 Campo cercano	31
3.3.3 Extensión del haz ultrasónico	32
3.3.4 Reflexión y refracción del haz ultrasónico.....	33
3.4 Técnicas de ensayo por Ultrasonido	35
3.4.1 Técnica pulso - eco.....	35
3.4.2 Técnica de transparencia.....	37
3.4.3 Técnica por inmersión.....	37
3.4.4 Técnica de reflexión.....	38
3.5 Sistemas de representación	39
3.5.1 Barrido A-Scan	39
3.5.2 Barrido B-Scan	40
3.5.3 Barrido C-Scan	40
3.6 Utilización del transductor angular	41
3.7 Selección de un transductor	43
Capítulo IV: Modelamiento y determinación teórica del área crítica de inspección de los ejes por ultrasonido.....	44
4.1 Sistema: Manejo de rollizos.....	44
4.1.1 Componentes del sistema de manejo de rollizos.....	45

4.1.2 Características polín pateador	47
4.2 Sistema: Separadores de nudos y clasificación	49
4.2.1 Componentes sistema separadores de nudos y clasificación.....	49
4.2.2 Características del eje motor harnero Delta Combi	51
4.3 Modelamiento y análisis de los ejes a inspeccionar	52
4.3.1 Polín pateador	53
4.3.2 Eje motor harnero Delta Combi DC10	55
Capítulo V: Parametrización del equipo ultrasónico	57
5.1 Calibración del equipo Epoch 4.....	60
5.1.1 Calibración Longitudinal.....	61
5.1.2 Calibración Angular.....	63
Capítulo VI: Inspección general por ultrasonido de los ejes modelados	65
6.1 Inspección general del Polín pateador	65
6.1.1 Lado Accionamiento	66
6.1.2 Lado Conducido.....	70
6.2 Inspección general del eje Motor Harnero.....	72
Capítulo VII: Inspección por ultrasonido de los ejes en las áreas encontradas en Pro/Engineer	75
7.1 Inspección Polín pateador	75
7.2 Inspección eje motor harnero	76
Conclusiones.	78
Bibliografía.....	80
ANEXOS.....	82

Índice de Figuras

Fig. 1 Falla por fatiga de una pieza forjada.....	8
Fig. 2 Inicio y propagación de la grieta.....	10
Fig. 3 Creación de concentraciones de esfuerzos.....	11
Fig. 4 Diagrama de combinación de esfuerzos estático y cíclico.....	13
Fig. 5 Diagrama de esfuerzo cíclico alterno.....	13
Fig. 6 Diagrama de solicitaciones cíclicas combinadas con esfuerzo estático.....	14
Fig. 7 Gráficos de Wöhler.....	15
Fig. 8 Diagramas de esfuerzos.....	16
Fig. 9 Diagrama Tensión Vs. Número de Ciclos.....	17
Fig. 10 Límite de Fatiga.....	10
Fig. 11 Componente del transductor ultrasónico.....	30
Fig. 12 Campo cercano.....	31
Fig. 13 Extensión del haz ultrasónico de un transductor plano.....	32
Fig. 14 Refracción del haz ultrasónico.....	34
Fig. 15 Señal Pulso-eco.....	36
Fig. 16 Técnica de Transparencia.....	37
Fig. 17 Técnica por inmersión.....	38
Fig. 18 Técnica por reflexión.....	38
Fig. 19 Barrido A-Scan.....	39
Fig. 20 Barrido B-Scan.....	40
Fig. 21 Barrido C-Scan.....	41
Fig. 22 Ensayo transversal.....	41
Fig. 23 Camino recorrido por un haz ultrasónico transversal.....	42
Fig. 24 Ubicación sistema manejo de rollizos en área preparación madera	44
Fig. 25 Componentes manejo de rodillos.....	46
Fig. 26 Ubicación física en línea norte.....	48
Fig. 27 Ubicación harnero delta combi.....	49

Fig. 28 Componentes del sistema de separación de nudos y clasificación..	50
Fig. 29 Harnero Delta Combi DC10.....	51
Fig. 30 Motor Harnero Delta Combi.....	52
Fig. 31 Polín pateador.....	53
Fig. 32 Cargas actuantes en polín.....	54
Fig. 33 Convergencia del análisis.....	54
Fig. 34 Eje motor harnero Delta Combi DC10.....	55
Fig. 35 Cargas actuantes en eje motor harnero Delta Combi DC10.....	56
Fig. 36 Convergencia del análisis.....	56
Fig. 37 Colector Epoch 4.....	60
Fig. 38 Bloque Patrón.....	61
Fig. 39 Pantalla de Calibración Longitudinal.....	62
Fig. 40 Pantalla de Calibración Angular 45°.....	63
Fig. 41 Patrón verificador de ángulo.....	64
Fig. 42 Polín Pateador.....	65
Fig. 43 Plano Polín.....	66
Fig. 44 Vista Lateral Polín.....	66
Fig. 45 Vista Frontal Polín.....	66
Fig. 46 Dimensiones Lado Accionamiento.....	67
Fig. 47 Pantalla 1ª Inspección.....	68
Fig. 48 Pantalla 2ª Inspección.....	68
Fig. 49 Pantalla 3ª Inspección.....	68
Fig. 50 Pantalla 4ª Inspección.....	68
Fig. 51 Pantalla 1ª Inspección.....	69
Fig. 52 Pantalla 2ª Inspección.....	69
Fig. 53 Vista Frontal.....	70
Fig. 54 Vista Lateral.....	70
Fig. 55 Dimensiones Lado Conducido.....	70
Fig. 56 Lado Conducido.....	71
Fig. 57 Detalle de maquinado.....	71
Fig. 58 Motor Harnero Delta-Combi.....	72

Fig. 59 Anillo de retención.....	73
Fig. 60 Eje motor Harnero.....	73
Fig. 61 Pantalla 1ª Inspección.....	73
Fig. 62 Pantalla 2ª Inspección.....	73
Fig. 63 Pantalla 3ª Inspección.....	74
Fig. 64 Pantalla 4ª Inspección.....	74
Fig. 65 Pantalla Inspección Longitudinal.....	75
Fig. 66 Pantalla Inspección Angular.....	75
Fig. 67 Pantalla 1ª Inspección.....	76
Fig. 68 Pantalla 2ª Inspección.....	76
Fig. 69 Plano Polín Pateador.....	93
Fig. 70 Tensiones Von Mises.....	95
Fig. 71 Tensiones Von Mises (ampliación).....	95
Fig. 72 Análisis de Fatiga.....	96
Fig. 73 Confiabilidad de vida.....	96
Fig. 74 Plano Eje Motor Harnero Delta-Combi.....	98
Fig. 75 Modificación plano Eje Harnero Delta-Combi.....	99
Fig. 76 Tensiones Von Mises.....	101
Fig. 77 Tensiones Von Mises (ampliada).....	101
Fig. 78 Análisis de Fatiga.....	102
Fig. 79 Confiabilidad de vida.....	102

Índice de Tablas.

Tabla N° 1 Ángulos comúnmente usados en cálculos ultrasónicos.....	43
Tabla N° 2 Materiales polín pateador.....	48
Tabla N° 3 Cálculos para inspección longitudinal.....	58
Tabla N° 4 Cálculos para inspección transversal.....	59
Tabla N° 5 Características de los materiales usados como transductores en los palpadores.....	83
Tabla N° 6 Ventajas y desventajas de diferentes materiales para transductores.....	83
Tabla N° 7 Propiedades Mecánicas Monótonas de los Materiales.....	88
Tabla N° 8 Propiedades Mecánicas Cíclicas de los Materiales.....	89
Tabla N° 9 Propiedades Mecánicas Acero A-106.....	90
Tabla N° 10 Propiedades Mecánicas Acero A 36.....	91
Tabla N° 11 Velocidades de Propagación del sonido.....	104

Resumen

El siguiente trabajo presenta una simulación de 2 ejes: polín pateador y eje motor harnero Delta-Combi de Celulosa Arauco y Constitución Planta Valdivia, en busca de las áreas más probables a fallar por fatiga, simulado con el módulo Pro/Mechanica del software Pro/Engineer, para su posterior inspección con equipo de ultrasonido.

El objetivo principal de trabajo es disminuir los tiempos de inspección, y proporcionar un procedimiento de inspección para el ensayo ultrasónico.

Se realiza una inspección general de los ejes mediante ultrasonido en busca de falla, posteriormente se modelan los ejes en Pro/Mechanica buscando las áreas críticas, encontradas las áreas se realiza una nueva inspección, pero ahora se concentra la inspección sólo al área definida por el programa.

Summary

The following work presents a simulation of 2 shafts: Kicker Polín and motor shaft screen Delta-Combi of Celulosa Arauco and Constitución Planta Valdivia, in search of the most probable areas to fail for fatigue, simulated with the module Pro Mechanica of the software Pro Engineer, for your later inspection with equipment of ultrasound.

The principal objective of work is to decrease the times of inspection, and to give a procedure of inspection for the ultrasonic test.

A general inspection of the shafts through ultrasound in search of failure is accomplished, Later they model the shafts in Mechanica looking for the critical areas, once the areas were found a new inspection is accomplished, but now the inspection is concentrated to the area defined by the program only.

Introducción

En ingeniería y en toda empresa con un proceso productivo importante, es necesario saber cómo responden las máquinas herramientas y en especial los materiales sólidos que las componen, puesto que dichos materiales se encuentran sometidos a esfuerzos como tensión, compresión, torsión y flexión, que son producto de las fuerzas externas que actúan sobre ellos, como también del estudio de estos en servicio, para su correcto funcionamiento.

Debe tenerse en cuenta, que las sollicitaciones predominantes a que generalmente están sometidos, no son estáticas, por el contrario, dependen del tiempo y de la forma en que son aplicadas; además, se repiten continuamente hasta producir la falla en el material.

Sin embargo, los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con una deformación elástica, en la que el material vuelve a su tamaño y forma original cuando la fuerza externa es eliminada, por otra parte, también se puede ver afectada por una deformación plástica o permanente, y esta puede llevar a producir plastodeformación y las fuerzas fluctuantes pueden producir la falla por fatiga, aun cuando la fuerza aplicada esté por debajo del límite de fluencia del material.

Las fallas por fatiga comienzan con una pequeña microgrieta, que generalmente se desarrollan en donde se encuentran las mayores concentraciones de esfuerzos, como son los cambios de sección, chaveteros, inclusiones producidas durante la fabricación, deficientes acabados superficiales, etc., siendo ésta tan diminuta que no puede percibirse a simple vista; y es así, como a medida que el material es sometido a un tiempo prolongado de trabajo, la grieta va creciendo hasta llegar a ser mayor que el tamaño de un grano y es cuando empieza a abrirse camino por la estructura molecular llegando a ser tan grande que la fractura del material es inminente. Ésta indicación incipiente es bastante difícil de localizar por los métodos comúnmente usados.

Tanto los software como los equipos de ultrasonido y/o de radiografía, nos permiten adelantarnos y prever las fallas en los elementos mecánicos de todo uso; es así como al incorporar el uso de software modernos en ingeniería, tales como el Pro/Engineer, ALGOR, COSMOS, ANSYS entre otros, nos facilitan el trabajo y el ahorro de tiempo para ubicar las zonas de mayor interés, pudiendo simular su comportamiento, y de esta forma encontrar los mayores esfuerzos y deformaciones, bajo la acción de ciertos estados de carga.

En la actualidad, en el área de mantenimiento predictivo, es de uso común las pruebas no destructivas (N.D.T. Non Destructive Testing) siendo de gran ayuda para la detección de fallas incipientes en elementos de gran importancia para el funcionamiento de cualquier equipo.

Para la detección de estas fallas los equipos de ultrasonido son los más utilizados, teniendo el inconveniente que el proceso ultrasónico se hace muy extensivo, por no saber donde se encuentra el área más propensa a fallar por fatiga y así poder acotar el problema.

Hipótesis

Es posible encontrar, por medio del software Pro/Engineer, las áreas de los ejes de: polín pateador y motor harnero Delta Combi, mas propensas a fallar por fatiga, para su posterior inspección con un equipo de ultrasonido.

Objetivo General

- A partir de los ejes señalados anteriormente (hipótesis), y a través del software Pro/Engineer, encontrar las áreas en las cuales se presenten las mayores probabilidades de falla por fatiga, para sus inspecciones mediante un equipo de ultrasonido.

Objetivos Específicos

- Modelar y analizar los ejes sometidos a carga variable y encontrar las áreas con mayor probabilidad de falla por fatiga por medio del software Pro/Engineer.
- Inspeccionar con un equipo de ultrasonido los ejes mencionados anteriormente.
- Comparar datos entregados por el software Pro/Engineer con los del equipo de ultrasonido.

Metodología de Trabajo

- Buscar las especificaciones técnicas de los ejes a inspeccionar.
- Identificación en terreno de los ejes de los equipos mencionados.
- Investigar teoría sobre el módulo Pro/Mechanica Fatigue Advisor.
- Modelamiento de los ejes con el software Pro/Engineer.

- Modelamiento de los ejes con el módulo Pro/Mechanica Fatigue Advisor.
- Inspección de las áreas encontradas, en los ejes con un equipo de Ultrasonido.
- Verificación de los datos entregados por el software Pro/Engineer con los obtenidos por un equipo de ultrasonido.

Capítulo I: Fatiga en los materiales

1.1 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, eje flexible, etc.

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

a) Deformación y rigidez.

- Deformación por flexión.
- Deformación por torsión.
- Inclinación de descansos y elementos soportados por ejes.
- 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.

1.2 Fatiga

El fenómeno por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de esfuerzos variables en el tiempo, se denomina, "*Fatiga*". Esta ocurre porque hay deformaciones plásticas **cíclicas** que provocan cambios irreversibles en la dislocación de la microestructura de los materiales.

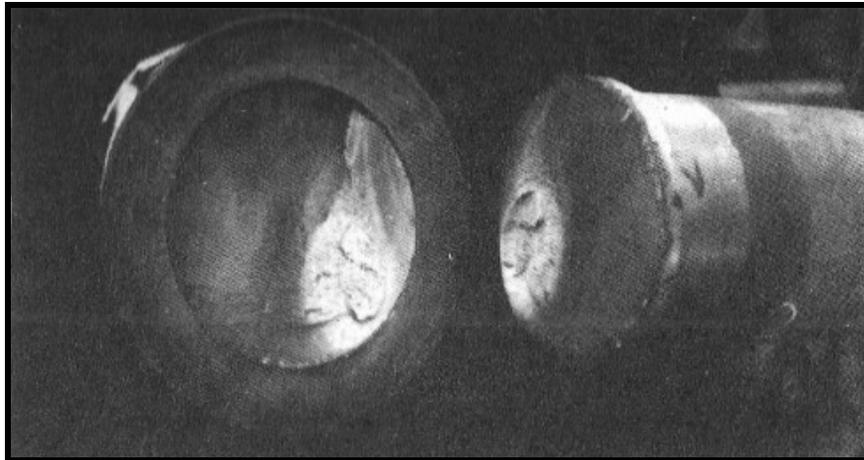


Figura 1 Falla por fatiga de una pieza forjada de 7 1/2 in de diámetro con ajuste a presión. La probeta es de acero UNS G10450, normalizado y revenido, fue sometida a flexión rotatoria.

En 1860, Wöhler desarrolló 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***.

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 microgrietas por el efecto repetitivo de las 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 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. [2]

➤ **Física de la fatiga**

Desde 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 2 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.

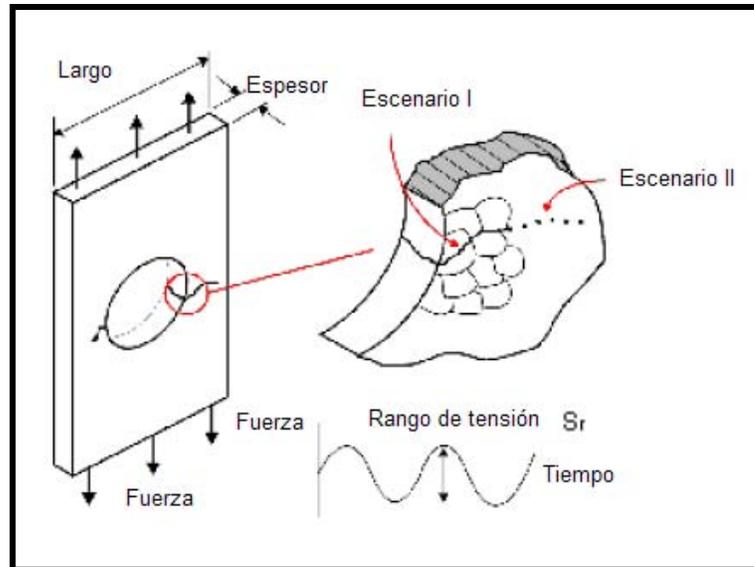


Figura 2 Inicio y propagación de la grieta.

1.2.1 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.

- La primera corresponde a una fase donde se producen los primeros cambios microestructurales.
- En la segunda etapa se inician las macrogrietas y la formación de fisuras con tamaños similares al tamaño del grano del material.
- Y 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, cambia su dirección de propagación, en la primera etapa de crecimiento sigue la dirección del máximo plano de esfuerzo al corte, o 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 3, después de esta etapa, la grieta se propaga perpendicularmente en la dirección de la carga aplicada.

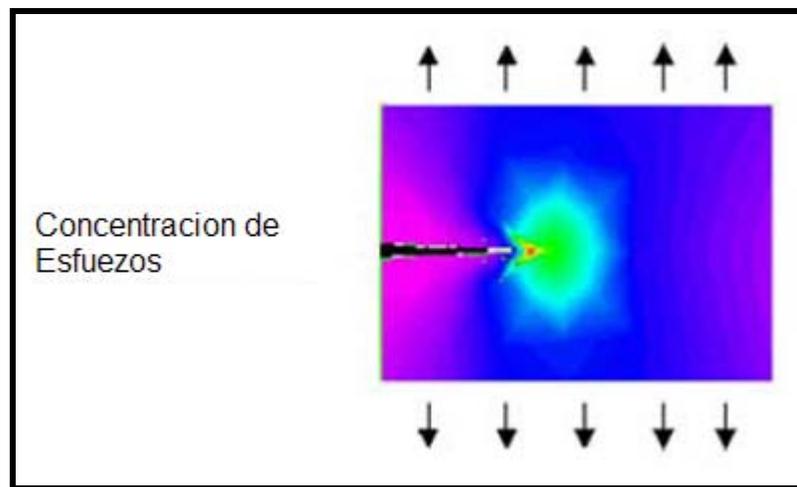


Figura 3 Creación de concentraciones de esfuerzos.

Como el mecanismo físico en la fatiga está 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. [1]

Por lo tanto, una predicción íntegra de la vida a la fatiga sería usando ambos métodos:

Vida Total = tiempo de iniciación + tiempo para propagar grieta hasta la falla

1.2.2 Factores que le 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 atmósfera de trabajo, presencia de entallas, etc. Todos estos factores son tenidos 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 de estos factores son:

- a) **Concentración de tensión o presencia de entallas:** se usa ante la presencia de entallas, agujeros en el material.
- b) **Carga y/o factor de carga:** considera si la carga es axial, corte, torsión o combinación.
- c) **Tamaño:** influye las dimensiones de la pieza.
- d) **Temperatura:** dado que la temperatura de operación puede generar problemas de fragilización del material o por el contrario, las altas temperaturas afectan cuando la tensión se aproxima a la de fluencia.
- e) **Acabado superficial:** debido a que la pieza no tiene el grado de pulido y acabado de la pieza de laboratorio.

1.2.3 Cargas cíclicas

Las cargas variables se pueden presentar como una combinación entre cargas dinámicas alternas actuando simultáneamente con cargas estáticas, tal como lo muestra el diagrama de esfuerzos estáticos y cíclicos.

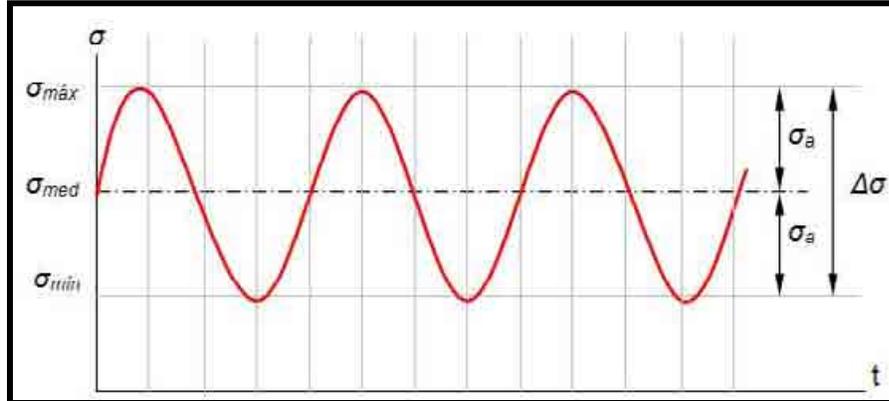


Figura 4 Diagrama de combinación de esfuerzos estático y cíclico.

Donde:

- $\sigma_{\text{máx}}$: esfuerzo máximo en el ciclo
- σ_{med} : esfuerzo medio
- $\sigma_{\text{mín}}$: esfuerzo mínimo en el ciclo
- σ_a : amplitud del esfuerzo alterno
- $\Delta\sigma$: rango de esfuerzo

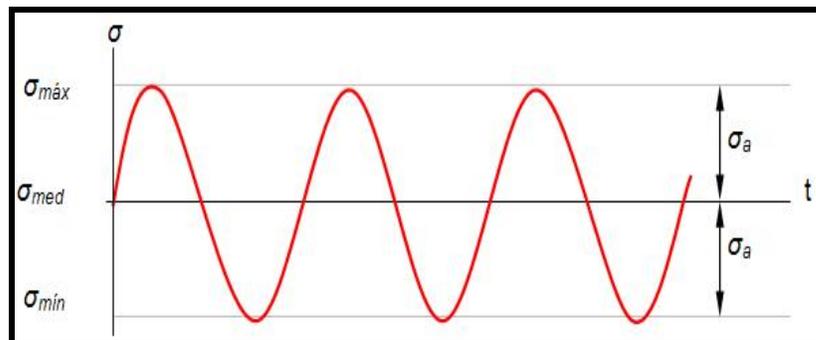


Figura 5 Diagrama de esfuerzo cíclico alterno.

En la práctica se pueden presentar una gama de combinaciones de esfuerzos cíclicos alternos con estáticos, donde el comportamiento del material dependerá de la intensidad y proporción de cada uno, entre los cuales se distinguen las siguientes combinaciones:

Alterno puro, alterno con pre-tensión, oscilante puro, oscilante con pre-tensión, estático.

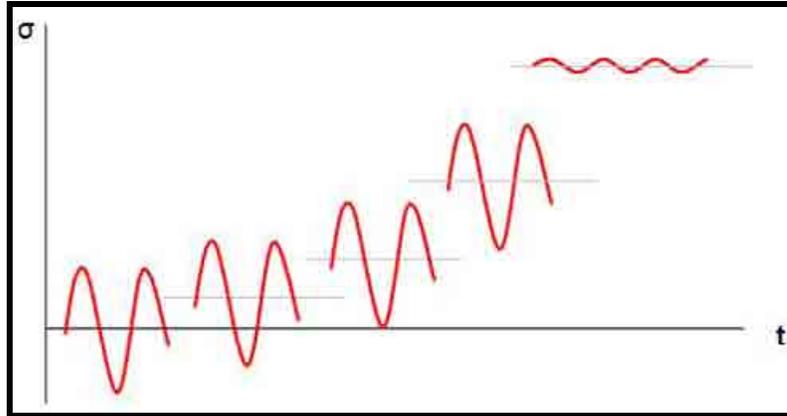


Figura 6 Diagrama de solicitaciones cíclicas combinadas con esfuerzo estático.

El comportamiento del material a soportar cargas alternas se representa en el diagrama de Wöhler, este diagrama es semi-logarítmico, donde en la abscisa se representa el log del N^o de ciclos de carga que soportó el material antes de fallar por fatiga; mientras que en la ordenada se representa el esfuerzo aplicado.

Se debe repetir la operación con una nueva probeta, pero con un esfuerzo inferior. Así sucesivamente, hasta llegar a un valor de esfuerzo en que la probeta no se fatigue (del orden de los cinco millones de ciclos). Esto significa que la probeta durará indefinidamente sin fallar; por lo tanto, se ha obtenido el esfuerzo de resistencia ilimitada a la fatiga. [3]

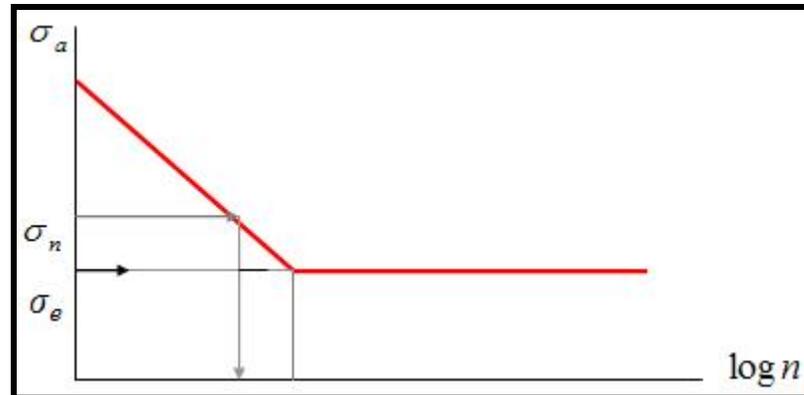


Figura 7 Gráficos de Wöhler.

1.2.4 Diagrama esfuerzo - número de ciclos (σ -N)

En una prueba de fatiga, los elementos moldeados en reloj de arena de diferentes tipos de materiales son subordinados para los tipos diversos de carga cíclica, como: torsión, tensión, y compresión. La aproximación E-N usa estas pruebas para medir la vida a la fatiga. Los resultados son representados gráficamente en términos de los esfuerzos (E) vs ciclos para la falla (N) en un diagrama E-N.

El módulo de Pro/Engineer, Pro/Mechanica utiliza un conjunto genérico de propiedades de fatiga para modelar aceros de baja aleación, aceros no aleados, aleaciones de aluminio, y aleaciones de titanio, estas propiedades genéricas han sido recopiladas por Baumel Jr. y Seeger y son conocidas como las **Leyes de Materiales Uniformes**.

Típicamente los efectos se concentran a lo largo de la vida en el final del diagrama, con el esfuerzo medio de tensión reduciendo la vida y el esfuerzo medio de compresión extendiéndola.

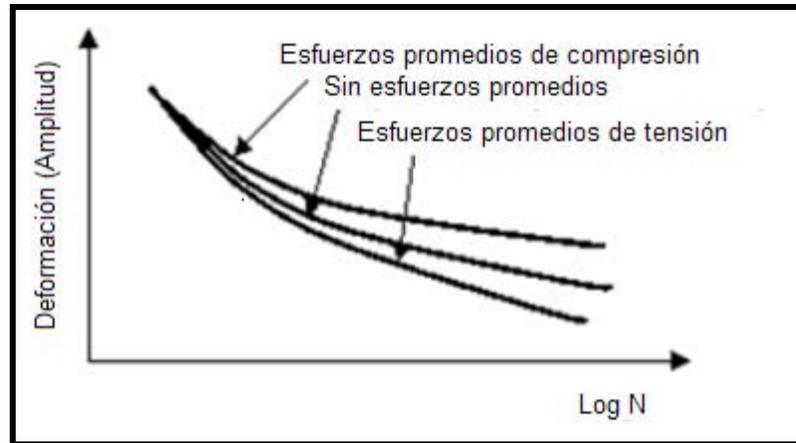


Figura 8 Diagramas de esfuerzos.

Varias relaciones empíricas han sido desarrolladas para modelar el efecto de esfuerzo medio. De todos los métodos propuestos, dos han sido más ampliamente aceptados:

- La aproximación Smith Watson Topper.
- La corrección Morrow.

Para las secuencias de carga que por naturaleza son en su mayoría de tensión, la aproximación de Smith, Watson, Topper es más conservadora y se recomienda. En el caso donde la carga es mayormente compresiva, en particular para ciclos completamente compresivos, la corrección de Morrow puede usarse para dar estimaciones de vida más reales.

Pro/Mechanica usa ambos métodos y el método más apropiado está automáticamente escogido.

1.2.5 Diagrama tensión - número de ciclos (S-N)

El diagrama S-N es la forma fundamental de representar los datos de la duración de una probeta a la fatiga, ilustra la variación de vida media en fatiga con la tensión. Se suele llamar **Curva de Fatiga o Curva S-N** (Stress-Number

of Cycles), e indica la duración de la probeta expresada en números de ciclos hasta la rotura para la máxima tensión aplicada. Representa en ordenadas las tensiones máximas que producen la rotura por fatiga; y en abscisas, su duración en ciclos (suele representarse $\log N$ en lugar de N). Proviene de someter a ensayos una serie de probetas para determinar el número de ciclos, es un modelo simplificado de la manera en que trabaja una pieza bajo cargas de fatiga en general.

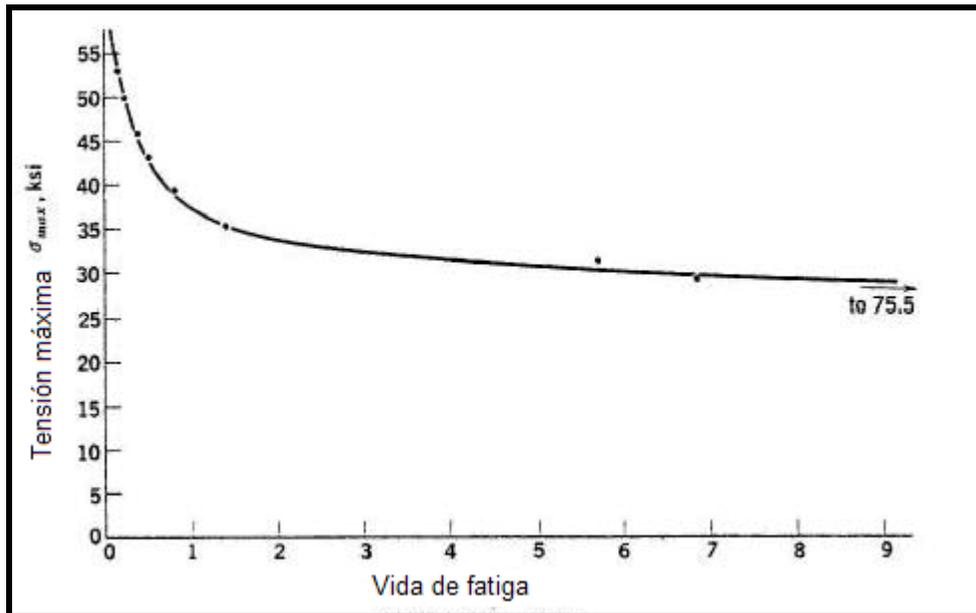


Figura 9 Diagrama Tensión Vs. Número de Ciclos.

En la curva de la figura 9 pueden distinguirse dos zonas: la que comprende un bajo número de ciclos aplicados (fatiga oligocíclica), y la de bajo nivel de tensión aplicada (fatiga multicíclica).

En la primera zona, el daño "puro" por fatiga se ve acompañado por el producido por las deformaciones plásticas que son apreciables a esos altos niveles de tensión. La segunda zona es muy larga, lo que obliga a la selección de una escala logarítmica. La rama extrema de la curva se asimila a veces a una recta y otras a una curva.

De todas maneras la porción inferior tiende hacia la horizontal, y en ciertos materiales realmente llega a ser horizontal para todos los propósitos

prácticos. Cuando la curva S-N se acerca asintóticamente a la horizontal, la tensión correspondiente se llama **límite de fatiga**, y la vida en fatiga a tensiones más bajas se presume infinita.

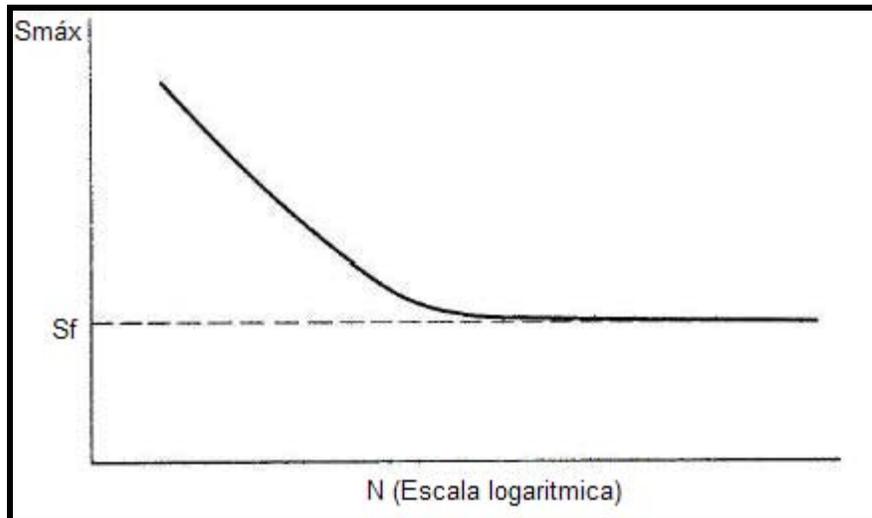


Figura 10 Límite de Fatiga.

Del análisis de la curva surge que el número de ciclos que soporta una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión S aplicada. Algunos materiales (ferrosos, aceros, titanio) presentan un tramo horizontal a un valor de tensión bien determinado conocido como límite de fatiga (límite de resistencia), valor por debajo del cual se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin fracturarse. En el caso de materiales no ferrosos (Al, Mg, Cu) estas curvas son asintóticas a la horizontal, lo cual implica que no existe un verdadero límite de fatiga, por lo tanto se utiliza un número de ciclos convenido arbitrariamente inferior a ese valor, bajo el cual se supone que la pieza resistirá infinitos números de ciclos.

Por lo tanto los metales ferrosos tienen generalmente límite de fatiga, mientras que los metales no-ferrosos frecuentemente no.

Debido a estas características el límite de fatiga (S_f) constituye un criterio de diseño muy aceptable. Por ello es una magnitud frecuentemente tabulada, aunque por razones obvias debe basarse en ensayos "finitos" (500 millones de

ciclos para aleaciones de aluminio y magnesio, 100 millones para las aleaciones de base Cu y Ni). Téngase presente que para las frecuencias usuales de las máquinas de ensayo, se requieren 5 semanas para 500 millones de ciclos.

1.2.6 Daños por Fatiga

Se debe tener en cuenta que las fisuras por fatiga se nuclean en los primeros ciclos de carga, pero su propagación involucra muchos factores, uno de los más importantes es el gradiente de tensiones. Las fisuras comienzan en regiones de altas tensiones, pero si crecen en la dirección en que las tensiones disminuyen, su crecimiento es lento e incluso puede llegar a detenerse; además, las fisuras pueden propagarse a diferentes velocidades en distintos materiales y bajo diferentes condiciones.

El orden en el cual los niveles de tensión son aplicados tiene un efecto importante en el progreso del daño por fatiga. Es lógico pensar que si aparece una fisura con la aplicación de altos niveles de tensión, no se propagará rápidamente si luego se aplican tensiones más bajas; por el contrario, si aparece una fisura con la aplicación de bajas tensiones, es probable que se propague rápidamente si se aumentan las tensiones. Estos efectos tienden a promediarse si los niveles de tensión se aplican aleatoriamente.

La **teoría del daño acumulado** estipula que cada serie de ciclos de tensión se cuenta como una cierta fracción del daño total, y cuando estas fracciones sumadas llegan a la unidad ocurre la fractura.

La fracción del daño total ocasionado por una serie de ciclos a un determinado nivel de tensión está dado por la relación entre el número de ciclos aplicados (a ese nivel de tensión), y la vida en fatiga a esa tensión (relación de ciclos $C = n_i / N_i$, donde N se obtiene de las curvas S-N para un dado P por ciento de supervivencia).

➤ Criterios de Diseño

A partir de la incertidumbre que genera el desconocimiento de las causas que originan la fatiga, se debe recurrir necesariamente a ensayos, cálculos estadísticos y simulaciones para arribar a datos confiables. Para calcular la **vida real** de una pieza, la única forma es efectuar los ensayos necesarios simulando las condiciones de servicio de la forma más real posible. Surgen así dos criterios de diseño:

- **Falla Segura (SAFE-FAIL):** asegura que la falla de la pieza no afecte al resto del conjunto o estructura.
- **Vida Asegurada (SAFE-LIFE):** asegura la vida del elemento sometido a fatiga, durante determinado tiempo (o número de ciclos) de uso.

1.3 Pro/Mechanica Fatigue Advisor

Como se mencionó anteriormente cuándo un elemento mecánico experimenta ciclos repetidos de carga, puede fallar aun si las tensiones están debajo de valores seguros para niveles estáticos constantes de carga.

Pro/Mechanica Fatigue Advisor es un módulo del software Pro/Engineer, en el que se puede modelar y analizar distintos elementos, los que pueden ser de distintas especialidades, usado para predecir y mejorar la función de fatiga en los diseños a primera hora del ciclo de vida del producto, ayudando a su vez a reducir el costo del diseño. La tecnología usada por Fatigue Advisor es suministrada por nCode International.

Fatigue Advisor trabaja enteramente dentro de Pro/Mechanica Structure; simplemente se especifica un análisis estático existente, luego se definen las características de los materiales e historia de carga junto con la vida requerida para el diseño para el estudio, además se puede usar la biblioteca de materiales y el generador de historia de carga incluido en el software o también se puede importar esta información.

Fatigue Advisor calcula los siguientes puntos:

- **Vida** – determina los ciclos previstos para la falla.
- **Daño** – las medidas porcentuales de daño debido a la carga.
- **Factor de seguridad** – estimación del coeficiente de seguridad basado en la falla prevista.
- **Confianza de vida** – las medidas de confiabilidad de los resultados.

Se puede definir y revisar estos resultados usando herramientas estándar de visualización de Pro/Mechanica incluyendo alrededores, contornos, y gráficas; además, se puede definir y hacer un monitoreo local, medidas globales de resultados para la sensibilidad y la optimización de los diseños en estudio. También crear modelos paramétricos, asignar un rango permisible a cada parámetro, especificar metas del diseño y límites de desempeño. Este módulo trabaja con el método esfuerzo-número de ciclos (E-N).

Capítulo II: Ensayos no destructivos

2.1 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.

Para esto, los ensayos deben ser realizados bajo procedimientos escritos estrictos, que atienden a los requisitos de las principales normas de fabricación mundial tales como el ASME (American Society of Mechanics Engineering).

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.

2.2. Tipos de ensayos no destructivos (E.N.D)

2.2.1 Ensayos radiográficos

La radiografía industrial se usa para detectar variaciones de una región de un determinado material, que presenta 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.

2.2.2 Líquidos penetrantes

Este ensayo se presta para detectar discontinuidades superficiales y que estén abiertas a la superficie, tales como grietas, fisuras, poros, etc., pudiendo aplicarse en todos los materiales sólidos y que no sean porosos o con superficie muy rugosa. Es muy utilizado en materiales no magnéticos como el aluminio, magnesio, aceros inoxidable austeníticos, ligas de titanio y zirconio, además de los materiales magnéticos. También es aplicado en cerámicas vitrificadas, vidrio y plásticos.

El método consiste en pintar con un líquido la sección a inspeccionar, dejándolo actuar aproximadamente por 15 minutos para que este penetre, luego se aplica un revelador, el cual hace aflorar la tinta que penetró en el material, dejando al descubierto las indicaciones que pudiesen existir.

2.2.3 Inspección visual

Este ensayo solo consiste en observar con mucha detención todas las partes donde exista algún tipo de indicio de fractura o desprendimiento de material, generalmente se hace con una linterna, una lupa (-10x), limpiadores, que serian las herramientas mínimas para hacer una buena inspección.

2.2.4 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 cuando se requiere un trabajo de mantenimiento en alguna pieza específica de un equipo en operación.
- Eliminar el desmantelamiento innecesario para inspecciones internas.
- 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 requieren mantenimiento, consiguiendo así óptimos resultados en la gestión, ya que solo se realizarán las reparaciones necesarias.

2.2.5 Termografía

Consiste en la obtención de imágenes térmicas del elemento indicado.

Además el estudio, preparación y presentación de reporte gráfico de imágenes, con las siguientes indicaciones:

- Puntos calientes (máximos y mínimos),
- Perfiles de temperatura, incluyendo curva de temperatura en función de la zona por la cual fue trazado el perfil (se presentará el perfil en los casos que se estime más representativo que la indicación por puntos),
- Posible localización de fallas ocasionadas por problemas térmicos.

2.2.6 Mediciones de espesores por ultrasonido

Mediante el ultrasonido y los procedimientos recomendados por ASME se puede determinar los espesores de las partes de equipos expuestos a corrosión, abrasión o desgaste.

Los estanques y tuberías presurizadas o a presión atmosférica, están sujetos a corrosión, es decir, a la pérdida de material que va disminuyendo el espesor de la pared y que puede llegar a condiciones críticas.

El ensayo ultrasónico sirve no tan solo para medir espesores, o fugas en tuberías, válvulas, etc., sino que también para buscar fallas en los materiales a inspeccionar y éste se verá en mayor extensión en el capítulo siguiente ya que será relevante para el desarrollo de este trabajo.

Capítulo III: Ultrasonido

3.1 Introducción

El Ultrasonido es una **señal** de audio que no puede ser percibida por el oído humano, sirve en múltiples aplicaciones y es en muchos casos la manera de dar solución a problemas de una manera menos costosa; sin embargo, dependiendo de la aplicación su implementación puede ser de mayor o menor complejidad.

El ensayo no destructivo por medio del ultrasonido se ha desarrollado principalmente a partir de la segunda guerra mundial, siendo los primeros aplicados por Sokolov en 1929, posteriormente, Firestone en 1942, aplicó el principio del sonar, para la detección de heterogeneidad en los materiales mediante una serie reflejada.

Su funcionamiento se remite básicamente a los mismos principios que los materiales piezoeléctricos, convirtiendo la energía mecánica en eléctrica y viceversa.

Aplicaciones generales

Estos ensayos tienen un amplio campo de aplicación y prevé una mayor propagación con el pasar del tiempo, pudiéndose nombrar:

- Medición de espesores.
- Ensayos en soldaduras.
- Ensayos en cañerías y tubos.
- Ensayos en planchas.
- Ensayos en barra, palanquillas y ejes.
- Ensayos a materiales compuestos.
- Ensayos a elementos electrónicos.

- Ensayos en metales, plásticos, vidrios, gomas, fibra de vidrio, compuestos y otros.

Tales defectos como: burbujas de gas en fundidos, doble laminación en planchas, microgrietas en forjados, escorias en uniones soldadas entre muchas otras, son caracterizados por el propio proceso de fabricación de la pieza o elemento a examinar; por lo tanto, este ensayo, así como todo ensayo no destructivo, busca disminuir el grado de incertidumbre en la utilización de materiales o elementos fundamentales para el correcto funcionamiento de cualquier equipo o máquina.

➤ **Ventajas y Limitaciones**

La serie de ventajas que a continuación se nombran, no significa que este método sea el más conveniente para todos los ensayos, ya que existen limitaciones en su uso, las cuales se pueden dar por la naturaleza del material, el tipo de estructura interna, condiciones de la superficie a examinar, geometría, etc.

- Elevada sensibilidad de detección.
- Posibilidad de inspeccionar volumétricamente el material, aun tratándose de espesores del orden de 5 mm. en metales.
- Rapidez de examen y resultado inmediato.
- Ausencia de riesgo para el operador y personal circulante.
- Facilidad del registro y compatibilidad con sistemas de comunicación para la creación de reportes y exportación al PC.

Además se requiere que el operador tenga un mayor conocimiento y entrenamiento con respecto a otros tipos de ensayos.

3.2 Generación del ultrasonido

Existen varios métodos para generar ondas ultrasónicas, en principio sirven ya los mismos procedimientos que se emplean para generar sonidos audibles.

Sin embargo esos procedimientos mecánicos y algunos otros principios, no se utilizan en el ensayo no destructivo, recurriéndose a efectos físicos, como: el efecto magnetoestrictivo y piezoeléctrico.

3.2.1 Efecto magnetoestrictivo

Los materiales ferromagnéticos (especialmente el níquel, además del acero), tienen la propiedad de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético; inversamente, en una barra de acero ferromagnético se produce un campo magnético si es expuesta a un esfuerzo de tracción o compresión.

3.2.2 Efecto piezoeléctrico

Reviste una importancia mucho mayor, siendo aprovechado casi universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Ciertos cristales naturales o sintetizados tienen la propiedad que en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en su superficie, la carga cambia de signo si se invierte la dirección del esfuerzo, así es que en las superficies de un cristal expuesto alternativamente a un esfuerzo de tracción y un esfuerzo de compresión existe un potencial alternativamente positivo y negativo (tensión alterna).

El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, cuando se aplica una carga eléctrica a la superficie del cristal, esta se contrae o se expande según el

signo de la carga eléctrica. Una tensión eléctrica alterna, aplicada a las superficies del cristal, da origen a oscilaciones mecánicas de presión (expansión y contracción).

Este efecto no es propio de todos los cristales y sólo se produce en determinadas condiciones. El ejemplo más conocido es el cuarzo.

3.2.3 Características de algunos materiales piezoeléctricos

Cuarzo: fue el primer material usado, tiene características muy estables en frecuencia; sin embargo, es muy pobre como generador de energía acústica y es comúnmente reemplazado por materiales más eficientes.

Sulfato de litio: es muy eficiente como receptor de energía acústica, pero es muy frágil, soluble en agua y su uso está limitado a temperaturas por debajo de los 75° C.

Cerámicas sinterizadas: producen los generadores más eficientes de energía acústica, pero tienen tendencia al desgaste.

En el anexo 1 se aprecian las características de los materiales más usados como generadores de ultrasonido

3.3 Transductores

Un transductor convierte una forma de energía en otra, un transductor ultrasónico convierte energía eléctrica en energía mecánica del tipo sonora y viceversa. Se utiliza generalmente el *titanato de bario* en forma de pastilla sintetizadas policristalinas polarizadas, cuando se trata de generar ondas ultrasónicas con baja frecuencia a los 10 MHz, pero no pueden operar con

temperaturas superiores a los 80 / 100° C, salvo que tenga un dispositivo de refrigeración en la sonda.

Los cristales de cuarzo son utilizados normalmente para construcción de transductores, para generar haces ultrasónicos de elevada frecuencia, superior a los 10 MHz, son también apropiados para transductores que deben trabajar a altas temperaturas, ya que su punto de curie, (temperatura a la cual el cristal pierde sus propiedades piezoeléctricas) es de casi 550° C.

3.3.1 Componentes del transductor ultrasónico

Este dispositivo es capaz de generar y recibir vibraciones de alta frecuencia ultrasónica y sus principales componentes son:

- a) Elemento activo.
- b) Respaldo o apoyo.
- c) Placa de desgaste.

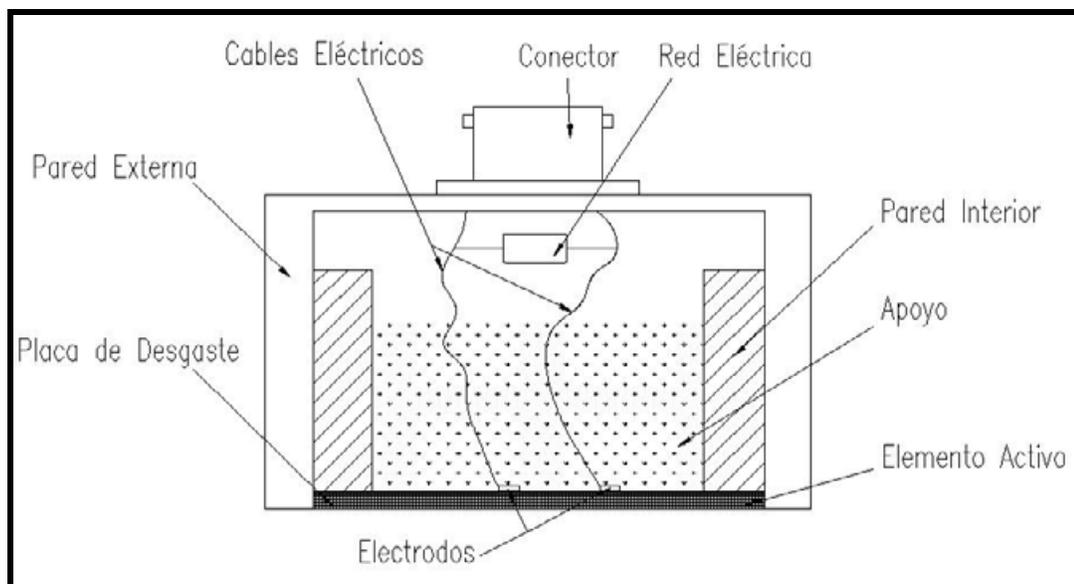


Figura 11 Componente del transductor ultrasónico.

- a) **Elemento activo:** es de material piezoeléctrico o ferroeléctrico, convierte energía eléctrica en pulso de excitación de energía ultrasónica para la detección de fallas.
- b) **Respaldo o apoyo:** es de alta atenuación, alta densidad y controla la vibración del transductor absorbiendo la energía irradiada desde la espalda del elemento activo.
- c) **Placa de desgaste:** su función principal es de proteger el elemento transductor del medio, ayudándolo a aumentar su duración y resistencia a la corrosión.

3.3.2 Campo cercano

El campo sonoro de un transductor ultrasónico, está dividido en dos zonas; campo cercano y campo lejano. El campo cercano es una zona recta que nace desde el transductor, donde las amplitudes de eco varían de máximos a mínimos, y termina en el último máximo, es la distancia "N" desde el transductor.

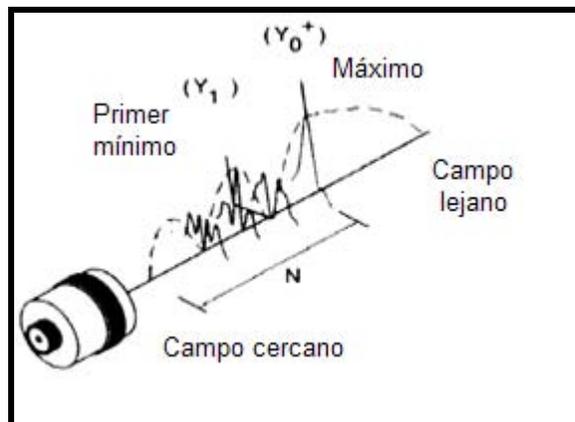


Figura 12 Campo cercano.

La localización del último máximo, es conocido como la distancia del campo cercano (N), y depende de la naturaleza del foco del transductor. El campo

lejano es un área que comienza desde N, donde la presión del campo sonoro disminuye gradualmente hasta llegar a cero. Debido a la variación del campo cercano, es extremadamente difícil cuantificar y evaluar fallas en él.

La distancia del campo cercano es función de la frecuencia del transductor, del diámetro del elemento, y de la velocidad del sonido en el material a ensayar:

$$N = \frac{D^2 \times f}{4 \times C} \quad (3.1)$$

Donde:

- N : Distancia del Campo Cercano (mm).
- D : Diámetro del elemento (mm).
- f : Frecuencia (MHz).
- C : Velocidad del sonido en el material (m/s).

3.3.3 Extensión del haz ultrasónico

Es importante cuando se inspeccionan fallas ya que pueden ser causa de ecos falsos si se trata de fallas cercanas a la superficie.

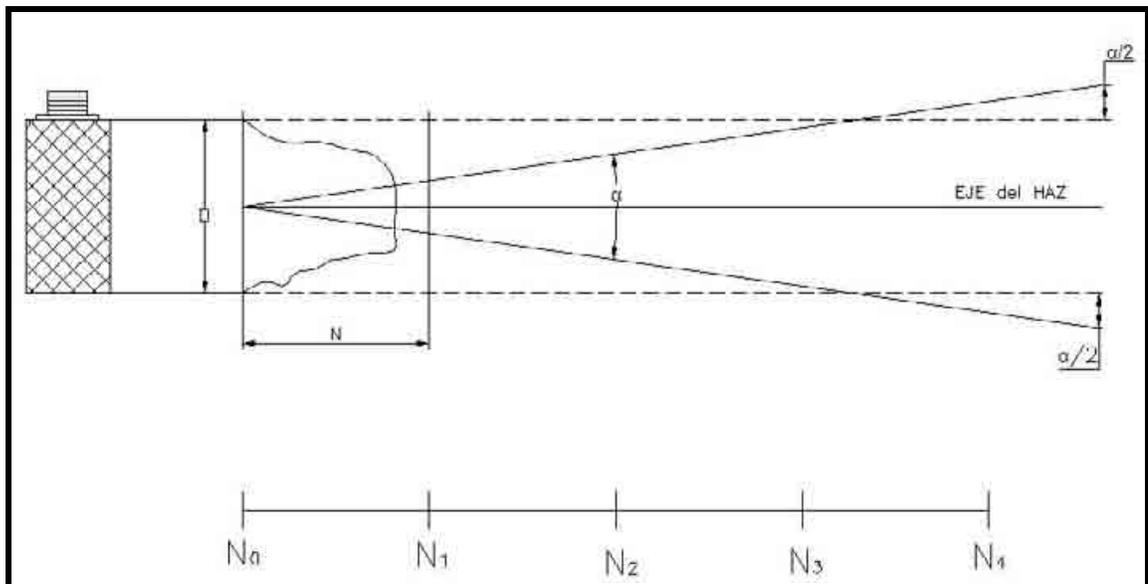


Figura 13 Extensión del haz ultrasónico de un transductor plano.

La extensión de dicho haz está determinada por la siguiente expresión:

$$\text{sen}(\alpha/2) = \frac{0,514^2 \times C}{f \times D} \quad (3.2)$$

Donde:

$(\alpha/2)$: Extensión de ángulo medio @ - 6dB (°).

C: Velocidad de propagación del sonido (m/s).

f: Frecuencia (MHz).

D: Diámetro del elemento activo (mm).

3.3.4 Reflexión y refracción del haz ultrasónico

La energía reflejada depende de las características de los medios que forman la interface, aquel en el cual se propaga el haz y aquel que determina la falla, estos dependen de la impedancia acústica "Z" de los materiales.

Pero cuando el haz ultrasónico incide a una superficie a interface con un ángulo que difiere de cero con respecto de la normal se produce la refracción de la parte del haz que incide en el segundo medio, y la dirección del segundo medio se puede determinar por la ley de Snell.

$$\frac{\text{sen}(\alpha_i)}{C_i} = \frac{\text{sen}(\alpha_f)}{C_f} \quad (3.3)$$

El haz incide oblicuamente ejerciendo una presión "F" que se descompone en dos componentes principales:

F_n : componente normal que produce el desplazamiento longitudinal de las partículas originando a su vez ondas longitudinales.

F_t : componente tangencial que provoca ondas transversales.

Entonces se obtienen ondas longitudinales y transversales reflejadas en el primer medio y ondas longitudinales y transversales refractadas en el segundo medio, (figura 14).

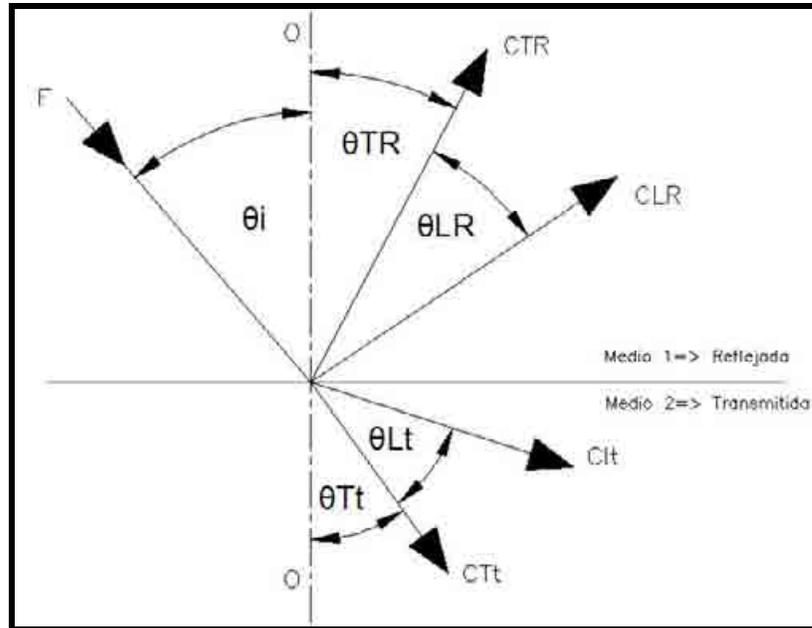


Figura 14 Refracción del haz ultrasónico.

Donde:

- F : Presión ejercida por el haz ultrasónico.
- CTR : Velocidad transversal de propagación del haz reflejado.
- CLR : Velocidad longitudinal de propagación del haz reflejado.
- CTt : Velocidad transversal de propagación del haz transmitido.
- CLt : Velocidad longitudinal de propagación del haz transmitido.
- θ_i : Ángulo de incidencia.
- θ_{Tr} : Ángulo reflejado velocidad transversal reflejada.
- θ_{Lr} : Ángulo reflejado velocidad longitudinal reflejada.
- θ_{Tt} : Ángulo transmitido de la velocidad transversal.
- θ_{Lt} : Ángulo transmitido de la velocidad longitudinal.

Primer ángulo crítico

Es θ_i de incidencia para el cual el ángulo de refracción de las ondas longitudinales es 90°

Segundo ángulo crítico

Es θ_i de incidencia para el cual el ángulo de refracción de las ondas transversales es 90°

3.4 Técnicas de ensayo por Ultrasonido

El aire y en general los gases disminuyen la energía ultrasónica transmitida, por lo que para lograr la transferencia de energía del transductor a la pieza a inspeccionar es necesario interponer un medio líquido que desplace el aire y realice el llamado acoplamiento ultrasónico, esta solución se constituye generalmente por agua o alguna solución acuosa, las grasas y aceites minerales de viscosidad adecuada según el tipo de superficie y fluidos en base a siliconas en el caso de examen de piezas a elevadas temperaturas hasta 500° C, son igualmente empleadas en este tipo de ensayo.

Una onda ultrasónica incidente, en parte se refracta y en parte se refleja si existe una variación de la resistencia a la onda sonora, como en el caso en que exista un defecto dentro del material.

De ello se derivan procedimientos de ensayo, basados respectivamente, en la evolución de la parte transmitida de la onda o de la parte reflejada de la misma.

3.4.1 Técnica pulso - eco

Es la técnica de ensayo por ultrasonido más empleada, y se caracteriza porque el transductor posee un único cristal, que actúa como emisor y receptor del haz sónico. El transductor y la pieza a examinar están siempre en contacto directo, y el acoplamiento ultrasónico se produce por algún medio líquido.

Mientras el espesor del medio líquido se mantenga por debajo de $1/4$ de la longitud de la onda del haz (λ) ultrasónico que se transmite, no permite ninguna perturbación sensible en la propagación del ultrasonido. Esto ocurre

normalmente en todos los ensayos manuales efectuados sobre superficies lisas. Cuando el espesor del medio líquido es mayor a $1/4$ del largo de la longitud de la onda del haz, se verifican numerosas reflexiones en el espesor de acoplamiento, con la consiguiente disminución de la energía transmitida y con el aumento considerable de la zona muerta, donde no se encontrará ninguna señal.

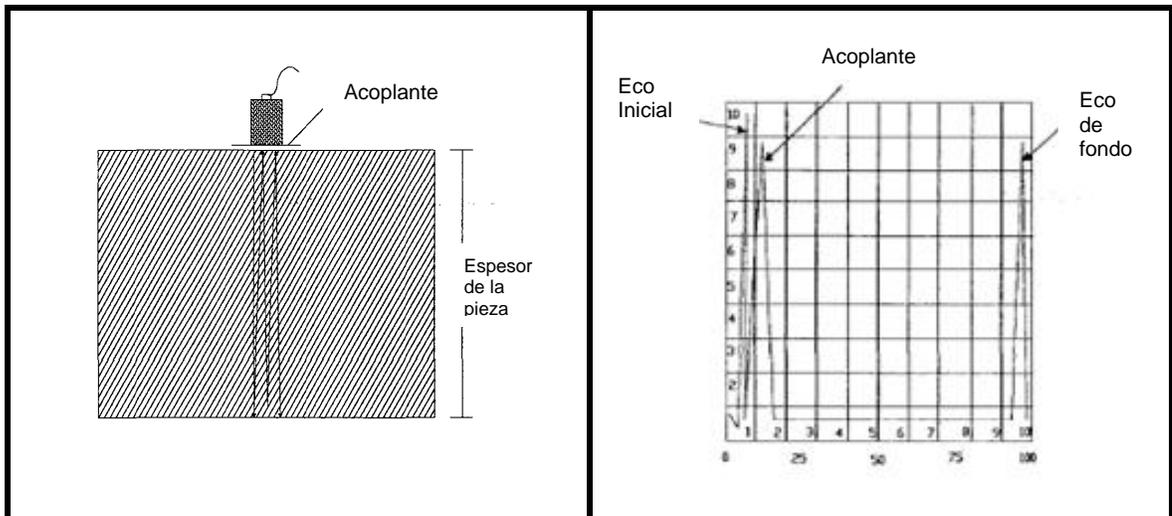


Figura 15 Señal Pulso-eco.

3.4.2 Técnica de transparencia

Esta técnica utiliza dos transductores separados, las ondas sónicas salen desde el cristal de un transductor emisor hacia el transductor receptor. Cualquier discontinuidad es determinada por una disminución en la altura del eco de fondo o eco de recepción.

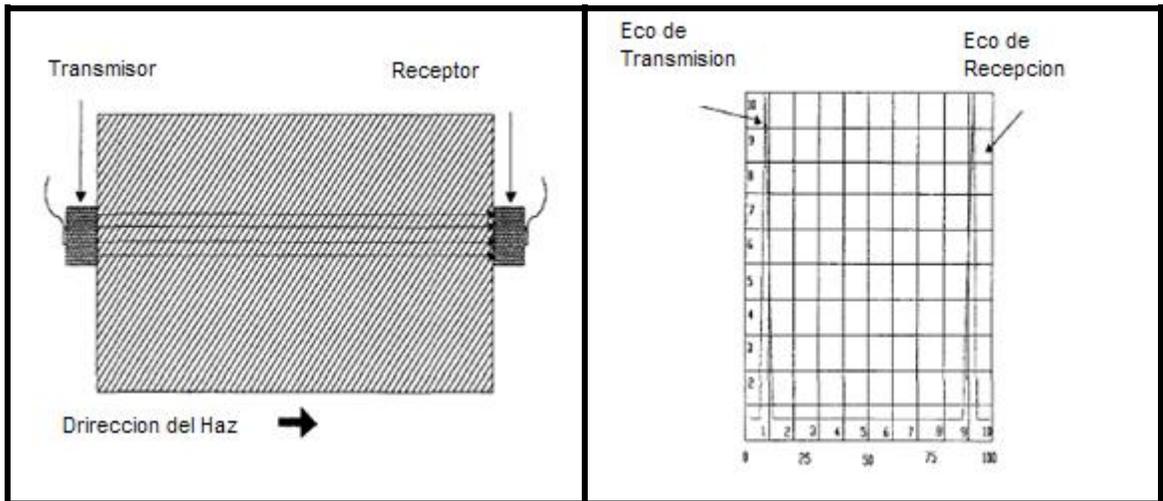


Figura 16 Técnica de Transparencia.

3.4.3 Técnica por inmersión

En esta técnica el transductor y la pieza a examinar están siempre separados por un líquido (generalmente agua con anticorrosivos), se utiliza principalmente en control automático, permitiendo un desplazamiento mutuo y continuo entre transductor y pieza a examinar, asegurando de esta manera un acoplamiento ideal.

El acoplamiento de inmersión, ofrece ventajas sobre el acoplamiento por contacto (antes señalados):

- Acoplamiento uniforme, reduce las variaciones de sensibilidad.

- Incrementa al doble la velocidad de escaneo automático.
- La focalización de transductores de inmersión, incrementan la sensibilidad de reflectores pequeños.

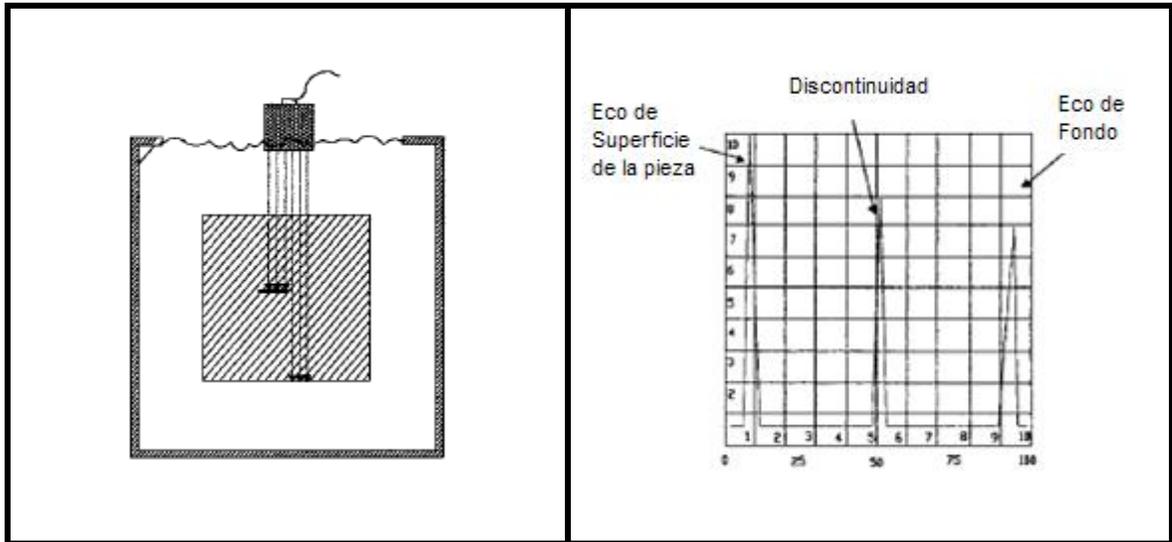


Figura 17 Técnica por inmersión.

3.4.4 Técnica de reflexión

Esta técnica es similar a la técnica de transmisión o transparencia, con la diferencia que se ocupan transductores angulares.

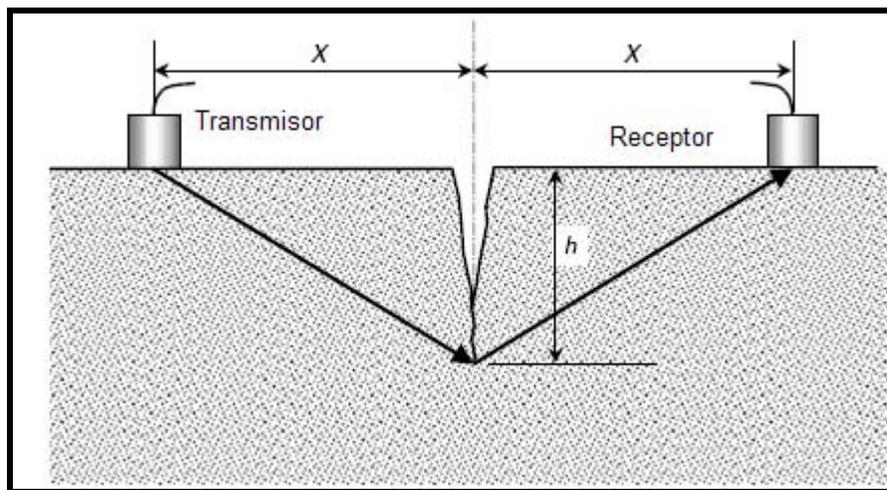


Figura 18 Técnica por reflexión.

3.5 Sistemas de representación

Hay tres tipos básicos de representación en las pantallas de los equipos para ensayos ultrasónicos:

- Equipos con indicación de posición del defecto y amplitud de señal de defecto. Se les denomina de Barrido A (A - Scan).
- Equipos con indicaciones de profundidad y distribución de los defectos en el plano transversal de la pieza, se les denomina de Barrido B (B - Scan).
- Equipos con indicaciones de forma y distribución de los defectos en el plano de la inspección, se les denomina de Barrido C (C - Scan).

3.5.1 Barrido A-Scan

Es el más extendido, en el que las indicaciones aparecen como deflexiones verticales de la base de tiempo, es decir, en la pantalla se representa el tiempo en la escala horizontal y la amplitud en la escala vertical.

La representación tipo A, se discrimina de izquierda a derecha.

La altura de los ecos pueden ser comparadas con la altura de un eco proveniente de un reflector de referencia conocido, a fin de tener una referencia del tamaño de la indicación.

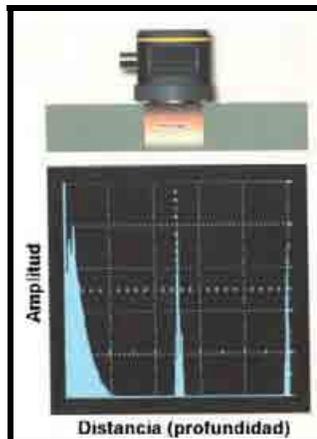


Figura 19 Barrido A-Scan.

3.5.2 Barrido B-Scan

La representación tipo B, usa una pantalla de osciloscopio típico que muestra una vista de una sección transversal del material a ser ensayado. La imagen es retenida el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la pantalla, con el objeto de obtener un registro permanente.



Figura 20 Barrido B-Scan.

3.5.3 Barrido C-Scan

La pantalla tipo C, representa una vista en planta, similar a una placa radiográfica, además, muestra la forma y localización de la discontinuidad, pero no su profundidad. Los sistemas de alta velocidad de barrido, generalmente utilizan pantallas tipo C, conjuntamente con graficadores, algunos de ellos con papel tratado químicamente. El movimiento del papel está sincronizado con el movimiento del transductor a través de la superficie de ensayo.

La ventaja de la pantalla tipo C, es su velocidad y su capacidad de producir registros permanentes. Sin embargo, la pantalla solamente da longitud y ancho,

pero no la profundidad de la falla. Este tipo de representación, junto con el tipo B, prácticamente está reservada a los ensayos automáticos por inmersión.

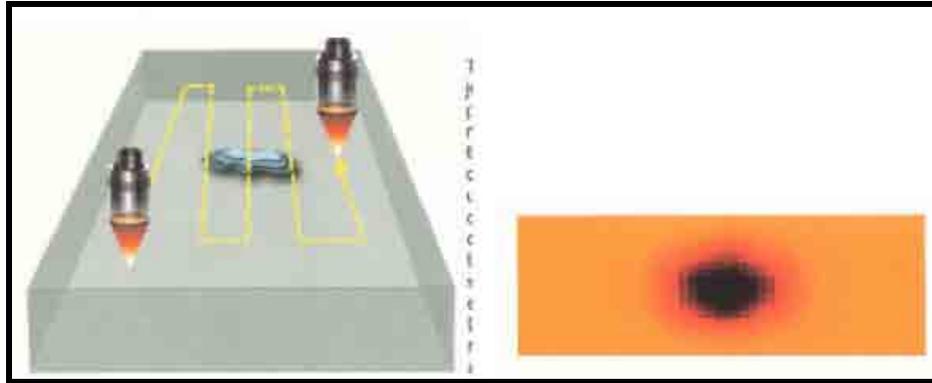


Figura 21 Barrido C-Scan.

3.6 Utilización del transductor angular

La emisión de ondas transversales en un medio es lograda a partir de la utilización de ondas longitudinales, las cuales se refractan en el medio con un ángulo distinto al de incidencia, estas ondas se propagan en forma transversal, como muestra la figura 22.

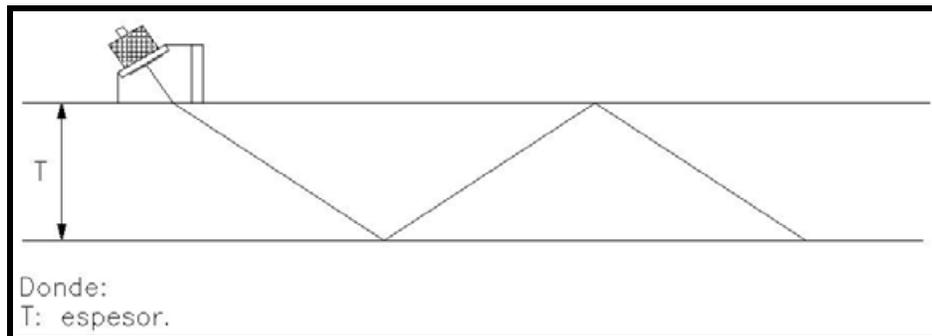


Figura 22 Ensayo transversal.

Para el cálculo de la distancia y del camino recorrido por el haz ultrasónico se usan las siguientes expresiones:

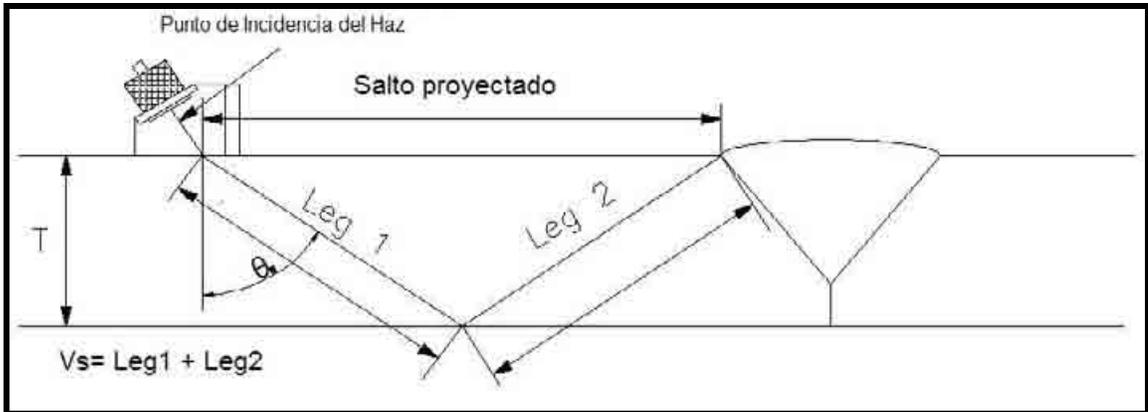


Figura 23 Camino recorrido por un haz ultrasónico transversal.

$$\text{Leg} = \frac{T}{\cos(\theta_R)} \quad (3.4)$$

$$V_s = \frac{2 \times T}{\cos(\theta_R)} \quad (3.5)$$

$$P_s = 2 \times T \times \tan(\theta_R) \quad (3.6)$$

Donde:

- T : Espesor (mm).
- θ_R : Ángulo refractado (°).
- V_s : Camino sónico (mm).
- P_s : Salto proyectado (mm).
- Leg : Tramo (mm).

Valores para ángulos usualmente empleados en el ensayo:

Tabla N° 1 Ángulos comúnmente usados en cálculos ultrasónicos.

Ángulo (°)	tan	cos	sin
30	0,5774	0,866	0,5
45	1	0,707	0,7071
60	1,732	0,5	0,866
70	2,747	0,342	0,9397
80	5,671	0,1736	0,9848

3.7 Selección de un transductor

El transductor es un componente crítico del sistema de inspección, aún cuando estando involucrados factores tales como las características del equipo ultrasónico, los parámetros de calibración, las propiedades del material y las condiciones de acoplamiento, que también juegan un papel importante en la funcionalidad del sistema de inspección.

Un sistema con buena resolución tiene la habilidad de producir, separar y distinguir dos o más indicaciones de reflectores cercanos entre sí, en profundidad y posición. En aplicaciones donde se requiere una buena resolución axial o en distancias es común seleccionar transductores de alto amortiguamiento, por ejemplo, el videoscán.

Capítulo IV: Modelamiento y determinación teórica del área crítica de inspección de los ejes por ultrasonido

4.1 Sistema: Manejo de rollizos

En Celulosa Arauco y Constitución Planta Valdivia, se encuentran diversas y muy distintas máquinas que trabajan a variadas cargas de trabajo, lo que hace que su diagnóstico operacional se remita a solo algunas técnicas de inspección, tales como análisis de vibraciones, tintas penetrantes, termografía, ultrasonido en medición de espesores, inspección visual, desconociendo lo que ocurre en sus componentes. Dos ejes, uno del área de Preparación Madera (331) que corresponde a un polín pateador, y otro eje del motor de harnero Delta Combi ubicado en el área de Lavado y Deslignificación (346), fueron entregados para su análisis por medio de la técnica de ultrasonido.

En la figura 24 se muestra la ubicación del polín pateador en el área de preparación madera.

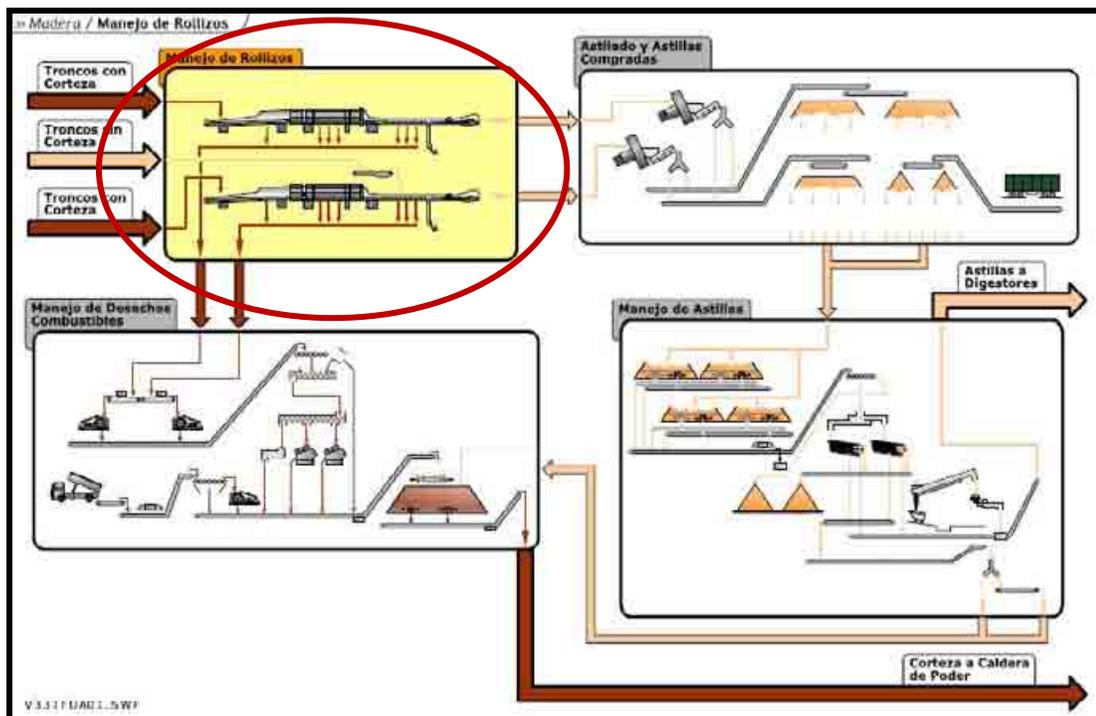


Figura 24 Ubicación sistema manejo de rollizos en área preparación madera.

El sistema de manejo de rollizos corresponde al primer sistema del área preparación madera.

Su función es:

- Medir y pesar la madera que ingresa a la Planta.
- Descargar la madera a almacenamiento o a producción.
- Descortezar los troncos.
- Eliminar las piedras, metales y arena.
- Retirar la madera sobredimensionada.
- Trasladar la madera descortezada y limpia al sistema de astillado.

Existen dos líneas similares de producción (Línea Norte y Línea Sur).

4.1.1 Componentes del sistema de manejo de rollizos

Este sistema regula la cantidad de madera que es enviada a proceso, de acuerdo a la producción de planta y a los inventarios máximos de astillas permitidos, descortezándola por medio de la fricción que se produce entre los troncos que rotan dentro del tambor descortezador, sacando las piedras que en ellos puedan venir, al igual que detecta metales por el principio de interrupción de campo magnético, lavándolos con agua a presión para el desarenado de ellos que luego son trasladados hacia el astillador.

En la figura 25 se aprecian los componentes que intervienen en este sistema.

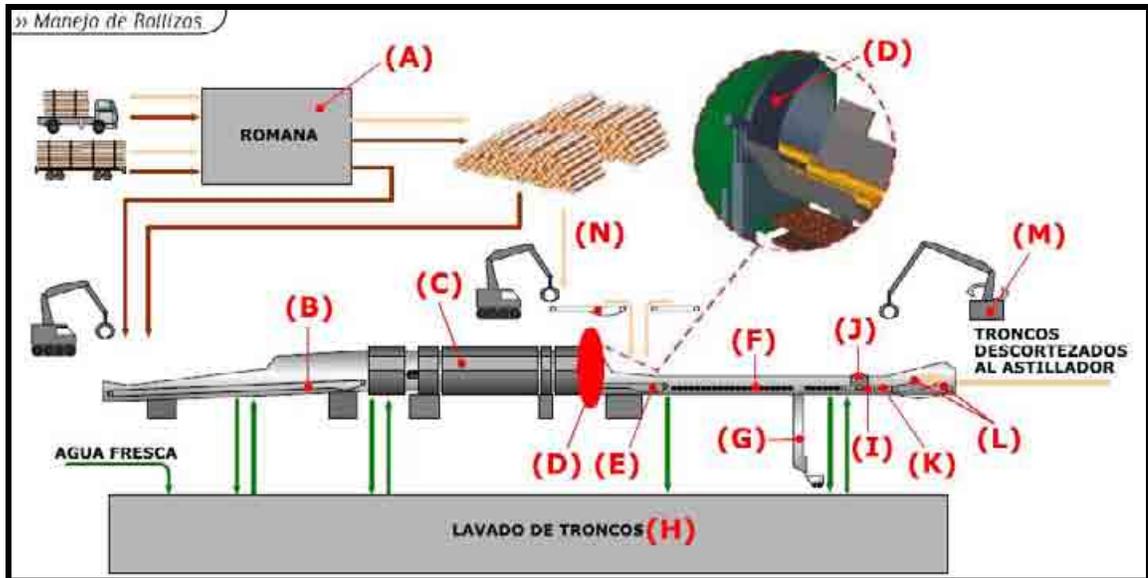


Figura 25 Componentes manejo de rodillos.

- A. **Romana:** recibe y mantiene la información de los inventarios de madera en la planta.
- B. **Transportador de cadena al descortezador:** traslada la madera que descarga un cargador frontal o grúa hacia los descortezadores.

1° Etapa Lavado de Troncos: Elimina arena adherida a la madera

- C. **Descortezador:** descortezca los troncos para enviarla al astillador.
- D. **Compuerta de retención:** controla el tiempo en que los troncos se encuentra en el descortezador.
- E. **Transportador de cadena evacuador:** saca los troncos del descortezador.
- F. **Transportador de rodillos:** traslada los rollizos hacia la trampa de piedras.
- G. **Trampa de piedras:** elimina las piedras que salen junto con los troncos, evitando que lleguen al Astillador.

2^{da} Etapa Transporte de Troncos: Envío de los troncos a la trampa de metales.

- H. **Lavado de troncos:** elimina la arena adherida.
- I. **Transportador de correa:** traslada los rollizos hacia el detector de metales.
- J. **Detector de metales:** detecta los metales que podrían venir.
- K. **Rodillo espaciador:** acelera el paso de los troncos entre el transportador de correa y el transportador de cadena al astillador.
- L. **Transportador de cadena al astillador:** envía al astillador los troncos limpios de piedras, arena y metales.
- M. **Grúa de rechazos:** retira desde el transportador de cadena al astillador la madera sobredimensionada.
- N. **Transportador de cadena auxiliar:** alimenta la madera sin corteza al transportador de cadena evacuador, sólo se encuentra en la línea sur de producción.

En el punto “F” se encuentra el polín pateador que va a ser tomado para el análisis a la fatiga.

4.1.2 Características polín pateador

La función del polín es hacer que los troncos salten y desprenda los restos de corteza adheridos a él, que dejó a su paso por el descortezador, esta compuesto de diferentes partes y materiales, que se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla N° 2 Materiales polín pateador.

Designación	Dimensión	Material
Muñón accto.	Ø 150 x 670	SAE 1045
Discos	258x258x16	A37-24 ES
Cañería Sch.40	Ø 10"	ASTM A-106
Muñón libre	Ø 150 x 432	SAE 1045
Alabes	PL 266x 265x 20	T1

Las propiedades mecánicas de los materiales que lo conforman se pueden ver en el anexo 2.

En la figura 26 se aprecia la ubicación del polín pateador.

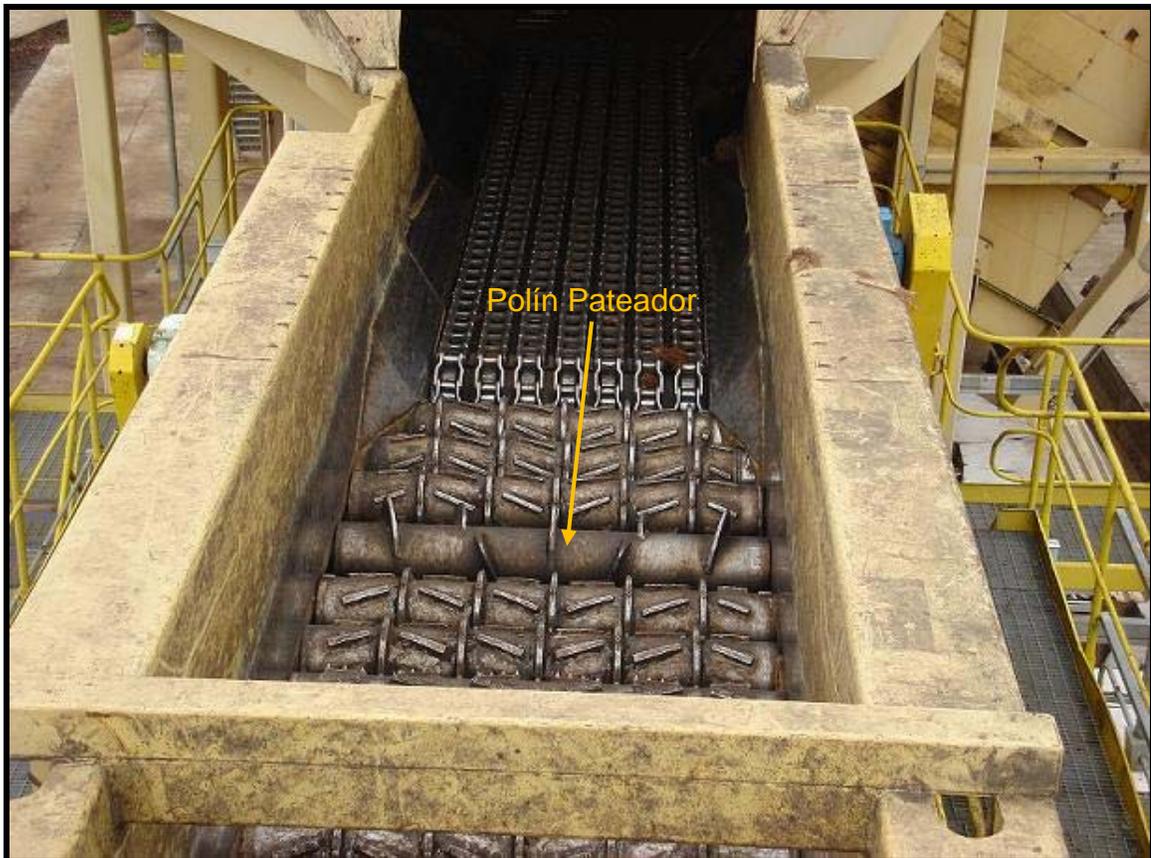


Figura 26 Ubicación física en línea norte.

4.2 Sistema: Separadores de nudos y clasificación

Esta es la primera fase del área (346) por donde seguirá la fibra que es cocida en el área de digestores (341).

La función de este sistema en el proceso es:

- Separar los nudos y clasificar la pulpa proveniente del área de digestores.
- Ajustar consistencia de operación para lavar la pulpa.
- Recuperar fibra y filtrado de los rechazos.

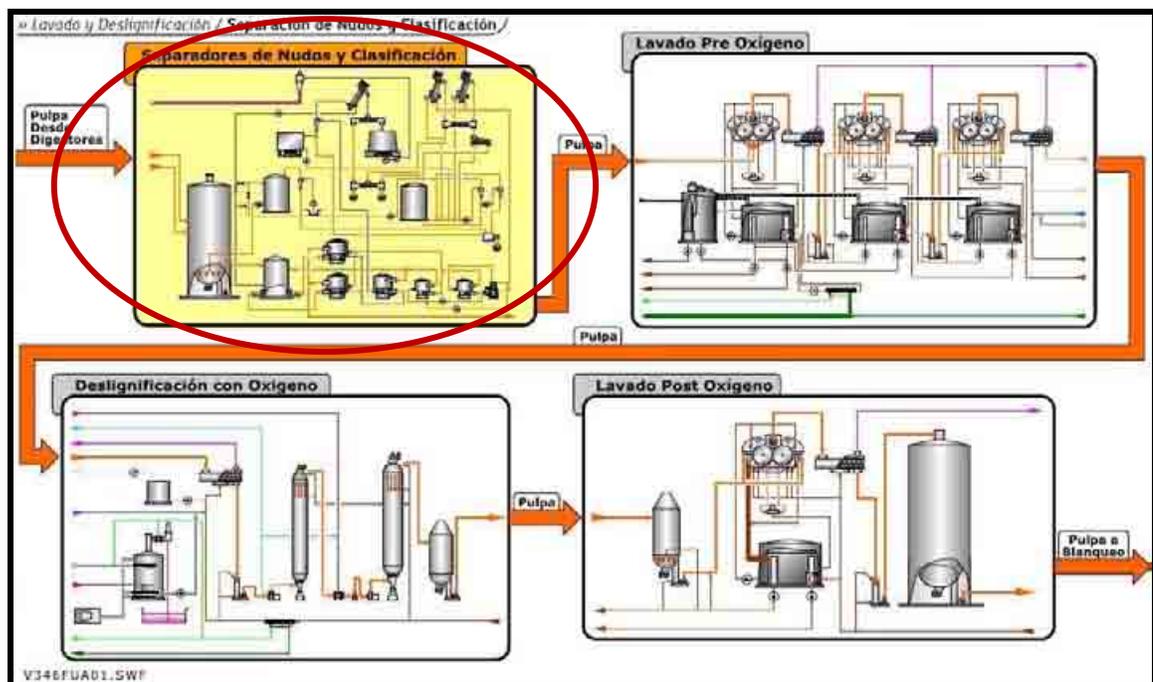


Figura 27 Ubicación harnero Delta Combi.

4.2.1 Componentes sistema separadores de nudos y clasificación

En este sistema la pulpa es enviada al estanque de alimentación de los separadores de Nudos, desde el estanque de almacenamiento de digestores. Luego la pulpa es homogenizada y se ajusta su consistencia.

Los separadores de nudos Delta Combi o harneros, separan los nudos de la pulpa y clasifican la fibra, esto se realiza por medio de dos mallas internas, en donde se retiran los nudos (malla gruesa) y el rechazo de la fibra (malla fina).

Los nudos son lavados, de forma de recuperar la mayor cantidad de fibra antes de enviarlos de regreso a los digestores, para ser cocidos nuevamente.

Los Harneros clasifican la fibra en cascada, de tal forma que los aceptados retornan a la etapa anterior y el rechazo es limpiado y prensado.

En la figura 28 se ven los componentes de este sistema.

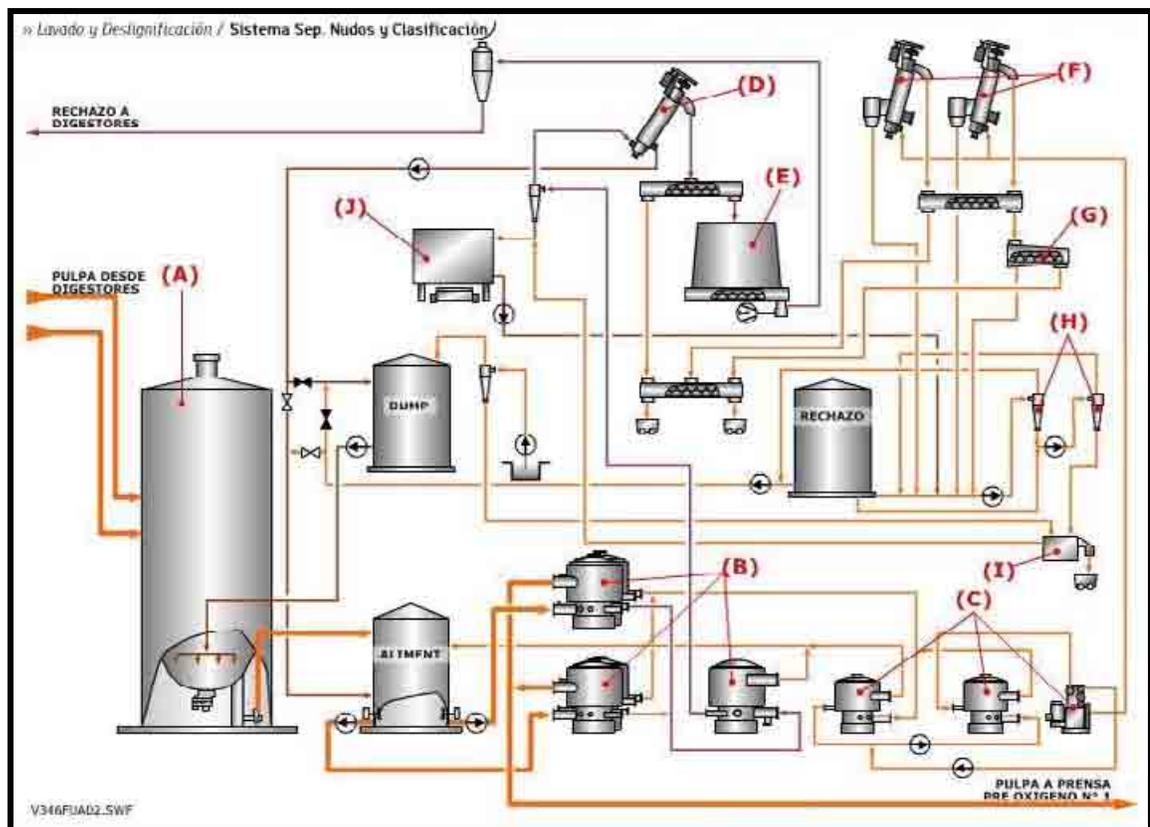


Figura 28 Componentes del sistema de separación de nudos y clasificación.

- A. **Estanque de descarga de digestores:** almacena la pulpa proveniente del área de digestores.
- B. **Separadores de nudos:** separan los nudos de la pulpa.
- C. **Harneros de clasificación:** retira los haces de fibra e impurezas del proceso.

- D. **Lavador de nudos:** lava los nudos con filtrado para recuperar los haces de fibra en los nudos.
- E. **Silo de nudos:** acumula los nudos para ser enviados a digestores, de una forma dosificada y constante.
- F. **Harneros finales TailScreen:** lavan y separan los haces de fibra.
- G. **Prensa de rechazo:** el rechazo es enviado al Bunker y el filtrado es recuperado.
- H. **Limpiadores de arena:** retiran del filtrado con fibra la arena u otras partículas.
- I. **Separador de arena:** separa la arena del filtrado proveniente de los limpiadores.
- J. **Separador de gruesos:** separa de los materiales pesados, el filtrado para recuperarlo en el separador de arena.

4.2.2 Características del eje motor harnero Delta Combi

El harnero **Delta Combi DC10** consiste en un cuerpo cilíndrico vertical con tapa con dos mallas cilíndricas en su interior. Una rotatoria con perforaciones en la parte inferior y otra con malla ranurada y estática en la parte superior, el que es accionado por un motor eléctrico.

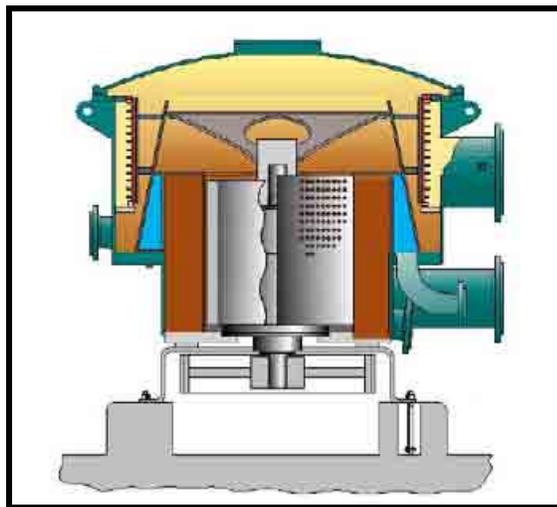


Figura 29 Harnero Delta Combi DC10.

El **motor eléctrico** es el encargado de hacer girar eje del rotor del Harnero a través de las correas de transmisión, las que por la acción de la fuerza centrífuga hace que la fibra sea seleccionada para seguir con el proceso, y sus características son: 315 kW, 1000 rpm., 50 Hz, 1500 Kg de peso.



Figura 30 Motor Harnero Delta Combi.

4.3 Modelamiento y análisis de los ejes a inspeccionar

El modelamiento y análisis de los ejes se efectuará con el módulo Pro/Mechanica del software Pro/Engineer, el cual permitirá encontrar las máximas concentraciones de esfuerzos, desplazamiento máximo, inicio del daño en los ejes, predecir la vida que durarán sometido a las cargas de trabajo, además con esos resultados se podrá acotar el problema de donde posicionar

el transductor ultrasónico, entregando un área de barrido mas limitada, para hacer de ese modo una inspección mas rápida y confiable.

4.3.1 Polín pateador

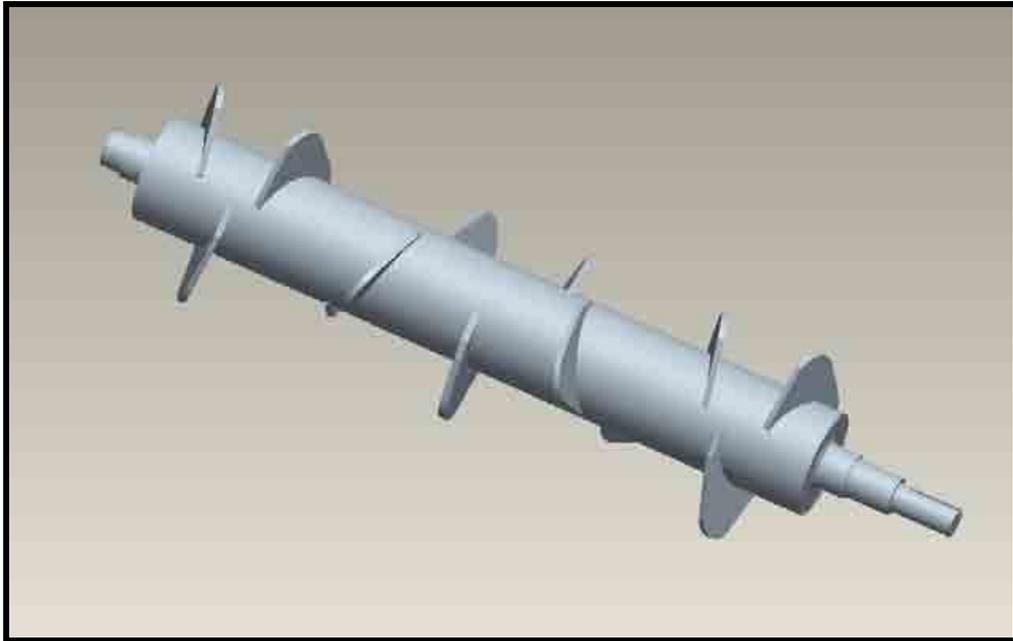


Figura 31 Polín pateador.

Para el modelado del polín se recurrió al historial de trabajo de este equipo, debido a que no siempre está en servicio, dependiendo de los requerimientos de la empresa, el polín trabaja accionado por un motor con reductor de 50 kW de potencia, girando a 63 rpm.

Las cargas actuantes en él se aprecian en la figura 32 y el plano con las dimensiones en el anexo 3.

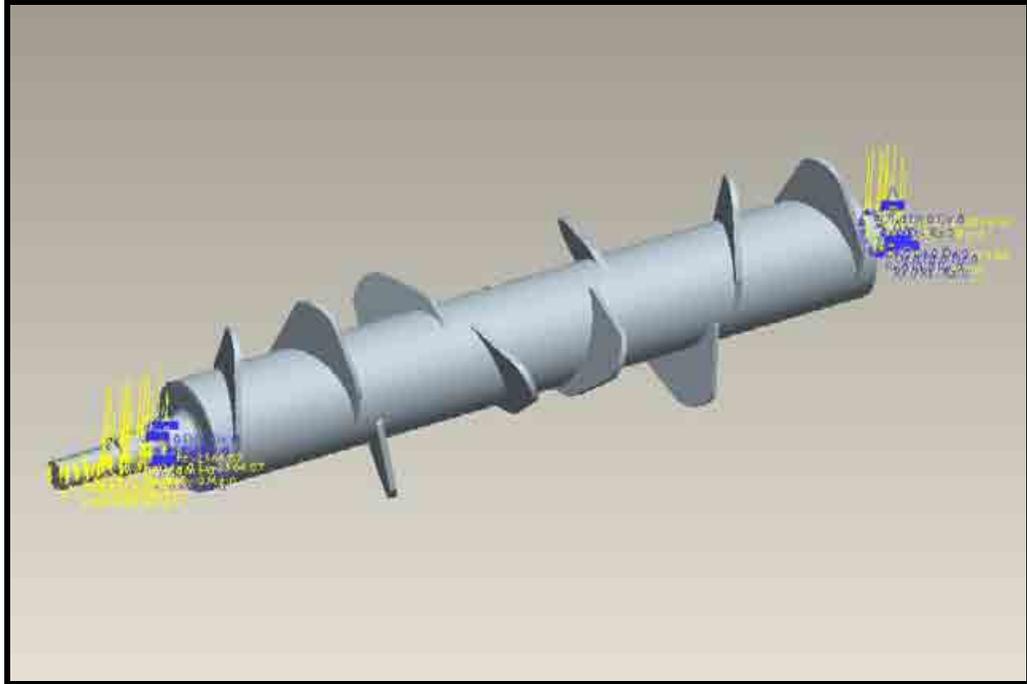


Figura 32 Cargas actuantes en polín.

El modelo se discretiza con 10193 elementos tetra, el índice de energía converge en un 5,6% y el índice global de esfuerzos Von-Mises converge con un 2,0%, las que se alcanzaron en la 6ª iteración con un polinomio de grado 9 en su interpolación, la que puede apreciarse en la figura 33. Los resultados pueden apreciarse en el anexo 4.

```

>> Pass: 6 <<
Calculating Element Equations: (17:12:07)
  Total Number of Equations: 89718
  Maximum Edge Order: 6
Solving Equations (17:14:11)
Post-Processing Solution (17:15:31)
Calculating Disp and Stress Results: (17:16:00)
Checking Convergence (17:17:50)
  Elements Not Converged: 0
  Edges Not Converged: 0
  Local Disp/Energy Index: 5.6%
  Global RMS Stress Index: 2.0%

RMS Stress Error Estimates:

Load Set      Stress Error  % of Max Prin Str
-----
LoadSet1      2.29e+00     1.8% of 1.29e+02

Resource Check (17:19:07)
  Elapsed Time (sec): 1140.71
  CPU Time (sec): 271.44
  Memory Usage (kb): 370251
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 351232

The analysis converged to within 10% on
edge displacement, element strain energy,
and global RMS stress.

** Warning: Local reaction data is currently unavailable if
  
```

Figura 33 Convergencia del análisis.

4.3.2 Eje motor harnero Delta Combi DC10

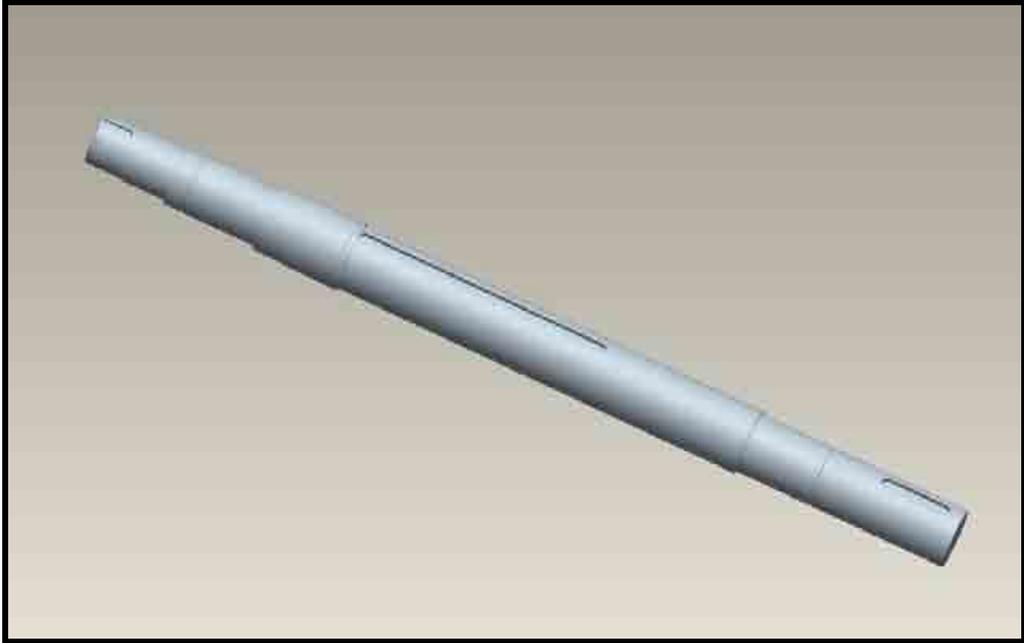


Figura 34 Eje motor harnero Delta Combi DC10.

Para el modelado del eje del motor del harnero, planta facilitó datos de carga de las poleas, potencia del motor y la velocidad de rotación, las cuales son 24900N, 315 kW y 990 rpm respectivamente.

En la figura 34 se aprecian las cargas actuantes en el eje, el plano con sus dimensiones se puede apreciar en el anexo 5.

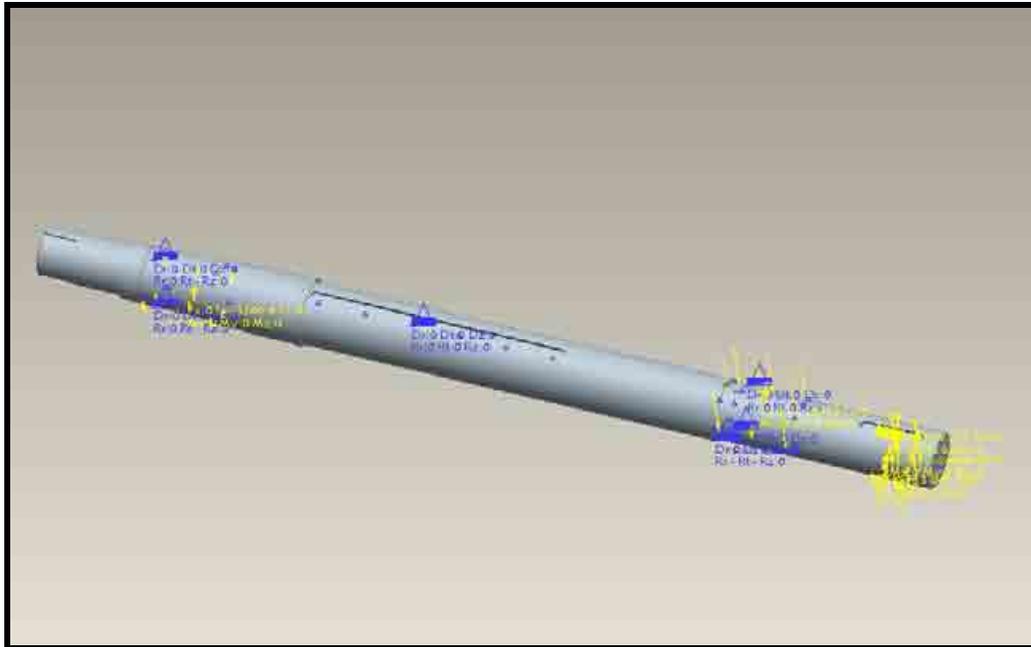


Figura 35 Cargas actuantes en eje motor harnero Delta Combi DC10.

El modelo se discretiza con 4996 elementos tetra, el índice de energía converge en un 6,5% y el índice global de esfuerzos Von-Mises converge con un 6,1%, las que se alcanzaron en la 7ª iteración con un polinomio de grado 9 en su interpolación, la que puede apreciarse en la figura 36. Los resultados se pueden apreciar en el anexo 6.

```

>> Pass 7 <<
Calculating Element Equations (21:35:13)
  Total Number of Equations: 210435
  Maximum Edge Order: 7
Solving Equations (21:39:46)
Post-Processing Solution (21:51:47)
Calculating Disp and Stress Results (21:53:05)
Checking Convergence (21:55:26)
  Elements Not Converged: 0
  Edges Not Converged: 0
  Local Disp/Energy Index: 6.5%
  Global RMS Stress Index: 6.1%

RMS Stress Error Estimates:

Load Set      Stress Error  % of Max Prin Str
-----
LoadSet1     6.55e+00     1.6% of 4.11e+02

Resource Check (21:57:20)
Elapsed Time (sec): 3055.33
CPU Time (sec): 780.56
Memory Usage (kb): 348240
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 1278976

The analysis converged to within 10% on
edge displacement, element strain energy,
and global RMS stress.

** Warning: local reaction data is currently unavailable if

```

Figura 36 Convergencia del análisis.

Capítulo V: Parametrización del equipo ultrasónico

Antes de establecer un procedimiento de inspección es necesario tener en cuenta una serie de parámetros que están relacionados con la operación.

Con los resultados obtenidos mediante el software Pro/Engineer y con las expresiones ultrasónicas mencionadas anteriormente, se puede establecer una guía para inspeccionar la zona más afectada de cada elemento cuando se requiera.

Localizada la zona a inspeccionar, además de conocer las dimensiones del elemento y tener el equipo ultrasónico con todos sus componentes para la inspección, se procede a calibrar el colector de datos.

Para ello se necesita conocer los siguientes datos previos:

- Diámetro del elemento del transductor.
- Velocidad de propagación del material a inspeccionar.
- Frecuencia del transductor.
- Resolución del equipo ultrasónico.

Para las velocidades de propagación de distintos materiales ver anexo 7.

Con estos datos se puede calcular:

- Detectabilidad.
- Campo cercano.
- Longitud de onda.
- Divergencia del haz sónico.

Entendiéndose por Detectabilidad como la mitad de la longitud de onda (teoría),

$$detectabilidad = \frac{\lambda}{2} \quad (5.1)$$

y la divergencia es lo que expansiona el haz en su recorrido.

Si la inspección se realiza longitudinalmente, buscando indicaciones a lo largo del elemento; se puede ver en la siguiente tabla, los parámetros calculados para los transductores existentes en Planta Valdivia.

Tabla N° 3 Cálculos para inspección longitudinal.

Nombre	Frecuencia (MHz)	Diámetro (Ø)	Velocidad Material (Km/s)	Campo cercano (N)	Longitud de onda (mm) (λ)	Detectabilidad (mm)
			Acero Común			
A540S	2,25	12,7	5,89	15,403	2,618	1,309
A541S	5	12,7	5,89	34,230	1,178	0,589
V109	5	12,7	5,89	34,230	1,178	0,589
V201	5	6,35	5,89	8,557	1,178	0,589

De ecuación 3.1 se puede obtener el campo cercano (N), el cual dice que esa es la distancia mínima en la cual el haz sónico empieza a detectar lecturas reales en el interior del elemento inspeccionado.

En cambio si la inspección es transversal, los parámetros cambian, ya que la velocidad de propagación se reduce. La tabla siguiente muestra los parámetros calculados para la inspección transversal.

Tabla N° 4 Cálculos para inspección transversal.

Nombre	Frecuencia (MHz)	Diámetro (Ø)	Velocidad Material (Km/s)	Campo cercano (mm) (N)	Longitud de onda (mm) (λ)	Detectabilidad (mm)
			Acero Común			
A540S	2,25	12,7	3,24	28,002	1,440	0,720
A541S	5	12,7	3,24	62,226	0,648	0,324
V109	5	12,7	3,24	62,226	0,648	0,324
V201	5	6,35	3,24	15,557	0,648	0,324

Comparando los resultados de las tablas 2 y 3 se puede concluir que:

- A mayor diámetro del elemento mayor va a ser el campo cercano.
- A mayor frecuencia mayor es el campo cercano.
- Mientras mayor es la velocidad de propagación, menor será el campo cercano.

Ahora en este tipo de inspección se toman otros factores para poder determinar el camino recorrido por el haz y el salto que proyecta, para ello las cuñas que existen en planta son de 45°, 60° y 70°.

De ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6 se puede obtener: tramo, camino sónico y el salto proyectado, dependiendo del espesor del material, que están relacionados con la cuña que se elija.

5.1 Calibración del equipo Epoch 4

Teniendo presente los parámetros previos y dependiendo de la inspección que se quiera realizar, el equipo colector de datos Epoch 4 se puede calibrar tanto para la inspección angular como para la longitudinal, las cuales se guardan en la memoria del equipo para luego ser llamadas y ocuparlas en las mediciones que se necesiten, las veces que sea necesario.

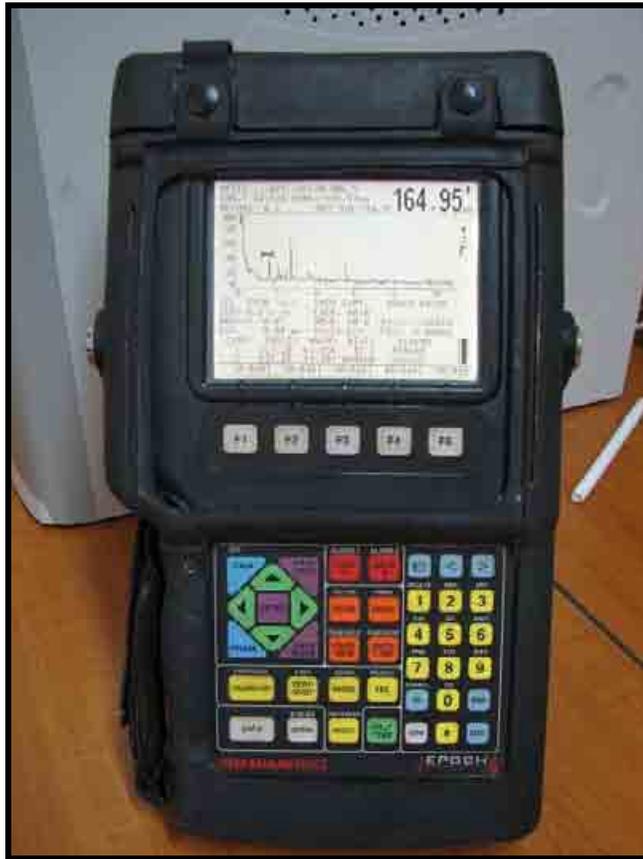


Figura 37 Colector Epoch 4.

Como las inspecciones que se realizaron fueron longitudinales y angulares, el equipo se calibró para los dos tipos de inspección.

5.1.1 Calibración Longitudinal

Para la calibración del equipo se utilizó un bloque patrón tipo IIW SAE 1018, el cual sirve de parámetro para las mediciones las que dependerán del espesor de elemento a inspeccionar, además del transductor de contacto A109S de 5 MHz y un diámetro de $\frac{1}{2}$ ", el cable estándar BCM-74-6 de GE Panametrics y como acoplante se utiliza grasa.



Figura 38 Bloque Patrón.

Se calibra el equipo para acero común con los siguientes datos:

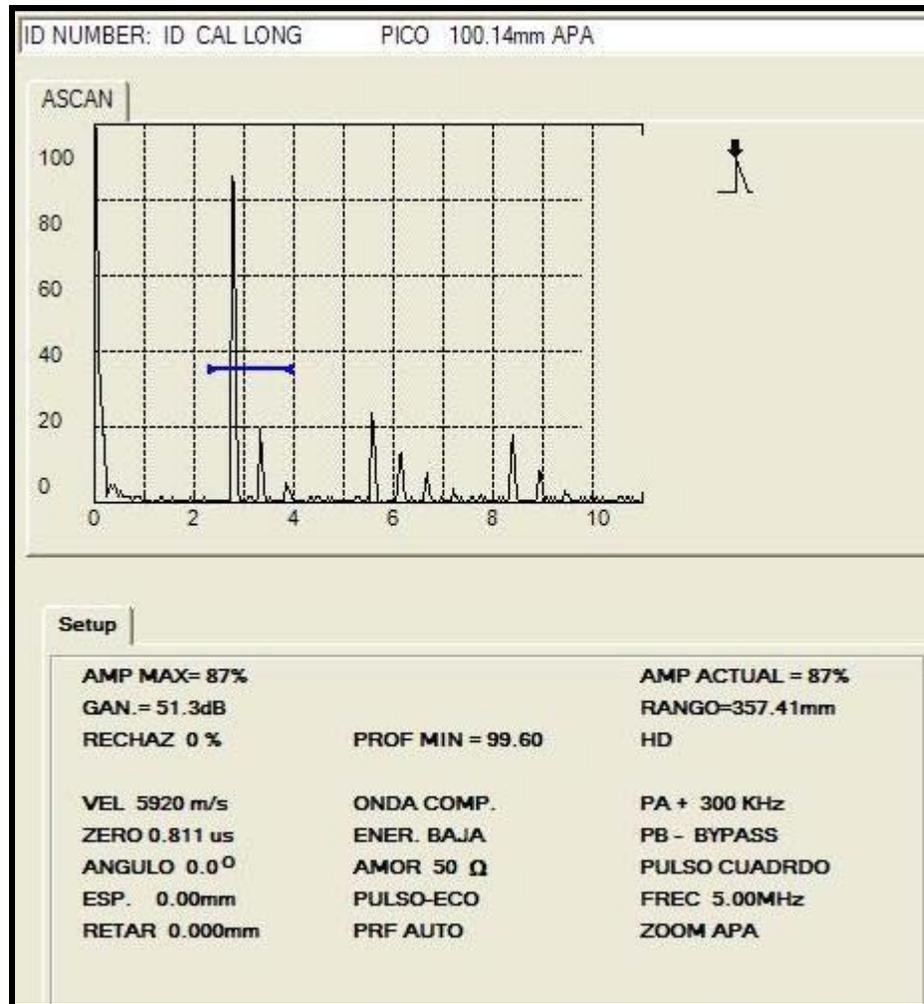


Figura 39 Pantalla de Calibración Longitudinal.

5.1.2 Calibración Angular

Al igual que la calibración longitudinal, se utiliza el bloque patrón tipo IIW SAE 1018, además del transductor de contacto V109 de 5 MHz y un diámetro de ½”, el cable estándar BCM-74-6 de GE Panametrics, como acoplante se utiliza grasa y cuña para acero al carbono de 45°.

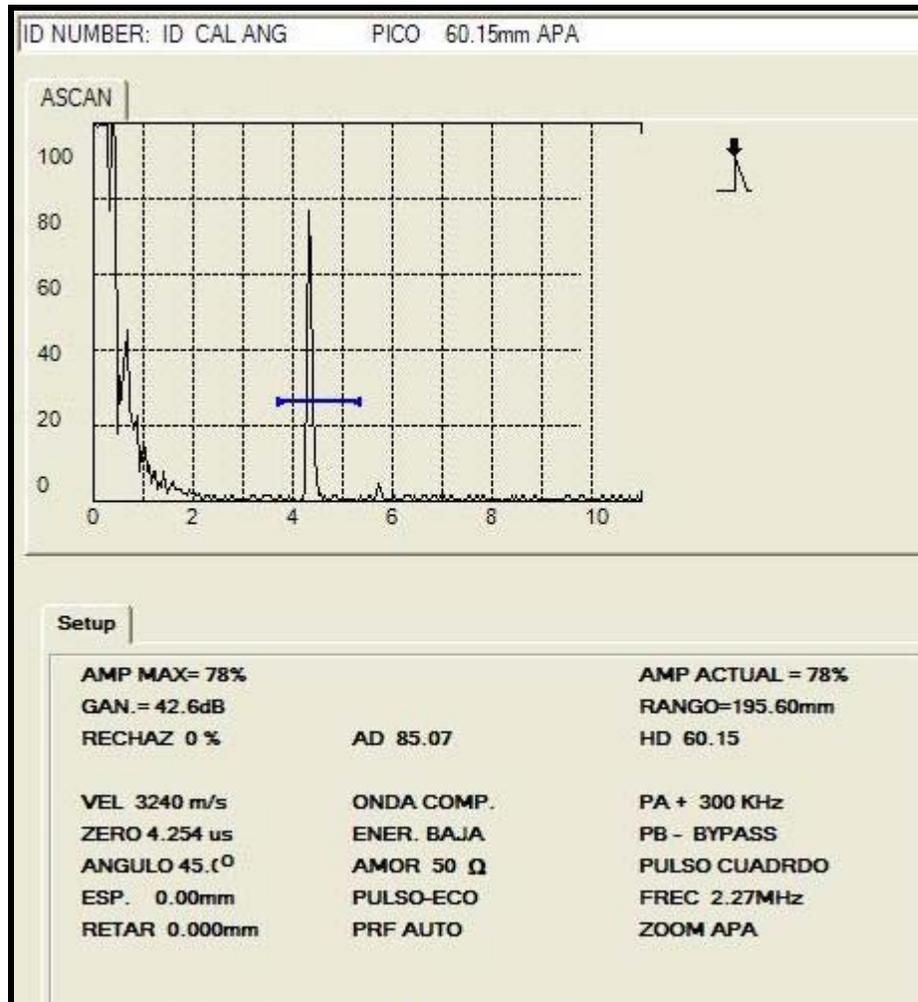


Figura 40 Pantalla de Calibración Angular 45°.

Donde:

AD: Camino recorrido (mm).

HD: Salto Proyectado (mm).

Para verificar el ángulo de salida del transductor se utiliza el patrón verificador de ángulo, el cual se muestra en la siguiente figura:



Figura 41 Patrón verificador de ángulo.

Capítulo VI: Inspección general por ultrasonido de los ejes modelados

Para inspeccionar ejes por medio del ensayo ultrasónico, es necesario hacerlo por sus 2 lados, lado accionamiento y lado conducido (cuando sea posible), y con las inspecciones angulares y longitudinales que sean necesarios para tener una mejor información acerca de su estado, ya que no se sabe cual es la zona más afectada donde se puede producir alguna fisura.

6.1 Inspección general del Polín pateador

La inspección del polín se lleva a cabo en la bodega de materiales de la planta. La figura siguiente muestra la geometría y los lugares inspeccionados.



Figura 42 Polín Pateador.

La siguiente figura muestra el detalle del lado accionamiento del polín pateador.

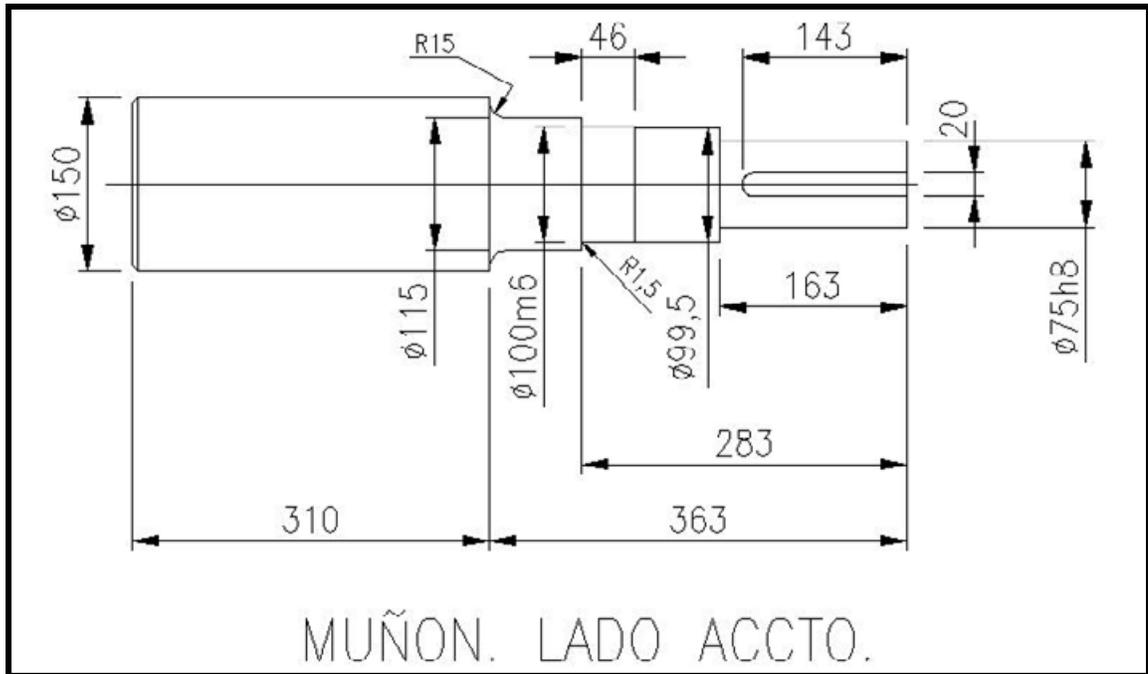


Figura 46 Dimensiones Lado Accionamiento.

Para comenzar la inspección, lo primero por hacer es una inspección visual minuciosa en la parte a inspeccionar, posteriormente se procede a limpiar la superficie de contacto, dejándolo muy limpio para que de esta forma se tenga un buen acoplamiento entre la pieza y el transductor.

Hay que tener en cuenta el acabado superficial de la pieza en estudio, ya que en superficies rugosas o de maquinado deficiente el acoplamiento sónico no será el óptimo para realizar la inspección y por consiguiente no se podrá tener una lectura real.

Los primeros haces que se tiraron fueron longitudinales a lo largo del muñón del lado de accionamiento del polín, los cuales se detallan en las siguientes figuras.

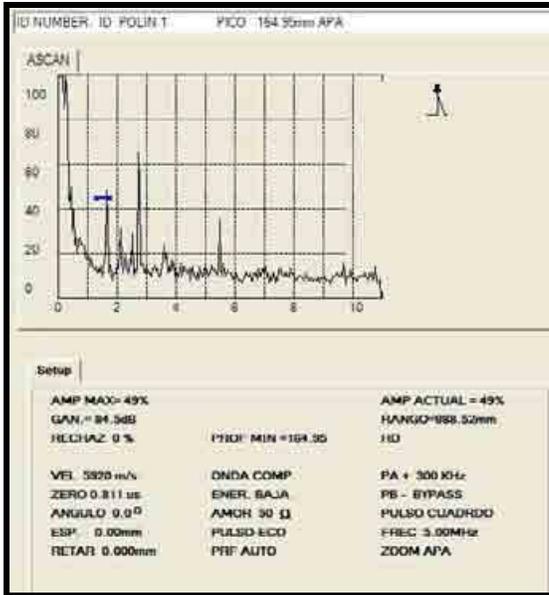


Figura 47 Pantalla 1ª Inspección.

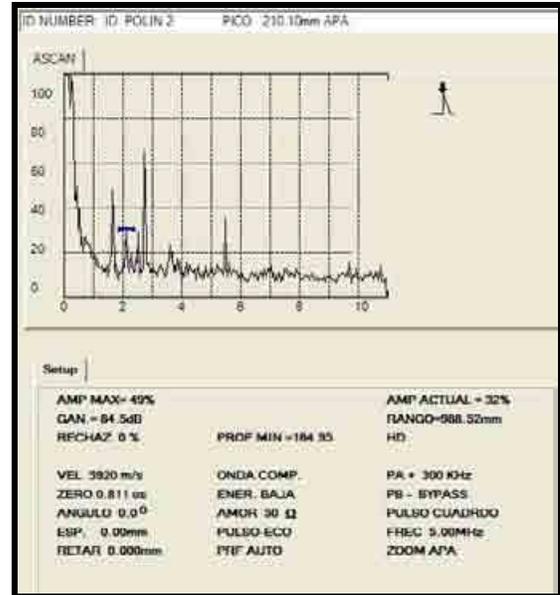


Figura 48 Pantalla 2ª Inspección.

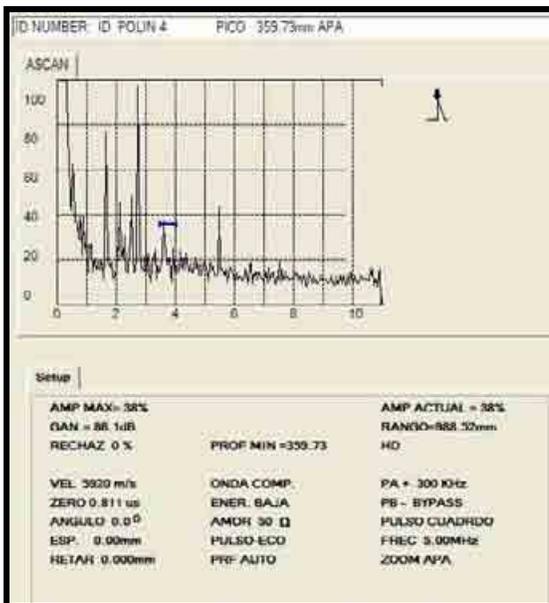


Figura 49 Pantalla 3ª Inspección.

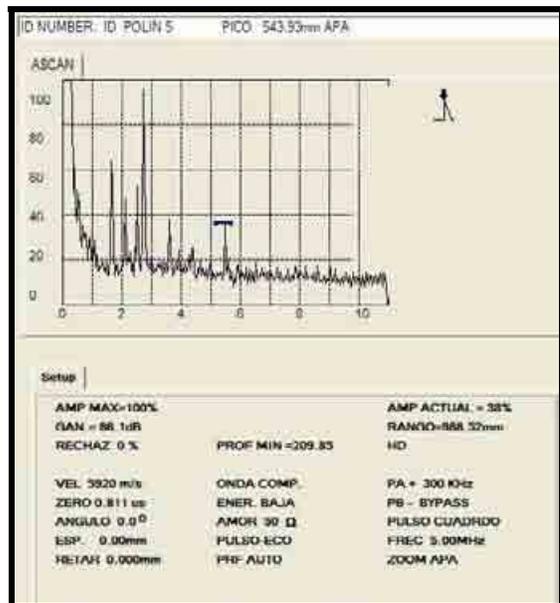


Figura 50 Pantalla 4ª Inspección.

Las siguientes figuras muestran la inspección angular tomada del lado de accionamiento.

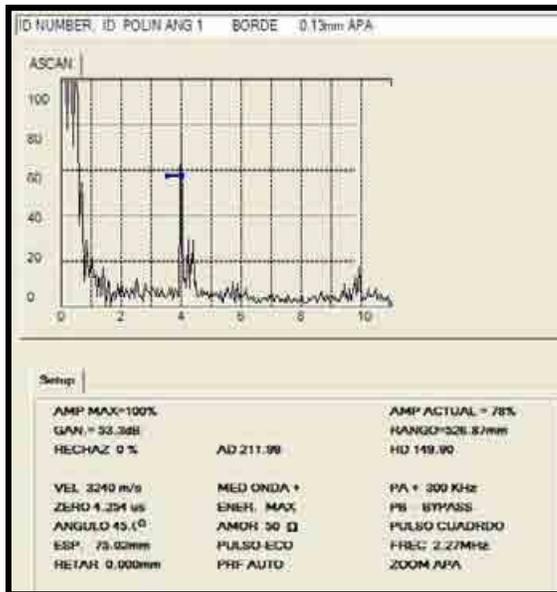


Figura 51 Pantalla 1ª Inspección.

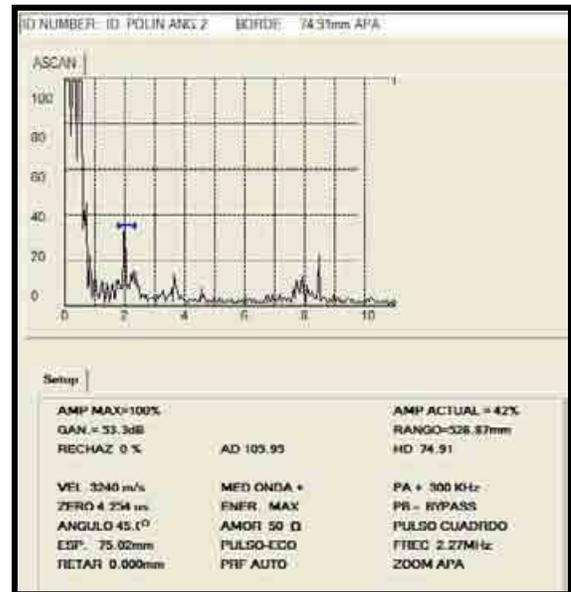


Figura 52 Pantalla 2ª Inspección.

Resumen de las figuras.

Inspección Longitudinal.

- Fig. 47 : Primer cambio de sección.
- Fig. 48 : Indicación por apriete.
- Fig. 49 : Tercer cambio de sección.
- Fig. 50 : Largo muñón.

Inspección Angular

- Fig. 51 : Borde del primer cambio de sección.
- Fig. 52 : Ancho de la parte inspeccionada.

En las pantallas de inspección se ven claramente los diferentes cambios de sección del muñón en estudio, no teniendo señales de falla.

6.1.2 Lado Conducido.

Para acceder a la testa de la parte conducida del polín hay que destapar la caja de rodadura.



Figura 53 Vista Frontal.



Figura 54 Vista Lateral.

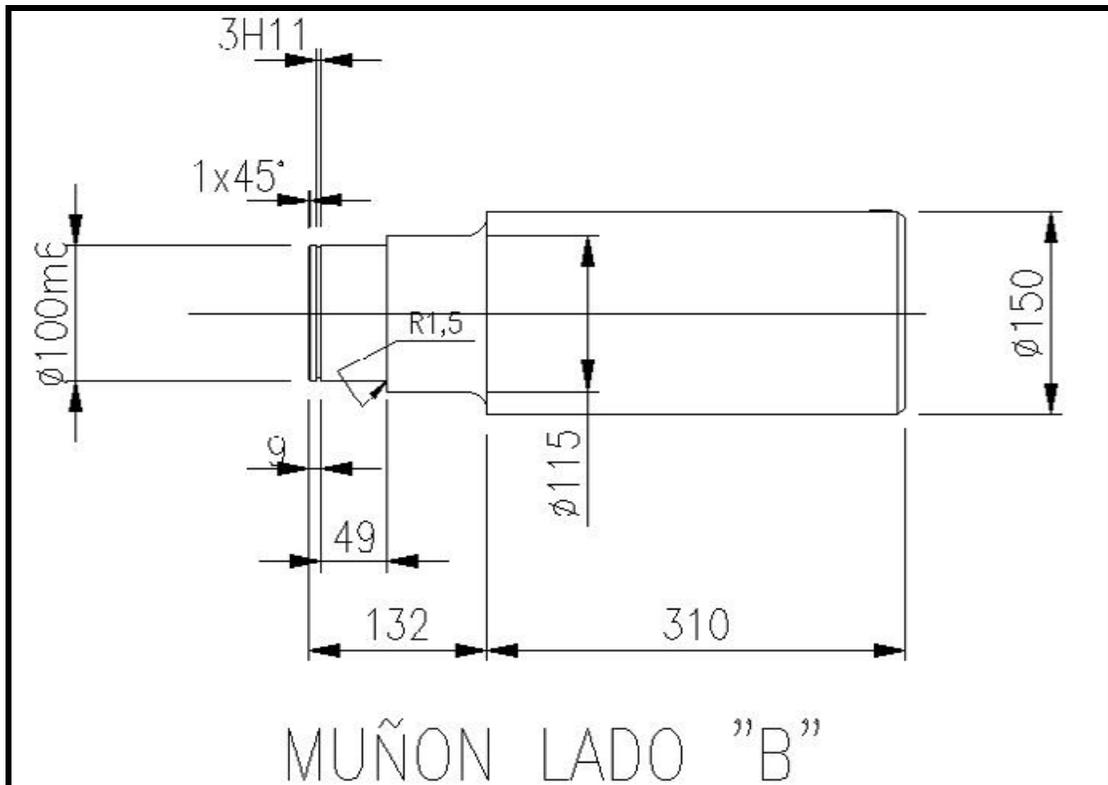


Figura 55 Dimensiones Lado Conducido.



Figura 56 Lado Conducido.



Figura 57 Detalle de maquinado.

La única forma de inspeccionar este muñón es por medio de la inspección longitudinal, ya que no se tiene acceso al contorno por el rodamiento que se encuentra asentado en él, no dejando espacio suficiente para el contacto de una cuña para hacerlo transversalmente; además, en las figuras se puede apreciar que el acabado superficial es muy deficiente, no logrando en su inspección tomar datos con el colector por un mal acople sónico.

6.2 Inspección general del eje Motor Harnero

La inspección del eje del motor se lleva a cabo en la bodega de motores de la planta, la siguiente figura muestra el lugar donde se encuentra.



Figura 58 Motor Harnero Delta-Combi.

Como no se puede sacar la polea, ya que el diseño original del eje se modificó, el único método de inspección es a través de haces longitudinales, haciéndole barridos a través del área transversal.



Figura 59 Anillo de retención.



Figura 60 Eje motor Harnero.

Para acceder a la testa del eje es necesario sacar el anillo de retención de la polea.

En la inspección se ocuparon los mismos materiales que en la calibración del equipo colector.

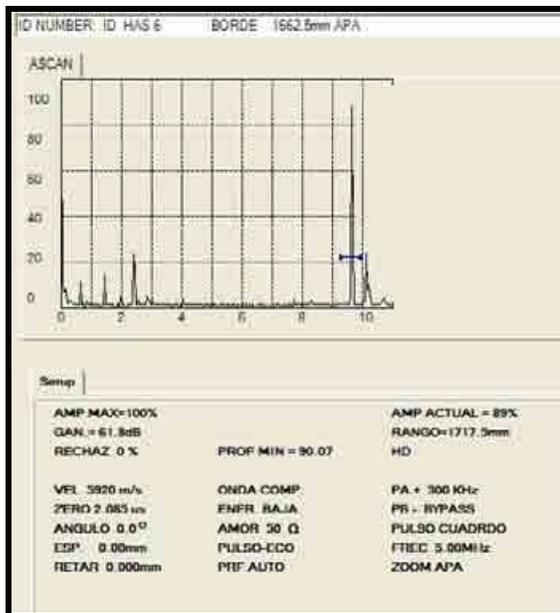


Figura 61 Pantalla 1ª Inspección.

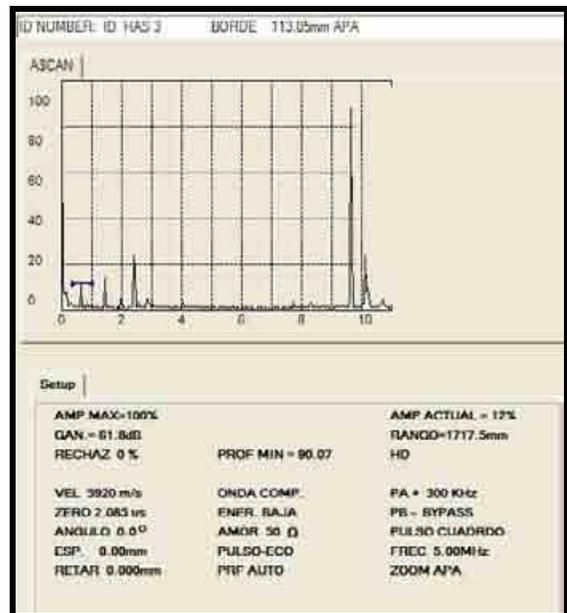


Figura 62 Pantalla 2ª Inspección.

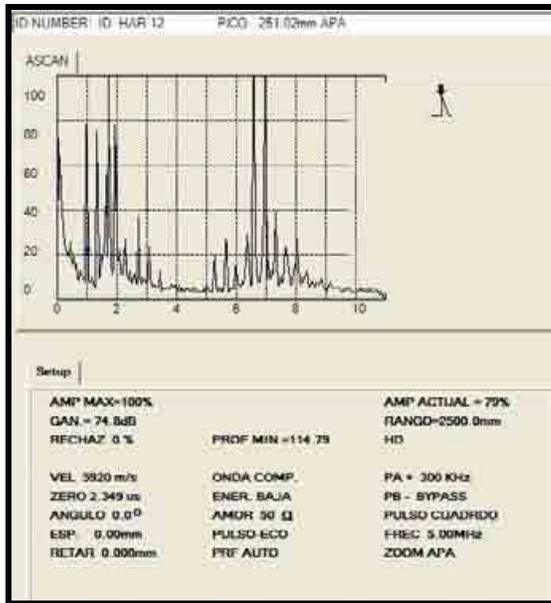


Figura 63 Pantalla 3ª Inspección.

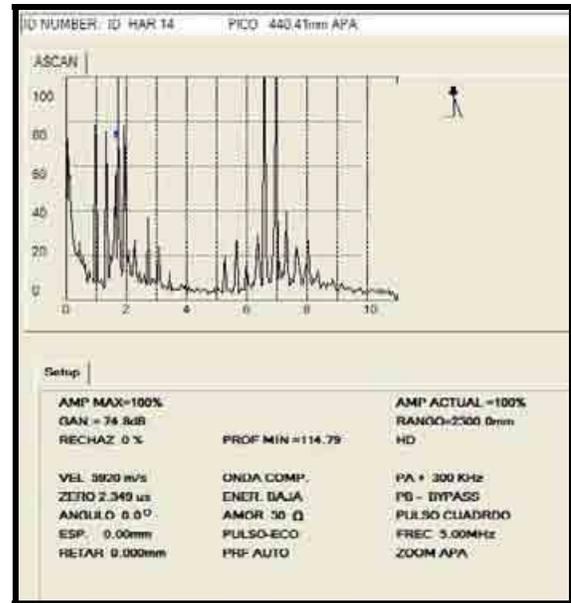


Figura 64 Pantalla 4ª Inspección.

Resumen de la Inspección.

Inspección Longitudinal.

- Fig. 61 : Largo del eje.
- Fig. 62 : Manguito de fijación de la polea.
- Fig. 63 : Primer cambio de sección.
- Fig. 64 : Segundo cambio de sección.

Si bien sólo se puede realizar la inspección en forma longitudinal, en las diferentes pantallas no se aprecian señales de comienzo alguna grieta que pueda llevar a la falla por fatiga.

Capítulo VII: Inspección por ultrasonido de los ejes en las áreas encontradas en Pro/Engineer

7.1 Inspección Polín pateador

Al igual que en la inspección general, se utilizan los mismos parámetros en el equipo colector, los mismos materiales; ahora el problema de inspeccionar se acotó a solo el área encontrada por el programa Pro/Engineer, el cual es el primer cambio de sección.

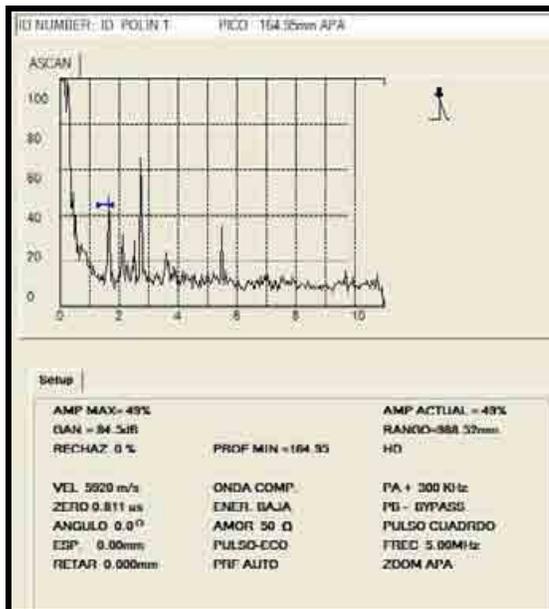


Figura 65 Pantalla de Inspección Longitudinal.

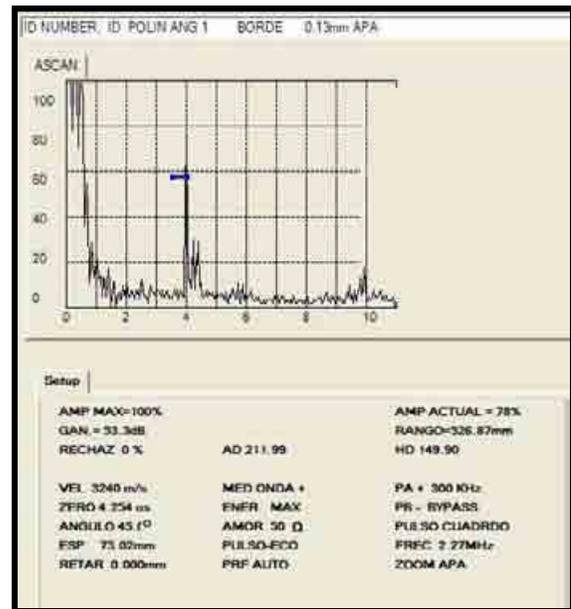


Figura 66 Pantalla de Inspección Angular.

Resumen de Inspección Longitudinal y Angular.

Fig. 65 : Primer cambio de sección.

Fig. 66 : Primer cambio de sección.

Como en la inspección general se centro en ver los cambios los cambios mas representativos y no se observo ningún indicio de falla, ahora solo se centro en el primer cambio de sección del lado accionamiento y se ratifico que no había señal de agrietamiento.

7.2 Inspección eje motor harnero

Esta inspección solo se puede hacer mediante la inspección longitudinal, puesto que la polea no deja hacerlo en forma angular y según el software Pro/Engineer el área más afectada es la cercana al descanso del lado accionamiento del motor.

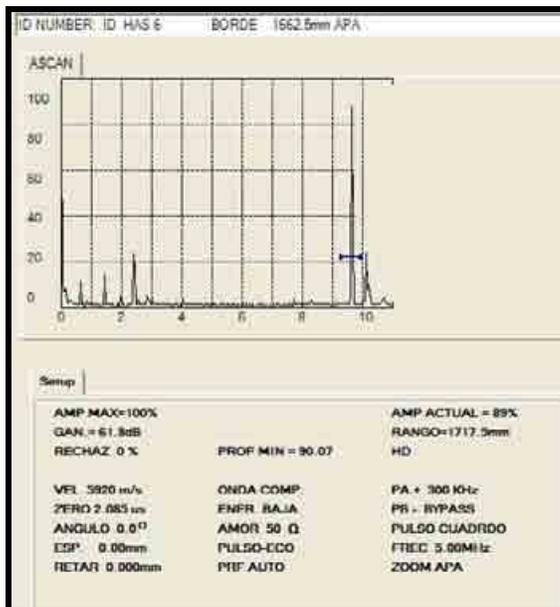


Figura 67 Pantalla 1ª Inspección.

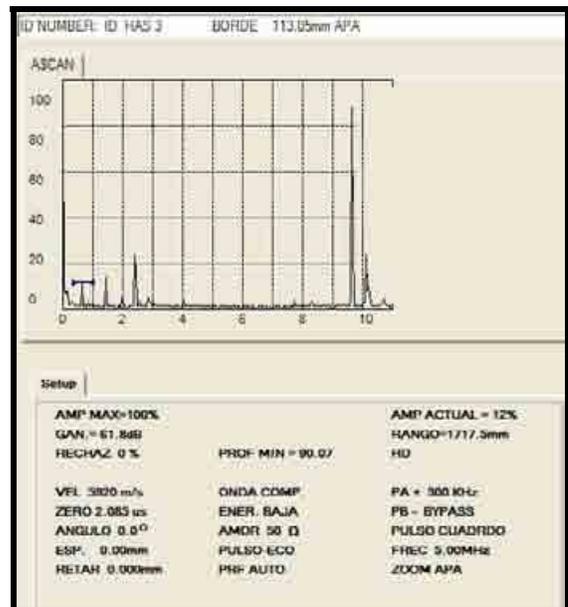


Figura 68 Pantalla 2ª Inspección.

Resumen de Inspección Longitudinal y Angular.

Fig. 67 : Largo total eje.

Fig. 68 : Manguito de fijación polea.

De la misma manera que en el polín, se procedió al análisis del eje y en las pantallas de inspección, no se ven señales de grieta, por lo tanto se puede deducir el buen estado del elemento.

Si bien el ensayo por ultrasonido es una herramienta que se puede usar por si sola, el programa de elementos finitos ayuda de manera significativa en la predicción de falla por fatiga al interior de los ejes analizados.

El uso del software Pro/Engineer por si solo no es suficiente para ver el real estado de un elemento de máquina, puesto que solo podemos ver el posible comportamiento bajo cierto estado de trabajo, además ayuda para poder adelantarnos, para así modificar diseños mal proyectados.

Por otra parte el uso del equipo de ultrasonido por si solo basta para poder dar un informe detallado del elemento en inspección, la desventaja que conlleva esto es que pueden analizarse elementos con una geometría muy compleja, pudiendo tomar más tiempo del que normalmente se usa para este tipo de ensayo.

Conclusiones.

De acuerdo al modelamiento y análisis hecho a los ejes en estudio, por medio del software Pro/Engineer, se logró determinar las áreas para la posterior inspección mediante la técnica con ultrasonido. Los resultados entregados por el programa predicen que en el polín pateador la mayor probabilidad de falla se encuentra en el primer cambio de sección del lado de accionamiento, con un esfuerzo de $174,2 \text{ N/mm}^2$ y para el eje del motor del harnero Delta-Combi, la zona más afectada se encuentra cercana al descanso del lado polea, con un esfuerzo de $145,7 \text{ N/mm}^2$.

La inspección por medio de la técnica de ultrasonido permitió saber el estado de los ejes en análisis, teniendo que inspeccionar todo el eje, en casa caso.

En la segunda inspección el problema se acotó solo a las áreas entregadas por el software, lo que significo una reducción de tiempo en la inspección en aproximadamente un 55%, pero esto va a depender de la accesibilidad que se tenga al momento de analizar algún elemento.

Según ASME, la experiencia para dar un análisis fiable es de un inspector nivel II, ya que hay que tener cierto tiempo de entrenamiento previo antes de analizar y dar un diagnostico operacional, la experiencia del ejecutor de este trabajo era básico con respecto a este tipo de ensayo; ahora con esta información el inspector certificado podrá reducir el tiempo de inspección en forma considerable.

Hacer una comparación no seria del todo lícita, ya que el software solo predice el comportamiento de un elemento bajo ciertas condiciones de trabajo y no el real estado del mismo.

Por otro lado, el equipo de ultrasonido es capaz de dar un diagnóstico operacional sin ayuda de algún otro ente asociado a la evaluación de fallas, sin embargo, el análisis es muy extenso, dependiendo de la geometría y

accesibilidad al elemento que se quiera inspeccionar, siendo de una ayuda considerable saber donde posar el transductor para el análisis.

Finalmente se puede concluir: que la modelación y el análisis permitió encontrar el área más propensa a fallar en cada eje en estudio; en otras palabras se cumplieron los objetivos propuestos en este trabajo.

Además, el complemento del uso de un software que permita modelar y analizar algún elemento mecánico, con un equipo ultrasónico, es de beneficio para la empresa, puesto que la inspección se torna más rápida, porque encontrada la zona más propensa a fallar por fatiga, el proceso de inspección por ultrasonido se disminuye, debido a que sólo se inspeccionaría el área encontrada por el software, sin embargo, va a depender de la experiencia del analista.

Bibliografía

1. Sergio Lavanchy M., Apuntes y Gráficos para el cálculo de resistencia a la fatiga, Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería, Universidad de Concepción.
2. Joseph Edgard Shigley, Charles R. Mischke; Diseño en Ingeniería Mecánica, quinta edición, editorial Mc Graw-hill, 1990.
3. ASM Handbook, Fatigue and Fracture, Volumen 19, 1996, editorial Asístanse.
4. PROFAN (Chile) S.I., Curso de Ultrasonido Nivel I, Concepción, Chile
5. Echeverría, R., 2002, Ultrasonido, Universidad Nacional del Comahue.
6. Berke, M., Non Destructive Material Testing whit Ultrasonic's, editorial Krautkrämer G MB H & Co, 1993.
7. Harris, C., Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido (3ª edición), Madrid, editorial Mc Graw-hill/ Interamericana de España S.A. 1995.
8. Berke, M., Nondestructive Material Testing whit Ultrasonic's, editorial Krautkrämer G MB H & Co, 1993.
9. Silva Saldía, R., Equipos y Técnicas Ultrasónicas, (tesis de grado), Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, 1990.
10. <http://www.weldqual.cl/home.html>

11. http://www.eddytronic.cl/index_es.html

12. http://www.panametrics-ndt.com/ndt/ndt_transducers/index.html

13. <http://www.infomecanica.com>

ANEXOS

Anexo 1 Características, ventajas y desventajas de algunos materiales usados en los palpadores.

Tabla N° 5 Características de los materiales usados como transductores 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	Frágil
Metaniobato de bario	Buena	Mediana	Optima	Optima	Buena
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Buena

Tabla N° 6 Ventajas y desventajas de diferentes materiales para transductores.

Material	Ventajas	Desventajas
Cuarzo	<p>Se obtiene a partir de cristales naturales.</p> <p>Posee excelentes características estabilidad térmica, química y eléctrica.</p> <p>Es muy duro y resistente al desgaste así como al envejecimiento.</p>	<p>-Sufre interferencias en el modo de conversión</p> <p>-Es el menos eficiente de los generadores de energía acústica.</p>

		<p>-Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias.</p> <p>-Se debe emplear a temperaturas menores de 550 °C, pues por arriba de ésta pierde sus propiedades piezoeléctricas.</p>
Sulfato de Litio	<p>Receptor más eficiente.</p> <p>Facilidad de obtener una amortiguación acústica optima.</p> <p>Mejor poder de resolución.</p> <p>No envejece.</p> <p>Es poco afectado por la interferencia en el modo de conversión.</p>	<p>-Es muy frágil</p> <p>-Soluble en agua</p> <p>-Se debe emplear a temperaturas menores de 75 °C.</p>
	Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación.	-Resistencia mecánica relativamente baja,
Cerámicos Polarizados	Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación.	-En algunos casos existe interferencia en el modo de conversión.

	<p>Prácticamente no son afectados por la humedad</p> <p>Algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300 °C.</p>	<p>-Presentan tendencia al envejecimiento.</p> <p>-Además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.</p>
Titanato de Bario	<p>Es un buen emisor debido a su elevado modulo piezoeléctrico.</p>	<p>-Problemas de acoplamiento y amortiguación.</p> <p>-Su empleo esta limitado a frecuencias menores de 15 MHz, debido a su baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica.</p> <p>-Presenta interacción entre varios modos de vibración.</p> <p>-La temperatura de su punto curie es de 115 – 150 ° C.</p>
Metaniobato de Bario	<p>Presenta un modulo piezoeléctrico elevado lo que lo califica como buen emisor.</p>	<p>-Presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica, por lo que se aplica principalmente a frecuencias altas.</p>

	<p>Posee excelente estabilidad térmica, similar al cuarzo, lo que le permite ser empleado a altas temperaturas.</p> <p>Posee un elevado coeficiente de amortiguación interna, por lo que se considera como el mejor material para generar impulsos cortos.</p>	<p>-Presenta interacción entre varios modos de vibración.</p>
<p>Zirconato Titanato de Plomo</p>	<p>Se considera como el mejor emisor por su alto módulo piezoeléctrico.</p>	<p>-Sin embargo, es el mas difícil de amortiguar por su alto coeficiente de deformación. Se recomienda su empleo cuando existen problemas de penetración.</p>

Anexo 2 Propiedades Mecánicas de los materiales.

Tabla N° 7 Propiedades Mecánicas Monótonas de los Materiales.

4.58

TABLE 1—MONOTONIC STRESS-STRAIN PROPERTIES OF SELECTED METALS (sort: steel, A1, SAE spec., increasing true fracture strength)

SAE Spec	BHn	Data Ref†	Grain Dir	Process Description	Ult Str ksi (MPa)	Yield Str ksi (MPa)	True Fract Str ksi (MPa)	%RA	True Fract Ductility	Strain Hard ^G Exponent	Str Cof ksi (MPa)
A-538-A ²	405	6	L	Sol Tr & Aged	220 (1517)	215 (1482)	275 (1896)	67	1.10	0.030	
A-538-B ²	460	6	L	Sol Tr & Aged	270 (1862)	260 (1793)	310 (2137)	56	0.82	0.020	
A-538-C ²	480	6	L	Sol Tr & Aged	290 (1999)	280 (1931)	325 (2241)	55	0.81	0.015	
AM-350 ⁵		1	L	HR & Annealed	191 (1317)	64 (441)	298 (2055)	52	0.74		
AM-350 ⁵	496	1	L	CD	276 (1903)	270 (1862)	316 (2179)	20	0.23		
Gainex ³		7	LT	HR Sheet	77 (531)	58 (400)	117 (807)	58	0.86	0.20	
Gainex ³		7	L	HR Sheet	74 (510)	57 (393)	118 (814)	64	1.02	0.20	
H-11	660	6	L	Ausformed	375 (2586)	295 (2034)	460 (3172)	33	0.40	0.120	
R-100 ⁴	236	11	LT	As Rec Plate	177 (1220)	117 (807)	214 (1475)				
R-100 ⁴	236	11	L	As Rec Plate	169 (1165)	112 (772)	236 (1627)				
RQC-100 ¹	290	10	LT	HR Plate	136 (938)	130 (896)	155 (1069)	43	0.56	0.06	170 (1172)
RQC-100 ¹	290	10	L	HR Plate	135 (931)	128 (883)	193 (1331)	67	1.02	0.06	170 (1172)
10862	430	7	L	Q&T	238 (1641)	219 (1510)	258 (1779)	38	0.89	0.042	260 (1793)
1005-1009	90	7	LT	HR Sheet	52 (359)	39 (269)	104 (717)	73	1.3	0.12	73 (503)
1005-1009	125	7	LT	CD Sheet	68 (469)	65 (448)	108 (745)	66	1.09	0.029	78 (538)
1005-1009	125	7	L	CD Sheet	60 (414)	58 (400)	122 (841)	64	1.02	0.049	76 (524)
1005-1009	90	7	L	HR Sheet	50 (345)	38 (262)	123 (848)	80	1.6	0.16	77 (531)
1015	80	4	L	Normalized	60 (414)	33 (228)	105 (724)	68	1.14	0.26	
1020	108	12	L	HR Plate Plate	64 (441)	38 (262)	103 (710)	62	0.96	0.19	107 (738)
1040	225	13	L	As Forged	90 (621)	50 (345)	152 (1048)	60	0.93	0.22	
1045	225	7	L	Q&T	105 (724)	92 (634)	178 (1227)	65	1.04	0.13	166 (1145)
1045	410	7	L	Q&T	210 (1448)	198 (1365)	270 (1862)	51	0.72	0.076	302 (2082)
1045	390	7	L	Q&T	195 (1344)	185 (1276)	270 (1862)	59	0.89	0.044	
1045	450	7	L	Q&T	230 (1586)	220 (1517)	305 (2103)	55	0.81	0.041	
1045	500	7	L	Q&T	265 (1827)	245 (1689)	330 (2275)	51	0.71	0.047	
1045	595	7	L	Q&T	325 (2241)	270 (1862)	395 (2723)	41	0.52	0.071	
1080 + Mn	326	14	L	HR Plate	162 (1117)	92 (634)	181 (1248)	17	0.17		
1080 + Mn	375	14	L	Q&T	189 (1303)	166 (1145)	235 (1620)	31	0.37		
1080 + Mn	415	14	L	Q&T	206 (1420)	180 (1241)	243 (1675)	31	0.36		
1080 + Mn	505	14	L	Q&T	265 (1827)	235 (1620)	295 (2034)	30	0.36		
1080 + Mn	555	14	L	Q&T	309 (2130)	273 (1882)	339 (2337)	17	0.18		
1144	265	16	L	CD Strain Rel	135 (931)	104 (717)	168 (1158)	33	0.51		
1144	305	16	L	Drawn at Temp	150 (1034)	148 (1020)	220 (1517)	25	0.29		
1541F	290	15	L	Q&T Forging	138 (951)	129 (889)	185 (1276)	49	0.68	0.12	
1541F	260	15	L	Q&T Forging	129 (889)	114 (786)	185 (1276)	60	0.93	0.13	
30304	160	1	L	HR & Annealed	108 (745)	37 (255)	228 (1572)	74	1.37		
30304	327	1	L	CD	138 (951)	108 (745)	246 (1696)	69	1.16		
30310	145	1	L	HR & Annealed	93 (641)	32 (221)	168 (1158)	64	1.01		
4130	258	1	L	Q&T	130 (896)	113 (779)	206 (1420)	67	1.12		
4130	365	1	L	Q&T	207 (1427)	197 (1358)	264 (1820)	55	0.79		
4140	310	16	L	Q&T Drawn at Temp	156 (1076)	140 (965)	221 (1524)	60	0.69		
4142	310	16	L	Drawn at Temp	154 (1062)	152 (1048)	162 (1117)	29	0.35		
4142	335	16	L	Drawn at Temp	181 (1248)	179 (1234)	246 (1696)	28	0.34		
4142	380	6	L	Q&T	205 (1413)	200 (1379)	265 (1827)	48	0.66	0.051	
4142	400	6	L	Q&T and Deformed	225 (1551)	210 (1448)	275 (1896)	47	0.63	0.032	
4142	450	6	L	Q&T	255 (1758)	230 (1586)	290 (1999)	42	0.54	0.043	
4142	475	6	L	Q&T and Deformed	295 (2034)	275 (1896)	300 (2068)	20	0.22	0.01	
4142	450	6	L	Q&T and Deformed	280 (1931)	270 (1862)	305 (2103)	37	0.46	0.016	
4142	475	6	L	Q&T	280 (1931)	250 (1724)	315 (2172)	35	0.43	0.048	
4142	670	6	L	As Quenched	355 (2448)	235 (1620)	375 (2586)	6	0.06	0.136	
4142	560	6	L	Q&T	325 (2241)	245 (1689)	385 (2654)	27	0.31	0.091	
4340	243	1	L	HR & Annealed	120 (827)	92 (634)	158 (1089)	43	0.57		
4340	409	1	L	Q&T	213 (1469)	199 (1372)	226 (1558)	38	0.48		
4340	350	2	L	Q&T	180 (1241)	170 (1172)	240 (1655)	57	0.84	0.066	229 (1579)
5160	430	7	L	Q&T	242 (1669)	222 (1531)	280 (1931)	42	0.87	0.055	308 (2124)
52100	518	1	L	Sol Heat Q&T	292 (2013)	279 (1924)	318 (2193)	11	0.12		
9262	260	7	L	Annealed	134 (924)	66 (455)	151 (1041)	14	0.16	0.22	253 (1744)
9262	280	7	L	Q&T	145 (1000)	114 (786)	177 (1220)	33	0.41	0.14	
9262	410	7	L	Q&T	227 (1565)	200 (1379)	269 (1855)	32	0.38	0.06	283 (1951)
950C	159	8	LT	HR Plate	82 (565)	46 (317)	135 (931)	64	1.03	0.19	134 (924)
950C	150	3	L	HR Bar	82 (565)	47 (324)	145 (1000)	69	1.19	0.21	
950X	150	5	L	Plate Channel	64 (441)	50 (345)	109 (752)	65	1.06	0.16	98 (676)
950X	156	9	L	HR Plate	77 (531)	48 (331)	145 (1000)	72	1.24	0.19	131 (903)
980X	225	5	L	Plate Channel	101 (696)	82 (565)	177 (1220)	68	1.15	0.13	181 (1248)
1100 Al	26	1	L	As Received	16 (110)	14 (97)		88	2.09		
2014-T6	155	1	L	Sol Tr & Artif Age	74 (510)	67 (462)	87 (600)	25	0.29		
2024-T351		7	L	Sol Tr Strn Harden	68 (469)	55 (379)	81 (558)	25	0.28	0.032	66 (455)
2024-T4		2	L	Sol Tr & RT Age	69 (476)	44 (303)	92 (634)	35	0.43	0.20	117 (807)
5456-H311	95	1	L	Strain Hardened	58 (400)	34 (234)	76 (524)	35	0.42		
7075-T6		2	L	Sol Tr & Artif Age	84 (579)	68 (469)	108 (745)	33	0.41	0.113	120 (827)

† See list of Data References

¹ Tradename—Bethlehem Steel Corp.² ASTM Specification³ Tradename—Armco Steel Corp.⁴ Tradename—Republic Steel Corp.⁵ Grade Number—Allegheny Ludlum Steel Corp.

Tabla N° 8 Propiedades Mecánicas Cíclicas de los Materiales.

TABLE 2—CYCLIC STRESS-STRAIN AND FATIGUE PROPERTIES OF SELECTED METALS (sort: steel, Al, SAE spec., increasing true fracture strength)												
SAE Spec	BHn	Data Ref†	Grain Dir	Process Description	Mod of Elas ksi (GPa)	Cyc Yld ksi (MPa)	Cyc Strain Hard'g Exp	Cyc Str Cof ksi (MPa)	Fat Str Cof ksi (MPa)	Fat Str Exp	Fat Duc Cof	Fat Duc Exp
A-538-A ²	405	6	L	Sol Tr & Aged	27000 (186)	150 (1034)	0.09		240 (1655)	-0.065	0.30	-0.62
A-538-B ²	460	6	L	Sol Tr & Aged	27000 (186)	195 (1344)	0.075		310 (2137)	-0.071	0.80	-0.71
A-538-C ²	480	6	L	Sol Tr & Aged	26000 (179)	215 (1482)	0.08		325 (2241)	-0.07	0.60	-0.75
AM-350 ³		1	L	HR & Annealed	28000 (193)	196 (1351)	0.13		406 (2799)	-0.14	0.33	-0.84
AM-350 ³	496	1	L	CD	26000 (179)	235 (1620)	0.21		390 (2689)	-0.102	0.10	-0.42
Gainex ¹		7	LT	HR Sheet	29200 (201)	58 (400)	0.11	114 (786)	117 (807)	-0.07	0.86	-0.65
Gainex ¹		7	L	HR Sheet	29200 (201)	54 (372)	0.11	114 (786)	117 (807)	-0.071	0.86	-0.65
H-11	660	6	L	Ausformed	30000 (207)	340 (2344)	0.07		460 (3172)	-0.077	0.08	-0.74
R-100 ⁴	236	11	LT	As Rec Plate	28500 (197)							
R-100 ⁴	236	11	L	As Rec Plate	28000 (193)							
RQC-100 ¹	290	10	LT	HR Plate	30000 (207)	87 (600)	0.14	208 (1434)	180 (1241)	-0.07	0.66	-0.69
RQC-100 ¹	290	10	L	HR Plate	30000 (207)	87 (600)	0.14	208 (1434)	180 (1241)	-0.07	0.66	-0.69
10862	430	7	L	Q&T	28000 (193)	140 (965)	0.16	309 (2130)	258 (1779)	-0.067	0.32	-0.56
1005-1009	90	7	LT	HR Sheet	30000 (207)	35 (241)	0.12	71 (490)	84 (579)	-0.09	0.15	-0.43
1005-1009	125	7	LT	CD Sheet	30000 (207)	41 (283)	0.11	83 (572)	75 (517)	-0.059	0.30	-0.51
1005-1009	125	7	L	CD Sheet	29000 (200)	36 (248)	0.11	71 (490)	78 (538)	-0.073	0.11	-0.41
1005-1009	90	7	L	HR Sheet	29000 (200)	33 (228)	0.12	67 (462)	93 (641)	-0.109	0.10	-0.39
1015	80	4	L	Normalized	30000 (207)	35 (241)	0.22	137 (945)	120 (827)	-0.11	0.95	-0.64
1020	108	12	L	HR Plate Plate	29500 (203)	35 (241)	0.18	112 (772)	130 (896)	-0.12	0.41	-0.51
1040	225	13	L	As Forged	29000 (200)	56 (386)	0.18		223 (1538)	-0.14	0.61	-0.57
1045	225	7	L	Q&T	29000 (200)	60 (414)	0.18	195 (1344)	178 (1227)	-0.095	1.00	-0.66
1045	410	7	L	Q&T	29000 (200)	120 (827)	0.146	335 (2310)	270 (1862)	-0.073	0.60	-0.70
1045	390	7	L	Q&T	30000 (207)	110 (758)	0.17		230 (1586)	-0.074	0.45	-0.68
1045	450	7	L	Q&T	30000 (207)	140 (965)	0.15		260 (1793)	-0.07	0.35	-0.69
1045	500	7	L	Q&T	30000 (207)	185 (1276)	0.12		330 (2275)	-0.08	0.25	-0.68
1045	595	7	L	Q&T	30000 (207)	250 (1724)	0.13		395 (2723)	-0.081	0.07	-0.60
1080 + Mn	326	14	L	HR Plate	30000 (207)							
1080 + Mn	375	14	L	Q&T	30400 (210)							
1080 + Mn	415	14	L	Q&T	29300 (202)							
1080 + Mn	505	14	L	Q&T	29700 (205)							
1080 + Mn	555	14	L	Q&T	30400 (210)							
1144	265	16	L	CD Strain Rel	28500 (197)	80 (552)	0.15		145 (1000)	-0.08	0.32	-0.58
1144	305	16	L	Drawn at Temp	28800 (199)	82 (565)	0.18		230 (1586)	-0.09	0.27	-0.53
1541F	290	15	L	Q&T Forging	29900 (206)	95 (655)	0.17	255 (1758)	185 (1276)	-0.076	0.68	-0.65
1541F	260	15	L	Q&T Forging	29900 (206)	85 (586)	0.16	235 (1620)	185 (1276)	-0.071	0.93	-0.65
30304	160	1	L	HR & Annealed	27000 (186)	104 (717)	0.36		350 (2413)	-0.15	1.02	-0.69
30304	327	1	L	CD	25000 (172)	127 (876)	0.17		330 (2275)	-0.12	0.89	-0.77
30310	145	1	L	HR & Annealed	28000 (193)	50 (345)	0.26		240 (1655)	-0.15	0.60	-0.57
4130	258	1	L	Q&T	32000 (221)	82 (565)	0.13		185 (1276)	-0.083	0.92	-0.63
4130	365	1	L	Q&T	29000 (200)	120 (827)	0.12		246 (1696)	-0.081	0.89	-0.69
4140	310	16	L	Q&T Drawn at Temp	29200 (201)	90 (621)	0.14		265 (1827)	-0.08	1.2	-0.59
4142	310	16	L	Drawn at Temp	29000 (200)	108 (745)	0.18		210 (1448)	-0.10	0.22	-0.51
4142	335	16	L	Drawn at Temp	28900 (199)	181 (1248)	0.14		181 (1248)	-0.08	0.06	-0.62
4142	380	6	L	Q&T	30000 (207)	120 (827)	0.17		265 (1827)	-0.08	0.45	-0.75
4142	400	6	L	Q&T and Deformed	29000 (200)	130 (896)	0.16		275 (1896)	-0.09	0.50	-0.75
4142	450	6	L	Q&T	30000 (207)	155 (1069)	0.15		290 (1999)	-0.08	0.40	-0.73
4142	475	6	L	Q&T and Deformed	29000 (200)	160 (1103)	0.15		300 (2068)	-0.082	0.20	-0.77
4142	450	6	L	Q&T and Deformed	29000 (200)	155 (1069)	0.16		305 (2103)	-0.09	0.60	-0.76
4142	475	6	L	Q&T	30000 (207)	195 (1344)	0.13		315 (2172)	-0.081	0.09	-0.61
4142	670	6	L	As Quenched	29000 (200)	320 (2206)	0.05		375 (2586)	-0.075		
4142	560	6	L	Q&T	30000 (207)	250 (1724)	0.12		385 (2654)	-0.089	0.07	-0.76
4340	243	1	L	HR & Annealed	28000 (193)	66 (455)	0.18		174 (1200)	-0.095	0.45	-0.54
4340	409	1	L	Q&T	29000 (200)	120 (827)	0.15		290 (1999)	-0.091	0.48	-0.60
4340	350	2	L	Q&T	28000 (193)	110 (758)	0.14		240 (1655)	-0.076	0.73	-0.62
5160	430	7	L	Q&T	28000 (193)	145 (1000)	0.15	335 (2310)	280 (1931)	-0.071	0.40	-0.57
52100	518	1	L	Sol Heat Q&T	30000 (207)	192 (1324)	0.16		375 (2586)	-0.09	0.18	-0.56
9262	260	7	L	Annealed	30000 (207)	76 (524)	0.15	200 (1379)	151 (1041)	-0.071	0.16	-0.47
9262	280	7	L	Q&T	28000 (193)	94 (648)	0.12	197 (1358)	177 (1220)	-0.073	0.41	-0.60
9262	410	7	L	Q&T	29000 (200)	152 (1048)	0.089	292 (2013)	269 (1855)	-0.057	0.38	-0.65
950C	159	8	LT	HR Plate	29600 (204)	50 (345)	0.15		170 (1172)	-0.12	0.95	-0.61
950C	150	3	L	HR Bor	30000 (207)	45 (310)	0.185		141 (972)	-0.11	0.85	-0.59
950X	150	5	L	Plate Channel	30000 (207)	49 (338)	0.134	115 (793)	91 (627)	-0.075	0.35	-0.54
950X	156	9	L	HR Plate	29500 (203)	56 (386)	0.114	134 (924)	146 (1007)	-0.10	0.85	-0.61
980X	225	5	L	Plate Channel	28200 (194)	81 (558)	0.134	181 (1248)	153 (1055)	-0.08	0.21	-0.53
1100 AL	26	1	L	As Received	10000 (69)	9 (62)	0.15		28 (193)	-0.106	1.8	-0.69
2014-T6	155	1	L	Sol Tr & Artif Age	10000 (69)	60 (414)	0.16		123 (848)	-0.106	0.42	-0.65
2024-T351		7	L	Sol Tr Strm Harden	10600 (73)	62 (427)	0.065	95 (655)	160 (1103)	-0.124	0.22	-0.59
2024-T4		2	L	Sol Tr & RT Age	10200 (70)	64 (441)	0.08		147 (1014)	-0.11	0.21	-0.52
5456-H311	95	1	L	Strain Hardened	10000 (69)	52 (359)	0.16		105 (724)	-0.11	0.46	-0.67
7075-T6		2	L	Sol Tr & Artif Age	10300 (71)	76 (524)	0.146		191 (1317)	-0.52	0.19	-0.52

† See Data References, Table 1

¹ Tradename—Bethlehem Steel Corp.² ASTM Specification³ Tradename—Armco Steel Corp.⁴ Tradename—Republic Steel Corp.⁵ Grade Number—Allegheny Ludlum Steel Corp.

Tabla N° 9 Propiedades Mecánicas Acero A-106.

TUBERIA DE ACERO ESTRUCTURAL

GRUPO	CLASE	ESPECIFICACION Y GRADO	LIMITE ELASTICO		RESISTENCIA A LA TRACCION	
			MPa	ksi	MPa	ksi
I	C	API 5L G-B	240	35	415 min.	60 min.
		ASTM A-53 G-B	240	35	415 min.	60 min.
		ASTM A-135 G--B	240	35	415 min.	60 min.
		ASTM A-139 G-B	240	35	415 min.	60 min.
		ASTM A-381G-Y35	240	35	415 min.	60 min.
		ASTM A-500 G-A	230-270	33-39	310 min.	45 min.
		ASTM A-501	250	36	400 min.	58 min.
I	B	ASTM A-106 G-B	240	35	415 min.	60 min.
I	A	ASTM A-524 (la resistencia varia c/ espesor)	205-240	30-35	380-585	55-85
II	C	API 5L G-X42 (2% máx. expansión en frío)	290	42	415 min.	60 min.
		API 5L G-X52 (2% máx. expansión en frío)	360	52	455 min.	66 min.
		ASTM A-500 G-B	290-320	42-46	400 min.	58 min.
		ASTM A-618	345	50	485 min.	70 min.
II	B	API 5L G-X52 con SR5,SR6 o SR8	360	52	455 min.	66 min.
II	A	API Spec 2B o ASTM A-139, A-252, A-381, A-671				

Tabla N° 10 Propiedades Mecánicas Acero A 36.
ASTM A36 Y A42-27ES.

Características	Espesor, e al que se aplica, mm		Unidad de medida (*)	Grados de aceros	
	A42-27ES	ASTM A36		A42-27ES	ASTM A36
Resistencia a la Tracción, R_m	Todos	(**)	Kgf/mm ²	$42 \leq R_m \leq 52$	$41 \leq R_m \leq 56$
Límite de Fluencia mínimo, R_e	$e \leq 16$	(**)	Kgf/mm ²	27	25
Alargamiento Porcentual de Rotura, A, en Probetas de $L_0 = 50$ mm	$e \leq 5$ $5 \leq e \leq 16$ $16 \leq e \leq 50$	(**)	% min % min % min	22 20 18	19

* De acuerdo con NCh 22, $1 \text{ Kgf/mm}^2 = 9,80665 \text{ MPa}$

** Para perfiles de sección inferior a 645 mm^2 , o barras de diámetro inferior a 13 mm , no se exige ensayo de tracción al fabricante.

Anexo 3 Plano Polín Pateador.

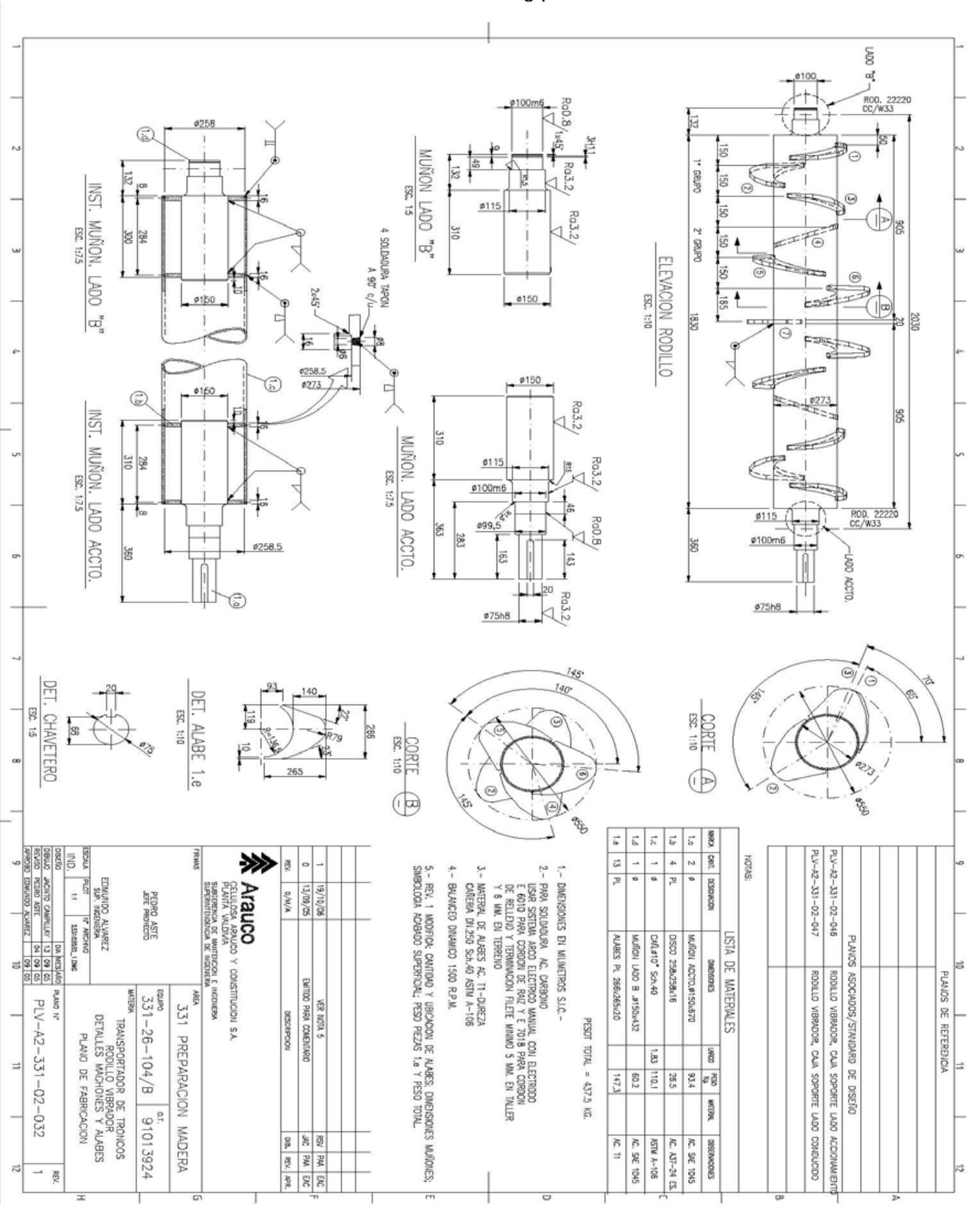


Figura 69 Plano Polin Pateador.

Anexo 4 Resultados Polín Pateador en Pro/Engineer.

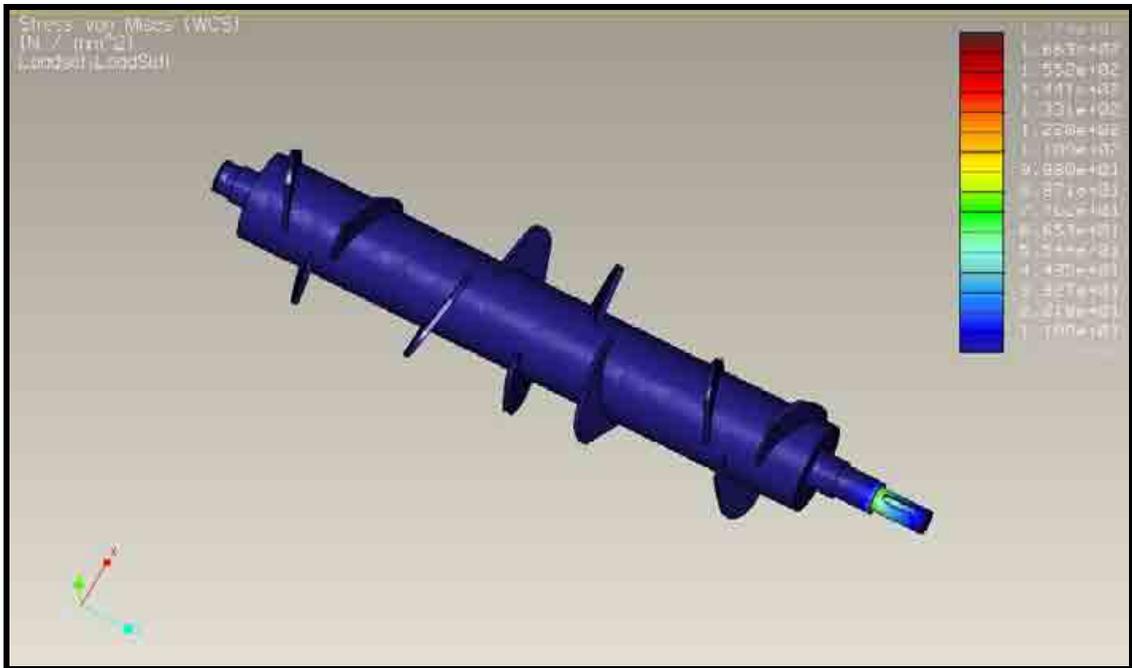


Figura 70 Tensiones Von Mises.

Las figuras muestran que las mayores concentraciones de tensiones se producen en el primer cambio de sección del lado accionamiento, con una magnitud de 174,2 N/mm².

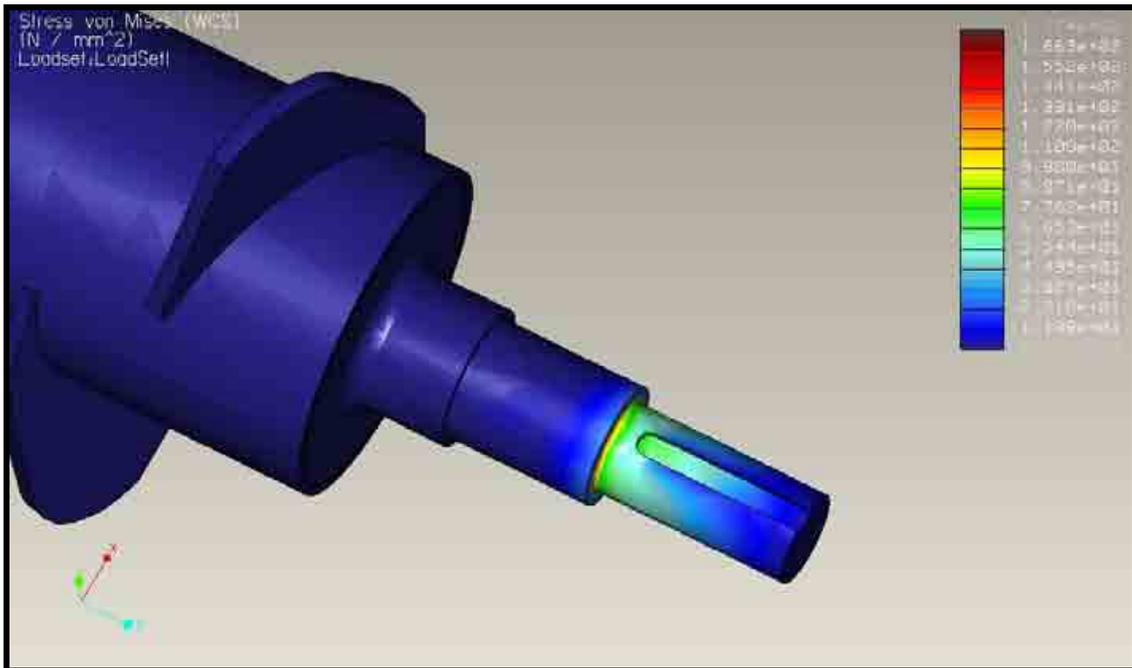


Figura 71 Tensiones Von Mises (ampliación).

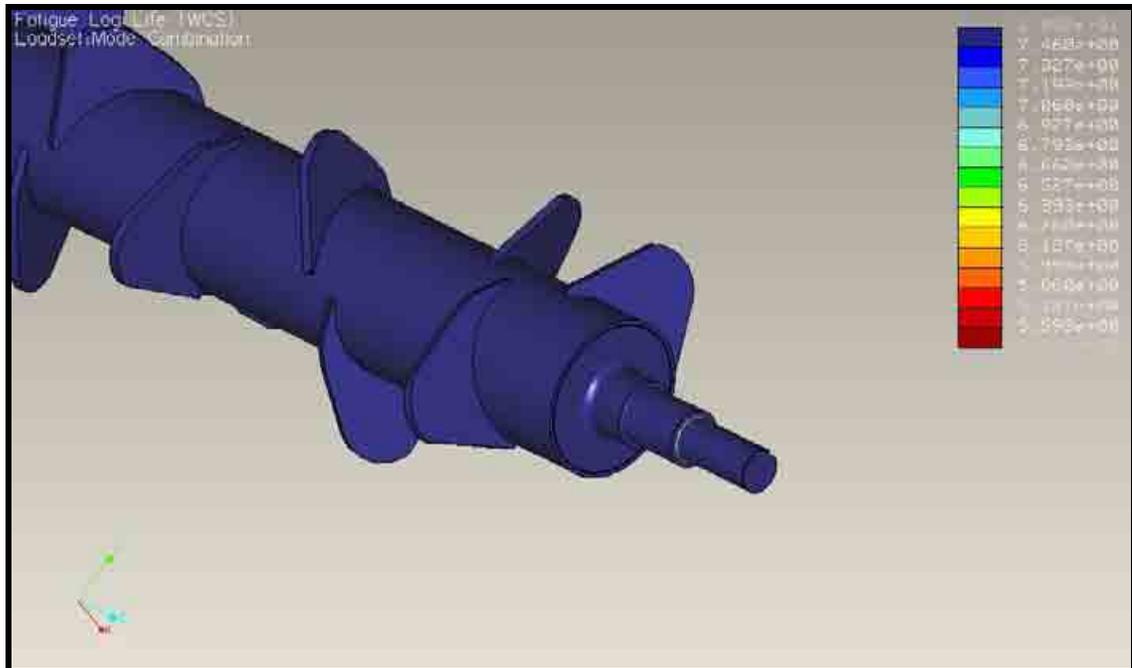


Figura 72 Análisis de Fatiga.

La duración de la posibilidad de falla por fatiga se iniciará aproximadamente a los $10^{5.46}$ ciclos.

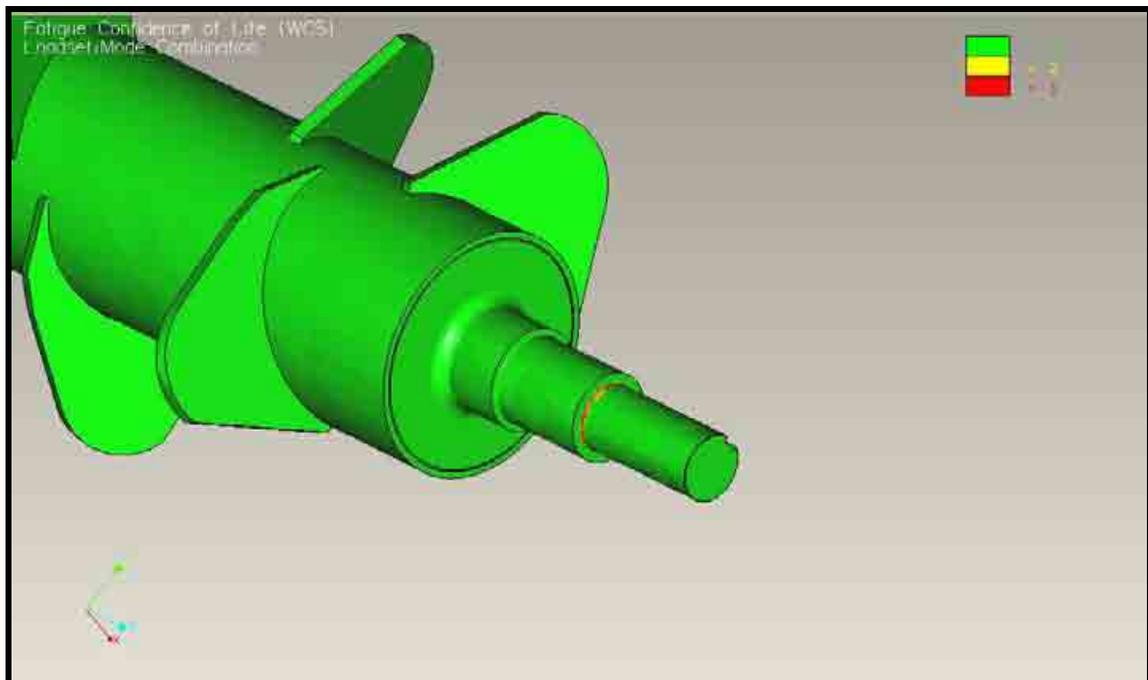


Figura 73 Confiabilidad de vida.

La zona del primer cambio de sección es la menos confiable con un valor de 1, mientras mayor sea el número mayor es la confiabilidad del elemento.

Anexo 5 Plano Eje Motor Harnero Delta-Combi.

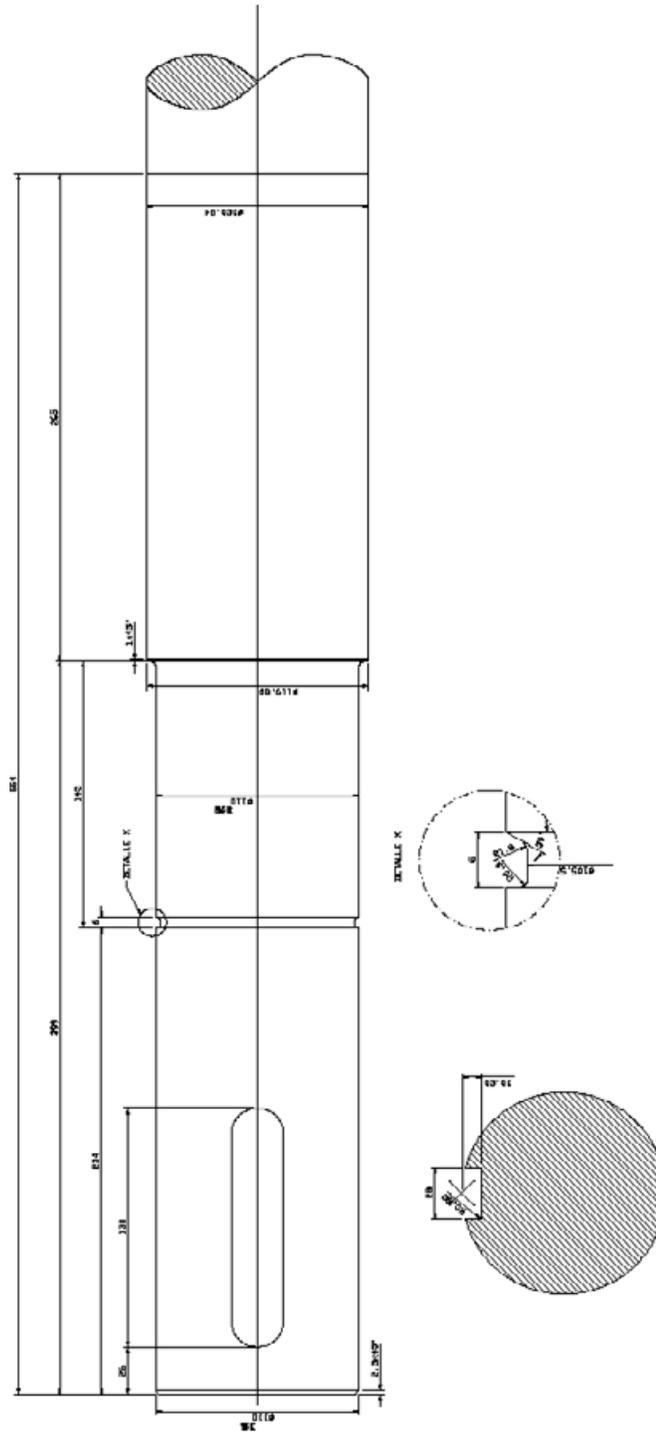


Figura 75 Modificación plano Eje Harnero Delta-Combi.

**Anexo 6 Resultados Eje Motor Harnero Delta-Combi en
Pro/Engineer.**

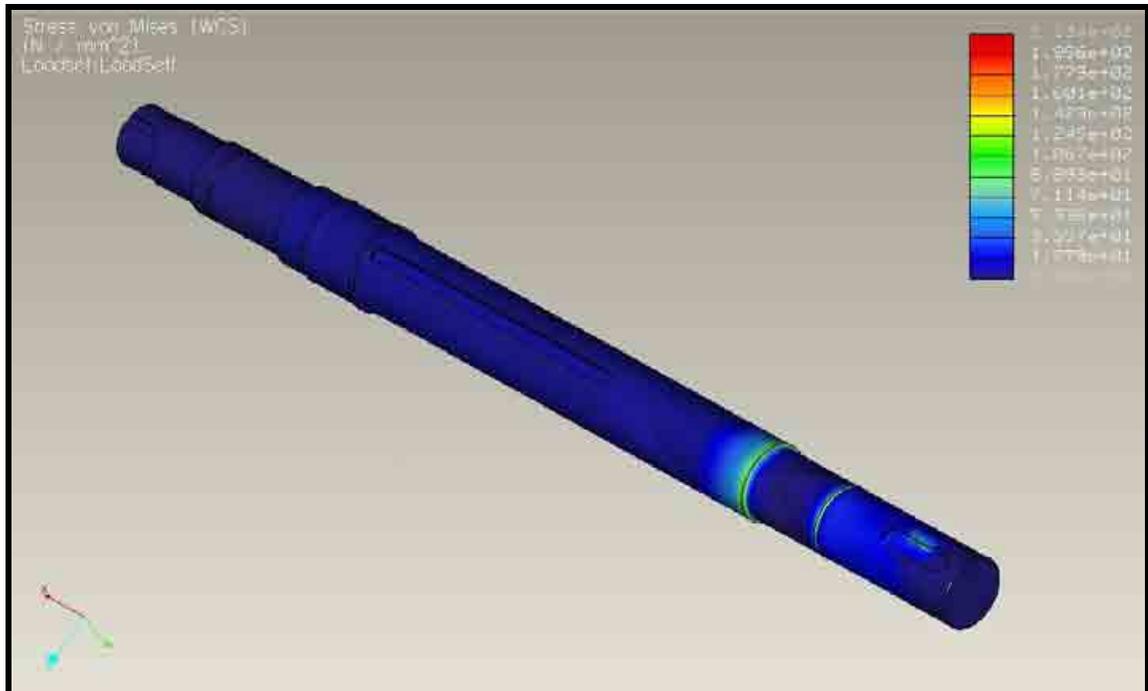


Figura 76 Tensiones Von Mises.

Las figuras muestran que las mayores concentraciones de tensiones se producen el cambio de sección cercano al descanso del lado accionamiento de motor, con una magnitud de $145,7 \text{ N/mm}^2$.

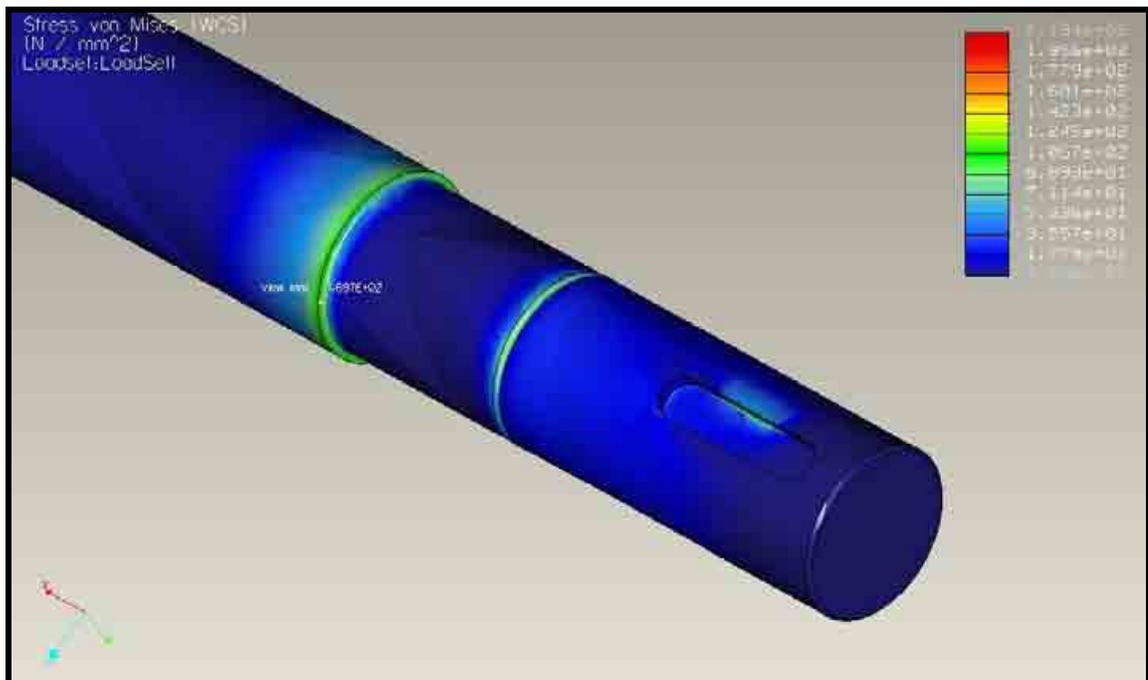


Figura 77 Tensiones Von Mises (ampliada).

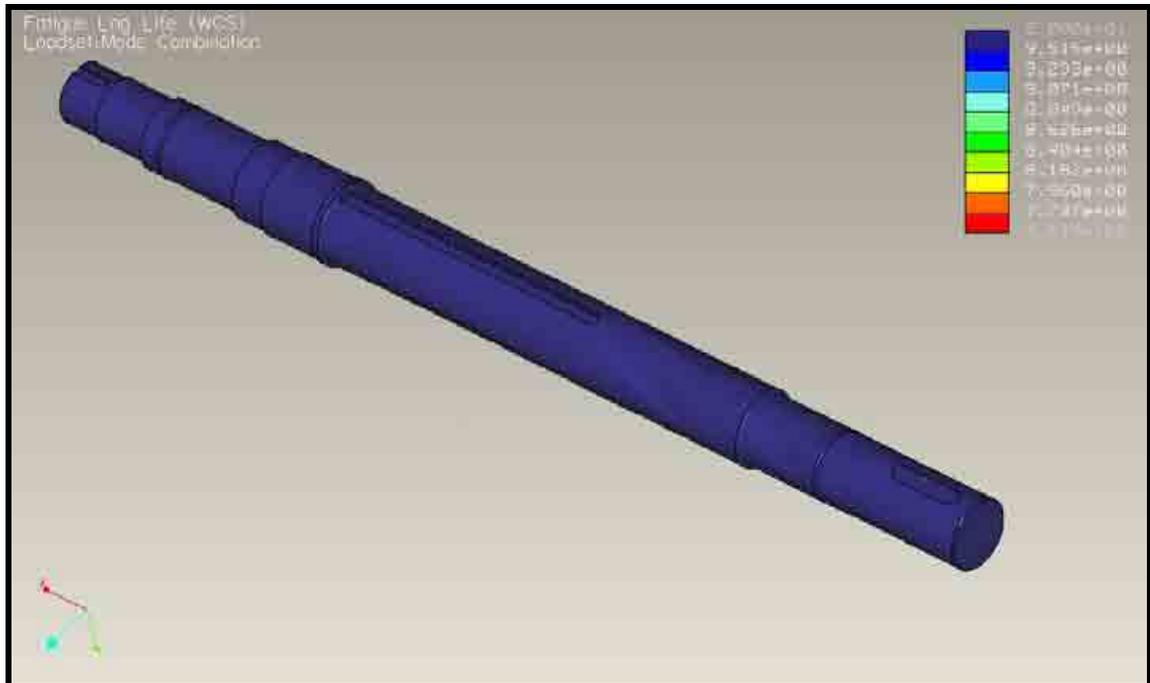


Figura 78 Análisis de Fatiga.

La duración de la posibilidad de falla por fatiga se iniciará aproximadamente a los $10^{7.532}$ ciclos.

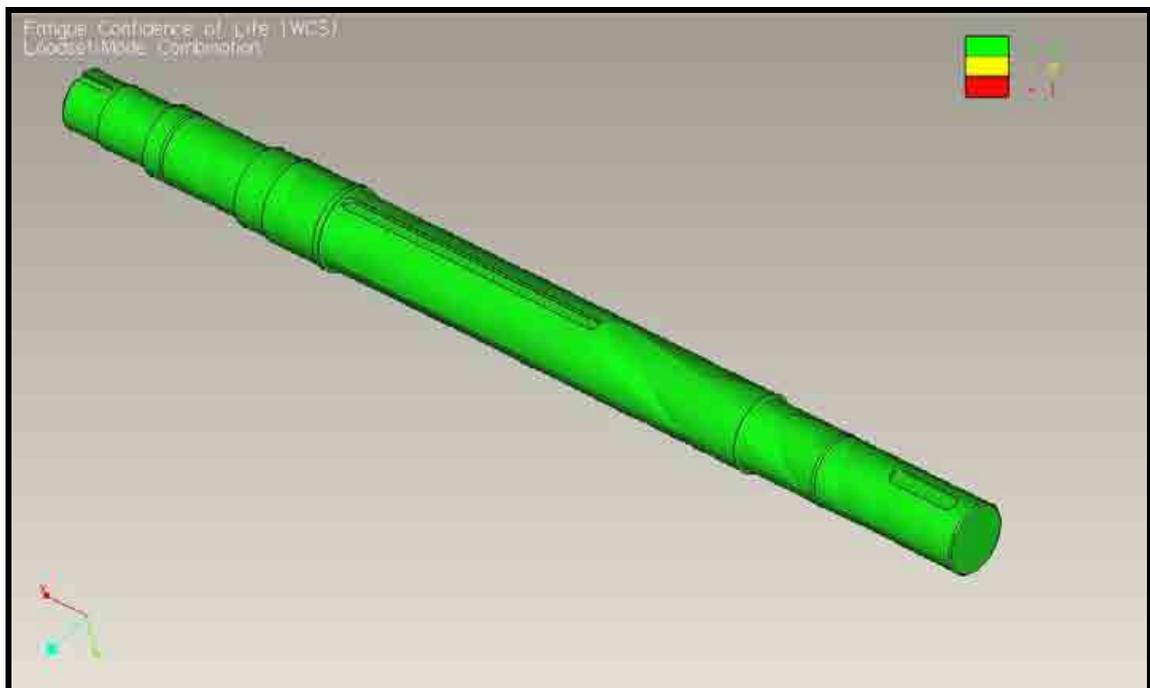


Figura 79 Confiabilidad de vida.

A mayor número (1, 2 ó 3) mejor es la confiabilidad del elemento.

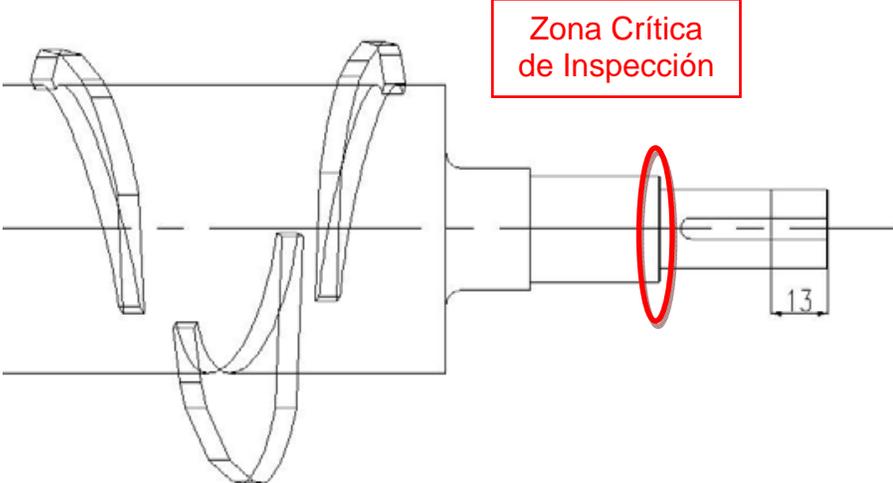
Anexo 7 Velocidades de propagación del sonido.

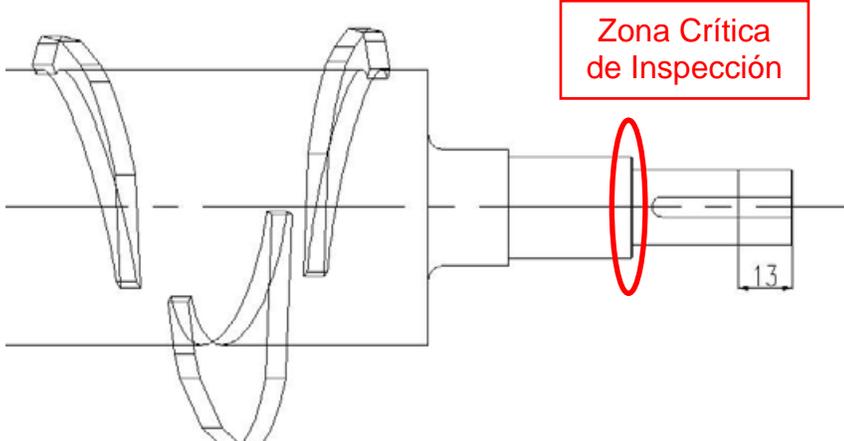
Tabla N° 11 Velocidades de Propagación del sonido.

Material	Longitudinal Velocity		Shear Velocity		Acoustic Impedance (kg/m ² x10 ⁶)
	(in/μs)*	(m/s)	(in/μs)*	(m/s)	
Acrylic resin (Perspex ®)	0,107	2730	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
Lead	0,085	2160	0,028	700	24,49
Lucite ®	0,106	2680	0,05	1260	3,16
Mercury	0,057	1450	-----	-----	19,66
Molybdenum	0,246	5250	0,132	3350	63,75
Motor Oil (SAE 20 or 30)	0,069	1740	-----	-----	1,51
Nickel, pure	0,222	5630	0,117	2960	49,99
Platinum	0,156	3960	0,066	1670	84,74
Polyamide (slow) (nylon, Perlon ®)	0,087	2200	0,043	1100	2,40
(fast)	0,102	2500	0,047	1200	3,10
Polystyrene	0,092	2340	-----	-----	2,47
Polyvinylchloride, PVC hard	0,094	2395	0,042	1060	3,35
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 austenitic stainless	0,223	5660	0,123	3120	45,45
Steel, 347 austenitic stainless	0,226	5740	0,122	3090	45,40
Tin	0,131	3320	0,066	1670	24,20
Titanium, Ti 150A	0,24	6100	0,123	3120	27,69
Tungsten	0,204	5180	0,113	2870	99,72
Uranium	0,133	3370	0,078	1980	63,02
Water (20° C)	0,058	1480	-----	-----	1,48
Zinc	0,164	4170	0,095	2140	29,61

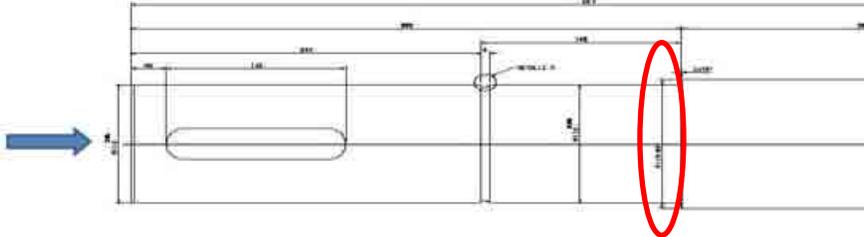
Source: Nondestructive Testing Handbook 2nd Edition Volume 7 Ultrasonic Testing ASNT 1991 ed. Paul McIntire.

Anexo 8 Procedimiento ultrasónico para polín pateador.

 Arauco Planta Valdivia		INFORME ULTRA SONIDO		Doc. N° IUT XX/ XXX XXXXX		Inspección Longitudinal				
				Rev. 1	Hoja 1					
				Fecha XX-XX-XXXX						
Área 331	Equipo N° 26104B	Descripción Polín Pateador								
Equipo Colector		Tipo Transductor		Cable		Acoplante		Patrón Calibración		
				Se buscará indicaciones en el primer cambio de sección de lado accionamiento del polín.						
Calibración					Inspección					
Estado de la Inspección			Aprobado			Rechazado				
Limpieza			Inspección			Total Horas Utilizadas				
Control Tiempos		Inicio			Inicio			Inicio		
		Término			Término			Término		
Ejecutante E.C.			Supervisor E.C.			Responsable Planta Valdivia				
Firma y Timbre										
Nombre										
Fecha										

 Arauco Planta Valdivia		INFORME ULTRA SONIDO		Doc. N° IUT XX/ XXX XXXXX		Inspección Angular			
				Rev. 1	Hoja 1				
				Fecha XX-XX-XXXX					
Área 331	Equipo N° 26104B	Descripción Polín Pateador							
Equipo Colector		Tipo Transductor		Cable		Acoplante		Patrón Calibración	
				<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block; color: red;"> Zona Crítica de Inspección </div>					
				Con cuña de 45° buscar indicaciones de falla a 13 milímetros desde la testa del muñón de accionamiento, barriendo todo su contorno.					
Observación: Con cuña angular de 45° posar el transductor a 13mm desde la testa del muñón de accionamiento del polín.									
Calibración					Inspección				
Estado de la Inspección				Aprobado		Rechazado			
Control Tiempos		Limpieza		Inspección		Total Horas Utilizadas			
		Inicio		Inicio		Inicio			
		Término		Término		Término			
		Ejecutante E.C.		Supervisor E.C.		Responsable Planta Valdivia			
Firma y Timbre									
Nombre									
Fecha									

**Anexo 9 Procedimiento ultrasónico para Eje motor
Harnero Delta-Combi**

 Arauco Planta Valdivia		INFORME ULTRA SONIDO		Doc. N° IUT XX/ XXX XXXXX		Inspección Longitudinal			
				Rev. 1	Hoja 1				
				Fecha XX-XX-XXXX					
Área 346	Equipo N° 31115	Descripción Eje Motor Harnero Delta-Combi							
Equipo Colector		Tipo Transductor		Cable		Acoplante		Patrón Calibración	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; color: red; font-weight: bold;">Zona Crítica de Inspección</div> <div> Buscar indicaciones en el cambio de sección del descanso de acción. </div> </div> 									
Calibración					Inspección				
Estado de la Inspección			Aprobado		Rechazado				
Control Tiempos	Limpieza		Inspección		Total Horas Utilizadas				
	Inicio		Inicio		Inicio				
	Término		Término		Término				
Ejecutante E.C.			Supervisor E.C.		Responsable Planta Valdivia				
Firma y Timbre									
Nombre									
Fecha									