

UNIVERSIDAD DON BOSCO



**“APLICACIONES DE LAS PRUEBAS NO
DESTRUCTIVAS EN EL MANTENIMIENTO DE
AERONAVES BAJO UN PROGRAMA DE
ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD”.**

TRABAJO DE GRADUACION PREPARADO PARA LA



FACULTAD DE INGENIERIA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO MECANICO

PRESENTADO POR:

CARLOS GILBERTO DOMINGUEZ TORRES

SEPTIEMBRE - 1997

SOYAPANGO EL SALVADOR CENTROAMERICA

UNIVERSIDAD DON BOSCO

RECTOR

ING. FEDERICO MIGUEL HUGUET RIVERA

SECRETARIO GENERAL

PBRO. LIC. JOSE PEDRO GARCIA

DECANO FACULTAD DE INGENIERIA

ING. CARLOS GUTIERREZ

ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACION

ING. RICARDO SILIEZAR

JURADO EXAMINADOR

ING. FRANCISCO DELEON

ING. MAURICIO HERNANDEZ

Distinguido grupo de Ingenieros que conformó el Jurado evaluador de este Trabajo de Graduación: Ing. Ricardo Siliézar, Jurado Asesor; Ing. Francisco DeLeón, Jurado Examinador; Ing. Mauricio Hernández, Jurado Examinador.

Ing. Ricardo Siliézar

Ing. Francisco Deleón

Ing. Mauricio Hernández

SEPTIEMBRE DE 1997

SOYAPANGO

EL SALVADOR

CENTROAMERICA

Distinguido grupo de Ingenieros que conformó el Jurado evaluador de este Trabajo de Graduación: Ing. Ricardo Siliézar, Jurado Asesor; Ing. Francisco DeLeón, Jurado Examinador; Ing. Mauricio Hernández, Jurado Examinador.

Ing. Ricardo Siliézar

Ing. Francisco Deleón

Ing. Mauricio Hernández

SEPTIEMBRE DE 1997

SOYAPANGO

EL SALVADOR

CENTROAMERICA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios Padre Todopoderoso y a su amadísima Madre por darme la oportunidad de culminar esta etapa satisfactoriamente. Les debo mucho a mis padres, familiares, maestros y amigos a los que “robé” parte de su tiempo para apoyarme y brindarme su confianza para llegar hasta este día. Y por último pero no menos importante, quisiera agradecer a mi asesor del presente Trabajo de Graduación por su conducción y guía. A todos ustedes y a los que se me escapan involuntariamente, mis más sinceros agradecimientos.

DEDICATORIA

Quisiera dedicar el presente Trabajo a:

A nuestro Dios Padre Todopoderoso y a su Santísima Madre por las incontables bendiciones con las que me han favorecido.

A mis padres por su amor, esfuerzos, sacrificios, comprensión y entrega decidida en todos estos años.

A mi Abuelita por su amor y oraciones.

A mis hermanas y sobrinita por su amor, apoyo y compañía.

A mis maestros de todos estos años anteriores por sus enseñanzas, en especial a todos aquellos anónimos que me enseñaron el valor del estudio, el sacrificio y la constancia.

A mis amigos por su amistad, comprensión y sobre todo por saberme esperar.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	xi
 CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	4
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	4
1.4 METODOLOGÍA.....	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
 CAPITULO II	
ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y SU INFLUENCIA EN LA INDUSTRIA AÉREA.	
2.1 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.....	9
<i>2.1.1 Conceptos básicos de Aseguramiento de la Calidad</i>	9
<i>2.1.2 Confiabilidad del producto</i>	9
<i>2.1.3 Establecimiento de niveles de calidad</i>	10
<i>2.1.4 Niveles prácticos de calidad</i>	11
<i>2.1.5 Rango de Sensibilidad de Pruebas</i>	11
<i>2.1.6 Especificaciones de Calidad</i>	11
2.2 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD.....	12
<i>2.2.1 Definiciones</i>	12
<i>2.2.2 Elementos básicos de un Programa de Aseguramiento de la Calidad</i>	12

2.3 INFLUENCIA DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN LA CALIDAD Y ECONOMÍA DE LOS PRODUCTOS.	13
2.3.1 Generalidades	13
2.3.2 Aplicación efectiva de las Pruebas No Destructivas.	17
2.4 ADMINISTRACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.	19
2.4.1 Funciones de las Pruebas no Destructivas industria moderna.	19
2.4.2 Razones para el uso de las Pruebas No Destructivas.....	20
2.5 RÁPIDO CRECIMIENTO Y ACEPTACIÓN DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.	24
2.5.1 Demandas de la Ingeniería por materiales más legítimos.....	25
2.5.2 Público demanda una mayor seguridad.	26
2.5.3 Incremento de los costos debido a las fallas.	26
2.5.4 Responsabilidades del personal de producción y de los inspectores.....	26
2.6 FACTORES ECONÓMICOS	27
2.6.1 Beneficios de las Pruebas No Destructivas.	27
2.6.2 Criterio económico para la adopción de las Pruebas No Destructivas.	28
2.6.3 Grado de perfección requerida.	29
2.6.4 Evaluando Costos y Valores de las Pruebas No Destructivas.	31
2.6.5 Ahorrando Costos provenientes de Procesar Materia Prima Defectuosa.	31
2.6.6 Incrementando la Producción reduciendo los productos desechados.....	32
2.6.7 Costos de las Pruebas No Destructivas.	32
2.7 COORDINACIÓN Y MANEJO DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.....	35
2.7.1 Políticas de la Dirección.....	35
2.7.2 Objetivos de las Pruebas No Destructivas.....	35
2.7.3 Inspección de Recibo.	35

2.7.4 Departamento de Inspección.....	37
2.7.5 Contactos Externos.....	38
2.8 PROGRAMANDO LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y ESPECIFICACIONES.....	39
2.8.1 Fuentes de información.....	39
2.8.2 Ingenieros de Diseño y de Esfuerzos.....	39
2.8.3 Ingenieros de Materiales y Procesos.....	39
2.8.4 Ingeniero de Pruebas No Destructivas.....	39
2.9 ESPECIFICANDO LA SENSIBILIDAD Y PRECISIÓN DE LAS PRUEBAS.	40
2.9.1 Tolerancias Razonables.....	40
2.9.2 Limitaciones de Interpretación.....	40
2.9.3 Limitaciones Geométricas.....	41
2.9.4 Limitaciones de Accesibilidad.....	41
2.9.5 Limitaciones de tamaño y forma.....	42
2.9.6 Limitaciones de Materiales.....	42
2.9.7 Limitaciones de las superficies al examinar.....	42
2.9.8 Limitando el número de Propiedades a ser medidas.....	42
2.10 ESTABLECIENDO LA CONFIABILIDAD DE LAS PRUEBAS.....	43
2.10.1 Validez de las Pruebas.....	43
2.10.2 Validez del Juicio de los inspectores.....	44
2.10.3 Costos de Estándares inadecuados.....	44
2.11 PROGRAMANDO LAS PRUEBAS PARA UNA MAYOR EFECTIVIDAD Y ECONOMÍA.....	45
2.11.1 Materia Primas.....	45
2.11.2 Materiales Procesados.....	45
2.11.3 Materiales en Servicio.....	45
2.11.4 Número requerido de Pruebas Diferentes.....	46

2.12 EL FENÓMENO DE LA FATIGA Y CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS...	46
2.12.1 <i>Fractura por Fatiga.</i>	47
2.12.2 <i>Concentración de Esfuerzos</i>	48

CAPITULO III

LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

3.1. GENERALIDADES.....	50
3.1.1 <i>Sistema de clasificación de las técnicas de PND</i>	51
3.1.2 <i>Tipos de inspecciones por Pruebas No Destructivas</i>	67
3.1.3 <i>Fallas comunes encontradas durante las inspecciones</i>	70
3.2. LA INSPECCION RADIOGRAFICA.....	71
3.2.1 <i>Principios de la Radiografía</i>	72
3.2.2 <i>Aplicaciones de la Radiografía</i>	75
3.2.3 <i>Equipo Radiografico</i>	77
3.3. LA INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES.....	78
3.3.1. <i>Principios de la técnica por líquidos penetrantes</i>	78
3.3.2. <i>Aplicaciones de la inspección por líquidos penetrantes</i>	83
3.3.3. <i>Equipo de inspección por líquidos penetrantes</i>	87

3.4 INSPECCION POR PARTICULA MAGNETICA.....	88
3.4.1 <i>Principios de la inspección por partícula magnética.....</i>	89
3.4.2. <i>Aplicaciones de la técnica por partículas magnéticas.....</i>	90
3.4.3. <i>Equipo de inspección por partículas magnéticas.....</i>	93
3.5. INSPECCION POR CORRIENTES DE EDDIE.....	95
3.5.1. <i>Principios de la inspección por Corrientes de Eddie.....</i>	96
3.5.2. <i>Aplicaciones de la técnica por Corrientes de Eddie.....</i>	101
3.5.3. <i>Equipos para la técnica por Corrientes de Eddie.....</i>	101
3.6. INSPECCION POR ULTRASONIDO.....	104
3.6.1. <i>Principios de la inspección por Ultrasonido.....</i>	104
3.6.2. <i>Aplicaciones de las pruebas por Ultrasonido.....</i>	107
3.6.3. <i>Equipo de Ultrasonido.....</i>	109

CAPITULO IV

SELECCION DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

4.1.GENERALIDADES.....	112
4.2. BASES DE LOS CUADROS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.....	112

CAPITULO V

APLICACIONES DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN UNA AERONAVE COMERCIAL SEGUN RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE.

5.1 INSPECCIONES GENERALES EN ESTRUCTURAS DE COMPUESTOS.....	125
5.1.1 <i>Inspección de reparaciones de Compuestos.....</i>	125
5.1.2 <i>Radiografía de Rayos X en general.....</i>	130
5.1.3 <i>Inspección por Ultrasonido en general.....</i>	132
5.1.3.1 <i>Detección de Fallas por Ultrasonido.....</i>	132
5.1.3.2 <i>Inspección de Adhesión por Ultrasonido de estructuras metal-a-metal y “panal de abejas”</i>	137
5.1.4 <i>Inspección por método de golpeteo en estructuras “panal de abejas”.....</i>	139
5.1.5 <i>Inspección por Corrientes de Eddie en general.....</i>	142
5.2 RADIOGRAFIA POR RAYOS X.....	144
5.2.1 <i>Detección de Agua en estructuras “Panal de abejas”.....</i>	144
5.2.2. <i>Inspección de estructuras “Panal de abejas”.....</i>	146
5.2.3 <i>Empalmes de la Piel y Larguerillos en el área de la corona.....</i>	149
5.2.4 <i>Marcos formadores, larguerillos y clips en la BSTA 400,520 y 887.....</i>	150
5.2.5 <i>Abertura de la puerta de la escalera delantera en la BSTA 351 y el larguerillo S20.....</i>	152
5.2.6 <i>Marcos formadores de los flanges de las cuerdas internas de la bahía de carga delantera y trasera.....</i>	153
5.2.7 <i>Determinación de la distancia de los remaches al filo de los larguerillos entre la BSTA 1016 a la BSTA 1088.....</i>	156
5.2.8 <i>Lado interno de la piel inferior del ala en el refuerzo S8C al lado del empalme en la WBL 71.24.....</i>	158
5.2.9 <i>Placas Interiores de empalmes de la cuerda inferior de la pared delantera del ala en la BBL 70.85.....</i>	160

5.3 INSPECCION POR ULTRASONIDO.....	162
5.3.1 <i>Pin en las juntas de torsión superiores del tren de aterrizaje principal....</i>	162
5.3.2 <i>Sujetadores: Pernos y remaches.....</i>	166
5.3.3 <i>Cuerda exterior en el larguero 18A y la estación BSTA 727.....</i>	169
5.3.4 <i>Inspección en el mamparo de presurización en la BSTA 178.....</i>	171
5.3.5 <i>Inspección de adhesión de ultrasonido en los “doblers” del fuselaje.....</i>	174
5.3.6 <i>Inspección de los “doblers” de los cinturones de las ventanas.....</i>	176
5.4 INSPECCION POR CORRIENTES DE EDDIE.....	178
5.4.1 <i>Identificación del material de los cables de Control.....</i>	178
5.4.2 <i>Refuerzos del alma en el compartimiento del tren de aterrizaje delantero en la BSTA 268.25</i>	183
5.5 INSPECCION TERMOGRAFICA.....	186
5.5.1 <i>Inspección termográfica por hielo/agua en estructuras “Panal abejas”....</i>	186

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCION.....	191
6.2 CONCLUSIONES.....	192
BIBLIOGRAFIA.....	193

APENDICE:

GLOSARIO

INTRODUCCION

El presente trabajo examina las mayores aplicaciones del uso de la tecnología de las Pruebas No Destructivas (PND) bajo un Programa de Aseguramiento de la Calidad, mostrando cómo caben, desde el punto de vista económico, dentro de las estructuras organizacional y financiera de la industria moderna, sirviendo a la vez de guía para el lector que considere su uso, ya que el tema surge como una necesidad de aportar a la profesión y estudiantes universitarios de la carrera de Ingeniería Mecánica de El Salvador, una herramienta útil que sirva de apoyo efectivo y de ayuda en cualquier campo de la industria.

El trabajo comienza por hacer un análisis del por qué las Pruebas No Destructivas son un ingrediente crítico en la fórmula manufacturadora total y en el mantenimiento de cualquier industria que se rija bajo el esquema de un programa de Aseguramiento de la Calidad; más específicamente, en el mantenimiento de la estructura de una aeronave. El uso de ésta herramineta , ahorra dinero a las empresas, volviéndolas más rentables al ser más eficientes, manteniendo e incrementando la confiabilidad de sus productos y la reputación del fabricante; y en el caso de aeronaves de pasajeros, lograr el objetivo principal de reducir a cero, la pérdida de vidas humanas.

Se presentará en forma más detallada, la teoría general de cada una de las técnicas más conocidas y más utilizadas en la industria de servicios aéreos, garantizando que la selección de la técnica escogida esté basada en un conocimiento completo de las capacidades, ventajas y limitaciones de todas ellas. Luego se delimitarán todos aquellos conceptos y factores críticos para el análisis de la selección de la técnica de Pruebas No Destructivas (PND) más idónea, ante un determinado problema en particular de cualquier industria. Se expondrán los métodos más empleados en forma de manual práctico para una consulta rápida, de tal manera que el criterio de selección de dichas técnicas, sea en base al tipo de material y al tipo de servicio del objeto que será probado.

Finalmente se presentará la aplicación de algunas Pruebas No Destructivas (PND) más desarrolladas que se emplean en la industria del mantenimiento aéreo. Más específicamente, sobre las inspecciones que se efectúan durante el mantenimiento de la estructura del fuselaje de una avión comercial fabricado por la compañía estadounidense "Boeing Company" con su modelo 737-200. En ésta parte, se verán las aplicaciones específicas de dichas técnicas a determinados problemas que involucren diferentes tipos de materiales, propiedades mecánicas, técnicas, criticalidad, accesibilidad de la parte que será inspeccionada y el grado de confiabilidad que se desea obtener.

Para desarrollar el tema de “APLICACIONES DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN EL MANTENIMIENTO DE AERONAVES BAJO UN PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD”, el trabajo se ha dividido en seis capítulos :

El Capítulo I comprende una introducción general, con el objeto de que se visualice en forma global el trabajo. En él se expondrá la problemática y justificación de la realización del presente proyecto. Así mismo, se explicará la metodología empleada para alcanzar los objetivos que se establecerán y se señalarán los alcances y las limitaciones para llevar a cabo dicho trabajo.

En el Capítulo II, se estudiarán los principios básicos de Aseguramiento de la Calidad explicando lo que es un Programa de Aseguramiento de la Calidad y de cómo éste cabe dentro de la estructura organizacional de la industria moderna. A su vez, se analiza en una industria que utiliza las Pruebas No Destructivas (PND), la influencia que tienen en la economía y calidad de los productos y la razón del porqué ellas constituyen un ingrediente crítico en la fórmula manufacturadora total. Brevemente se presentan consideraciones generales sobre el fenómeno de la fatiga y la concentración de esfuerzos en los materiales.

En el Capítulo III, se presentará una recopilación bibliográfica de las Pruebas No Destructivas (PND) más conocidas en el medio, haciendo una clasificación de ellas de tal forma que queden ordenadas y en concordancia al sistema de 8 categorías utilizado por el estadounidense Comité Nacional Asesor (*National Advisory Board*) en su Comité de Pruebas No Destructivas, exponiendo los principios fundamentales, objetivos y limitaciones de dichas pruebas técnicas.

En el Capítulo IV se elaborarán las tablas de Pruebas No Destructivas que se utilizan para la selección de las técnicas más apropiadas, presentando una guía en donde se describirán de manera esquematizada, las técnicas de Pruebas No Destructivas en cada una de las 8 categorías de clasificación, con el objeto de que sirva como un manual de consulta de referencia rápida, que permita seleccionar la técnica más conveniente en base a las capacidades, ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Con ésta información, se garantizará que el criterio de selección de dichas técnicas sea en base al equipo que se dispone, al tipo de material y el tipo de servicio del objeto a ser inspeccionado. También se listarán las técnicas que son muy similares pero que convencionalmente son reconocidas como técnicas separadas con metodologías únicas, agrupándolas en cuadros bajo un solo nombre representativo para todas ellas.

Con el fin de demostrar la aplicabilidad de las Pruebas No Destructivas en un Programa de Aseguramiento de la Calidad, se describirá en el capítulo V las Pruebas No Destructivas (PND) más desarrolladas en el mantenimiento de componentes estructurales de un Boeing 737-200. Se recolectarán algunas de

las técnicas de Pruebas No Destructivas (PND) en componentes estructurales recomendadas por el fabricante de ésta aeronave con su respectiva técnica de inspección no destructiva, entre las cuales figuran como técnicas más desarrolladas la de Rayos X, ultrasonido, corrientes de Eddie y en menor escala la termografía. Estas categorías serán tratadas de manera particular en el presente trabajo por haber sido mejor desarrolladas por parte del fabricante con técnicas y métodos específicos a problemas típicos y de gran criticalidad. Todas las demás técnicas y métodos de Pruebas No Destructivas son igualmente aplicables a componentes estructurales de una aeronave con la misma efectividad que se aplicarían en otro componente en cualquier campo de la industria.

Finalmente, en el Capítulo VI, se presentarán las conclusiones generales del trabajo.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En éste capítulo se explica como se desarrollará el tema **“APLICACIONES DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN EL MANTENIMIENTO DE AERONAVES, BAJO UN PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD”** exponiendo el desconocimiento real y la poca e inaccesible información especializada con la que se dispone para cualquier persona interesada en dicha temática. Se justifica de esta manera, la realización del presente trabajo por la problemática planteada, la metodología empleada con la cual se alcanzan los objetivos trazados y los alcances y limitaciones del trabajo para que el lector sepa enmarcarse y obtenga lo que justamente el trabajo le proporciona.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Temor y desconocimiento real de la tecnología de las Pruebas No Destructivas (PND) en el país y los beneficios de ésta.

En nuestro medio, el temor y el desconocimiento han etiquetado a la tecnología de las Pruebas No Destructivas (PND) de costosa e irrelevante, que se agrega al proceso de producción cumpliendo con un requerimiento externo para garantizar la calidad de un producto. Por ejemplo, en el país, son pocas las empresas e industrias que están conscientes del uso y beneficios de la utilización de éstas pruebas en la manufactura y mantenimiento de componentes o estructuras.

Principalmente el desconocimiento de las PND crea una confusión, desconfianza, ambigüedad e indecisión de utilizarlas al momento de incorporarlas a la línea de producción como parte integral del mismo proceso de manufactura y/o mantenimiento.

Importación de las técnicas y métodos de las Pruebas No Destructivas (PND) en nuestro país.

La importación al país de insumos y tecnología es necesaria para un país que como el nuestro está en vías de desarrollo. Cuando se demandan bienes con tecnología avanzada, nos vemos obligados a comprar, en algunos casos, equipo de segunda mano, cuyos adelantos que traía incorporados cuando se lanzó originalmente al mercado, en el momento de la adquisición ya eran obsoletos. Dicha situación obliga a utilizar esos recursos tal y como están, sin poder escoger el que sería más apropiado para el trabajo al que se desea destinar.

En el caso de la importación de técnicas relativas a las Pruebas no Destructivas, debe tenerse un gran cuidado en la selección de las mismas, pues cada diseño de las Pruebas (PND) está basado así mismo, en el diseño, material, función y condiciones de servicio de la parte que va a ser probada, por lo que una errónea selección o aplicación de técnicas podría tener consecuencias graves según el caso.

Escasez de la Información bibliográfica sobre Pruebas No Destructivas (PND).

En el área de Ingeniería Mecánica, dentro de la Universidad Don Bosco, la información especializada sobre las Pruebas No Destructivas (PND) resulta ser muy limitada. Para efectos de investigación posterior, los alumnos de dicha Universidad se ven imposibilitados de contar con un material bibliográfico suficiente, confiable, práctico y actualizado con el que puedan desarrollar trabajos posteriores.

En el ámbito nacional universitario, la información que se dispone no es abundante y lo que se encuentran son las técnicas aisladas, información que, a pesar de ser en muchos casos avanzada y completa, no ayuda a elegir la que sea más idónea ante un caso o problema en particular. Estas técnicas por separado, no llegan a mostrar cómo las aplicaciones específicas de un grupo adecuado de ellas, son de gran beneficio en una rama o campo en particular .

A nivel de autores extranjeros, es posible encontrar una gran cantidad de libros escritos sobre alguna técnica en particular y sobre otras similares, pero sin ocuparse mucho de la bibliografía que permita al usuario seleccionar aquella que satisfaga sus necesidades ante un problema en particular.

Fuentes de información sobre las PND dispersas y poco accesibles en el ámbito extra- universitario.

En el ámbito empresarial e industrial de nuestro país, las fuentes especializadas de información de las Pruebas No Destructivas (PND) permanecen dispersas e inaccesibles a cualquier estudiante o interesado. Los trámites para tener dicho acceso varía con cada empresa poseedora de dicha tecnología, lo que dificulta la pronta accesibilidad de la información. Una vez se haya superado el obstáculo anterior, no toda la información se permite que salga de las instalaciones en las cuales se encuentra.

Como dicha información es custodiada celosamente por las empresas, resulta difícil el tener un listado o un registro a nivel nacional de todas aquellas empresas o industrias que utilicen la tecnología en el país. Como resultado lógico, la empresa o industria que importa el equipo siendo la poseedora de la

tecnología, lo utiliza para su propio beneficio, disminuyendo así la posibilidad de propagación de la tecnología a otros interesados.

Desconocimiento en los estudiantes universitarios de las técnicas de inspección no destructivas en componentes estructurales.

El estudiante de Ingeniería Mecánica de las Universidades del país y en especial, el de la Universidad Don Bosco, desconoce la aplicación de las técnicas de inspección no destructivas más prácticas y convenientes en componentes estructurales, durante un programa de mantenimiento de dichos componentes. Para ser más específicos, el estudiante raramente encontrará información en el medio en la rama del mantenimiento estructural de las aeronaves.

Factor clave de la no utilización de las técnicas PND: el desconocimiento

En síntesis, el desconocimiento es el factor clave como causa principal de que nuestras industrias no utilicen como debieran ésta técnica que en un análisis de costo-beneficio, en muchas empresas compensaría con creces el beneficio que proporcionarían al costo que se supone es muy elevado.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Se justifica el presente trabajo por los grandes avances de la Ingeniería de Materiales y de la tecnología que da soporte a las Pruebas No Destructivas. Los materiales cada vez son más complejos, lo que aumenta la creciente necesidad mundial de ofrecer a todos los campos de la industria, partes y componentes que satisfagan las exigentes condiciones de servicio en la industria de la manufactura y/o de mantenimiento.

En segundo lugar, justificaremos el presente proyecto porque en la Universidad Don Bosco, aún no se dispone de material bibliográfico que ayude al futuro Ingeniero Mecánico o al Industrial a resolver los problemas específicos que requieren el uso de las PND, basándose en una confianza plena de todas las ventajas y limitaciones de éstas.

Habiendo evidenciado el problema, el proyecto "Aplicaciones de las Pruebas No Destructivas en el mantenimiento de aeronaves bajo un programa de Aseguramiento de la Calidad", en concreto se justifica porque:

- Proveerá a los profesionales en el campo que busquen solucionar casos específicos de la suficiente información de las técnicas de PND más idóneos.*

- ☑ *Proveerá a los estudiantes de la Universidad Don Bosco, en especial en el área de Ingeniería Mecánica, de un material bibliográfico que complemente la formación profesional de los mismos.*
- ☑ *Se unificará en un sólo documento toda la información sobre las PND que exista en forma de una guía de consulta práctica de referencia rápida que trate sobre los criterios de selección de dichas técnicas ante una determinada necesidad.*
- ☑ *Se darán a conocer las aplicaciones de las técnicas PND más desarrolladas en la industria del mantenimiento de componentes estructurales de una aeronave de tal manera que se puedan ilustrar su vigencia y actualidad en nuestro medio.*

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

OBJETIVO GENERAL

Proveer al estudiante universitario y al profesional de la carrera de Ingeniería Mecánica, de un material de consulta bibliográfico que le permita tener criterios de selección de las Pruebas No Destructivas (PND) ante problemas que involucren el uso de dicha tecnología, e ilustrar de una manera práctica el uso de ésta herramienta en el mantenimiento de componentes estructurales en una aeronave.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. **Mostrar cómo las Pruebas No Destructivas (PND) caben en las estructura organizativa de cualquier empresa e industria moderna, bajo un programa de Aseguramiento de la Calidad.**
- b. **Proveer a la Universidad Don Bosco de un material de consulta que contenga los factores más importantes a tener en cuenta al momento de seleccionar la Prueba No Destructiva (PND) más adecuada ante una situación en particular.**
- c. **Unificar la información bibliográfica de muchos autores, en un sólo documento que contenga los criterios básicos de selección de las Pruebas No Destructivas (PND) conocidas hasta el momento.**
- d. **Hacer comprender al lector, que el empleo de cada una de las Pruebas No Destructivas debe estar basado en un total entendimiento de la naturaleza, función y condición de servicio de la parte que deberá ser probada, así**

como también en la familiaridad completa de la naturaleza, propiedades, capacidades y limitaciones de cada método en particular.

- e. Desvanecer la confusión, desconfianza, ambigüedad e indecisión de los profesionales con cargos ejecutivos, de incorporar en la línea de manufactura o mantenimiento, a las Pruebas No Destructivas como parte integral del mismo proceso.
- f. Promover la investigación entre los estudiantes de la Universidad Don Bosco, sirviendo así de insumo para los trabajos de investigación posteriores sobre las Pruebas No Destructivas.
- g. Describir el uso apropiado de las múltiples aplicaciones de las Pruebas No Destructivas (PND) más utilizadas en el mantenimiento de componentes estructurales en la industria de aeronaves.

1.4 METODOLOGÍA.

El presente trabajo comprende 5 fases:

La primera fase consiste en la explicación de lo que es un Programa de Aseguramiento de la Calidad en general y de cómo éste se ubica dentro de la estructura organizacional de la industria moderna, efectuando un análisis de la influencia en la economía y calidad de los productos en una industria que utilice las Pruebas No Destructivas (PND) y del por qué ellas constituyen un ingrediente crítico en la fórmula manufacturadora total, explicando cómo dentro de una industria que se dedica al mantenimiento de aeronaves, la rama de las Pruebas No Destructivas (PND) resulta ser una herramienta muy útil en el cumplimiento de los objetivos que se persiguen .

En la segunda fase, se hará una referencia bibliográfica de las propiedades mecánicas de los materiales, consideraciones sobre fatiga y concentración de los esfuerzos en forma general. De una manera particular, se hará la referencia de la naturaleza de los materiales utilizados en un avión, y los esfuerzos más comunes en la estructura de una aeronave en el aire o en tierra.

En la tercera fase, se recolectará toda la información disponible sobre las Pruebas No Destructivas (PND) y se clasificarán dichas técnicas de tal forma que queden ordenadas y en concordancia al sistema de 8 categorías utilizado por el Comité Nacional Asesor de Materiales (*National Material Advisory Board NMAB*) en su Comité de Pruebas No Destructivas, exponiendo los principios básicos, objetivos, y limitaciones de las técnicas más conocidas en el medio.

La cuarta fase, consiste en una guía donde se describirá de manera esquematizada las técnicas de Pruebas No Destructivas, en cada una de las 8 categorías de clasificación, de tal manera que se tenga un manual de consulta de referencia rápida que permita seleccionar la técnica más conveniente en base a sus capacidades, ventajas y limitaciones que ofrezcan. Además de lo anterior, esta guía garantizará que el criterio de selección de dichas técnicas sea en base al equipo que se dispone, al tipo de material y al tipo de servicio del objeto a ser inspeccionado.

En la quinta y última fase, se recolectan algunas de las técnicas recomendadas por el fabricante del Boeing 737-200 sobre las Pruebas No Destructivas (PND) más desarrolladas en dichas aeronaves. Entre éstas Pruebas No Destructivas más desarrolladas, se encuentran la técnica de los Rayos X, ultrasonido, corrientes de Eddie y en menor escala la termografía. Se darán a conocer los componentes estructurales con su respectiva técnica de inspección no destructiva, recomendada por el fabricante de las aeronaves, para un caso en particular.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.

El alcance de este proyecto es únicamente bibliográfico y descriptivo, por lo tanto, no se incluirán las instrucciones de operación de los diferentes equipos que podrían utilizarse. Este trabajo examinará de una manera sencilla y comprensible las mayores aplicaciones de la tecnología de Pruebas No Destructivas (PND) justificando su uso en las estructuras de las industrias progresistas modernas.

El proyecto no será por lo tanto un postulado científico que sugiera la implementación de un Programa de Aseguramiento de la Calidad, sino una guía para aquellos profesionales en puestos intermedios o gerenciales que están considerando el uso de la tecnología de Pruebas No Destructivas en sus programas de Aseguramiento de la Calidad. Esto no significa que éste trabajo sea excluyente sino que por el contrario, por el mismo lenguaje no muy especializado que se utilizará, lo podrá entender y aplicar cualquier profesional que trabaje en éste tipo de labores.

Los ejemplos y gráficas de resultados estadísticos que se presentarán, corresponden a estudios obtenidos en los Estados Unidos en publicaciones avaladas por la Sociedad Americana para las Pruebas No Destructivas (American Society for Nondestructive Testing). El hecho de que éstas publicaciones se den en un país extranjero, es obviamente por el hecho de que nuestro país tiene un desarrollo y contexto industrial muy diferente a esos países como los EE.UU., sin embargo, El Salvador, en el área de aviación comercial, trabaja bajo estándares de seguridad extranjeros y con una organización muy similar a la de esos países,

por lo que periódicas auditorías externas en la organización y sistemas de inspección, garantizan el cumplimiento de dichos estándares.

Una limitación del presente trabajo, es que no pretende explicar la física detrás de la tecnología, por existir una gran cantidad de información que se relaciona sobre dicha temática y sobre cada uno de los métodos en particular, por lo que hará más énfasis en ordenarlas de tal forma, que la selección de un determinado método sea de manera práctica ante un problema en particular.

Por la anterior razón, se mencionará que el enfrentarse eficientemente a los problemas que involucren a las Pruebas No Destructivas (PND), dependerá en gran medida de la comprensión total de la física básica involucrada en las mismas técnicas y a la selección del método de PND más adecuado en base a una total familiarización de cada uno de ellos. En este mismo contexto, se requiere que la persona que efectúe dichas PND sea un operador calificado que sepa interpretar radiografías y todos los resultados que se obtienen de los equipos de PND como los de ultrasonido y corrientes de Eddy que requieren de mucha habilidad, experiencia y entrenamiento del operador, tanto en la teoría básica como en la aplicación práctica de los métodos. Además, éste debe de tener un buen conocimiento de la estructura de un avión y de las limitaciones a las que se encuentra restringido.

Otra limitación del trabajo, es que sólo describirá el uso apropiado de las técnicas más comunes y más desarrolladas de las Pruebas No Destructivas (PND) aplicadas al campo del mantenimiento de componentes estructurales de aeronaves. Se deja constancia de que no forman parte de un programa de mantenimiento, sino de inspecciones aprobadas por el fabricante sin llevar un orden o secuencia que se pueda considerar lógica. No se incluirán todos aquellos componentes estructurales menores como soportes, ángulos, refuerzos, intercostales y sujetadores, sino que de estructuras grandes como componentes del fuselaje principal de la aeronave, de las alas y de los controles de vuelo. Lo anterior debido a que los componentes estructurales menores pueden ser inspeccionados por una gran cantidad de métodos que por su tamaño y accesibilidad, no resulta crítica la selección de la técnica idónea. Para todos éstos componentes, se les aplican técnicas, como el de partícula magnética, líquido penetrante y otras más conocidas que no serán incluidas en ésta parte por haberse ya hecho anteriormente de una manera general y no tener una aplicación especial o diferente a la que se podría aplicar en cualquier otra industria.

Específicamente, se tratará con mucho detalle las pruebas por Rayos X, Ultrasonido, Corriente de Eddie y en menor grado la Termografía que se aplican en un mantenimiento estructural de un Boeing 737-200. En éstos componentes estructurales mayores, cuya naturaleza de materiales varía, resulta crítica la selección del método idóneo en cuanto a que sea económico, accesible, práctico,

funcional y confiable en los resultados. Por otra parte, no se incluirán lógicamente todas las miles de combinaciones posibles que podrían resultar según la posición en que se encuentren los componentes en las aeronaves en cada técnica, sino sólo casos representativos que ejemplificarán el uso del equipo y posiciones recomendadas.

Se aclara que ninguna de las inspecciones por Pruebas No Destructivas (PND) descritas en la última parte del trabajo son de carácter mandatorio por parte del fabricante o de una agencia reguladora nacional o internacional. Técnicas de inspección alternas podrían ser igualmente satisfactorias, pero las que se describen en el proyecto han sido desarrolladas y usadas con éxito en dichas aeronaves, sin pertenecer necesariamente a un programa de mantenimiento establecido.

CAPITULO II

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y SU INFLUENCIA EN LA INDUSTRIA AÉREA.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica como en cualquier empresa, entre ellas la dedicada al mantenimiento de aeronaves, las Pruebas No Destructivas son una herramienta útil e indispensable en un Programa de Aseguramiento de Calidad. Se presenta además, generalidades sobre el fenómeno de la fatiga y concentración de esfuerzos en los materiales.

2.1. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.

2.1.1. Conceptos básicos de Aseguramiento de la Calidad

Industrias con mentalidad progresista están tratando de asimilar el término de Aseguramiento de la Calidad por lo que resulta importante que se discuta el significado, la interrelación y la interpretación de algunas expresiones ampliamente difundidas. No es extraño escuchar que la *inspección* es una operación no productiva, a lo mucho, se entiende como un trabajo con menos valor que cualquier otro en el proceso de manufactura o mantenimiento. Tampoco es extraño escuchar que los ensayos y pruebas son una operación de laboratorio comparada con las pruebas de tensión en barras para determinar sus propiedades físicas. Otra idea ampliamente divulgada que se tiene acerca de la *calidad*, es que ésta se introduce al producto en alguna parte del proceso de acuerdo con las instrucciones del diseñador.

En ciertas situaciones, estos conceptos podrían ser valederos . En realidad, éstos términos por sí solos tienen un significado muy limitado a menos que el contexto de ellos sea entendido en el esquema general del proceso de producción, manufactura o de mantenimiento.

2.1.2 Confiabilidad del producto.

La primera meta para cualquier producto es su vida útil llegando a definirse como fiabilidad o confiabilidad, calidad (comúnmente como de alta calidad), rentabilidad y algunos otros términos .

Consideremos la palabra *Confiabilidad*. El fabricante del producto generalmente concuerda con el término de que el producto debe ser confiable. Pero la pregunta que surge entonces es la de cuan confiable debe ser el producto o componente para satisfacer ésta meta. La respuesta a ésta pregunta es básicamente una responsabilidad del fabricante, y por tal razón, el grado de confiabilidad debe ser definido lo más cercano posible.

La demanda de los clientes, la confiabilidad de productos competitivos y el valor en el mercado de productos similares es tomado en cuenta. La gran experiencia y los consejos de los expertos de todos los departamentos dentro de la organización pueden guiarnos hacia la respuesta. Una vez tomada ésta decisión, el nivel de calidad escogido llega a convertirse en política de la compañía, quedando la responsabilidad de alcanzarla y mantenerla, en la dirección misma de la empresa.

Es en esta etapa entonces que debe asegurarse que esa política es seguida, verificar que la operación para tal objetivo está bajo control y de no ser así, averiguar dónde, cómo y cuándo se salió de control. A ésto es lo que se define como el *Aseguramiento de la Calidad*.

2.1.3 Establecimiento de niveles de calidad.

Uno de los problemas más difíciles de la dirección es el determinar y luego definir los niveles deseados de calidad en cualquier producto y/o componente, pues no tiene una solución matemática, por lo que tiene que ser resuelto de otra manera.

Para el ingeniero de diseño, no es problema el resolver una norma establecida por el personal de producción, pero llega a ser un verdadero problema cuando la dirección deja la decisión de escoger el nivel de calidad más apropiado al ingeniero mismo de diseño, al inspector o al departamento de producción si faltaran los anteriores. Cuando esto sucede, los resultados frecuentemente son menos beneficiosos de los que se esperan al considerar por ejemplo que el diseñador usualmente requerirá de un nivel de calidad más alto del necesario. Por el contrario, Producción usualmente quiere un nivel de calidad más bajo y los inspectores requieren el nivel de calidad que requiere el diseñador.

Por tal razón, es primordial que la dirección sea la que defina claramente y de una manera precisa, los niveles de calidad que desea que se implementen. Una vez establecidos, la dirección podrá solicitar que el aseguramiento de la calidad caiga dentro del rango o tolerancia establecida. Cuando se ha dejado claro lo anterior, las funciones de diseñado, de inspección, de producción y de control de calidad pueden ser llevadas a cabo.

2.1.4 Niveles prácticos de calidad.

Ningún producto es perfecto en cualquier sentido que pueda ser tomada la presente aseveración. Las características de una parte, material o producto que sea perfecta podrían ser definidas, pero al aumentar el conocimiento en la materia, llega a ser necesario el aumentar definiciones o más características. La perfección total no es nunca la meta verdadera de las pruebas no destructivas o del proceso de producción. La industria generalmente desea un nivel de calidad abajo de la perfección y tolerarán aún una mínima desviación de ese nivel sin resultar ser antieconómico.

2.1.5 Rango de Sensibilidad de Pruebas.

Muchos no realizan el amplio rango posible de sensibilidad en cada prueba no destructiva. La Radiografía puede ser superficial o muy sensitiva para algunas discontinuidades por medio de las variaciones del voltaje en el tubo de rayos X, por medio del tipo de película empleada, la distancia del tubo a la parte y otros factores.

La Prueba No Destructiva de Partícula Magnética puede variar la sensibilidad ampliamente con los cambios en tipo y magnitud de la corriente o con concentraciones de las partículas mismas. Si se deseara hallar rajaduras de 2 centésimas de milímetros de profundidad, puede ser llevado a cabo. Por el otro lado, si nada abajo de los 2.5 mm (0.1 pul) de profundidad es considerado importante, la prueba puede ser hecha un poco más insensible.

2.1.6 Especificaciones de Calidad.

Comúnmente, una especificación es concerniente a la dirección, localización o forma de una discontinuidad en áreas críticas. Éstas consideraciones determinan la importancia de la discontinuidad que causan fallas típicas de fatiga en partes mecánicas pertenecientes a ensambles. El control de la sensibilidad de la prueba de acuerdo a tales especificaciones, resulta práctico por lo que debería ser empleado a menudo. Por ejemplo, con una prueba de partícula magnética, la dirección de la magnetización, la fuerza del campo magnético que se genera, tipo y concentración y otros factores, pueden controlar tal sensibilidad a límites deseados.

2.2 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD.

2.2.1 Definiciones

Aseguramiento de la Calidad es un programa que persigue con su implantación, proporcionar la suficiente seguridad que un producto o servicio podrá satisfacer requerimientos de calidad establecidos. Así deberá asegurarse la calidad desde el suministro de la materia prima, su fabricación y distribución, hasta llegar al cliente. Esto es llevado a cabo con la preparación juiciosa de las especificaciones y procedimientos para la selección del material y revisiones de diseño y selección de vendedores o suministradores. La vigilancia de que dichos procedimientos se están llevando a cabo, deberá hacerse a través de las auditorias; controles de procesos y puntos de chequeo de calidad también son requeridos por el programa de Aseguramiento de Calidad.

Control de Calidad son las actividades y técnicas operativas que son utilizadas para satisfacer los requerimientos de calidad. Esto incluye pruebas físicas y químicas donde sea apropiado, así como también las Pruebas No Destructivas (PND) en los puntos adecuados del ciclo manufacturador. Los expertos, aseguran que "la Calidad no puede inspeccionarse dentro de un producto o servicio. Debe ser diseñada y construída dentro del mismo".

También se incluyen en la función de Control de Calidad, todas las actividades administrativas relacionadas con la adquisición de la documentación necesaria para establecer un récord de todos aquellos procedimientos de calidad. Esto es un elemento vital de protección contra las acciones obligadas del producto y de seguros.

La recopilación y custodia de los paquetes de la documentación final es función de Aseguramiento de la Calidad y por lo tanto del control de la documentación que es una acción que requiere de atención constante. Otra función vital de un programa de Aseguramiento de la Calidad es el de darle seguimiento a las acciones correctivas que se disponen.

2.2.2 Elementos básicos de un Programa de Aseguramiento de la Calidad.

Un programa de Aseguramiento de la Calidad consiste de 5 elementos básicos que deben ser implementados, controlados y mantenidos en vigencia:

a. Prevención. Aquí, un plan formal de diseño, de inspeccionabilidad y otro de costos que sea efectivo, es requerido.

b. Control. Donde se documenta la habilidad del personal de producción y de Control de Calidad con la requerida por los procedimientos estándares establecidos.

c. Aseguramiento. Estableciendo puntos de chequeo que garantice la calidad y un rápido sistema de retro-alimentación que detecte los problemas desde el principio para solucionarlos.

d. Acción Correctiva. Para implementar efectivamente el sistema de retroalimentación, un equipo de especialistas debe ser organizado para corregir rápidamente las acciones correctivas necesarias.

e. Auditoria. El programa de Aseguramiento de la Calidad debe contener provisiones para que cualquier tercero pueda auditar todos los aspectos del programa, incluyendo los materiales o componentes suministrados por el vendedor. Los supervisores de calidad deben administrar todo lo que una auditoría debe contener en cualquier punto y lugar del ciclo de manufactura y de iniciar a tiempo las acciones correctivas.

En un mercado competitivo, la calidad de un producto afecta directamente en su éxito y puede llevar a tener consecuencias adicionales más adelante. Por tal razón, la calidad debe ser construida desde el principio y las Pruebas No Destructivas han llegado a ser un elemento esencial en el Control de la Calidad en nuestros días.

2.3 INFLUENCIA DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN LA CALIDAD Y ECONOMÍA DE LOS PRODUCTOS. ¹

2.3.1 Generalidades

Desde los años veinte hasta los inicios de la segunda guerra mundial, las Pruebas No Destructivas fueron usadas principalmente para control de procesos y en segunda instancia para controlar la calidad. Con el advenimiento de la Segunda Guerra Mundial, la tremenda escalada armamentista en las líneas de producción de los países involucrados y los recursos limitados del personal y equipo de Pruebas No Destructivas, dejaron relegados a éstos a una simple herramienta de inspección.

En relación con la inspección final de un producto acabado, ésta es una póliza de seguro que usualmente satisfecerá al cliente. Sin embargo en un primer momento, la pregunta más importante que los encargados de una empresa o industria se hacen es en el momento de decidirse a utilizar las Pruebas No

¹ Wenk, S.A. & McMaster R.C. Choosing NDT, Applications, costs and benefits of Nondestructive Testing in your Quality Assurance Program. 1987 American Society for Nondestructive Testing.

Destructivas (PND): “¿Dónde puede darnos las PND el margen competitivo ente la calidad y el costo?” Hay dos factores de costos que deben ser tomados en cuenta: el costo de la fabricación del producto y la de los costos por los ciclos de vida. Estos factores de costos son altamente dependientes de la calidad inicial y de la inspeccionabilidad de los componentes y ensambles críticos.

El punto de inicio en el desarrollo de un programa integral que incluya los costos efectivos y el de las pruebas técnicas, son los materiales y las especificaciones de compras de los componentes. Esto ya ha sido tratado anteriormente por varios grupos incluidos el estadounidense Comité Nacional Asesor de los Materiales (National Materials Advisory Board ó NMAB) en su comité de Pruebas No Destructivas . A continuación, se extrae uno de los últimos reportes del comité en “Aspectos económicos y de manejo de las PND, evaluación e inspección en la manufactura de Aeronaves” (*Economic and Management Aspects of Nondestructive Testing, Evaluation and Inspection in Aerospace Manufacturing*) :

“...En los últimos años ha habido una gran proliferación de especificaciones militares, gobiernos, sociedades técnicas e industriales, lo que ha creado confusión en la interpretación, aplicación y control de toda la documentación del mantenimiento. Una vez preparadas las especificaciones y aplicadas apropiadamente, pueden incrementarse los costos iniciales de las Pruebas No Destructivas PND, pero da por resultado las más bajas razones de rechazo final del producto y una baja razón de costos por ciclos de vida.”

“...Como una regla, la Administración debe romper todos aquellos costos de PND asociados directamente con la manufactura. Generalmente, la función de las PND cae bajo el departamento de calidad y/o el de inspección, y la tendencia es incluir todos los costos asociados con el Control de Calidad y el Aseguramiento de Calidad en uno solo.”

Para colocar los costos de las PND en perspectiva con otros elementos dentro de un programa de Aseguramiento de la Calidad, se ilustra en la siguiente tabla desarrollada por la Asociación de Industrias del Aeroespacio (AIA) una comparación con un muestreo industrial en las cuales los componentes forjados, motores y armazón fueron considerados y comparados.

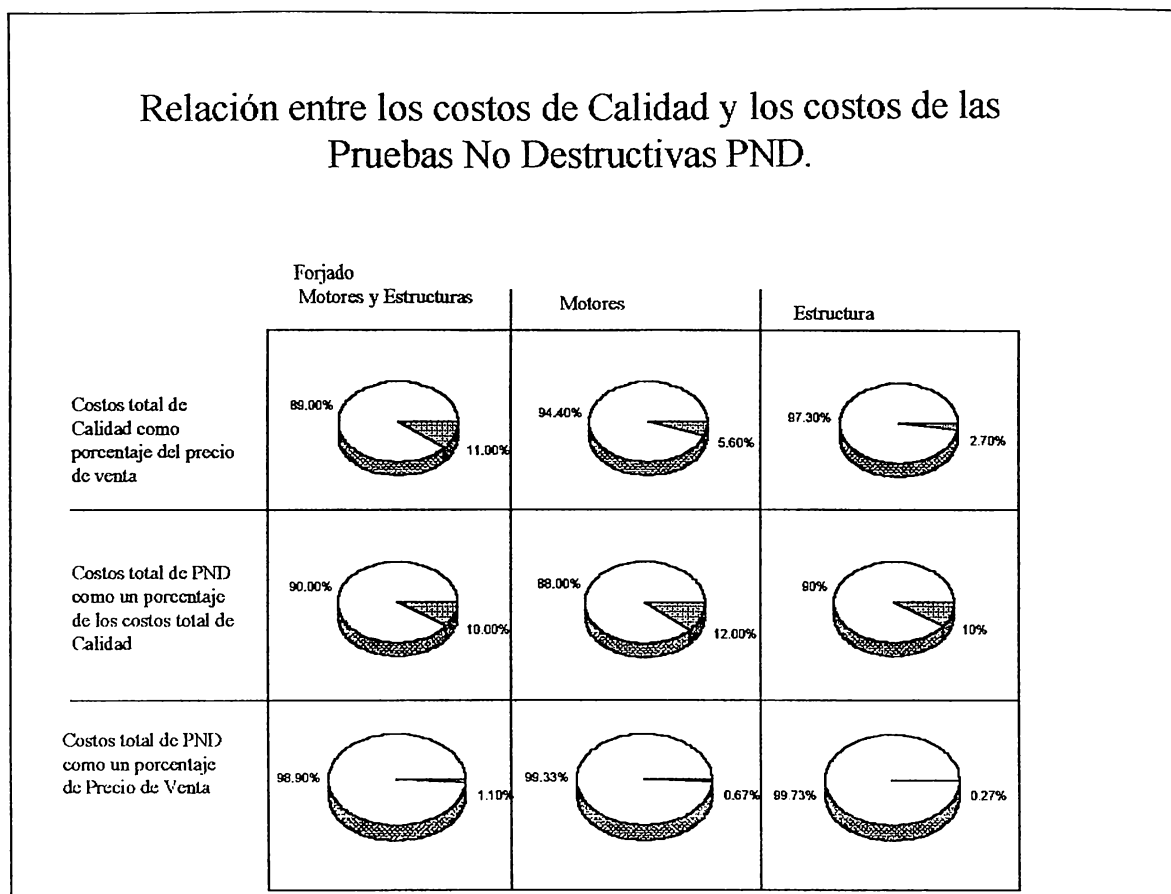


Figura 2.1: Relación entre los Costos de Calidad y los Costos de las PND.²

En esta tabla, los costos de PND se acercan a casi 1.5% del costo de venta del artículo, lo que ilustra la relación de los costos de las Pruebas No Destructivas con la función del Aseguramiento de la Calidad y los costos de venta. En conclusión, los costos de PND representan un bajo porcentaje del precio de venta final del producto. Por tal razón, si el factor de la vida promedio es considerado, se justifica la cantidad y el nivel de las PND en orden de mejorar la calidad total del producto, porque dicho incremento llevará a una mayor confiabilidad, más tiempo de servicio y costos de vida por ciclo más bajos.

Una organización industrial típica bajo un programa de Aseguramiento de la Calidad son mostradas en la siguiente página. Los elementos que involucran la tecnología de Pruebas No Destructivas se encuentran resaltados con flechas en negrillas. Cuando se mira en este contexto, el costo de la función de Pruebas No Destructivas no parece excesivo para una organización.

² Tomado de "Influencia de las PND en la Calidad y Economía de los Productos" del Capítulo I titulado: "Apreciación Global de la Dirección para las PND" (The Manager's Overview of Nondestructive Testing) página 4, Figura 1 de Samuel A. Wenk (Consultor de PND, Port St. Lucie, Florida 1987.)

ORGANIZACIÓN TÍPICA DE UN PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD:

Símbolos:

- ➡ Responsabilidad específica de las Pruebas No Destructivas.
- ⇨ Responsabilidad relacionada de las Pruebas No Destructivas.

INSPECCIÓN DEL PRODUCTO:

1. Inspección de las herramientas
2. ➡ Inspección detallada de partes y Pruebas No Destructivas
3. ➡ Inspección de ensamble y Pruebas No Destructivas
4. Inspección de salida
5. Revisión de Materiales

CONTROL DE CALIDAD EN APROVISIONAMIENTO

1. Revisión de ordenes de compra
2. ⇨ Inspección de recibo
3. Control de subcontratores
4. Historial de calidad del proveedor
5. Inspección de embarque.

ADMINISTRACIÓN Y AUDITORIA DE CALIDAD

1. Presupuestos.
2. Auditorias
3. Acciones Correctivas
4. ⇨ Manuales y procedimientos
5. ⇨ Planificación de Calidad
6. Actividades Administrativas
7. Investigaciones de Quejas

INGENIERÍA DE CALIDAD

1. Servicios Técnicos
2. Laboratorio de Control de Materiales
3. ⇨ Control de Procesos
4. ➡ Búsqueda y Desarrollo de las Pruebas No Destructivas
5. ➡ Procedimientos y Certificación de Pruebas No Destructivas
6. ⇨ Análisis de Fallas
7. Procedimientos de pruebas de aceptación de equipo de sistemas.

METROLOGIA

1. Mantener los estándares de medidas de la compañía
2. Inspección de instrumentos de calibración
3. Equipo de pruebas de calibración.

Los esfuerzos encaminados específicamente a reducir los costos asociados a las Pruebas No Destructivas en una línea manufacturadora, tendrán muy pocos resultados en cuanto a reducir el costo total del sistema. Para mejorar el costo efectivo de las PND, el estadounidense Comité Nacional Asesor de los Materiales (National Material Advisory Board, NMAB) en su Comité de Pruebas No Destructivas ha hecho recomendaciones en cuanto a desarrollar un programa más efectivo de PND a través de la reducción de las pruebas inútiles o innecesarias y además de reforzar la tecnología utilizada. En adición, el NMAB sugiere que un programa práctico de Pruebas No Destructivas que cubra todos los aspectos de la manufactura, inspección y mantenimiento en general pueden reducir significativamente los costos totales por ciclo de vida de los componentes.

2.3.2 Aplicación efectiva de las Pruebas No Destructivas.

El ambiente de los negocios ha cambiado drásticamente en años recientes. Ha habido una gran preocupación en aumentar el potencial de una buena planificación en las pruebas no destructivas y de su habilidad de asegurar tanto la calidad del producto y reducir los costos operacionales a través de periódicas evaluaciones.

Para aplicar de una manera efectiva las Pruebas No Destructivas, sus capacidades deben ser consideradas tempranamente en la fase del diseño del producto. Los ingenieros diseñadores y los analistas estructurales están empezando a considerar seriamente los procesos de ingeniería y aplicaciones de Pruebas No Destructivas durante el diseño del producto y no después de un requerimiento de inspección. Algunos diseñadores y analistas son reacios al uso de las Pruebas No Destructivas por que no se comprenden sus capacidades y sus limitaciones. Estos podrían considerar que las Pruebas No Destructivas tienen un efecto inverso en sus diseños: tomemos por ejemplo que en algunos casos se hacen modificaciones de diseño porque los procesos de las Pruebas No Destructivas no pueden detectar discontinuidades críticas cuando sus orientaciones son inaccesibles para las pruebas. Las P N D son herramientas deseables en el control del proceso, pero si su aplicación se expande, sus aspectos positivos deberían ser reforzados y el prejuicio en contra que se tiene en ellas debería ser eliminado .

Como primer paso en el diseño de un proceso controlado por medio de las pruebas no destructivas, un criterio de aceptación o rechazo debe ser establecido

por ingeniería dando por asumido de que todo lo que constituye un criterio realístico no siempre es obvio. Por ejemplo, determinación analítica de los efectos de porosidad o inclusiones no metálicas en componentes estructurales metálicos es difícil y una determinación empírica de estos efectos podrían probar ser inadmisiblemente caros. Surgen preguntas como cuál es la distribución de los vacíos existentes en componentes no estructurales compuestos llamados “de panal de abeja” por su forma, que puedan ser tolerados para una satisfactoria vida de servicio?, cual calidad de acabado superficial debe ser alcanzado para hacer un producto aceptable?, o qué nivel de anomalías en el material puede ser detectado confiablemente por las pruebas no destructivas? o cómo debe ser cambiado el diseño para implementar y acomodar las pruebas no destructivas en el proceso?. Si los controles de procesos correctos son establecidos, éstas y otras preguntas similares deben ser estimadas realmente y contestadas lo más pronto posible.

Uno de los más complejos problemas incluye el determinar cuando, durante todo el tiempo de la fabricación y proceso de ensamble, los controles de pruebas no destructivas serán más efectivas y menos caras. Es obvio que si a un producto le exigimos que cumpla ciertas funciones, las materias primas del cual está hecho, deben de cumplir con los estándares presumidos por el diseñador. Sin embargo, no siempre es obvio el determinar qué controles de procesos deben ser usados para asegurar una aplicación económica a éstos criterios.

Los requerimientos de las Pruebas No Destructivas deben ser consideradas en cada etapa del diseño del producto. Si el diseño envuelve 4 fases (conceptual, diseño preliminar, distribución y detalle), la influencia de las Pruebas No Destructivas empieza durante las etapas conceptual y la del diseño preliminar. En la etapa *conceptual*, debe ser determinado si el concepto de diseño es compatible con los requerimientos de las PND. Si no lo es así, entonces el concepto debe ser revisado. En la fase del *diseño preliminar*, criterios de ejecución y selección de material deben ser hechos compatibles con las pruebas no destructivas. Durante la fase de *distribución* la inspeccionabilidad del producto debe ser determinada. Es más importante que el diseño incluya lo siguiente:

1. Relaciones entre las fracturas mecánicas y las PND;
2. Vida segura o criterio seguro de falla;
3. Requerimientos para las necesidades de producción más que las preferencias;
4. Capacidad de efectuar las pruebas no destructivas en el taller o en el campo;
5. Accesibilidad para inspeccionar;
6. Estudios de costos y mercadeo;
7. Pruebas y verificación de procedimientos, y
8. Anomalías características del proceso.

Es importante que los esfuerzos del personal de la ingeniería de los materiales calificados (incluyendo los procesos), ingeniería de los esfuerzos

(incluyendo fractura y fatiga), planificación (de la manufactura), y control de calidad (PND) estén cercanamente coordinados. La productividad y la calidad deben de recibir la más grande atención en la fase del diseño, pero todas las disciplinas deben ser consideradas. Áreas de estructuras complejas que no son inspeccionables por las formas geométricas de las mismas, deben ser rediseñadas o deben ser diseñadas con pleno conocimiento que no podrán ser inspeccionadas. En este punto, las Pruebas No Destructivas son obviamente un elemento de costo, pero cuando es apropiadamente aplicado, podría sustancialmente reducir los costos totales por ciclo de vida.

Los especialistas de PND deben participar en el proceso de diseño asistiendo al diseñador a entender la función de las pruebas no destructivas. Esto puede ser logrado de mejor manera proveyendo soporte de un especialista calificado de pruebas no destructivas durante la fase de diseño, revisando manuales de diseño para cubrir apropiadamente las funciones de ésta técnica , y estableciendo una guía de tales pruebas .

La inaccesibilidad y por lo tanto, la no inspeccionabilidad de zonas críticas o de alto esfuerzos de miembros estructurales en un ensamble completo, aumenta significativamente los costos.

2.4 ADMINISTRACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

2.4.1 Funciones de las Pruebas no Destructivas en la industria moderna

Desde los años 20, el arte de probar los objetos sin destruirlos ha sido desarrollado desde una curiosidad en el laboratorio a una indispensable herramienta de producción. Si no se puede examinar visualmente los materiales, partes o componentes completos, el principal medio de determinar la calidad adecuada del producto es a través de las Pruebas No Destructivas. Estas pruebas, son ampliamente usadas en el mundo en gran variedad de aplicaciones para detectar variaciones en la estructura, cambios minúsculos en acabados de superficies, la presencia de rajaduras u otras discontinuidades físicas, mediciones de espesores de materiales y coberturas y para determinar otras características de productos industriales. Científicos e ingenieros de muchos países han contribuido grandemente al desarrollo y aplicación de las PND.

Varias técnicas de Pruebas No Destructivas son cubiertas en detalle en la literatura pero es siempre sabio considerar los objetivos de éstas antes de entrar en detalles del método. Esto es, quedar definidos sobre cuál es el uso de las pruebas no destructivas, porque miles de industriales están dispuestos a comprar

equipo de pruebas, pagar las subsecuentes costos de operaciones de las pruebas y aun rediseñar los procesos de manufacturar para ajustarse a las necesidades de las pruebas .

2.4.2. Razones para el uso de las Pruebas No Destructivas.

Entre las razones para el uso de las PND por parte de los fabricantes se encuentran: (a) asegurar la confiabilidad del producto, (b) prevenir accidentes y salvar vidas humanas, (c) asegurar la satisfacción del cliente y mantener la reputación del fabricante, (d) ayudar a un mejor diseño del producto, (e) controlar mejor los procesos de producción, (f) disminuir los costos de fabricación y (g) mantener un nivel uniforme de calidad. A continuación lo veremos en más detalle:

a) Asegurar la confiabilidad del producto:

El usuario de un producto fabricado o manufacturado lo compra con la expectación de que servirá sin problema alguno por un período razonable de tiempo. Esperaremos que muy pocos de los productos de hoy en día estén fabricados para entregar más de una centena de años, pero se requiere por lo menos que brinden un tiempo de servicio razonable sin fallar. Año tras año, la gente ha aprendido a esperar una mejor y larga vida de servicio de los componentes a pesar del incremento en complejidad de todas las aplicaciones de hoy en día ya sean estas mecánicas, eléctricas y electrónicas. En estos tiempos, los trenes, automóviles, buses, aviones y barcos llevan a la gente a más lugares y más rápido que nunca antes por lo que ellos solo esperan llegar a sus destinos sin retrasos o inconvenientes debido a fallas mecánicas. Entretando las empresas manufacturan más y mejores productos con una mayor velocidad y con más maquinaria automática. La dirección de las empresas esperan que esta maquinaria opere de manera continua porque los beneficios dependen de este funcionamiento sostenido. La complejidad de los productos de hoy en día y la maquinaria que las hace y transporta, requieren de cada parte que la compone de gran confiabilidad.

Si un producto tiene una parte que tiene una probabilidad de falla de 1 en 1,000 antes de que haya estado en servicio por un tiempo razonable, podría ser un resultado satisfactorio al parecer una pequeña probabilidad de fallo. Ahora supongamos que un producto es ensamblado de 100 partes críticas de varias clases y que cada una de las partes tiene una posibilidad de falla de 1 en 1,000, la posibilidad de falla del producto ensamblado será en esta oportunidad distinta. La confiabilidad total de cualquier ensamble es el producto matemático de los factores de confiabilidad de los componentes. En este caso, la confiabilidad de este caso sería entonces de :

$$C = 0.999 \times 0.999 \times 0.999 \times \dots \times 0.999 \text{ (repetido 100 veces)}$$

$$C = 0.9057$$

Entonces la posibilidad de falla del ensamble es entonces de:

$$1.00 - 0.9057 = 0.0943$$

o en otras palabras de casi 1 en 10. Por tal razón, es razonable de que el usuario de este producto se encuentre grandemente insatisfecho si 1 de cada 10 unidades fallan prematuramente. El punto medular es de que la confiabilidad del componente debe ser inmensamente grande que la confiabilidad requerida del producto ensamblado.

b) Prevenir Accidentes y salvar vidas.

Asegurar la confiabilidad del producto es necesario debido al incremento generalizado en la expectativa de funcionamiento de los componentes de parte de los usuarios. Pero principalmente la confiabilidad que se espera no es suficiente si sólo se cubren los aspectos de la conveniencia y beneficios que se puedan obtener, sino que el proteger las vidas humanas es un fin invaluable en sí mismo. El eje de un ferrocarril no debe de fallar a altas velocidad así como tampoco el tren de aterrizaje de un avión no debe de colapsar en el aterrizaje. Las anteriores son ejemplos de fallas críticas que raramente suceden y no es precisamente producto de la buena suerte sino que en gran parte es un directo resultado del extensivo uso de las pruebas no destructivas y de la gran habilidad de la tecnología de Pruebas No Destructivas ahora disponibles.

c) Haciendo un beneficio al usuario.

Si bien es cierto que la razón más poderosa para el uso de las pruebas no destructivas es la seguridad, también es cierto que la razón más común es la de crear un beneficio al usuario. Las fuentes de estos beneficios son tanto tangibles como intangibles.

d) Asegurando la satisfacción del cliente.

La fuente intangible del beneficio es asegurar la satisfacción del cliente. Su corolario es la preservación y mejoramiento de la reputación del fabricante. Para esta obvia ventaja antes mencionada, debe ser agregada el mantener la posición competitiva del manufacturer en su rama o campo.

Es en este punto donde generalmente el usuario establece los niveles de calidad al escoger en el mercado entre todos los productos de los competidores. Ciertamente, la reputación del manufacturer para una alta calidad es solamente un factor. Los otros factores son la función, la apariencia, el empaque, el servicio y el precio. En los mercados altamente competitivos de hoy en día, la calidad actual y la reputación para la calidad que tenga el manufacturer permanece muy grabado en las mentes de los consumidores.

e) Ayudando al diseño del producto.

Las Pruebas No Destructivas ayudan significativamente en un mejor diseño del producto. Por ejemplo, el estado de respuesta física que revelan algunas pruebas no destructivas como la radiografía, partícula magnética o inspección por penetrantes en un componente, podría conducir al diseñador a realizar algunos cambios al diseño en las secciones más críticas para obtener siempre el tipo de respuestas que se esperan de esas partes importantes para garantizar la utilidad o no de las mismas. El diseñador debe entonces mejorar y/o modificar el patrón original para incrementar de esta manera la calidad del producto.

Algo que no debería estar fuera de la mira de las Pruebas No Destructivas es el determinar la dirección, cantidad y pendiente de los esfuerzos en partes mecánicas como son aplicados realmente en el campo de análisis experimental de esfuerzos. Este aspecto juega un rol importante en el diseño de una parte más liviana, más resistente, menos costosa y más confiable.

f) Controlando Procesos de Manufactura.

Control es un concepto básico en la industria. Metalúrgicos, inspectores, operadores y personal de producción saben de los problemas de mantener cualquier proceso de manufactura bajo control. Cualquier material que es trabajado o fabricado debe ser controlado al igual que el proceso en sí, proporcionando al operador el entrenamiento y la supervisión de su trabajo. Cuando cualquier elemento de una operación de manufactura llega a estar fuera de control, la calidad cae y lo más seguro es que haya desperdicio.

Casi todos los métodos de pruebas no destructivas es aplicado en un solo sentido u otro para controlar un proceso y así, crear un beneficio directo para el manufacturador. Como un ejemplo de miles que podrían ser citados, consideremos una operación de tratamiento térmico: Durante la operación de un proceso metalúrgico, una prueba no destructiva puede ser aplicada a todas las partes o a una cuantas de cada lote de partes, y decir si los análisis químicos de los materiales está errático y que por lo tanto el procedimiento podría fallar para producir la dureza deseada o inducir a las rajaduras. Una segunda prueba podría enseñar cuando y donde la rajadura ha ocurrido y la siguiente prueba nos enseñaría si la dureza deseada ha sido alcanzada. Si es así, el material o proceso podría ser corregido inmediatamente y en todos estos casos, significaría dinero ahorrado al manufacturador.

g) Ahorrando Costos de Manufactura.

Casi cualquier planta manufacturadora puede cortar o reducir los costos de manufactura decidiendo donde aplicar el siguiente principio de reducción de

costos: *“Una prueba no destructiva puede reducir los costos de manufactura cuando localiza características indeseables de un material o componente en una etapa temprana, ahorrando así dinero que se gastaría en el procesado o ensamble”*.³

Otro principio que produce beneficios es el de una Prueba No Destructiva que puede ahorrar costos de manufactura cuando produce información deseable a bajo costo comparada con otras pruebas destructivas o no destructivas. Un ejemplo de esto podría ser la sustitución de la prueba no destructiva de partícula magnética por la de baño de ácido y examinación visual para detectar costuras o rajaduras. Como en muchas plantas, un sincero estudio económico de los costos comparativos de los 2 métodos podría demostrar las ventajas de ahorro de las pruebas no destructivas tomadas en lugar del método de partícula magnética en este caso en particular.

h) Manteniendo un Nivel de Calidad Uniforme.

Pareciera obvio que mejorar la calidad del producto sería la meta invariable de las Pruebas No Destructivas. Ahora, esto no es siempre el caso ya que hay algo más arriba que el nivel de calidad: La función verdadera de las pruebas es controlar y mantener el nivel de calidad que la dirección decida en base a un producto en particular y circunstancias. Ingenieros ilustrados y manufacturadores han reconocido ampliamente que la perfección es inasequible y que el intento de alcanzar la perfección en producción resulta costoso y no es realista. Una dirección legítima busca no la perfección pero sí lo óptimo y el nivel de calidad alcanzable y que valga la pena.

La calidad abajo de lo óptimo destruirá las ventas y reputación del manufacturador y una calidad arriba de lo óptimo puede diluir los beneficios a través de una excesiva producción y pérdidas por desperdicios. La dirección por esta razón debe decidir que nivel de calidad quiere para producir y mantenerla. Una vez que la dirección ha establecido el nivel de calidad, producción y el personal de pruebas deben de apuntar a mantener este nivel y no salirse excesivamente ya sea hacia abajo o hacia arriba del nivel convenido y establecido. En lenguaje claro, las Pruebas No Destructivas no mejoran la Calidad: podría mejorar la calidad pero sólo la dirección puede establecer el estándar de calidad. Si la dirección quiere hacer un producto lo más cerca posible a la perfección o quiere por el contrario hacerlo desperdicio, entonces las PND ayudarán a lograr lo que se desea, ni más ni menos.

³ Robert C. McMaster, Management and application of Nondestructive Tests. Ohio State University, Ohio, 1987.

2.5. RÁPIDO CRECIMIENTO Y ACEPTACIÓN DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

Las razones anteriores que se han descrito en el uso de las Pruebas No Destructivas, sean tangibles o intangibles son ampliamente beneficiosas por sí mismas. Pero desarrollos paralelos de otras áreas han contribuido a su crecimiento y aceptación.

Entre esos factores tenemos los siguientes:

a) Aumento de la complejidad de la maquinaria moderna

Consideremos el automóvil de hoy en día. El obturador manual de gasolina es obsoleto. El varillaje desde el tablero a la válvula de mariposa en el carburador ha sido reemplazado por un termostato y un número de varillas y palancas a las que se les ha agregado una bomba de gasolina controlada por la posición del pedal del acelerador. Además el sistema de la dirección y los frenos operados con servo señales para activar el sistema hidráulico. En el sistema de los limpiaparabrisas están ahora energizados por vacío o eléctricamente y complicados sistemas de boquillas y temporizadores. Los componentes de hoy en día incluyen sistemas complejos de ventilación, calefacción, desempañador y aire acondicionado, asientos eléctricos, mandos electrónicos, ventanas laterales y de techo energizadas, control de emisión de gases, controles de velocidad de cruce, equipos de audio y estereo digitales y transmisiones automáticas. La industria del automóvil mientras lleva la complejidad a todos sus aspectos y sistemas, también la confiabilidad en el vehículo aumenta. De otra manera, la mayoría de los usuarios no se atreverían a sacar sus vehículos de los garajes por el temor de una posible falla seria.

Como un ejemplo más sorprendente de aritmética de la confiabilidad del componente, considere las computadoras. Ellas requieren decenas de miles de tubos electrónicos, transistores, condensadores, resistores, conexiones, interruptores, medidores, contadores y otras partes cuyo funcionamiento demanda confiabilidad operacional en cada componente. El automóvil y las industrias de instrumentos electrónicos son ejemplos de la complejidad de hoy en día que nunca podría haber sido alcanzado sin un vasto incremento en las pruebas no destructivas.

b) Demanda incrementada en las máquinas

En un corto período de tiempo, velocidades promedios de trenes de pasajeros y de carga se han doblado. La velocidad del transporte aéreo comercial se ha cuadruplicado y dentro de poco se quintuplicará. Velocidades transónicas son aceptadas por aviones militares piloteados y misiles impulsados. Las velocidades que pueden alcanzar los carros, buses y camiones se han incrementado y sus motores giran 2 veces más rápidos. Los elevadores en

edificios altos son totalmente automáticos y mucho más rápidos, con velocidades limitadas solamente para la comodidad de los pasajeros. El esfuerzo aplicado a las partes en estos vehículos frecuentemente se incrementa al cuadrado o al cubo de la velocidad incrementada.

En el interés de aumentar la velocidad, el ingeniero de diseño está siempre bajo presión para reducir el peso. Esto puede ser hecho algunas veces al sustituir aleaciones de aluminio o de magnesio en componentes donde haya acero o hierro, pero con la diferencia de que las aleaciones que llegan a sustituir a las otras no son del mismo tamaño o diseño. Es en este punto que el ingeniero diseñador tiene que reducir generalmente el tamaño que es con lo que generalmente se va a enfrentar. Esto presiona al diseñador de que se aumente el nivel de esfuerzos a los que dichas partes se verán sometidos. Aún objetos triviales tales como las máquinas de costura, cacerolas y equipajes son también más ligeros y con más capacidad de carga que alguna vez antes. El esfuerzo a ser soportado es raramente estático, generalmente fluctúa a bajas y altas frecuencias. La frecuencia de esfuerzo se incrementa con el incremento de las velocidades de las máquinas modernas y por lo tanto esas partes tienden a una mayor fatiga y fallar más rápidamente.

Otra causa de incremento de esfuerzos en productos modernos es la reducción en el factor de seguridad. Un ingeniero diseña con cierto conocimiento de cargas en mente pero suponiendo que los materiales y la habilidad de la mano de obra nunca son perfectos, un factor de 2,3,5 ó 10 es aplicado. Si no fuera por la velocidad, el peso o el costo, un factor de alta seguridad sería siempre usado. Aunque a causa de otras consideraciones, un factor más bajo es usualmente usados dependiendo de la importancia de aliviar peso o reducir costos.

Al mejorar la tecnología y al incrementar los requerimientos de servicio de los componentes, las máquinas están sujetas a grandes variaciones y amplios extremos de todas clases de esfuerzos, creando un incremento en la demanda de materiales mucho más resistentes que los actuales.

2.5.1. Demandas de la Ingeniería por materiales más legítimos.

Otra justificación para el uso de Pruebas No Destructivas es la demanda del diseñador para materiales más idóneos. Tanto como el tamaño y el peso disminuye y el factor de seguridad es bajado, más y más énfasis es puesto en un mejor control de las materias primas y una alta calidad de los materiales, procesos de manufactura y habilidad del operador.

Una interesante realidad es de que el productor de las materias primas o de un producto terminado frecuentemente no mejoran la calidad o funcionamiento del mismo hasta que la mejora sea demandado por el cliente. La presión del

consumidor es entonces transferido al productor de los instrumentos de pruebas no destructivas para la verificación de una nueva calidad especificada.

2.5.2. Público demanda una mayor seguridad.

Las demandas y expectativas del público de una mayor seguridad son aparentemente en cualquier lugar. No es raro encontrar en los registros de las cortes altas concesiones económicas a personas perjudicadas. Ultimamente, ha habido una gran proliferación de agencias que velan y que expresan el sentir en cuanto a la demanda de la seguridad del público por lo que dichas demandas han sido otra fuerza en el desarrollo de las Pruebas No Destructivas.

2.5.3. Incremento de los costos debido a las fallas.

Aparte de las recompensas e indemnizaciones por daños o a propiedades de los perjudicados, considere brevemente otros costos que se elevan de una falla mecánica. Estos costos son mucho mayores que los 2 primeros por muchas diversas razones. Algunos de los más importantes está:

- Mayor costo de materiales y trabajos.
- Mayores costos de partes complejas.
- Mayores costos debido a la complejidad de los ensambles,
- La mayor posibilidad que falle una parte o componente causando alguna falla en las otras debido a sobrecargas.
- La tendencia de bajar los factores de seguridad hace que vuelvan a subirse.
- La probabilidad que la falla de una parte dañe otras partes de alto valor. Por ejemplo, la falla de una biela en un camión viejo de 4 cilindros podría quebrar el bloque de cilindros. Ahora en día podría quebrar un bloque de 8 cilindros de mayor costo y daños en otras partes.
- La falla de una parte dentro de una máquina automática podría parar una línea de producción integral de alta velocidad. Cuando la producción anteriormente era llevada a cabo por medio de varias y separadas máquinas, la que tenía la pieza quebrada perfectamente podría ser obviada hasta que se reparara. Ahora, una máquina está atada a la producción de otras máquinas lo que genera grandes pérdidas si una tan sola pieza llegara a fallar en la línea de producción.

2.5.4. Responsabilidades del personal de producción y de los inspectores.

Anteriormente cada uno que trabajaba en una parte o componente, le daba también a la pieza un poco de inspección aunque esta fuera sólo superficial. Ahora en día, ese es raramente el caso: Muchas operaciones de producción están cubiertas por cobertores, dispositivos de seguridad y otros artefactos mecánicos

de tal manera que el operador escasamente ve la parte. Esto ha incrementado el número de inspectores y el tamaño y complejidad de sus trabajos. Ellos también necesitan de dispositivos de pruebas con los componentes o partes que sean más rápidos y más precisos por lo que los inspectores han llegado a ser especialistas. Ahora en día, los componentes son probados por medios más avanzados y de gran confiabilidad en los resultados.

Para cumplir con las demandas de los clientes, los especialistas de las Pruebas No Destructivas, los físicos, metalúrgicos, químicos, ingenieros eléctricos y mecánicos continuamente desarrollan mejores y más precisas pruebas. Ellos investigan más acerca de los materiales y componentes de lo que se ha sabido hasta el momento sin destruirlos y cuando estos especialistas hallan una respuesta producto de las investigaciones, ellos encuentran que el usuario ha propuesto nuevos problemas.

2.6. FACTORES ECONÓMICOS

2.6.1. Beneficios de las Pruebas No Destructivas.

Ningún proceso es empleado por una dirección industrial de manera inteligente a menos que ese proceso haga mucho más que pagarse a sí misma, excepto cuando ese proceso es forzado por una presión externa. Las Pruebas No Destructivas han sido asociadas cercanamente con la función de aceptación o rechazo en el ambiente industrial. El uso tremendo de esta tecnología y su crecimiento en el uso de estos métodos durante la Segunda Guerra Mundial enfatizó esta función. Las especificaciones gubernamentales de los Estados Unidos forzaron a los métodos de Pruebas No Destructivas en muchas industrias a ser una herramienta de aceptación o rechazo final. Muy natural, las direcciones de las empresas frecuentemente las apartaban lo más lejos posible tan pronto fuera posible sin comprender que son un camino al aumento de ganancias en lugar de un gasto impuesto. Los métodos de pruebas afectan las ganancias en una variedad de maneras directas e indirectas, por lo que se hace necesario un análisis económico extensivo de muchos factores como los que se muestran:

a) Ahorros en los costos de reconstrucción de bloques de motores.

Una ilustración simple de la habilidad de las pruebas no destructivas de hacer ganancias para la industria es en la reconstrucción de motores de vehículos. Los reconstructores tienen todas las de perder al recoger motores viejos, flojos, que fugan aceite con partes gastadas y garantizar que son tan buenos como si fueran nuevos después de haberlos literalmente hecho de nuevo.

Es por esa razón que los reconstructores de estos motores deben de mantener los costos y las posibles pérdidas al mínimo posible satisfaciendo a los clientes de un trabajo confiable. Por otra parte, los talleres que instalan los motores los comprarán de alguien o reconstruirá el motor por ellos mismos siendo la clave en ambos casos la condición en que se encuentre el bloque del motor. Si aún un bloque en un ciento es encontrado con una rajadura, el riesgo podría justificar el uso de las pruebas no destructivas que sea confiable en busca de las rajaduras. Supongamos por ejemplo que la planta esta procesando un ciento de bloques por día a un costo de \$200 por bloque. Suponga también que se encuentra un bloque de motor rajado por día que pasa por toda la línea de producción hasta la inspección final o peor aún en el carro del cliente, entonces perdemos \$200 por día. Ahora suponga que el reconstructor compra un equipo de partícula magnética para inspeccionar los bloques usados tal como los recibe, a un costo de \$2 por día por la unidad (amortizado a 10 años) y \$50 por día de inspector y materiales. Entonces se gastarían \$52 por día en pruebas no destructivas siendo la ganancia neta por día de \$148 con una inevitable ganancia intangible de mejora de la reputación del que reconstruye los motores.

b) Producción a proporciones de comprobación.

Las Pruebas No Destructivas como todas las actividades humanas, operan en una rango de compromiso entre 100 y el 0 porciento de cumplimiento o uso. El balance entre la producción y la verificación por pruebas dependen enteramente de la naturaleza, el uso del producto y de los costos de manufactura del componente que se tendrá que reconstruir en caso de que se encuentre defectuoso y por lo tanto rechazado. En la manufactura de las 2 primeras bombas atómicas, ninguna inspección hubiera sido demasiado costosa y ninguna razón de rechazo muy alto si se tuviera la certeza de que las 2 primeras bombas y sus componentes operaran positivamente cuando sea requerido y no antes o después del momento en que se necesitaba. Si 1000 duplicados de cada parte de la bomba tuviera que ser producida, con 10 operaciones de inspección por cada operación de producción y si 998 de las 1000 partes fueron rechazadas en un estado inconcluso o acabado, sería justificado la más alta aplicación de estrategias de control de calidad en los 2 juegos de partes. Esta es una máxima inspección para una mínima producción con una confiabilidad máxima. La mayoría de la industria manufacturadora y de reconstrucción caen dentro de los 2 extremos posibles por lo que los factores económicos determinan el porcentaje de partes de producción sujetas a inspección.

2.6.2. Criterio económico para la adopción de las Pruebas No Destructivas.

La determinación de los controles económicos resulta ser la primer pregunta en el uso de las pruebas no destructivas junto a la determinación de la cantidad y calidad de inspección que se le debería proporcionar a una parte particular o a un ensamble en producción. Una segunda y complementaria

pregunta es el costo de las pruebas no destructivas. El costo de estas pruebas dependen de (a) lo que se inspecciona, (b) en que cantidad, (c) para que es inspeccionado el componente y (d) por cuál método la pieza es probada. En vista de esta amplia diversidad de costos y problemas, es importante examinar los factores en producción que determinan el uso de los métodos de Pruebas No Destructivas.

Las Pruebas No Destructivas son usadas para reducir los costos de producción o pérdidas y asegurar el continuo servicio del producto. Los requerimientos de servicio son los que determinan los niveles de calidad aceptables quienes dictan el grado de control de los procesos de manufactura necesarios para mantener una calidad aceptable a bajo costo. Para obtener los más bajos costos de manufactura, el control debe de comenzar con una inspección de recibo. En otras palabras, una Prueba No Destructiva se JUSTIFICA completamente si el costo de un rechazo tardío o el costo de una parte que falla es mayor que el costo de una inspección no destructiva para controlar discontinuidades críticas.

2.6.3. Grado de perfección requerida.

Más y complejos problemas son encontrados en las industrias manufactureras. La inspección es conducida para cumplir con ciertas especificaciones en las que se deben de incluir una tolerancia por ser inalcanzable la perfección absoluta. En radiografía, una especificación puede ser expresada como la menor expansión posible de porosidad en una superficie sin permitir arrugas o rajaduras. La tolerancia no es expresada matemáticamente aquí pero sí en una forma que se comunica con el personal de producción.

Los valores estandarizados y la tolerancia son los más importantes factores en el costo de manufactura de cualquier producto los cuales deben establecerse claramente al ser distintos los deseos del personal diseñador, del de producción y la dirección.

La interrelación de estos factores aparece en la gráfica de la siguiente página en la que se ve que la curva del costo de producción aumenta rápidamente así como la calidad se acerca más y más a la perfección. También, el valor de un producto es cero hasta que un grado mínimo de calidad es obtenido. El valor entonces crece rápidamente pero su razón de crecimiento baja al acercarse la calidad a la perfección. Dentro del área de estas 2 curvas, producción aumenta valor al material. Es natural que el diseñador tienda a pedir un mayor grado de perfección mientras los talleres pidan un menor grado. La Tolerancia ideal desde el punto de vista de la dirección es aquel que alcanza el valor máximo agregado por el proceso de manufactura. Es a este nivel de tolerancia que las especificaciones de inspección deben de ser escritas y obtenidas.

En el ejemplo de la industria acerera se muestra como estimar los ahorros utilizando las Pruebas No Destructivas. En dicha industria como muchas otras existen pasos o etapas comunes con otros procesos que van desde la materia prima pasando por su fabricación preliminar, los procesos de acabado hasta que preste su vida de servicio con los usuarios. Dependiendo del producto final y la calidad que se les demanda, cada uno de los productos tales como las extrusiones, tuberías, láminas, barras y otras formas que se pueden obtener de los aceros por ejemplo, reciben más o menos inspecciones en cada una de las 4 áreas principales: desde materia prima en lingotes brutos y otras formas, pasando por forjado y el formado, el maquinado y ensamble y la del producto final hacia los usuarios. Tanto en cada uno de estos 4 pasos como internamente, existen unos puntos de inspección en donde las operaciones de aceptación/rechazo son llevadas a cabo previniendo que el producto defectuoso llegue hasta el final con el costo que eso implica.

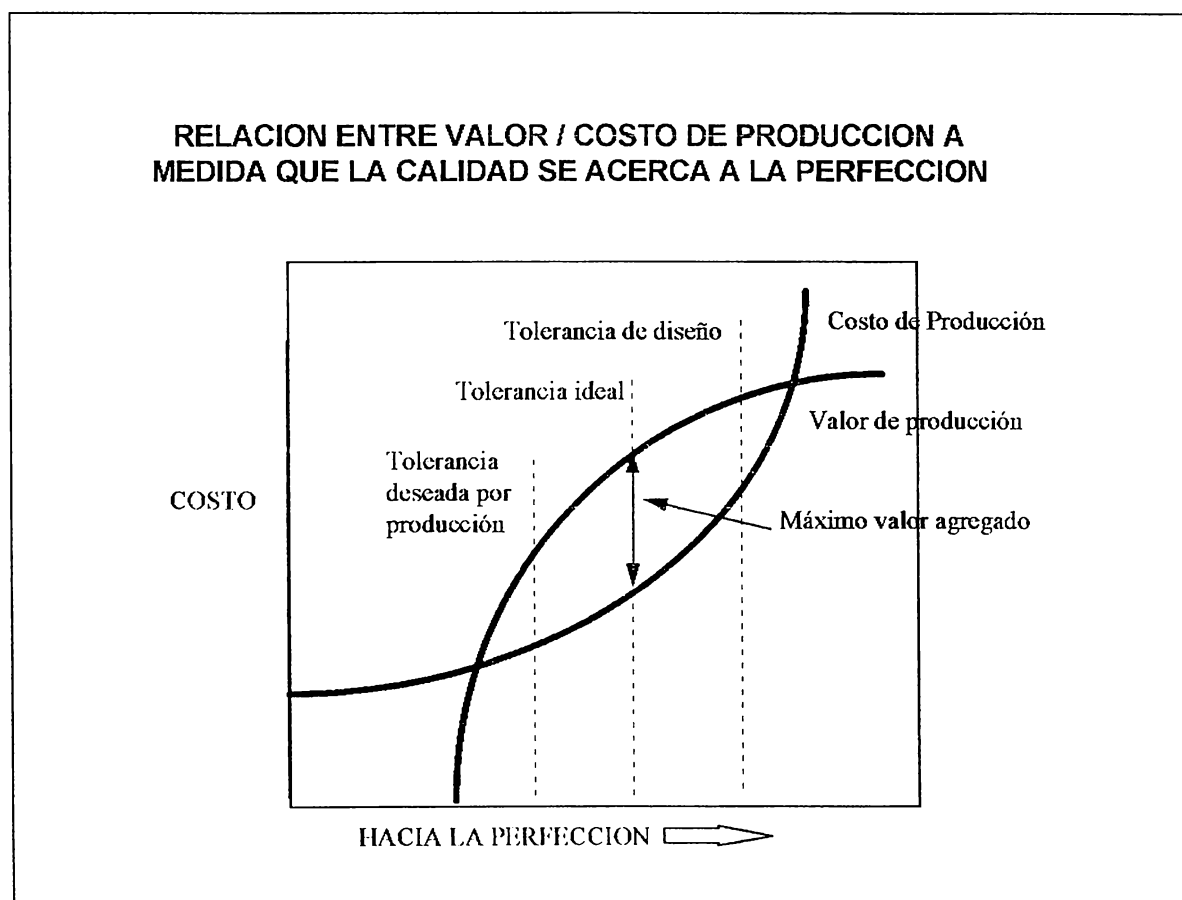


Figura 2.2: Relación entre valor/costo de Producción a Medida que la Calidad se acerca a la Perfección.⁴

⁴ Tomado de "Manejo y Aplicación de las PND" (Management and Application of Nondestructive Tests) por Robert C. MacMaster, Profesor emérito de Ohio State University, Columbus, Ohio 1987.

2.6.4. Evaluando Costos y Valores de las Pruebas No Destructivas.

La contabilidad de costos puede ser de considerable ayuda en evaluar los costos y las ganancias. El costo contra el valor del producto es la llave de la ganancia neta. El inspector está siempre enfrentado con el problema de justificar la inspección de materia prima o material semi-procesado. La dirección podría desconocer los ahorros de producción reales que podrían ser ahorrados por una inspección temprana.

La justificación económica de una inspección de la materia prima o en un material semi-procesado está basado en una o más de las siguientes razones:

- a. Ahorro del costo de reprocesar material o productos defectuosos que podrían ser rechazados posteriormente en una inspección final.
- b. Aumento en la producción cuando el porcentaje final de lo desechado es reducido al mínimo y
- c. Donde la capacidad de producción es limitada, el rechazo final de artículos ya acabados que podrían haber sido rechazados por las Pruebas No Destructivas en una etapa temprana, le coloca un límite de producción en la capacidad actual.

2.6.5. Ahorrando Costos provenientes de Procesar Materia Prima Defectuosa.

Si se dan los siguientes casos:

- (a) el costo de inspección es de unos pocos centavos,
- (b) el costo de un procesado posterior y más amplio es de varios dólares por pieza,
- (c) la razón final de rechazo debido a discontinuidades encontradas en el material o del proceso inapropiado con el que se inició es de "X" por ciento, entonces el proceso de pre-inspección vale la pena.

De nuevo, si los materiales desechados en una inspección final hubieran sido satisfactorios para la venta, hay una obvia ventaja monetaria en eliminar los materiales desechados y aumentar así las ventas de la compañía y los beneficios de esas ventas adicionales.

2.6.6. Incrementando la Producción reduciendo los productos desechados.

Ahorros adicionales para la compañía resultan del aumento de la capacidad de producción de la planta al hacer productos que se venden, cuando el porcentaje final desechado es eliminado por una pre-inspección. La siguiente tabla 2.1 ilustra este incremento a la producción asumiendo una pérdida de 5% debido a malas materias primas. La línea A en la gráfica muestra los resultados de no usar inspección en la materia prima y rechazo de 50 piezas completas por cada mil manufacturadas. El costo de producción de estas partes fué perdido. En la línea B, estas 50 partes defectuosas fueron rechazadas antes de la producción y 950 partes buenas fueron manufacturadas y vendidas. Sin embargo, la meta de cada departamento de producción es obtener tantas partes acabadas listas para su uso como las que se puedan producir. Si el taller puede producir hipotéticamente mil piezas como se muestra en la línea A, entonces mil piezas buenas deben de pasar a producción. Un exceso suficiente es inspeccionado antes de la producción como en la línea C y la capacidad total de la planta es utilizada eficientemente. El máximo número de partes buenas puede entonces ser vendidas. Si ambos, el ahorro de los costos de producción y el incremento en el número de partes buenas producidas y vendidas son consideradas, la escala de porcentajes en el Cuadro de Beneficios de la Inspección titulado "Porcentajes de Rechazo" (corregida para incrementar la capacidad de producción), es la escala la cual debería ser usada para determinar el punto de equilibrio (el porcentaje arriba del cual, es económico inspeccionar la materia prima).

Tabla Nº 2.1 Incremento de Producción eliminando el 5% de desechos.⁵

NUMERO DE PIEZAS INSPECCIONADAS DE MATERIA PRIMA	NUMERO DE PIEZAS RECHAZADAS Y RETORNADAS AL VENDEDOR	NUMERO DE PIEZAS MANUFACTURADAS	NUMERO DE PIEZAS RECHAZADAS EN LA INSPECCIÓN FINAL Y DESECHADAS	NUMERO DE PIEZAS BUENAS VENDIDAS
A: 1,000	0	1,000	50	950
B: 1,000	50	950	0	950
C: 1,053	53	1,000	0	1,000

2.6.7. Costos de las Pruebas No Destructivas.

Al determinar el valor de las Pruebas No Destructivas, sólo una mitad de la cantidad es el ahorro en los costos de producción. La otra mitad es el costo de las pruebas en sí. Algunos de los factores que entran en estos costos son discutidos abajo:

⁵ Tomado de "Manejo y Aplicación de las PND" (Management and Application of Nondestructive Tests) por Robert C. MacMaster, Profesor emérito de Ohio State University, Columbus, Ohio 1987.

Factores de Costo

Los costos de las pruebas no destructivas contemplan muchos aspectos como:

- a) el costo de la labor de inspección,
- b) el costo de los materiales de pruebas como la placa de rayos X, líquidos penetrantes y otros,
- c) Costos de operación tal como electricidad, agua y reemplazo de partes y
- d) Costos fijos como el espacio de la fabrica, depreciación de equipo y seguros.

Estos costos varían significativamente para cualquier Prueba No Destructiva dependiendo de las diversas variaciones en sus aplicaciones. Las variaciones más importantes son:

- La cantidad de partes inspeccionadas,
- El traslado de las partes desde y hacia la unidad de pruebas,
- El traslado de las partes durante el proceso de pruebas,
- La sensibilidad requerida por el método de pruebas,
- La tolerancia permitida en la interpretación de los resultados de las pruebas,
- El porcentaje de las partes defectuosas encontradas por la prueba y
- El conocimiento y experiencia del personal de producción requerido.

Consideraciones de cada uno de estos factores fácilmente llevan a reducir casi cualquier costo de las pruebas. Esto se aplica ya sea a una nueva instalación de pruebas que se está planificando o a una existente operación que está siendo mejorada.

Cantidad de partes a ser inspeccionadas

Como en el costo de maquinado, el tiempo de instalación es importante en cualquier Prueba No Destructiva. Algunas Pruebas no requieren ninguno como la inspección con líquidos penetrantes pero otros, como la posición de la placa o película para radiografía podrían requerir media hora. Un factor suplementario es la variedad de los tamaños o formas de las partes en la cantidad total. Esta variedad podría o no incrementarse significativamente el tiempo de instalación para que la parte sea probada dependiendo de otros factores.

Traslado de las partes hacia la unidad de pruebas y durante el proceso de pruebas.

Como en cualquier operación de producción, el traslado de las partes podría ser más costoso que la operación misma del probado por medio del equipo. En la consideración del costo de las Pruebas No Destructivas, es

importante considerar métodos de operaciones previas y subsecuentes en las partes para reducir el problema.

Durante el proceso de pruebas, el traslado de partes individuales por medios mecánicos en muchas unidades de pruebas ha sido eliminado completamente o minimizado significativamente con una considerable reducción en el costo por pieza.

Automatización del Método de Pruebas.

Muchos métodos de pruebas requieren a un operador a hacer una parte o todas las operaciones de la Prueba. Esto podría incluir la manipulación del objeto que se prueba más una inspección visual de la parte, con aplicación de polvos reveladores, penetrantes o un monitoreo a través de un equipo de rayos catódicos, una medida o alguna otra indicación. El desarrollo del microprocesador basado en sistemas de pruebas y robótica, han aumentado el esfuerzo a reducir el involucramiento del operador en casi todos los procedimientos de Pruebas No Destructivas.

Sensibilidad requerida de los Métodos de Pruebas.

Sensibilidad significa generalmente un control cercano de los parámetros que se prueban y éste significa a su vez más cuidado en la instalación, más exactitud en el control del método, más entrenamiento del operador y el tiempo suficiente para una lectura concisa de la presentación de los resultados.

Tolerancia permitida en la Interpretación de los resultados de las Pruebas.

Sin importar la sensibilidad que se requiera, siempre hay una tolerancia aceptable. Esa tolerancia es un factor importante en la determinación del costo de las pruebas por las mismas razones que la sensibilidad lo es también.

Porcentaje de partes defectuosas encontradas por las Pruebas No Destructivas.

El porcentaje de rechazo es quizás un factor de costo inesperado, pero uno que es rápidamente apreciado y aceptado como un factor determinante en el costo de las Pruebas. De lo anterior se infiere que donde no hayan partes defectuosas en un lote, el inspector puede abarcar más partes en un día.

Alta capacitación y experiencia del Personal de Pruebas

Muchas de las Pruebas No Destructivas requieren un cierto grado de habilidad y algunas requieren un muy alto nivel de adiestramiento. Por esta razón, hay un pensamiento creciente de ir eliminando las variables que complican los métodos y equipos de las Pruebas No Destructivas. Varios de ellos son ahora

operados con relativamente poco adiestramiento del personal y otros sin experiencia previa hasta el punto de hacer las interpretaciones y análisis de los resultados.

2.7 COORDINACIÓN Y MANEJO DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

2.7.1 Políticas de la Dirección

Para alcanzar el máximo valor de cualquier operación de pruebas no destructiva, es esencial instalar políticas propias con respecto a su uso. Estas políticas incluyen:

1. Establecimiento claro de parte de la dirección, de la política del departamento encargado de las pruebas no destructivas.
2. Un cuadro organizacional de todo el departamento de Control de Calidad.
3. Descripción de la interrelación entre el departamento de Control de Calidad de la compañía y los otros;
4. Descripción de puestos de trabajo para cada posición dentro del departamento.

2.7.2 Objetivos de las Pruebas No Destructivas.

La política a seguir por el departamento de las Pruebas No Destructivas debe estar basado en una o más de las razones que previamente se han discutido:

1. Asegurar la confiabilidad del producto ya terminado,
2. Salvar vidas humanas o prevenir accidentes y
3. Ahorrar dinero al usuario de las mismas.

Tal política debería sin embargo ir más lejos con mucho más detalle dejando en claro los deseos de la dirección a todos los niveles de la organización.

2.7.3 Inspección de Recibo.

Considere una compañía bien integrada de cualquier género metalúrgico. Esta compañía recibe materias primas tales como barras, extrusiones, láminas y otras formas por lo que tiene un departamento de inspección de recibo. La política de tal operación podría incluir el establecimiento de estándares y ahorro a la compañía por medio de:

1. Probar el estado de los materiales que entran para asegurar que el defectuoso no pase al proceso de producción,
2. Mantener los registros de calidad de cada vendedor y notificar al departamento de compra de la calidad ofrecida por diversos vendedores.

(Generalmente, el vendedor con el precio más bajo en una pieza podría no dar los más bajos costos en un conjunto ensamblado con tales piezas si el nivel de calidad es muy bajo).

3. Proporcionar al departamento de Compras la información en que se recibe el material que viene de los vendedores tal como la protección que proporcionan en el embarque o traslado de los mismos.
4. Consultar con el departamento de inspección de los vendedores sobre los estándares o tolerancias usados de tal manera que quede claro entre vendedor y comprador de los niveles de calidad requerido.

Esta inspección de recibo del departamento encargado probablemente reporta al inspector supervisor como se muestra en el siguiente cuadro organizacional:

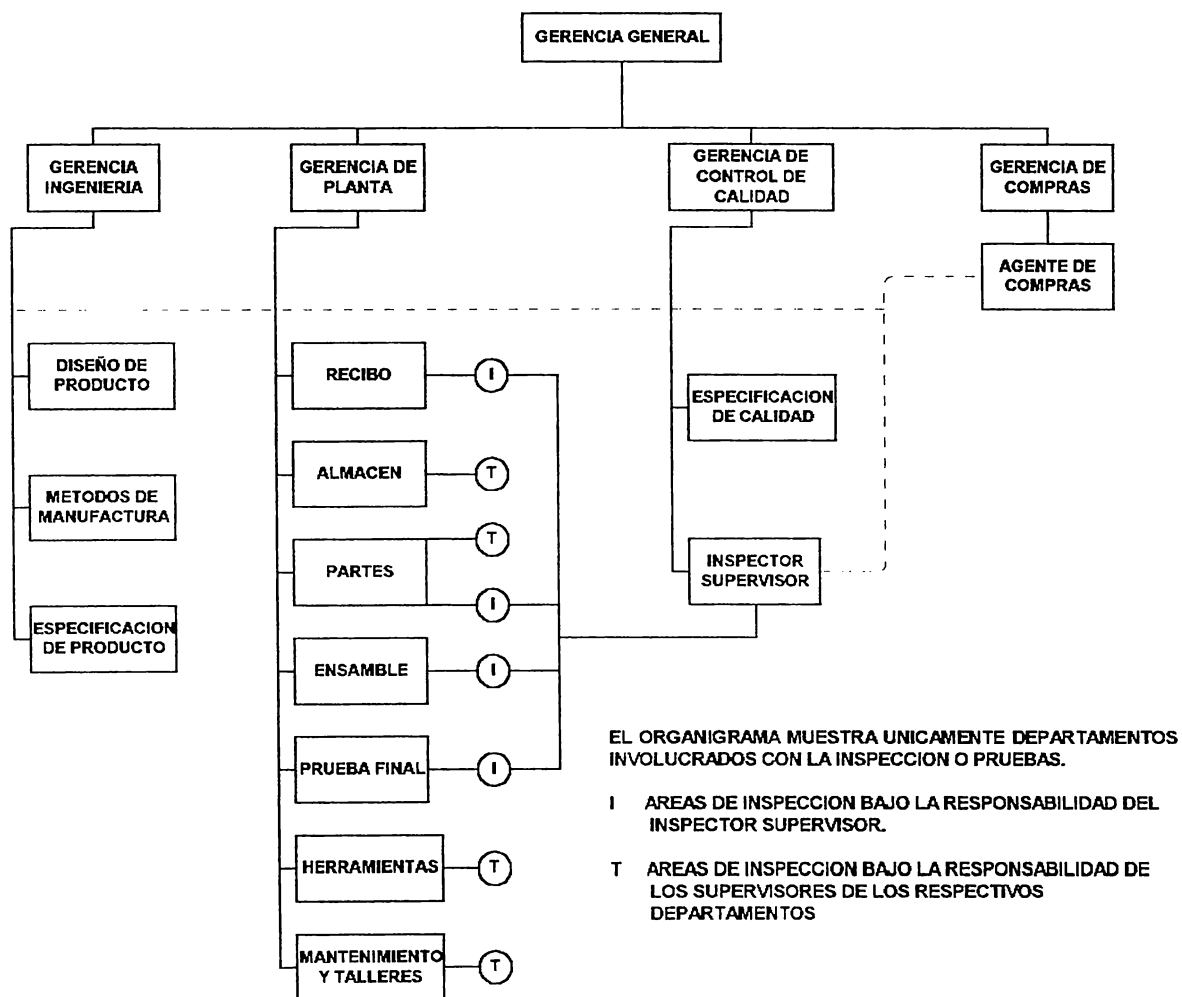


Figura 2.3: Cuadro de una Organización Industrial que muestra los canales de responsabilidad en las áreas de inspección.⁶

⁶ Tomado de "Manejo Coordinado de las PND" Parte 4, Fig. 4 por Wenk S.A. y McMaster R.C. (American Society for Nondestructive Testing)

De manera similar, esta organización de responsabilidades también aplican a todo el departamento de inspección en la propia manufactura, ensamble y etapa final del producto. En la función del inspector supervisor que es la cabeza de estas operaciones, usa estándares establecidos por la propia compañía. El inspector supervisor reporta al Gerente de Control de Calidad del establecimiento de reales y bien definidas especificaciones de calidad. En plantas con pocas personas, el inspector supervisor o jefe podría actuar como un Gerente de Calidad estableciendo estas especificaciones. Estas especificaciones de calidad (las cuales incluyen mas que los estándares de las pruebas no destructivas) debe ser compartidas y del conocimiento obvio de la dirección y de los departamentos de venta, ingeniería, producción y entendidas completamente por Compras.

Todos deben de estar de acuerdo con ellos y por eso se muestra en el cuadro anterior los puntos de comunicación entre el Gerente de Calidad, el de Ingeniería, el inspector supervisor, el Gerente de Planta y el de Compras.

2.7.4 Departamento de Inspección.

En la figura anterior, la letra T es asociada con el almacén, partes fabricadas, herramientas y mantenimiento indica que esos departamentos deben de tener sus propios equipos de Pruebas No Destructivas que no estén bajo la supervisión del inspector supervisor. Un operador de torno debe de tener un micrómetro y podría periódicamente revisar las dimensiones del producto para mantener la operación en control dentro de límites. De la misma manera, podría haber una inspección de partícula magnética en el departamento de tratado térmico para asegurar el control del calentamiento, recocido y revenido. Esa unidad podría estar bajo la responsabilidad y control directo del encargado del departamento de Tratamiento Térmico de la misma manera que otros departamentos también tienen sus propios equipos de prueba para propósitos de control internos.

Similarmente, en el cuarto de herramientas, una inspección de líquido penetrante podría asegurar que las herramientas están listas para usarse en el taller de maquinado. También, mantenimiento podría tener su propio equipo de pruebas para la maquinaria de producción en la planta por lo que la falla de dicho equipo podría ser muy peligroso para el personal de la planta. En los casos anteriormente mencionados, la responsabilidad de dichos equipos y su operación en los distintos departamentos recae directamente en los encargados de los mismos.

Sin embargo, las funciones de inspección en la línea de producción está bajo la responsabilidad del inspector supervisor. Estas operaciones tienen una naturaleza de auditoría por lo que deben de ser realizadas por personal adiestrado quienes se hacen responsables de la operación que es auditada. Por lo tanto el jefe inspector, inspector supervisor o Gerente de Calidad no se

reportará al Gerente de Producción o de Planta sino a un director ejecutivo quien en la organización será responsable no sólo de la producción sino también de las áreas de soporte técnico como ingeniería, planificación y otras que tienen que ver con el desarrollo entero de la compañía. En el cuadro que se muestra, es el Gerente General quien tiene esa responsabilidad como en otras plantas lo sería el Presidente o Director. De esta manera, la política de la dirección debe ser directamente aplicada a la determinación y vigilancia de la calidad del producto.

2.7.5. Contactos Externos.

Es altamente deseable para el control de calidad y supervisores el tener contactos tanto dentro de la organización de la compañía como fuera de ella. Como se ha dicho, el tratar con ingeniería y con producción de una manera eficiente es esencial en el desarrollo de los estándares de los métodos e interpretación de las pruebas. Pero eso no basta, sino que también los frecuentes contactos con los departamentos de venta o servicios brindarán información de campo que habrán que considerarse de tal manera que las especificaciones de pruebas pueda cumplir las condiciones de servicio del producto.

Es esencial que contactos de afuera puedan ser mantenidos por ser los contactos con los clientes los que dan una excelente información. Especialmente si se tratan de agencias gubernamentales que poseen detalladas especificaciones que requieren que se cumplan proveyendo una ayuda mutua a ellos mismos como al que ofrece el servicio. El contacto con los proveedores es también importante, porque un proveedor con un claro entendimiento de los estándares y requerimientos de los clientes proveerán una mejor información para productos que cumplen con dichas normas y que son menos costosos.

Por último, pero también importante es el contacto con el personal de inspección y pruebas de todos los niveles como sería el caso de la Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas con la que se puede trabajar de manera conjunta. Hay un Comité denominado E-7 de dicha Sociedad que colabora directamente con el campo de todos los que se dedican a las Pruebas No Destructivas. Muchas otras sociedades técnicas e industriales incluyen comités y grupos de investigación dedicados a la aplicación de las Pruebas No Destructivas en diversos campos.

2.8 PROGRAMANDO LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y ESPECIFICACIONES.

2.8.1. Fuentes de información

Ingenieros de Pruebas No Destructivas requieren toda la información posible concerniente a las cargas durante el servicio y condición de uso de los componentes en orden a diseñar o especificar una determinada Prueba No Destructiva que sea útil para una parte en particular. Ellos también necesitan claridad en cuanto a los límites de aceptabilidad y de rechazo, además es necesario probar que las propiedades a ser medidas por las Pruebas No Destructivas son un medio confiable de detectar discontinuidades o de predecir propiedades de la parte de poder seguir brindando servicio. Ante la ausencia de esta información necesaria, usualmente no es posible especificar de una manera inteligente una Prueba No Destructiva confiable.

2.8.2. Ingenieros de Diseño y de Esfuerzos.

El ingeniero de diseño y de esfuerzos deben suplir la información necesaria de las cargas de servicio, condiciones de operación y los límites de funcionamiento aceptables. Ellos deben identificar las regiones críticas de concentración de esfuerzos y de fatiga del material junto con los probables puntos y tipos de fallas que se esperan en durante el servicio.

2.8.3. Ingenieros de Materiales y Procesos.

El conocimiento del diseñador podría ser complementado con Pruebas Destructivas en materiales y componentes críticos. La determinación de la correlación entre 1) el esfuerzo o condición de servicio y 2) las discontinuidades o propiedades no destructivas medidas, usualmente requieren de la ayuda de un ingeniero de materiales o procesos. Frecuentemente una serie extensiva de pruebas destructivas controladas es requeridas para probar que las indicaciones de las pruebas que se efectúan son completas y confiables sobre la condición de vida de los componentes.

2.8.4. Ingeniero de Pruebas No Destructivas.

Finalmente el trabajo de encontrar un método sensitivo y confiable de medir la propiedad de los materiales o componentes sin destruirlos es responsabilidad del ingeniero de Pruebas No Destructivas. Desafortunadamente, ha existido la

práctica de asumir que el ingeniero que desarrolla el programa de pruebas no destructivas tomará las funciones del ingeniero de diseño y de esfuerzos y la del ingeniero de materiales y procesos en adición con la tarea básica de diseñar, desarrollar y aplicar las pruebas no destructivas más idónea. Como resultado, muchas Pruebas No Destructivas determinadas de manera fina han fallado precisamente porque el ingeniero de diseño y materiales han fallado en contribuir con la información precisa y confiable necesaria. Las Pruebas No Destructivas pueden dar una medida confiable de las propiedades de los componentes para el cual estuvo diseñado que midiera, siempre y cuando haya una correlación con la experiencia de servicio o previas pruebas destructivas. De lo contrario, dichas medidas y por lo tanto toda la Prueba no sería de utilidad ni confiable.

2.9. ESPECIFICANDO LA SENSIBILIDAD Y PRECISIÓN DE LAS PRUEBAS.

Precaución y un cuidado especial deben ser usados para especificar los límites de sensibilidad y precisión requerido en pruebas no destructivas. La sensibilidad de cada tipo de PND es limitada ya que la sensibilidad adecuada para probar a una parte podría ser totalmente inadecuada para otra parte que se pruebe o para la misma parte pero con una condición más severa de servicio. En general, las pruebas más sensitivas requieren equipo más elaborado y que cuestan más. El costo del desarrollo y de la aplicación de una adecuada PND debe ser considerado en cada caso en particular. Pruebas No Destructivas las cuales no puedan ser aplicadas económicamente por su alto costo en una aplicación específica, usualmente será abandonada aún cuando sea la más idónea.

2.9.1. Tolerancias Razonables.

No hay reglas simples para determinar la sensibilidad y precisión más económica de las Pruebas No Destructivas. En algunos casos, no es económico requerir que la precisión del equipo de pruebas exceda la precisión conocida del número y magnitud de las cargas de servicio del objeto a ser probado. Similarmente, no siempre es económico exceder la precisión dentro de la cual se asume por diseño donde se concentraran los mayores esfuerzos.

2.9.2. Limitaciones de Interpretación

Aún los métodos bien establecidos y desarrollados en el medio de Pruebas No Destructivas están sujetos a limitaciones. Radiografía por ejemplo, podría ser confiable para revelar porosidad, encogimiento, arrugas, inclusiones en colados, falta de penetración en soldaduras y discontinuidades similares. Pero pocos son

los casos en que verdaderamente el tiempo de vida real o carga por falla pueda ser predecido de manera cuantitativa de una examinación por Rayos X. Esto sería difícil de hacer aún si las partes fueran seccionadas (parcialmente destruidas) para una detallada examinación visual interna.

Similarmente, la inspección por partícula magnética de materiales ferrosos revelan rajaduras en la superficie y discontinuidades de manera confiable. Sin embargo, Hay muy pocos casos en que los esfuerzos por fatiga o el número de aplicaciones de carga requerida para producir fallas por fatiga pueda ser predecidas por las indicaciones de las pruebas. Lo que si se puede inferir es que el conocimiento de la existencia de una quebradura en la superficie o concentración de esfuerzos pueden llevar a una prematura falla bajo una condición de carga repetitiva siendo generalmente suficiente para rechazar el material o parte que se prueba.

2.9.3. Limitaciones Geométricas.

Cuando se diseña, se hacen especificaciones o aplicaciones de las Pruebas No Destructivas, es importante reconocer ciertas limitaciones geométricas en el escudriñamiento y sensibilidad de las mismas, Algunos métodos de pruebas están específicamente limitados a probar objetos considerablemente planos o superficies paralelas o aún con secciones de espesor constante. Resonancia de ultrasonido para espesores está limitado naturalmente a paredes o platos con superficies casi paralelas en orden de que los ecos puedan retornar a la sonda sensible.

Pocos tipos de Pruebas No Destructivas son aplicables solamente a especímenes de idéntica geometría. Algunas aparatos de pruebas con inducción electromagnética o corrientes de Eddie pueden detectar solamente discontinuidades en varillas o extrusiones de determinada forma y diámetro.

2.9.4. Limitaciones de Accesibilidad.

Algunos métodos de prueba requieren accesos a ambos lados del objeto que se prueban. En varios de ellos, la fuente de la sonda está localizado en un lado del objeto que se prueba y en el lado opuesto se encuentra el detector como en el caso del tubo de Rayos X y la placa o película en una radiografía a través de todo el espesor de una pared.

Otros métodos están diseñados o pueden ser modificados para usarlos en un sola cara o lado como las pruebas de Partícula Magnética, reflexión de ultrasonido y de líquidos penetrantes.

2.9.5. Limitaciones de Tamaño y Forma.

Algunos métodos de pruebas pueden ser aplicados a casi cualquier tipo y forma de objetos a ser probados mientras otros tienen esas limitaciones. Los aparatos de pruebas portátiles pueden ser usados para examinar grandes y fijas estructuras en el campo. Otras pruebas involucran el uso de masivas unidades de pruebas en fundaciones fijas poco maniobrables dentro de un área de pruebas confinada. Su uso es limitado al objeto de pruebas que pueda ser traído al área de las pruebas y colocado apropiadamente con respecto al aparato que los prueba.

Otras pruebas tienen limitaciones de espesor definidas como los medidores de espesor con rayos Beta que pueden penetrar solamente delgadas capas de casi todos los materiales. En cambio, las sondas de contacto de reflexión de ultrasonido requieren de suficiente grosor de material arriba de las discontinuidades para permitir al pulso de la fuente atenuarse antes que la señal de discontinuidad retorne.

2.9.6 Limitaciones de Materiales.

Pocas pruebas están limitadas a ciertas clases de materiales. Las Pruebas de partículas magnéticas por ejemplo, son útiles solamente en materiales ferromagnéticos sin poderse usar en aleaciones ligeras o para aleaciones no magnéticas de aceros inoxidables.

2.9.7. Limitaciones de las superficies al examinar.

Algunas Pruebas No Destructivas permiten a grandes áreas o volúmenes ser inspeccionados simultáneamente en una sola exposición u operación. Esto produce imágenes de grandes áreas (como radiografía y fluoroscopia) o proveen indicaciones de superficies totalmente expuestas (como las pruebas por penetrantes). Otros métodos de prueba son esencialmente pruebas en determinadas áreas que requiere la examinación de pequeñas áreas sospechosas de contener discontinuidades.

2.9.8. Limitando el número de Propiedades a ser medidas.

El número de propiedades a ser medidas por las Pruebas No Destructivas deben ser limitados a las que se necesitan conocer para que la pieza continúe en servicio. Por ejemplo, una parte en particular puede ser descartada para estar en condiciones de servicio debido a diferentes causas como material inapropiado, deficiente tratamiento térmico, porosidad, arrugas, segregación, inclusiones, rajaduras superficiales, costuras y discontinuidades por lo que no se debería

esperar que una sola prueba no destructiva detecte y mida todas estas propiedades. Frecuentemente, una prueba no destructiva es requerida para cada tipo general de discontinuidades.

Razonamiento similar es verdadero para la inspección de daños por servicio como la corrosión, esfuerzos repetitivos, desgaste, impactos, destrucción de superficies y otros factores que podrían contribuir a fallas de las partes durante el servicio. Usualmente un método separado de inspección será requerido para cada tipo diferente de discontinuidades y según las localizaciones de ellas derivadas de las condiciones de servicio de la parte que se examina.

Si solamente una o pocas características que afectan la vida de la parte son seleccionadas para probar, la correlación entre las pruebas y el funcionamiento durante el servicio de las parte podría ser bastante pobre a menos que otras causas de fallas sean controladas, explicadas o tomadas en cuenta. Suponga que exista una alternativa entre algunos métodos de pruebas no destructivas, una de las cuales indica confiablemente una característica que se prueba mientras la segunda mide diferentes causas importantes de debilitamiento de la parte con menos confiabilidad. Si sólo uno de estas 2 pruebas puede ser usado económicamente, el último podría utilizarse de manera fiable al tomar en cuenta la mayoría de los factores importantes aunque sea un poco menos precisa que la primera opción.

2.10. ESTABLECIENDO LA CONFIABILIDAD DE LAS PRUEBAS.

Muchas Pruebas No Destructivas detectan y evalúan discontinuidades o determinan esfuerzos o condición de servicio de las partes por procedimientos indirectos. Esto usualmente involucra la medida de diferentes pero correlacionadas propiedades. Una cosa es la prueba evidente no destructiva de la existencia, localización y magnitud de una discontinuidad y otra es la de determinar la influencia de esa discontinuidad en los esfuerzos y condiciones de servicio del objeto que se prueba.

2.10.1. Validez de las Pruebas.

La determinación de la validez de las pruebas requieren buen juicio de ingeniería basado en adecuada experiencia de servicio o apropiadas Pruebas Destructivas. Especímenes típicos, algunos libres de discontinuidades y otros que contengan todos los tipos básicos y magnitudes de discontinuidades en cada localización crítica, deben de estar disponibles para tales pruebas. Proporcionar a estos especímenes de referencias satisfactorias no es siempre fácil porque en muchos campos de la ingeniería de materiales, hay una escasez de información específica de la influencia del material y las discontinuidades de fabricación en la resistencia y servicio de las partes cuando están en funcionamiento. Las pruebas

no destructivas no pueden suplir dicha información porque dicha información debe ser obtenidas de pruebas destructivas o por la experiencia obtenida durante la operación.

2.10.2. Validez del Juicio de los inspectores.

El prerequisite necesario para la fiabilidad de las Pruebas No Destructivas es una correlación probada entre 1) las propiedades reales medidas por las PND y 2) la Presencia de discontinuidades o propiedades de servicio que se predicen de las medidas. En situaciones donde dicha correlación no ha sido totalmente establecida o donde varios factores influyen, las evaluaciones basadas en la experiencia y juicio de inspectores experimentados llegan a ser de gran importancia en el método de PND utilizado. Tales correlaciones son usualmente implícitas pero raramente probadas o demostradas al ser usualmente difícil, costoso y consumidor de tiempo el obtener dicha información para establecer dichas correlaciones y luego diseñar y desarrollar un método de PND confiable basado en ellas.

Al evaluar los métodos de Pruebas No Destructivas , la carencia de información específica, experiencia de operación inadecuada o mal juicio pueden influir seriamente en las conclusiones del inspector. Esta situación puede ocurrir aún cuando el método de pruebas no destructivas proveen una excelente información concerniente a la condición del objeto que se prueba. Consecuentemente es anti-económico colocar un excelente y completo equipo de PND en manos de operadores sin experiencia, o inspectores con poca experiencia de inspección o con juicio erróneo. La combinación de la información precisa obtenida de las pruebas unidas al buen juicio del inspector es esencial en el éxito de toda la operación de prueba.

2.10.3. Costos de Estándares inadecuados.

Si no se puede demostrar la fiabilidad de las correlaciones de las pruebas antes de aplicarlas puede resultar muy costoso. En muchos de los casos en que se duda, los inspectores que usan los métodos de Pruebas No Destructivas tienden a ser conservadores, particularmente en los casos donde no se tiene información confiable de servicio. En otros casos, han habido partes rechazadas porque las Pruebas No Destructivas han revelado discontinuidades sin mostrar que haya habido un debilitamiento de la parte cuando son sometidas a pruebas de servicio normal de manera simulada. La causas de estos juicios erróneos son los inexactos y arbitrarios estándares de inspección establecidos en las empresas más por temor o ignorancia que basados en cuidadosas pruebas físicas.

2.11. PROGRAMANDO LAS PRUEBAS PARA UNA MAYOR EFECTIVIDAD Y ECONOMÍA.

El programar las Pruebas No Destructivas frecuentemente tienen una influencia crítica en el costo, efectividad y valor general de toda la operación. En producción es frecuente probar una mayor efectividad en aplicar las Pruebas No Destructivas en las etapas más tempranas que sea posible en las que las potenciales discontinuidades se encuentran presentes y detectables. De esta manera, rechazos potenciales son eliminados antes de una posterior fabricación o costos posteriores en que se incurra.

2.11.1 Materia Primas.

Es una buena práctica inspeccionar las materias primas cuando entran a la planta. Tales inspecciones tiene que ser hechas por el proveedor, un laboratorio independiente o por el departamento de inspección de recibo. De esta manera, la materia prima defectuosa no puede proseguir a Producción o áreas de ensamble de la planta donde podrían ser accidentalmente confundidas con los lotes de producción en buen estado.

En algunos casos, la discontinuidades en las materias primas podrían no ser detectables hasta que en un paso del procedimiento haya sido completado y pueda detectarse. En estos casos, la inspección debe continuar directamente hacia el paso del procedimiento en que las posibles anomalías puedan ser detectables.

2.11.2. Materiales Procesados.

En los pasos o etapas del proceso donde podría introducirse discontinuidades, la inspección debería ser aplicada lo más antes posible después de que esa etapa del proceso termine. Cuando la fabricación es costosa, es antieconómico dejar toda la inspección hasta la etapa de producto terminado donde cada unidad rechazada se encuentra en su estado más caro. Además, una falla en detectar el defecto en la pieza en este punto podría mandar a entrar en servicio a una parte defectuosa que podría fallar prematuramente con un costo mucho más alto.

2.11.3. Materiales en Servicio.

El intervalo óptimo de tiempo entre las pruebas no destructivas por daño en servicio varía con las condiciones de servicio y con los tipos de discontinuidad. Este período debe ser lo suficientemente corto para que las discontinuidades no detectadas en la inspección precedente no tenga tiempo de propagarse y colapsar entre inspecciones. En varios tipos de servicio, hay localizaciones típicas o períodos de tiempo en las cuales las inspecciones pueden ser hechas de

manera más económica. Buen juicio ingenieril junto con una vasta experiencia son usualmente requeridas para establecer un programa óptimo de inspección.

2.11.4. Número requerido de Pruebas Diferentes.

Es también frecuente la dificultad de responder a la pregunta de cuantas pruebas no destructivas diferentes deben aplicarse en un tiempo particular o a una etapa específica durante el servicio o de producción de una parte. Si específicas Pruebas No Destructivas para cada causa potencial de falla son combinadas en operaciones grandes y complejas de PND, entonces los costos serán altos sin razón. Consecuentemente, el diseñador y el ingeniero de materiales y procesos deben de determinar que propiedades son prácticamente importantes en limitar la operación o la producción. Solamente las propiedades que no puedan ser económicamente o confiablemente controladas a través de otros métodos que controlen el proceso deben ser reservados para las Pruebas No Destructivas.

2.12. EL FENÓMENO DE LA FATIGA Y CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS.

El fenómeno de fatiga es de una consideración importante en el diseño mecánico moderno, ya que la mayor parte de fallas mecánicas involucran fatiga. Por otro lado, la complejidad de este tema requiere un estudio profundo y extenso con el objeto de asimilar la teoría que se requiere en la práctica moderna de la ingeniería por lo que dicho material se discute y se encuentra disponible en una amplia y vasta bibliografía. En especial el estudio de fenómeno de la fatiga se ha caracterizado por contar con una riqueza de información empírica, la cual debe ser considerada en un orden lógico para correlacionar los datos con los conceptos teóricos y organizarlos en una forma apropiada para la solución de problemas prácticos de ingeniería.

Desde el desarrollo de la máquina de vapor, las cargas dinámicas altas llegaron a ser más comunes y las fallas que llegaron a ocurrir no pudieron ser explicadas sobre las bases de consideraciones estáticas que era el criterio que dominaba hasta la mitad del siglo XIX. Wholer con su primera máquina construída para pruebas de cargas repetidas observó que es el número de ciclos de esfuerzos más bien que el tiempo de prueba transcurrido es el importante y que los materiales ferrosos pueden soportar un número infinito de ciclos de esfuerzo con valores de esfuerzos abajo de ciertos límites.

2.12.1. Fractura por Fatiga.⁷

La *fatiga* es la fractura de un material a través de un proceso de agrietamiento progresivo en el cual un cuerpo sometido a cargas fluctuantes o cíclicas desarrolla una grieta que crece paulatinamente hasta alcanzar un tamaño crítico, después del cual sobreviene la fractura en forma catastrófica. La fatiga no produce cambios aparentes en la microestructura del material, ni en sus propiedades mecánicas. A nivel macroscópico, las grietas por fatiga son extremadamente finas y se presentan en forma localizada. En adición una fractura por fatiga suele ocurrir aún cuando los esfuerzos en la pieza o estructura están generalmente dentro del rango elástico. Estas características hacen que la fatiga sea muy difícil de detectar en una pieza en servicio, por lo que constituye una forma muy peligrosa de fallas de hecho. Se tiene conocimiento de que aproximadamente el 90% de las fallas de componentes mecánicos y estructurales durante el servicio esta relacionada con la fatiga.

Cuando el deslizamiento submicroscópico ocurre una y otra vez y sucesivamente con cada inversión de carga, puede darse uno de los casos siguientes: si el deslizamiento es leve, y si el material tiene la propiedad de alto endurecimiento por deformación, los puntos de deformación plástica local pueden llegar a adquirir suficiente resistencia como para detener el deslizamiento antes de que la grieta sea iniciada. Si este no es el caso, las regiones sujetas a deslizamiento cíclico altamente localizado usualmente desarrollan fracturas submicroscópicas, que se van uniendo y propagando hasta que la sección transversal se encuentra suficientemente reducida para que la fractura completa ocurra con una aplicación final de la carga.

La fractura por fatiga se origina invariablemente en puntos de alta vulnerabilidad como son los agujeros, filetes, cuñeros, roscas de tornillos, etc. , donde se tiene una concentración de esfuerzos. También las fallas se pueden originar comúnmente en granos que tienen una orientación desfavorable con respecto al campo de esfuerzos existente.

La fatiga es de primordial importancia en el diseño y mantenimiento de aviones, helicópteros, cohetes, ferrocarriles, todo tipo de vehículos terrestres, puentes y edificios, plantas nucleares, plantas generadoras de potencia, maquinaria, reactores, recipientes y ductos a presión y en general en todo tipo de estructura o pieza en la que se tengan cargas fluctuantes. En adición se puede decir que cualquier material es candidato a sufrir fractura por fatiga; habiendo sido inicialmente identificada en metales y luego en plásticos, hules y cerámicos.

La fatiga requiere de 3 condiciones para llevarse a cabo: (a) Que existan esfuerzos tensiles en el material, (b) Que los esfuerzos sean fluctuantes o cíclicos

⁷ Dr. González Velásquez, Jorge Luis. "Fractura por Fatiga" : Instituto Politécnico Nacional, Dpto Ingeniería Metalúrgica, Labs. Ing. Metalúrgica, Zacatenco, México D.F. 07300 Junio 1992.

y (c) Que se de un número suficiente de ciclos. Además de estos 3 requisitos, la fractura es influenciada por un gran número de factores, entre los que se destacan:

- La geometría de la pieza o estructura,
- La concentración de esfuerzos,
- El estado de esfuerzos y deformaciones,
- El tamaño,
- La microestructura,
- Las propiedades mecánicas,
- La temperatura,
- El ambiente,
- Los esfuerzos residuales,
- El acabado superficial,
- El esfuerzo promedio.

El proceso de agrietamiento en fatiga ocurre en 3 etapas: (a) Iniciación de las grietas, (b) la grieta crece en cada ciclo en una magnitud proporcional a la amplitud de la carga y (c) propagación inestable y la falla final.

Durante la propagación de una fractura por fatiga, se desarrolla un patrón concéntrico de marcas “de orillas”. Estas corresponden a varias posiciones de la grieta durante su crecimiento intermitente y están asociadas con la naturaleza aleatoria de la carga.

La porción de la superficie de fractura que representa la propagación relativamente lenta de la grieta es conocida como la “zona de fatiga” y es usualmente suave o con apariencia aterciopelada. El área que representa la falla final es llamada “zona instantánea”. Esto algunas veces muestra evidencia de deformación plástica, pero más comúnmente refleja la características granular de la superficie de fractura de un material frágil.

2.12.2. Concentración de Esfuerzos⁸

Cuando hablamos de fatiga, la concentración de esfuerzos asume una importancia mayor debido a que virtualmente todas las fallas por fatiga en piezas ocurren en puntos de concentración de esfuerzos o “elevadores de esfuerzos”. Comúnmente, éstos incluyen ranuras, filetes, orificios, roscas, chaveteros, etc. Partiendo del hecho de que es difícil diseñar piezas sin elevadores de esfuerzos, un entendimiento de su naturaleza permite al ingeniero de diseño minimizar la

⁸ Fuente: Separatas del Tema “Concentración de Esfuerzos” de la Materia *Diseño de Elementos de Máquinas III* . Escuela Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de El Salvador, Marzo 1990.

severidad de los mismos y tomarlos en cuenta en la determinación de la resistencia de fatiga.

La determinación analítica de la distribución de esfuerzo y deformación en la región de un elevador de esfuerzo rara vez es posible aún dentro del rango elástico. El esfuerzo máximo en la sección de discontinuidad se obtiene calculando primero el esfuerzo nominal (como si el elevador de esfuerzos no existiera) y luego multiplicándolo por un “factor de concentración de esfuerzos” que puede ser “geométrico o teórico” que se designa por K_t que indica el incremento del esfuerzo en materiales hipotéticos que son completamente homogéneos, isotrópicos y elásticos. Afortunadamente, las desviaciones en el comportamiento de los materiales reales respecto del ideal, tienden a reducir el efecto de debilitamiento por fatiga del elevador de esfuerzos, particularmente donde un pequeño radio de muesca está involucrado. Por tal razón, se enfoca particularmente a tratar con factores de concentración de esfuerzos en fatiga (factor de reducción de la resistencia de fatiga o factor de muesca por fatiga) y las fallas que éstas producen en los componentes estructurales.

CAPITULO III

LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

3.1 GENERALIDADES

En éste capítulo se describirán aproximadamente 30 técnicas individuales de Pruebas No Destructivas en un formato de referencia rápida. Se presenta la información de una manera que permita una fácil comparación de los méritos y limitaciones de cada técnica con respecto a varios problemas de Pruebas No Destructivas.

Un sistema de clasificación sobre técnicas de PND se basa en el sistema que adopta el Comité Nacional Asesor de Materiales (NMAB). El presentado aquí sigue dicho sistema , con la excepción de categorías que se han aumentado para cubrir con técnicas más avanzadas usadas en el presente trabajo.

Éste formato provee una descripción concisa de cada técnica, los principios físicos envueltos, objetivos de las pruebas, ejemplos de aplicaciones, limitaciones de cada técnica y un material de referencia importante. Se proveen unas tabulaciones de índice de referencia cruzada de tal manera que técnicas apropiadas puedan ser aplicadas a problemas de PND particulares.

Las PND está llegando a ser un factor vital en aumento de la investigación, desarrollo, diseño y programas de manufactura. Sólo con un uso apropiado de éstas técnicas , pueden darse los beneficios de la ciencia de los materiales de una manera total. De cualquier modo que se busque la información, se observará que las PND son extensamente difundidas en una multitud de informes y publicaciones.

Todas las Pruebas No Destructivas tienen 5 puntos esenciales:

1. Proveen una forma satisfactoria de distribución de energía desde una fuente externa a el objeto que se prueba.
2. Modifica la distribución de energía dentro del objeto que se prueba como un resultado de sus discontinuidades o variaciones en las propiedades del material que correlaciona con su vida útil.
3. Detectan el cambio de las propiedades de energía por medio de un detector sensitivo.
4. Indicando o guardando la energía medida de un detector a una forma útil para interpretarla y
5. Interpretando la indicación junto al juicio de la correspondiente vida de servicio del objeto que se prueba.

Cada una de las técnicas puede ser caracterizada completamente en base a 5 factores principales:

1. Fuente de energía o medio usado para probar el objeto (como Rayos X, ondas de ultrasonido o radiación térmica).
2. Naturaleza de las señales o de las imágenes resultantes de la interacción con el objeto (atenuación de Rayos X o reflexión de ultrasonido).
3. Método de detección o de senso de las señales resultantes (foto-emulsión, cristales piezométricos o bobinas inductoras).
4. Método de indicación o de guardar las señales (deflección, trazos del osciloscopios o radiografía) y
5. Bases para interpretar los resultados (indicación directa o indirecta, cuantitativa o cualitativa).

El término "técnica" es usado aquí como el cuerpo de procedimientos especializados, métodos e instrumentos asociados con cada PND. El siguiente texto identifica, clasifica y describe estas técnicas sin dar los detalles en la aplicación o procedimientos proveyendo así un resumen de cada método en un sólo lugar para referencia rápida.

3.1.1 Sistema de Clasificación de las Técnicas de PND.

El Comité Nacional Asesor de Materiales estadounidense (NMAB) en su comité de PND ha adoptado una clasificación que ha dividido a las técnicas en seis categorías mayores: visual, radiación penetrante, electromagnética, vibración mecánica, térmica y electroquímica. Una versión modificada de dicho sistema de clasificación es presentado en este trabajo. Categorías adicionales han sido incluidas para cubrir nuevas técnicas como las que se describen en la siguiente tabla en donde las primeras seis categorías involucran procesos físicos básicos que requieren la transferencia de materia y/o energía con respecto al objeto que se inspecciona y 2 categorías mas adicionales que describen procesos que transfieren y acumulan información evaluando señales e imágenes comunes a los métodos de Pruebas No Destructivas.

A continuación se muestran las 8 categorías de clasificación de las PND que se han mencionado con aproximadamente una treintena de dichas técnicas con los 5 factores básicos que las caracterizan.

CATEGORÍAS	OBJETIVOS
Optica-Mecánica	Color, rajaduras, dimensiones, grosor de película, reflectividad, distribución de granos y magnitud, acabados de superficies, fallas de superficies.
Radiación Penetrante	Separación de láminas, rajaduras, densidad y variaciones químicas, distribuciones, inclusiones de objetos extraños, microporosidades, desalineaciones, partes faltantes, segregaciones, degradación por servicio, arrugas, espesores, vacíos.
Electromagnética-electrónica	Contenido de aleación, cavidades, trabajo en frío, esfuerzos locales, dureza, composición, contaminación, corrosión, rajaduras, profundidad de las mismas, estructuras cristalinas, conductividad eléctrica y térmica, hojuelas, tratamiento térmico, inclusiones, concentraciones de hierro, espesor de capas, contenido de humedad, polarización, costuras, segregación, arrugas, esfuerzos tensiles, espesores, superficies despegadas.
Ultrasonido	Iniciación de rajaduras y propagación, rajaduras, vacíos, grado de impregnación, delaminaciones, densidad, dimensiones, modulo elástico, tamaño de grano, inclusiones, desalineamiento, porosidad, estructuras compuestas, esfuerzos de superficies, tensión, esfuerzos de compresión y cortantes, desgaste.
Térmica	uniones, composición, emisividad, contornos de calor, espesor de enchapados, porosidad, reflectividad, esfuerzos, conductividad térmica, espesores, vacíos.
Química-Analítica	Identificación de aleaciones, composición, rajaduras, análisis y distribución elemental, tamaño de grano, inclusiones, macroestructura, porosidad, segregación, fallas de superficies.
Generación de Imágenes.	Variaciones dimensionales, funcionamiento dinámico, caracterización y definición de fallas, distribución de fallas, propagación de fallas, configuración de campos magnéticos.
Análisis de señales de imágenes	Selección de información, procesado y presentación, mapeo de fallas, correlación e identificación, reforzamiento de imágenes, separación de múltiples variables.

TABLA 3.1: CATEGORIAS DE CLASIFICACION DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS⁹

⁹ TOMADO DE "CATEGORIAS BASICAS Y AUXILIARES DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS". CAP 1: MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING PAGE 14 "CHOOSING NDT".

TÉCNICAS MECÁNICO-ÓPTICAS¹⁰

OPTICO-VISUAL

MÉTODO

Inspección visual directa y ópticamente ayudada que se aplica a las superficies de objetos para indicaciones de fallas y de otras anomalías al igual que en combinación con otras técnicas de PND.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/ o fuente de la energía: Luz visible (longitud de onda de luz ultravioleta con materiales fluorescentes).

Naturaleza de las señales: Reflectados o fotones transmitidos.

Detección y/o método sensitivo: ojos, ayudas ópticas: lupas, boroscopios, cámaras de video y de películas.

Indicación y método de guardarlo: Imagen visual

Base de la interpretación: Directo, usado con otras técnicas por interpretación directa (líquidos penetrantes, partícula filtrada, partícula magnética).

CAPA FOTOELÁSTICA

MÉTODO

Una capa de plástico transparente en el espécimen se convierte en birefringente cuando éste es sometida a esfuerzos y por lo tanto revela las cargas y patrones de los esfuerzos en las subestructuras.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda o fuente de energía: Aplicación de esfuerzos y/o cargas.

Naturaleza de las señales: Birefringencia y patrones de franjas.

Detección y/o método sensitivo: luz Polarizada y reflexión polariscópica.

Indicación y método de guardarlo: Observación visual directa y ayudas ópticas.

Base de la interpretación: Comparativo o diferencial; llega a ser cuantitativo con cierta calibración.

¹⁰ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: **MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING**, PAGES 24-55 DEL LIBRO 'CHOOSING NDT' S. A. WENK Y R. C. McMASTER.

MEDIDOR DE ESFUERZOS.

MÉTODO

Medidor de esfuerzos de resistencia eléctrica que se adhiere a la superficie del objeto que se prueba para indicar esfuerzos; el medidor consiste de un alambre fino o una capa de hoja delgada intercalada entre las capas del material portador.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/ o fuente de la energía: corriente eléctrica.

Naturaleza de la señal: Variación de la resistencia del medidor

Detección o método sensitivo: circuito puente Wheatstone

Indicación y/o método de guardarlo: Indicación medible; lectura del potenciómetro

Base de Interpretación: Indicación directa que es cuantitativa y depende de la uniformidad, estandarización y calibración de los medidores.

LIQUIDO PENETRANTE

MÉTODO

Se cubre con líquido penetrante que busca todas las rajaduras superficiales; el líquido en las rajaduras sobrante es sacado de la pieza y una capa develadora es aplicada a la superficie del objeto de la prueba.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/ o fuente de la energía: Medio del líquido conteniendo tinte o sustancia fluorescente.

Naturaleza de la señal: Capilaridad del líquido que penetra atrapado en las fallas.

Detección y/o método de sensibilidad: Mancha o señal localizada en la capa develadora.

Indicación y/o método de guardado: Observación directa visual por tinte en la pieza; luz negra si fuera fluorescente.

Base de la interpretación: Indicación directa (depende de los propios métodos de aplicación de penetrante o la sustancia develadora.)

DETECCIÓN DE FUGAS

MÉTODO

Salida o entrada de gas a áreas cerradas selladas que se induce. El gas atrapado o el externo es usado para localizar y sensar las fugas para estimar la razón de fugas.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de la energía: Gases utilizados para la búsqueda: helio, hidrógeno y Criptón-85

Naturaleza de la señal: Las fugas.

Detección y/o método de sensibilidad: Espectrómetro, medidor de vacío o de presión.

Indicación y/o método de guardado: Indicación medible; signo audible.

Base de la interpretación: Directa (referencia estándar de fuga requerida para una indicación cuantitativa).

TÉCNICAS DE RADIACIÓN PENETRANTE¹¹

RAYOS X.

METODO

Radiación penetrante emitido por un generador de rayos X impuesta en el componente que se prueba; la radiación transmitida o atenuada por el objeto que se prueba es usada para reflejar en una placa una imagen que revele la estructura interior y/o posibles fallas.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de la energía: Rayos X de 10^{-13} a 10^{-9} de longitud de onda.

Naturaleza de la señal: Transmisión o atenuación por variables del objeto.

Detección o método sensible: Emulsión penetrante de radiación-sensible, fluoroscopia y/o radiometría.

Indicación y/ o método de grabado: imagen radiográfica; densimetría.

Base de la Interpretación: Interpretación directa (estándares de penetración para una indicación de imagen de calidad); control del contraste, resolución y densidad crítica.

RAYOS GAMMA.

MÉTODO

Radiación penetrante emitida por un isótopo que es impuesto en el objeto que se prueba; La radiación transmitida o atenuada por el objeto de la prueba produce una imagen que detecta la estructura interior o posibles fallas en secciones gruesas que sean cruzadas de materiales densos.

PRINCIPIOS.

Medio de la sonda y/o fuente de la energía: Radiación gamma de 10^{-13} a 10^{-9} de longitud de onda de alcance.

¹¹ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: **MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING**, PAGES 24-55 DEL LIBRO "CHOOSING NDT" S.A. WENK & R.C. McMASTER.

Naturaleza de la señal: Transmisión o atenuación por variables del objeto.
 Detección o método sensitivo: Fotoemulsión y/o radiómetro.
 Indicación y/o método de grabado: imagen radiográfica; densitometría.
 Base de interpretación: Interpretación directa; control de la resolución, de contraste y densidad crítica.

RADIOGRAFÍA DE NEUTRONES

MÉTODO

Rayo de neutrón emitido de un reactor, un acelerador, o una fuente de isótopo que se impone en el objeto que se prueba; los neutrones son transmitidos o atenuados por dicho objeto dando una imagen que detecta la estructura interior y/o fallas que pobremente se revelarían por los rayos X y o los gamma.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de la energía: Haz de neutrón.
 Naturaleza de la señal: Transmisión o atenuación por variables del objeto.
 Detección o método sensitivo: Película radiográfica o métodos electrónicos tal como un intensificador de imagen de neutrones sensibles.
 Indicación y/o método de grabado: Imagen radiográfica; densitometría.
 Base de interpretación: Interpretación directa; control del contraste de resolución y densidad crítica.

TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS¹²

CAMPO MAGNÉTICO ESTÁTICO.

MÉTODO

Campo magnético es impuesto en el objeto que se prueba. El campo es permeable y magnetiza la zona de prueba del objeto y la sonda busca y detecta perturbaciones en el campo que son características de las anomalías que se dan en la superficie o subsuperficies.

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: Campo magnético estático inducido en el objeto.
 Naturaleza de la señal: Gradiente de campo y perturbaciones normales o tangenciales.
 Detección y/o método sensitivo: bobina rotante u oscilante, sondas.

¹² METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: **MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING**, PAGES 24-55 DEL LIBRO "CHOOSING NDT", S. A. WENK & R.C. McMASTER.

Indicación y/o método de grabado: Deflección medible, ploteo de coordenadas y mapeo del campo magnético.

Bases de interpretación: Comparativo o diferencial; requiere defectos estandarizados para comparar.

PARTÍCULA MAGNÉTICA

MÉTODO

El objeto de prueba o parte es magnetizada; polvo magnético es aplicado a la superficie y se acumula en las regiones donde el campo magnético erupciona o emerge como un resultado de fallas superficiales o subsuperficiales.

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: Corriente magnetizante o campo impuesto a la parte.

Naturaleza de la señal: Distorsión del campo o fuga en la superficie.

Detección y/o método sensitivo: Acumulación y patrones de polvo magnético.

Patrón en cinta magnética.

Indicación y/o método de grabado: Visual, fotografía y cinta magnética y/o caucho.

Base de interpretación: Indicación directa, depende de la dirección y fuerza del campo magnético y el polvo o medio de control.

CORRIENTES DE EDDIE

METODO

Corriente alternante de Eddie es inducido al objeto que se prueba; la reactancia inductiva de la sonda al campo magnético de la corriente inducida indica las fallas subsuperficiales.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Localizada corriente inducida desde un rango de 10 Hz a 6 Mhz.

Naturaleza de la señal: Perturbación de la corriente inducida y por lo tanto del campo magnético inducido.

Detección y/o método sensitivo: Bobina de inductancia; sonda de Hall.

Indicación y/o método de grabado: Deflección medible; trazo de osciloscopio.

Base de Interpretación: Diferencial o comparativa; referencia estándar requerida para cada tipo de falla.

CORRIENTE ELÉCTRICA

MÉTODO

La corriente fluye a través de la parte o zona que se prueba; la fuerza de la corriente o la densidad entre el par de electrodos que tocan a la superficie es afectada por discontinuidades o áreas no homogéneas.

PRINCIPIOS.

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Corriente entre el par de contactos de la superficie o de las sondas.

Naturaleza de la señal: Caída de voltaje y perturbación del campo magnético externo.

Detección y/o método sensitivo: Sonda potencial, sonda de Hall o bobina de inducción.

Indicación y/o método de grabado: Indicación de potenciómetro, oscilografía.

Base de interpretación: Comparativa; requiere de fallas estándares y curvas de calibración.

RADIACIÓN DE MICROONDAS**MÉTODO**

Radiación de ondas continuas o moduladas dirigidas al objeto que se prueba propagándose de acuerdo al estado interno o estructura de la parte.

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: Radiación electromagnética de 3 a 0.03 centímetros de largo de onda.

Naturaleza de la señal: Reflexión y/o atenuación de la radiación.

Detección o método sensitivo: guía de microondas y detector de cristal.

Indicación y/o método de grabado: Deflexión medible, ploteo de coordenadas.

Bases de interpretación: Comparativo, diferenciación fase-amplitud, referencias estándares.

TÉCNICAS SONICAS Y DE ULTRASONIDO¹³**IMPACTO ACÚSTICO****MÉTODO**

Zumbido o golpeteo del objeto; los pulsos mecánicamente aplicados causan vibraciones características que son indicativos de anomalías y de fallas.

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: energía de impacto proveniente de un pulsador.

Naturaleza de la señal: Respuesta vibratoria y amortiguación acústica.

Detección y/o método sensitivo: por medio del oído, micrófono y/o acelerómetro.

Indicación y/o método de grabado: Sonido audible, deflexión medible y trazo del osciloscopio.

¹³ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: **MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING**, PAGES 24-55 DEL LIBRO 'CHOOSING NDT', S. A. WENK & R.C. McMASTER.

Base de Interpretación: comparativa; basado en la señal del sonido, vibracional y/o respuesta amortiguada.

VIBRACIÓN SONICA

MÉTODO

Vibraciones sónicas continuas impartidas al objeto; vibraciones de frecuencia natural es inducida al objeto de prueba revelando de esta manera fallas y variaciones de las propiedades físicas.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Fuerza aplicada por un excitador o transductor.

Naturaleza de la señal: Resonancia y/o armónicos en un rango de 0 a 20 KHz.

Detección y/o método sensitivo: Micrófono y acelerómetro de holointerferometría.

Indicación y/o método de grabado: Deflección medible, osciloscopio o holográficos.

Bases de Interpretación: Comparativa; espectro de frecuencias, patrón holográfico.

EMISIÓN ACÚSTICA:

MÉTODO:

Señales Phonon se dan provenientes de la deformación plástica, fractura o cambios de fase; la razón de emisión ultrasónica y la intensidad revela la iniciación de rajaduras, propagación y deformaciones originadas por los esfuerzos.

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: Energía liberada en los sitios de deformación o fractura.

Naturaleza de la señal: Ondas de ultrasonido y de esfuerzos propagándose en el material.

Detección y/o método sensitivo: Transductor piezoeléctrico.

Indicación y/o método de grabado: contador digital, indicación medible, ploteo de coordenadas o formas de ondas.

Base de interpretación: Comparativa o diferencial; análisis de la razón de la emisión, espectro de amplitud-frecuencia, llegada de la señal diferencial, ondas de la onda o contador de emisión total.

ULTRASONIDO DE PULSO-ECO

MÉTODO

Pulsos de ultrasonidos son dirigidos al objeto de prueba; los ecos de ultrasonido son reflexiones que indican la ausencia, presencia y localización de fallas, interfaces y/o discontinuidades.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Haz de ultrasonido en pulsos en un rango de 20 kHz a 50 Mhz.

Naturaleza de la señal: Reflexión o transmisión de pulsos o ecos.

Detección y/o método sensitivo: Transductores piezoeléctricos.

Indicación y o método de grabado: Trazo de osciloscopio y compuertas pulso-eco.

Base de interpretación: Cuantitativa por fallas o localización de interfaces; referencias estándares son requeridas para la calibración y caracterización de fallas.

TRANSMISIÓN DE ULTRASONIDO

MÉTODO

Ultrasonido continuo, pulsado o modulado transmitido a través de la parte que es probada atenuado por discontinuidades, fallas y/o interfaces.

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: Haz de ultrasonido (usualmente en un rango de 20 kHz a 50 Mhz).

Naturaleza de la señal: Atenuación o obstrucción de ultrasonido.

Detección y/o método sensitivo: Transductor piezoeléctrico.

Indicación y/o método de grabado: Deflección medible; trazo de osciloscopio.

Base de interpretación: Comparativo o diferencial; referencias estándares requeridas para indicaciones cuantitativas.

ULTRASONIDO POR RESONANCIA

MÉTODO

La frecuencia es variada hasta que la sonda introduce ondas de ultrasonido continuas y comprimidas en la parte a una frecuencia de resonancia para medición de grosores.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Ultrasonido de ondas continuas en un rango de 20 kHz a 25 Mhz.

Naturaleza de la señal: Generación de ondas de lugar y de resonancia.

Detección y/o método sensitivo: Transductor piezoeléctrico.

Indicación y/o método de grabado: Indicación medible; trazo de osciloscopio.

Base de Interpretación: Cuantitativo; requiere catálogo de velocidades sónicas y/o dimensiones para grosores y/o medidas de velocidades.

TÉCNICAS TÉRMICAS ¹⁴

SONDA TERMOELÉCTRICA

MÉTODO

Voltaje producido al punto de contacto sonda-parte debido al gradiente térmico que indica las variaciones en la superficie y/o composición.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Gradiente térmico producido por una sonda calentada.

Naturaleza de la señal: Voltaje bimetalico característico de Seebeck.

Detección y/o método sensitivo: Circuito potenciométrico.

Indicación y/o método de grabado: Potenciómetro

Base de Interpretación: Comparativo o diferencial; superficie de referencia o estándar que se requiere para la calibración.

¹⁴ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: **MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING**, PAGES 24-55 DEL LIBRO 'CHOOSING NDT', S. A. WENK & R.C. McMASTER

TÉCNICAS QUÍMICO-ANALÍTICAS¹⁵

PRUEBA QUÍMICA

MÉTODO

Pequeña muestra de material es removido del objeto que se prueba para determinar su composición; identificaciones químicas están hechas por medio de combinación de partículas del espécimen con una serie de reactivos.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: reacción química.

Naturaleza de la señal: Color y/o cambios de fases de la frontera; precipitación.

Detección y/o método sensitivo: Visual.

Indicación y/o método de grabado: observación directa.

Base de Interpretación: Análisis cualitativo; procedimiento estandarizado para preparación de reactivos y secuencia de aplicación.

SONDA LÁSER

MÉTODO

Haz de láser es enfocado en el objeto que se prueba para determinar la composición y/o microestructura; cantidades diminutas de material vaporizado son analizadas espectroscópicamente.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Haz de láser pulsante y electroexcitación.

Naturaleza de la señal: muestra de vapor ionizado.

Detección y/o método sensitivo: Espectrómetro.

Indicación y/o método de grabado: Espectógrafo.

Base de interpretación: Análisis diferencial y/o cuantitativo.

FLUORESCENCIA RAYOS X

MÉTODO

La irradiación de rayos X de la superficie produce fluorescencia y un escaneado espectrográfico de emisiones que identifican la composición elemental.

¹⁵ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING, PAGES 24-55 DEL LIBRO "CHOOSING NDT", S. A. WENK & R.C. McMASTER

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: radiación de rayos X a un nivel de 100kV.

Naturaleza de la señal: Radiación secundaria o fluorescencia.

Detección y/o método sensitivo: Analizador de cristal, contador de ionización.

Indicación y/o método de grabado: Ploteo de coordenadas.

Base de interpretación: Análisis espectrográfico cuantitativo basado en curvas de calibración empíricas y/o especímenes estándares.

DIFRACCION DE RAYOS X

MÉTODO

Muestra del objeto que se prueba es expuesta a radiación de Rayos X; la intensidad de la radiación no deseable varía con los ángulos de difracción característicos de las especies cristalinas presentes.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Radiación monocromática de rayos X.

Naturaleza de la señal: Patrón de difracción.

Detección y/o método sensitivo: Fotoemulsión y contador de Scintillation.

Indicación y/o método de grabado: Fotografía difractométrica y ploteo de coordenadas.

Base de interpretación: Analítica; diferencial; patrón de referencias en archivos.

TÉCNICAS DE GENERACIÓN DE IMÁGENES¹⁶

TOMOGRAFIA DE RAYOS X

MÉTODO

Medida de la atenuación de múltiples rayos X que desarrolla una distribución de coeficiente de atenuación lineal en el plano de la radiación (Necesario un tubo de rayos X, una placa de rayos X y un brazo rígido que rota en un punto de apoyo en el cual cuando se mueve el tubo en una dirección, la placa se mueve en la dirección opuesta.)

¹⁶ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING, PAGES 24-55 DEL LIBRO 'CHOOSING NDT', S. A. WENK & R.C. McMASTER

PRINCIPIOS

Medio de sondeo y/o fuente de energía: Radiación de rayos X.

Naturaleza de la señal : Atenuación del nivel de radiación.

Detección y/o método sensitivo: Cualquier detector de rayos X.

Indicación y/o método de grabado: Tubo de rayos catódicos con intensidad de escalas grises.

Bases de interpretación: Cuantitativa, basada en estándares.

PLACA RADIOGRAFICA (VER RADIOGRAFÍA DE RAYOS)

MÉTODO

Una imagen fotográfica es producida al pasar los rayos X, rayos gamma y/o de electrones a través del objeto que se prueba a una película fotográfica con una emulsión sensitiva a la radiación; los cambios producidos en la emulsión de la película son llevados a una transparencia radiográfica.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Rayos X, gamma, de activación de neutrones, electrones y fotones.

Naturaleza de la señal: Atenuación, transmisión o emisión de radiación.

Detección y/o método sensitivo: Fotosensitivo o emulsión penetrante de radiación sensitiva.

Base de interpretación: Indicación directa, comparativa o diferencial; basada en estándares de imágenes de referencia.

XERO-RADIOGRAFIA

MÉTODO

Una imagen electrostática es producida al pasar rayos X o gamma a través del objeto que se prueba hacia una capa cargada eléctricamente; la imagen cargada es transferida xerográficamente a la forma de una radiografía opaca. La xerografía es la producción de una imagen visible utilizando la superficie cargada de un fotoconductor (como el amorphous selenio) como un medio detector, disipando parcialmente la carga al exponer los rayos X para formar la imagen latente y haciéndola visible por un proceso xerográfico.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Rayos X o gamma.

Naturaleza de la señal: Atenuación, transmisión o emisión de radiación.

Detección y/o método sensitivo: Capa eléctricamente cargada.

Indicación y/o método de grabado: Imágen radiográfica.

Base de interpretación: Indicación directa, comparativa o diferencial; basada en estándares de imágenes de referencia en archivos.

FLUOROSCOPIA

MÉTODO

Una imagen fluorescente es producida por los rayos X que pasan a través del objeto que se prueba hacia una capa fluorescente; una inmediata e instantánea imagen aparece en una pantalla que muestra detalles radiográficos.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Radiación por rayos X.

Naturaleza de la señal: Atenuación o transmisión de la radiación.

Detección o método sensitivo: Una capa química fluorescente.

Indicación y/o método de grabado: Imagen fluorescente.

Base de la interpretación: Indicación Directa; comparativa; basada en impresiones visuales.

VIDEO-RADIOGRAFIA

MÉTODO

Cámaras Vidicon son sensitivas a la radiación de rayos X, gamma y/o neutrones convirtiéndose en los receptores de la radiación transmitida por dichos rayos en el objeto que se prueba. De esta manera, la imagen radiográfica se despliega en un monitor de televisión.

PRINCIPIOS

Medio de la Sonda y/o fuente de energía: Rayos X, gamma o de neutrones.

Naturaleza de la señal: Transmisión o atenuación por variables del objeto.

Detección y/o método sensitivo: Cámaras Vidicon sensitivas a los rayos X, gamma y de neutrones.

Indicación y/o método de grabado: Pantalla de Televisión.

Base de interpretación: Observación directa; en movimiento; ayudas visuales de interpretación instantánea de los contenidos de las imágenes.

ULTRASONIDO POR INMERSIÓN

MÉTODO

El objeto que se prueba es escaneado por ultrasonido mientras permanece inmerso en líquido; las interacciones del ultrasonido con el objeto produce señales que son usadas para plotear o "mapear" las fallas internas.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Haz de pulsos de ultrasonido en un rango de 20 kHz a 50 Mhz).

Naturaleza de la señal: Reflexión del ultrasonido transmitido.

Detección y/o método sensitivo: Transductor(es) piezoeléctricos.

Indicación y/o método de grabado: Oscilograma; ploteo o mapeo de coordenadas.

Base de Interpretación: Comparativa o diferencial; cuantitativa con referencias o estándares de calibración.

VIDEOGRAFIA POR ULTRASONIDO

MÉTODO

El objeto es "iluminado" con ultrasonido; el ultrasonido sobre una área extensa del objeto es detectada para formar una imagen similar a la radiografía por rayos X.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Ultrasonido continuo o pulsante en un rango de 1 a 10 Mhz.

Naturaleza de la señal: Transmisión o atenuación por las variables del objeto.

Detección y/o método sensitivo: Plato o cristal piezoeléctrico.

Indicación y/o método de grabado: Directo visualmente, monitor de televisión o cinematografía.

Base de interpretación: Directa.

TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE IMÁGENES ¹⁷.

REFORZAMIENTO DEL VIDEO

MÉTODO

La imagen es examinada con una cámara de video que convierte los valores de densidad de la imagen en señales que son reforzadas electrónicamente; la imagen derivada es desplegada en un monitor de televisión.

PRINCIPIOS

Medio de la sonda y/o fuente de energía: Luz visible.

Naturaleza de la señal: Variaciones de la densidad de la imagen original.

Detección y/o método sensitivo: Cámaras Vidicon.

Indicación y/o método de grabado: Pantalla de televisión.

Base de interpretación: Ayuda interpretativa; depende de la selección del método reforzador de imagen.

¹⁷ METODOS Y PRINCIPIOS TOMADOS DEL CAPITULO 1: **MANAGER'S OVERVIEW OF NONDESTRUCTIVE TESTING**, PAGES 24-55 DEL LIBRO 'CHOOSING NDT', S. A. WENK & R.C. McMASTER.

3.1.2 Tipos de Inspección por Pruebas No Destructivas

Los tipos más comunes de inspección son los siguientes:

Inspección Visual Es el tipo más común de examinación, y consiste en la examinación de áreas accesibles con la ayuda de los ojos ayudado por lentes de aumento, boroscopios y fuentes de luz. Es requerido que el examinador posea gran experiencia y habilidad en la detección de las disconformidades.

Inspección Radiográfica Es la inspección que mostrará detalles estructurales internos y externos de todos los tipos de materiales y partes. Es un método de PND que es usado para la inspección de la armazón estructural de una aeronave que se encuentre inaccesible o insatisfactorio para la aplicación de otros métodos. Es llevada a cabo con el paso de los Rayos X o Rayos Gamma a través de una parte o ensamble que se expone a una película o placa radiográfica. Esta placa muestra los detalles estructurales de la parte por medio de las variaciones en la densidad de la misma cuya interpretación indicará defectos o daño.

Inspección por Ultrasonido. Es un método de PND satisfactorio para la inspección de la mayoría de los metales, plásticos y cerámicas para defectos de superficies o debajo de ellas. La inspección por ultrasonido requiere al menos tener una superficie de la parte accesible en la vecindad del área en cuestión. La inspección de la armazón estructural de las aeronaves por ultrasonido es llevada a cabo induciendo las ondas de ultrasonido a la parte por medio de una sonda de contacto y recogiendo sus reflexiones dentro de la parte. Las reflexiones detectadas de ultrasonido son desplegadas electrónicamente en la pantalla de un tubo de osciloscopio e interpretada para indicaciones de defectos.

Inspección por Partícula Magnética. Es el método de PND en partes ensambladas o individuales que indica defectos superficiales o cerca de las superficies en componentes ferro-magnéticos. La prueba es llevada a cabo induciendo un campo magnético en la parte y aplicando un polvo seco o una suspensión líquida de partículas de óxido de hierro. Polos magnéticos locales son formados en los defectos o discontinuidades encontradas de tal manera que atraen las partículas de óxido dando una indicación que puede ser evaluada por un contraste de color o de manera fluorescente con una "luz negra".

Inspección por Penetrantes. Es un método de PND usado para detectar pequeñas rajaduras o discontinuidades abiertas en la superficie y que no podrían ser tan evidentes para una inspección visual normal. Inspección por penetrantes puede ser usado en la mayoría de partes estructurales y ensambles que sean accesibles para su aplicación. La inspección es llevada a cabo al aplicar un líquido que penetra en los defectos superficiales, después se remueve el excesivo líquido y un revelador se emplea para "dibujar" el penetrante que ha quedado en los defectos superficiales de tal manera que una indicación visual es obtenida por medio del contraste de color o fluorescentemente por la influencia de una "luz negra".

Inspección por Corrientes de Eddie. Este método de PND es empleado para detectar rajaduras superficiales o cerca de ellas en la mayoría de metales y separar a los mismos de las aleaciones y sus condiciones de tratamiento térmico. Puede ser empleado en partes o ensambles de aeronaves donde el área que se prueba es accesible al contacto de la sonda de prueba de Eddie. La inspección es llevada a cabo al inducir corrientes laminares de Eddie en una parte y observar electrónicamente las variaciones en el campo inducido. La característica del campo observado es interpretado para determinar la naturaleza de la condición defectuosa.

En la tabla 3.2 de la página siguiente, se presentan las ventajas y desventajas de los distintos métodos de inspección no destructivos mas comúnmente empleados en las industrias que utilizan dichas pruebas, de tal manera que se puedan realizar comparaciones entre una y otra técnica.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Visual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo Costo 2. Portabilidad 3. Inmediato resultados. 4. Mínima habilidad del operador. 5. Mínima preparación de la parte. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Satisfactorio sólo para superficies que puedan ser vistas. 2. Generalmente sólo detecta grandes defectos. 3. Mala interpretación de quebraduras o rayones.
Radiografía. Rayos X	<ol style="list-style-type: none"> 1. Habilidad para inspeccionar defectos internos o superficiales. 2. Habilidad para inspeccionar partes cubiertas o escondidas por otras estructuras. 3. Un récord permanente de la prueba es obtenido. 4. Preparación mínima de la parte es requerida. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Más cara. 2. En casos como la aviación, los tanques de combustible deben ser vaciados. 3. El área de inspección acordonada para evitar la exposición de los Rayos X 4. El método depende de la orientación de las discontinuidades y la fuente de rayos X. 5. Alto entrenamiento al operador para efectuarlo y para la interpretación de los resultados.
Corrientes de Eddie	<ol style="list-style-type: none"> 1. Portable 2. Precio Moderado 3. Resultados Inmediatos 4. Sensible a pequeñas indicaciones. 5. Poca preparación de las partes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Principalmente, inspección de superficies. 2. La superficie a probarse debe ser accesible al contacto de la sonda de corrientes de Eddie. 3. Superficies rugosas interfieren con la sensibilidad de las pruebas. 4. Satisfactoria para inspección de metales. 5. Ningún récord permanente. 6. Considerable experiencia y habilidad en el manejo del equipo. 7. Demasiado tiempo de pruebas en áreas demasiado grandes.
Ultrasonido	<ol style="list-style-type: none"> 1. Satisfactorio para defectos superficiales y subsuperficiales. 2. Sensible a pequeños defectos. 3. Resultados inmediatos. 4. Poca preparación de las partes. 5. Un amplio rango de espesores de materiales puede ser inspeccionado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La superficie de la parte a ser inspeccionada debe ser accesible a la sonda de ultrasonido. 2. Superficies rugosas interfieren con la sensibilidad de las pruebas. 3. Ningún récord permanente. 4. El método de pruebas es dependiente de la fuente y la orientación del defecto. 5. Alta habilidad y experiencia es requerida para la instalación e interpretación de resultados.
Líquidos Penetrantes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Económica. 2. Portátil. 3. Alta sensibilidad 4. Resultados inmediatos 5. Mínima habilidad requerida. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Solo puede ser inspeccionadas partes accesibles a la aplicación del líquido penetrante. 2. Los defectos deben de estar abiertos hacia la superficie externa. 3. Preparación de la parte es requerida como la remoción de acabados y sellantes. 4. No resultados permanentes. 5. Detección visual requerida de los resultados. 6. Requiere una gran limpieza de la parte.
Partícula Magnética	<ol style="list-style-type: none"> 1. Semiportátil. 2. Sensible a pequeñas indicaciones. 3. Detecta defectos superficiales y cerca de ella. 4. Sensible tanto a inclusiones como a rajaduras. 5. Habilidad moderada del operador. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Satisfactoria sólo para partes ferromagnéticas. 2. Partes deben ser física y visualmente accesibles para la inspección. 3. Requerida la remoción de capas y sellantes. 4. La inspección es semidireccional por requerir una orientación del defecto con el campo magnético. 5. No hay resultados permanentes de las pruebas. 6. No es útil en áreas donde un fuerte campo magnético pueda dañar instrumentos. 7. Partes deben de demagnetizarse después

Tabla 3.2 : Ventajas y Desventajas de los métodos de PND más comunes. ¹⁸

3.1.3 Fallas comunes encontradas durante las inspecciones.

El tipo de fallas o defectos que el personal de inspección encontrará durante un programa de inspección de Pruebas No Destructivas dependerá esencialmente de que dicho personal tenga la habilidad y el entrenamiento adecuado para que pueda hacer decisiones correctas. El personal inexperto no debería intentar el interpretar los resultados de dichas inspecciones. La mala interpretación puede resultar en rechazo de partes útiles y en la aceptación de partes defectuosas.

a) Quebraduras por fatiga pueden ocurrir únicamente en partes que han estado en servicio bajo condiciones repetidas de esfuerzos cíclicos. La rajadura comienza de una área de alto esfuerzo y se propaga a través de toda la sección hasta que la falla ocurre. Una rajadura por fatiga empezará más fácilmente en los lugares donde el diseño o condición de la superficie provee un punto de concentración de esfuerzos como los filetes, acabados deficientes de superficies, costuras y de agujeros de sujetadores que tienen poco acabado o filos.

b) Quebraduras por Tratamiento Térmico son causadas por un proceso defectuoso de tratamiento en las partes. Ellos pueden ser causados durante el ciclo de calentamiento o enfriamiento o como una extensión de problemas previos a la operación.

c) Rajaduras por maquinado.

1) Son causados por procesos de maquinado como los de un esmerilado defectuoso, y es bastante crítico cuando ocurren generalmente en superficies que está muy sometida a esfuerzos. Se distinguen por muy finas y afiladas rajaduras a ángulos rectos a las marcas del esmerilado.

2) Rajaduras se hallan generalmente en áreas donde altas fuerzas residuales quedan de alguna operación previa, tal como endurecimiento. Cuando se chapen tales partes, el funcionamiento causaría a esos esfuerzos quebrar la superficie.

d) Discontinuidad es una interrupción en la configuración normal de la estructura física de una parte tal como las rajaduras, salientes, pliegues, costuras, porosidad, etc. Una discontinuidad puede o no afectar la utilidad de la parte.

e) Inclusiones son impurezas incrustadas en el material en la fase de formación. Las inclusiones pueden ser profundas o cerca de la superficie de la parte. Normalmente, no tendrán ningún efecto en la resistencia de la parte, pero cuando ocurren en áreas de alto esfuerzos o en ciertos puntos especiales o dirección, podrían ser causa de rechazo de la parte.

f) Corrosión. Casi todos los metales están sujetos a sufrir corrosión. El uso de metales resistentes a la corrosión, tal como la lámina de aluminio revestida, disminuye la corrosión de las armazones en las aeronaves. Muchos otros factores contribuyen con la cantidad y grado de corrosión, tal como la localidad geográfica y proceso de fabricación. Geográficamente, la corrosión es causada por la presencia de sales en aire húmedo, o por algunos otros elementos que favorecen a la corrosión presente en el contenido químico del agua o elementos en el metal. La corrosión causada por un pobre proceso de fabricación es dependiente en muchos factores tales como la capa protectora, el tipo de metal usado, el tratamiento de las partes, y metales diferentes en contacto. La corrosión producida por los esfuerzos es otra causa común de las rajaduras en los metales.

3.2 LA INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA

La radiación de rayos X y de rayos Gamma por su habilidad única de penetrar en el material y descubrir discontinuidades, han sido empleadas en la inspección radiográfica de productos metálicos y no metálicos.

La radiación penetrante es proyectada a la parte que se inspecciona y produce una imagen invisible o latente en la película. Cuando es procesada, la película se convierte en una radiografía del objeto permitiendo que se localicen los defectos y fallas en la estructura de las aeronaves o motores con poco o nada de desensamble. Generalmente la radiografía es usualmente usada para la inspección de partes metálicas. Una máquina de rayos X es usada para producir los rayos necesarios para penetrar al metal y una vez que lo ha atravesado, golpear con la placa fotográfica. Las fallas en el metal serán revelados como sombras en el cuadro de la parte. Hay peligro de los altos voltajes requeridos y por una exposición inadvertida de la radiación en los seres humanos. Además el operador debe ser lo suficientemente capacitado para saber que película o placa utilizar y que voltaje aplicar dependiendo del tipo de material que se prueba y de su espesor.

La inspección radiográfica es también llevada a cabo por medio de una pequeña bomba de cobalto que es puesta adentro de las partes donde sería imposible usar una máquina de rayos X. El cobalto es radioactivo y continuamente

emite radiación gamma que es similar a los rayos X y que penetra de la misma manera. El uso del cobalto radioactivo para pruebas no destructivas está sujeto a numerosas regulaciones para asegurar que nadie es expuesto al material radioactivo. Permisos especiales deben ser obtenidos por agencias gubernamentales antes de que este tipo de inspección pueda ser usado.

3.2.1. PRINCIPIOS DE LA RADIOGRAFÍA

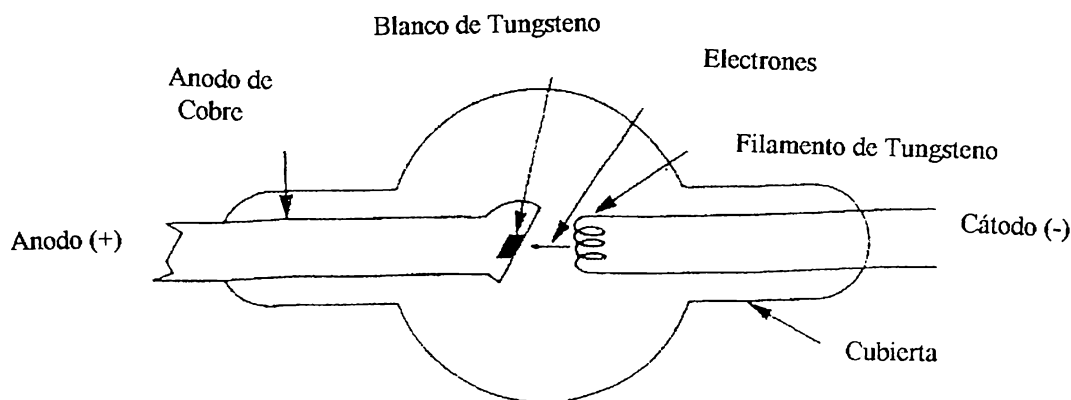
Los Rayos X y los Rayos Gamma son radiaciones que tienen la habilidad de penetrar objetos opacos a una luz visible. Estas radiaciones cuando pasan a través del material, son absorbidos de manera variada según la densidad y el número atómico del mismo. Este fenómeno de absorción es usado para proporcionar una información que es grabada en una placa o película.

Los rayos X pertenecen al grupo de radiaciones electromagnéticas ya que transporta energía a través del espacio como una combinación de campos eléctricos y magnéticos. Miembros de esta misma familia de radiación electromagnética son las ondas de radio, radiación térmica, luz visible y la radiación Gamma. Algunas interacciones de las radiaciones electromagnéticas son difíciles de explicar a menos que se asuman que son partículas y que se expliquen con la teoría concerniente a la propagación de ondas. Todas las radiaciones electromagnéticas tienen la misma velocidad por lo que la frecuencia de la radiación debe ser inversamente proporcional a su longitud de onda.

Definiciones de Rayos X y Rayos Gamma:

a) Rayos X: Es una forma de energía radiante resultante del bombardeo de electrones a un blanco apropiado producido en el vacío por la aplicación de altos voltajes. Los rayos X son producidos por la conversión de energía cuando una corriente de electrones de rápido movimiento son desacelerados de repente en un ánodo que sirve de blanco de un tubo de rayos X. Este tubo de Rayos X encierra vacío con 2 electrodos (esto es el tubo de diodos). Estos dos electrodos son diseñados de tal manera que los electrones producidos en el cátodo (electrodo negativo o filamento) pueda ser acelerados por una alta diferencia de potencial hacia el ánodo (electrodo positivo o electrodo de blanco). Los electrones son producidos por el calentamiento del filamento de tungsteno y acelerados a través del tubo para que golpee el blanco de tungsteno de donde los Rayos X son producidos. Ver la figura 3.1 de los mayores componentes de un equipo de Rayos X.

b) Rayos Gamma: Radiación electromagnética de ondas de alta frecuencia (o de onda corta) emitida por el núcleo de un átomo durante una reacción nuclear. Los rayos Gamma no son deflectados por campos eléctricos o magnéticos. Son de naturaleza y propiedades idénticas a las de los Rayos X y como tal, la fuente con el uso se depreciará también en intensidad y por lo tanto, el tiempo de exposición debe ser recalculado periódicamente.



19

Figura 3.1 Mayores componentes del tubo de ánodo estacionario de rayos X

Características de los Rayos X y Rayos Gamma

Los rayos X y los rayos Gamma son formas de radiación electromagnética como la luz visible, ondas infrarrojas, ondas de radio y ondas cósmicas. La longitud de onda, λ , de una radiación electromagnética es expresada en unidades de longitud aceptables para la longitud de la onda en metros, centímetros, milímetros, micrones (μ), milimicrones ($1\text{m}\mu$) o para los rayos X en Angstroms ($1\text{\AA} = 1/10\text{ m}\mu = 10^{-8}\text{ cm}$).

La longitud de las ondas cortas son las características distintivas de los rayos X y los rayos Gamma ya que la energía penetrante es dependiente de la longitud de onda en una relación inversa; por ejemplo, a menor longitud de onda, mayor es la energía penetrante y a mayor longitud de onda menor es la penetración.

Los Rayos X y los Rayos Gamma por su habilidad inusual de penetrar en los materiales y descubrir discontinuidades han sido aplicados para la inspección

industrial radiográfica de soldaduras, colados, forjas, productos metálicos y no metálicos.

Producción de Rayos X

Los rayos X son producidos cuando alguna forma de materia es golpeado por un rápido movimiento de partículas cargadas negativamente llamadas electrones. Un generador de rayos X supe energía eléctrica al tubo de rayos X y regula la longitud de la exposición radiográfica. El tubo de rayos X requiere de dos fuentes de energía: uno que caliente el filamento y el otro que acelere los electrones entre el cátodo y el ánodo.

Producción de Rayos Gamma

Fuentes Naturales.

La Radioactividad es un fenómeno de desintegración atómica espontánea que es una propiedad de átomos de ciertos materiales. La falta de estabilidad de la estructura atómica del material causa la desintegración liberando energía debida a esa condición de desbalance en una forma espontánea de Rayos Gamma.

Fuentes Artificiales.

Ciertos elementos pueden causar radioactividad por medio del bombardeo en un confinamiento atómico. Estos elementos son cambiados estructuralmente y son conocidos como isótopos del elemento original. Entre estos comunes isótopos usados actualmente en la industria están los derivados de los elementos Cobalto, Cesio, Iridio y Thulium y son referidos como Cobalto 60, Cesio 137, Iridio 192 y Thulium 170. La designación numérica indica el peso de un átomo de un radioisótopo en particular y lo diferencia de otros isótopos del mismo elemento o del mismo elemento original.

Intensidad de la Radiación.

La cantidad o número de rayos disponibles durante un período específico de tiempo debe ser determinado. Esto es importante ya que el tiempo requerido para hacer una exposición radiográfica es directamente relacionada con la intensidad de radiación. La intensidad de rayos X es directamente proporcional a la corriente del tubo y es en general una función del voltaje levantado a una potencia mayor a 2.5. La intensidad de Rayos Gamma es la emisión de radiación medida sobre un período de tiempo a una distancia fija.

Efecto de la Radiación en la película o placa.

La película es básicamente un material de celulosa con una emulsión fotosensitiva en ambos lados generalmente un cristal de Yodo-bromuro de plata.

Un cambio en la misma ocurre cuando la emulsión es expuesta a los rayos X o Gamma ya que es sensitiva a ciertos rangos de ondas de radiación electromagnética. Entre las características que la película o placa debe de poseer se encuentran enmarcadas en la densidad de la misma, la exposición, sus curvas características, velocidad y el procesado.

3.2.2. APLICACIONES DE LA RADIOGRAFÍA

La inspección radiográfica de la estructura es recomendada si hay un área de la estructura sospechosa que no pueda ser fácilmente accesible o muy escondida. Esta tipo de inspección no es recomendada como una técnica exploratoria para inspección general, sino que en la mayoría de los casos, cuando las técnicas radiográficas son usadas, el punto que se sospecha y la orientación de la falla será conocida por previa experiencia.

ASPECTOS DE SEGURIDAD

La seguridad personal es una de las más importantes consideraciones en el uso de equipo de Rayos X. La radiación de los equipos de Rayos X y de las fuentes de isótopos radioactivos son destructivas a todos los tejidos vivientes por lo que métodos adecuados de protección y dispositivos de detección deben de ser empleados. Ya que los efectos destructivos de una excesiva exposición no son inmediatamente visibles, el personal que se expone frecuentemente a los mismos debe de examinarse periódicamente.

Debido al peligro natural de la radiación radiográfica, es necesario aislar la zona de exposición y mantener al personal no autorizado a una distancia segura. En el caso de una aeronave, ésta debe ser vaciado de combustible y apropiadamente cercado con señales de precaución. En la mayoría de casos ningún desensamble es necesario en el avión, sin embargo el tubo de rayos X debe de ser adecuadamente nivelado y acondicionado.

Interpretación de la película radiográfica. La interpretación de las películas radiográficas debe ser llevado a cabo sólo por personal radiográfico calificado de las características de los materiales convencionales y de los nuevos así como poseer suficiente conocimiento de la estructura que se encuentra inspeccionando. La fase más importante de la radiografía es la interpretación de la película expuesta. El esfuerzo de todo el proceso radiográfico está centrado en esta fase. Los defectos o fallas que no son entendidas o impropriamente diagnosticadas pueden poner en riesgo la confiabilidad del material.

Descripción del proceso radiográfico. La radiación penetrante pasa a través del objeto y produce una imagen invisible en la película. El procesado de la película provee una radiografía del objeto pasando más radiación en la sección del objeto que es más delgada dando como resultado que el área correspondiente de la película sea más oscura. La radiografía es leída al comparar el diseño conocido del objeto y observando sus similitudes o diferencias. La siguiente figura nos muestra los elementos fundamentales de una exposición radiográfica.

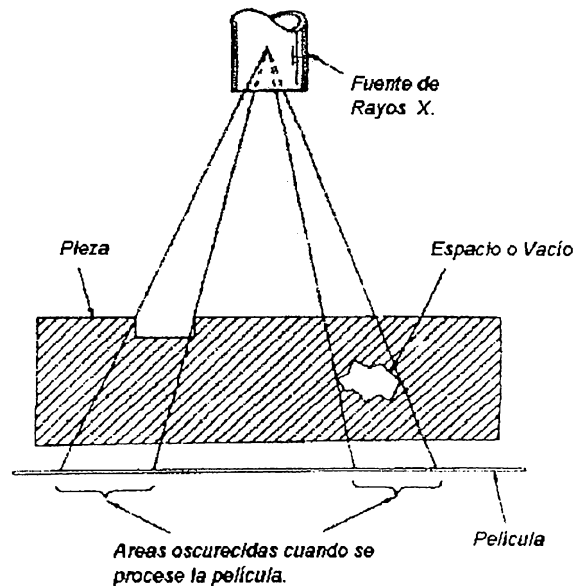


Figura 3.2: Elementos Fundamentales de una exposición radiográfica.²⁰

LIMITACIONES DE LA INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA.

La inspección radiográfica tiene varias limitaciones inherentes como el hecho de que la radiación viaja en líneas rectas desde la fuente, tiene que interceptar a la película casi a ángulos rectos y esto evita una examinación eficiente de artículos que tienen geometrías complejas. Tales condiciones pueden ocurrir bajo circunstancias en las que la película no pueda ser orientada satisfactoriamente y si fuera orientada satisfactoriamente, podría ser objeto de los efectos adversos de la radiación dispersa o de la distorsión de la imagen.

La información en una radiografía o placa es obtenida por diferencias de densidad a través del grado de absorción de la radiación. Estas diferencias de densidad deben ser orientadas casi paralelamente a la dirección en la cual la radiación viaja. Discontinuidades tales como las fallas de tipo laminar frecuentemente no serán detectadas porque ellas no presenta suficiente densidad

²⁰

Tomado de "Nondestructive testing for Aircraft" (AC 43-3), Capítulo 2 pág 9. Renton, WA. Estados Unidos.

diferencial a la radiación. La radiación penetrante es absorbida en proporción directa al espesor del material de tal manera que si el espesor es aumentado, el tiempo requerido para obtener la suficiente información de la película también aumenta.

Para una energía penetrante dada de radiación X o Gamma, existe un espesor más allá del cual la radiografía no es factible. El equipo radiográfico de gran poder podría ser obtenido pero los costos se incrementarían considerablemente en todos los factores que traería consigo dicho equipo.

3.2.3. EQUIPO RADIOGRÁFICO

Para todos los requerimientos de inspección, el equipo básico radiográfico debe ser portable. Consecuentemente, cualquier equipo portable aprobado es aceptable si está calibrado y la capacidad del mismo sea compatible con los requerimientos de la inspección. Los requerimientos para dichos equipos como contadores "geiger", penetrómetros, pantallas de plomo, equipo de un cuarto oscuro podrá ser encontrado en el MIL-STD-453.

Hay 3 tipos de monitoreo de la radiación existente en un área de uso generalizado:

- a) El primer tipo consiste de una pequeña cámara de ionización en forma de lápiz a la cual es dada una carga electrostática al inicio de cada jornada de trabajo. Como está sujeta a la radiación penetrante, descarga proporcionalmente a la cantidad de radiación recibida. Al insertar esta cámara a un electrómetro, la cantidad de radiación recibida entre el tiempo de carga y el tiempo de lectura puede ser determinada.
- b) El más común dispositivo de monitoreo es un equipo consistente en un contenedor, un filtro y una película especial de Rayos X. Estos son distribuidos a los operadores radiográficos, asistentes y todas las personas en la vecindad de un área de exposición de radiación. Después de una o dos semanas de exposición la película es procesada y la densidad resultante del negativo es leída por medio de un densitómetro. Al comparar la densidad de la película con una guía, la radiación recibida por la película puede ser determinada.
- c) El otro tipo es una cámara de ionización en conjunto con un medidor electrónico. Este tipo de instrumento lee la intensidad de la radiación que es recibida a un punto dado en el tiempo que el instrumento esta operando. Estos dispositivos son útiles para localizar áreas de peligro de radiación y para determinar la distancia segura de un área de exposición de radiación que los operadores deben mantener.

3.3. LA INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES.

La inspección por penetrantes es usado para detectar pequeñas rajaduras o discontinuidades que no pueden ser encontradas por una inspección visual normal en todos los metales como también en la mayoría de plásticos y cerámicas. Este tipo de inspección es ampliamente usada para determinar la integridad de una soldadura. La inspección por penetrantes puede ser usada sin limitaciones en casi todos los materiales en una aeronave y puede dar indicaciones positivas de cualquier tipo de estructura. El método depende de la habilidad de un líquido que penetra profundamente en una discontinuidad en el material en el cual es aplicado. Por tal razón, puede ser usada para detectar solamente defectos superficiales y subsuperficiales que se encuentran abiertos hacia la superficie.

3.3.1 PRINCIPIOS DE LA TÉCNICA DE INSPECCIÓN POR PENETRANTES.

La inspección de una parte por penetrantes es hecha al cubrir dicha superficie con una capa o película de líquido penetrante, permitiendo con el tiempo de que el líquido penetre en cualquier falla existente. Una vez que ha penetrado el líquido, dicha capa o película debe ser removida de la superficie para que el penetrante que ha quedado atrapado en las fallas o discontinuidades sea procesado o examinado con la ayuda de un develador y una luz satisfactoria. Las inspecciones por penetrantes pueden ser llevadas a cabo usando penetrantes que se puedan lavar con agua, postemulsificantes o penetrantes removibles con solventes. Cada uno de estos penetrantes están disponibles con propiedades fluorescentes o teñido visible.

PENETRANTES FLUORESCENTES Y POR TEÑIDO VISIBLE.

Ambas técnicas no son compatibles: Si un tipo ha sido usado para inspeccionar una parte, se debe de asegurar que se limpie la superficie totalmente antes de intentar reinspeccionarlo usando el otro método. El proceso a ser usado en cada aplicación debe ser cuidadosamente seleccionado de acuerdo a la sensibilidad requerida, el tipo de defecto visto y el equipo disponible. También, algunos de estos procesos involucran el uso de agua que bajo ciertas circunstancias como las de abajo podrían ser indeseables:

- 1) En superficies ásperas como colados.
- 2) En materiales donde el óxido o la corrosión podrían aparecer como resultado de un lento y completo secado de la parte.
- 3) Bajo condiciones ambientales donde suficiente agua no puede ser usada o donde bajas temperaturas evitan las evaporaciones rápidas.

INSPECCIÓN.

Es importante recordar que el penetrante debe entrar y llenar la superficie del defecto antes de que una indicación precisa pueda ser obtenida. La superficie que es inspeccionada debe de estar completamente limpia y seca y dejar suficiente tiempo para que el penetrante penetre y llene a la discontinuidad completamente. El período de tiempo variará considerablemente dependiendo ya sea del tipo de penetrante usado, el tipo de material siendo inspeccionado, la sensibilidad requerida y los tipos de defectos que se esperan encontrar. Mucho cuidado debe ser tomado para asegurarse que nada del penetrante que ha penetrado en los defectos sea removido al momento de eliminar el exceso de la superficie. Una indicación apropiada de la falla depende ya sea de la cantidad de penetrante mostrado por el revelador y la cobertura dada a la superficie.

PRECAUCIONES

Evite el contacto directo del penetrante y solvente de la ropa y la piel. Estos químicos causan irritación cuando el contacto es prolongado con la piel. Usar guantes de neopreno para proteger las manos y si es necesario lave la piel con jabón y agua tan pronto sea posible. Por otra parte se recomienda usar todo el equipo de seguridad, proveer al lugar de pruebas de adecuada ventilación todo el tiempo por los solventes y el polvo develador en seco que suele ser dañino.

PREPARACIÓN DE LAS PARTES.

Es muy importante que la parte este limpia y libre de materiales extraños de cualquier tipo, incluyendo la humedad que podría bloquear las indicaciones de discontinuidades y por lo tanto evitar una acción eficiente del penetrante. La pintura, barnices o coberturas similares deben ser completamente removidas al igual que las grasas, suciedad y corrosiones para evitar el revelado de indicaciones falsas o la propia indicación de discontinuidades.

PASOS BÁSICOS DE OPERACIÓN

En secuencia, son 5 los pasos básicos en el proceso de la inspección por penetrantes que son comunes con los métodos fluorescentes o los teñidos. Estos son los siguientes:

1. LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE
2. APLICACIÓN DEL PENETRANTE
3. REMOCIÓN DEL EXCESO DE PENETRANTE
4. APLICACIÓN DE DEVELADOR
5. INSPECCIÓN DE LA SUPERFICIE

De estos 5 pasos, 2 son las más críticas: la remoción del exceso de penetrante teñido y la aplicación del develador. Hay guías del tiempo de aplicación transcurrido entre ambas aplicaciones, las temperaturas y las técnicas ofrecidas.

TIPOS DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES :

INSPECCIÓN POR PENETRANTES FLUORESCENTES LAVABLE CON AGUA.

El método penetrante que es lavable con agua es el menos sensitivo de los 3 métodos que involucran penetrantes fluorescentes. El método utiliza un penetrante con base de aceite al cual se le ha adicionado un emulsificador para hacerlo lavable en agua y un teñido fluorescente. Después de una aplicación del penetrante, la superficie de prueba es lavada para remover el penetrante en exceso aplicando posteriormente el revelador que puede ser seco o húmedo. El tipo de revelador de polvo seco tiene una mejorada sensibilidad y puede ser usada donde una mayor inspección crítica es requerida. En ambos casos, cuando es vista con la luz negra, cualquier discontinuidad en la superficie de pruebas lucirá como un brillo de luz amarillo-verdosa sobre un fondo oscuro. La intensidad de la fluorescencia es relacionado con el volumen de penetrante retenido por la falla de la superficie. Las ventajas y desventajas de la inspección por penetrantes fluorescentes lavables con agua son mostrados en la siguiente tabla 3.3:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fluorescencia para una mayor visibilidad.	El anodizado de las partes puede afectar la sensibilidad de la prueba.
Fácilmente lavable con agua.	El acabado de cromado podría afectar la sensibilidad de la prueba.
Adecuada para cantidades de pequeñas partes.	Requiere la inspección con luz negra en áreas oscuras.
Adecuada para superficies ásperas.	No es confiable para detectar ralladuras o defectos similares en la superficie.
Adecuada para roscas y pasos similares.	
Alta velocidad, economía de tiempo.	
Buena en amplios rangos de defectos.	

Tabla 3.3: Ventajas y Desventajas Penetrantes fluorescentes lavables con agua.²¹

EL MÉTODO POR PENETRANTE FLUORESCENTE POSTEMULSIFICABLE

Este método utiliza un penetrante con base de aceite al cual un teñido altamente fluorescente ha sido agregado. Como el penetrante no contiene un emulsificante, tiene la habilidad de alojarse en defectos muy finos de la superficie.

La película superficial de penetrante es hecha soluble en agua por la aplicación de un emulsificador en una operación aparte. La sensibilidad de la

²¹

Tomado de "Nondestructive testing for Aircraft" (AC 43-3), Capítulo 3 pág 12. Renton, WA. Estados Unidos.

operación puede ser parcialmente controlada con un juicio apropiado del tiempo transcurrido entre la aplicación del emulsificante y las operaciones de lavado.

Un revelador es aplicado a la superficie que se prueba después del lavado y la superficie es examinada bajo una luz negra. Un defecto existente tendrá brillo fluorescente contra un fondo oscuro. En adición a las rajaduras profundas, una aplicación cuidadosa de esta técnica hace posible la detección de rayones pocos profundos, marcas de herramientas y imperfecciones poco profundas que son más anchas de lo que son en profundidad. Las ventajas y desventajas de la inspección por penetrantes fluorescentes postemulsificantes son tabuladas a continuación en la tabla 3.4:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fluorescencia para una mayor visibilidad.	Una operación aparte la aplicación de emulsificador.
Fácilmente lavados con agua después de emulsificación.	Requiere inspección con luz negra en áreas oscuras.
Pueden mostrar ampliamente defectos poco profundos.	Difíciles de remover el penetrante de partes con roscas, agujeros ciegos.
Alta sensibilidad en defectos muy finos.	
Corto período de penetración.	
Alta producción, especialmente con partes grandes.	
Pueden ser usadas en superficies anodizadas.	
Pueden ser usadas en superficies cromadas.	

Tabla 3.4: Ventajas y Desventajas de la Inspección por penetrantes fluorescentes ²² postemulsificantes.

EL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PENETRANTES FLUORESCENTES REMOVIBLE CON SOLVENTES :

Este método es especialmente útil para la detección de la corrosión por esfuerzos o intergranular, pero puede ser usado como un método de inspección general en partes donde el uso del agua no es satisfactorio o resulta inconveniente.

Un solvente es usado para remover de la superficie la película de penetrante altamente sensitivo y de un revelador de rápido secado de tipo no acuoso. Este revelador, cuando es aplicado en la forma de un fino spray, forma una capa delgada y uniforme que provee el más alto grado de precisión en la inspección.

EL MÉTODO DE INSPECCIÓN PENETRANTE CON TEÑIDO VISIBLE LAVABLE EN AGUA Y POSTEMULSIFICANTE :

Este método utiliza penetrantes con base de aceite al cual un teñido visible ha sido agregado. Las inspecciones son hechas bajo luz blanca ordinaria y los defectos de la superficie son revelados con brillantes indicaciones rojas contra un fondo blanco. Los procedimientos y ventajas relativas del método de teñido visible son básicamente similares a los usados por los métodos penetrantes fluorescentes.

EL MÉTODO DE INSPECCIÓN PENETRANTE CON TEÑIDO VISIBLE REMOVIDO POR SOLVENTES :

Este método es el mismo que el usado en el método teñido visible postemulsificable. Después de la penetración, el exceso de la película en la superficie es removida aplicando un solvente y limpiándola con papel toalla. Un revelador de rápido secado y no acuoso es entonces aplicado a la parte para producir las brillantes indicaciones rojas que son usuales. El revelador no acuoso es el más sensible revelador disponible pero para mejores resultados, debe ser aplicado en la forma de fino spray. Este método de inspección proveerá un alto grado de precisión cuando el procedimiento aplicado a mano es empleado. El método es por lo tanto idealmente satisfactorio para las operaciones de campo usando equipos portátiles que contienen todos los fluidos necesarios en latas presurizadas de tipo aerosol.

En resumen el proceso consiste de a) la aplicación de penetrante líquido teñido de rojo que entra en las fallas superficiales, b) la remoción de dicho penetrante rojo que no penetró en el defecto y c) rociando un revelador blanco. El revelador, un polvo blanco suspendido en un solvente que se evapora, empuja el penetrante teñido que ha sido retenido en la falla y la hace evidente en la superficie como una marca roja en un fondo blanco.

Las ventajas y desventajas de la inspección por penetrantes removibles por solventes son tabuladas en la siguiente tabla 3.5:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Puede ser usada en kits portátiles.	Materiales son inflamables.
No requieren una fuente especial de luz.	Dificultad de ser usado en superficies ásperas especialmente en magnesio colado.
Puede ser usada en áreas de sospecha local de grandes partes.	Caro en horas-hombre.
Puede ser usados en parte donde el contacto con el agua no es permitido.	Las indicaciones son menos visibles que las indicaciones fluorescentes.
Puede ser usado en superficies anodizadas.	Los materiales no pueden ser usados en tanques abiertos.
Ideal para componentes operacionales	Remoción del penetrante de la

que no puedan ser desensamblados.	superficie es muy lenta.
Provee una inspección muy precisa.	
Mejor técnica en defectos contaminados.	

Tabla 3.5: Ventajas y Desventajas de la Inspección por penetrantes removibles por solventes.²³

3.3.2 APLICACIONES DE LA INSPECCIÓN POR PENETRANTES.

Cuando queremos aplicar una inspección por líquidos penetrantes, debemos de tener en cuenta que una superficie limpia es esencial en el éxito del proceso de penetrante teñido. La superficie a ser examinada y el área adyacente debe de estar libre de contaminantes como polvo, pintura, aceite, grasas o gel. De no ser así, se tendrán falsas y confusas indicaciones por lo que será en algunos casos necesario el uso de cepillos de alambre de acero inoxidable para su remoción.

Los limpiadores/removedores se aplican directamente a la superficie saturando toda el área contaminada. Hay que permitir que transcurran unos 30 segundos mientras se disuelven todas las sustancias orgánicas. Posteriormente antes de que el limpiador/removedor se evapore completamente se debe limpiar con un trapo o toalla seca la superficie. Dicha operación se tiene que repetir hasta que ésta quede limpia. Hay 2 tipos de limpiador/removedores en el mercado que son más comunes: el solvente halogenado (clorinado) y el solvente con base de petróleo. Ambos son volátiles y se evaporan rápidamente sin dejar residuos. El primero es preferido como un pre-limpiador al ser más efectivo, no inflamable y se evapora más rápido, sin embargo, los solventes halogenados tienen el peligro de una descomposición peligrosa y su uso puede ser prohibido donde hay llamas, arcos de soldaduras o superficies muy calientes. Los limpiadores/removedores no halogenados no tiene peligros similares de descomposición pero es menos efectivo como un agente limpiador.

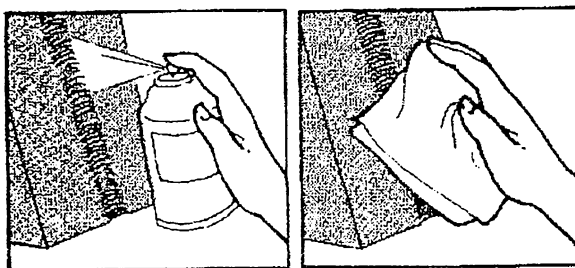


Figura 3.3: Limpieza de la superficie utilizando un limpiador/removedor .

El penetrante tiene que esparcerse con aerosoles en una superficie limpia y completamente seca. Hay que dejar que repose por 5 o más minutos en tal estado, especialmente si se sospecha de rajaduras pequeñas pero firmes o si hay una razón de creer de que los defectos puedan estar contaminados, con suciedad

²³

Tomado de "Nondestructive testing for Aircraft" (AC 43-3), Capítulo 3 pág 14. Renton, WA. Estados Unidos.

o la superficie helada (abajo de 60oF). Unos 30 minutos o más en tales circunstancias es una práctica común. Si la temperatura de la superficie es más alta que 125oF, menores tiempos son recomendados hasta un mínimo de 1 minuto para superficies a 200oF que será la más alta temperatura permitida para efectuar una inspección por el método de penetrantes.

El penetrante es removido de la superficie de inspección manualmente con un trapo o toalla seca. Primero, hay que limpiar la superficie para remover la mayoría del penetrante de la superficie con dicha toalla seca o trapo. Segundo, para la película que queda de penetrante después de la toalla o trapo seco, se debe remover con una toalla húmeda de limpiador/removedor y por último nuevamente una toalla seca hasta que la superficie quede libre de la película de penetrante. Nota importante: No se debe rociar el limpiador/removedor directamente en la superficie para remover el exceso del penetrante.

Los penetrantes lavables por agua pueden ser removidos de la superficie de la misma manera que los penetrantes no lavables por agua: con una toalla con limpiador/removedor o toalla húmeda con agua (Se recomienda que el penetrante lavable en agua sea removido de grandes áreas con un spray de agua).

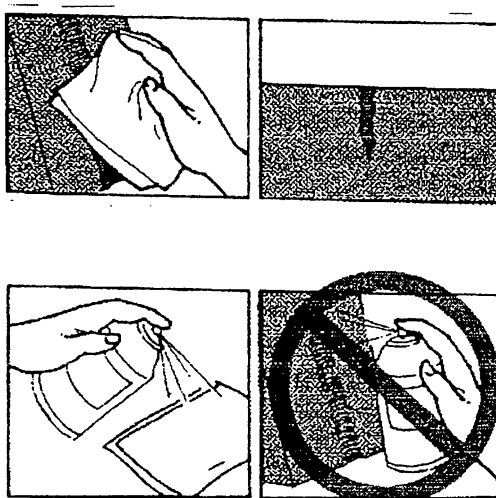


Figura 3.4: Instrucciones: Remueva el penetrante de la superficie con removedor para que permanezca en la falla. Humedezca una toalla con un limpiador/removedor para remover lo rojo del penetrante en la superficie cuidando de no removerlo frenéticamente. No aplicar el spray directamente.

Antes de aplicar el revelador en la superficie, agite vigorosamente la lata del revelador hasta restaurar totalmente la partícula de suspensión blanca del revelador. El "spray" o rociado es el único método recomendado para la aplicación del revelador a la superficie. El objetivo es rociar una capa ligera de revelador en la superficie de tal manera que se "acople" con el penetrante entrampado en la falla y permita "verla". No debe ser tan poco que se diluya y que dé por resultado unas indicaciones débiles o mucho que no deje ver la poca cantidad de

penetrante que pueda ser contenida en una falla. La cantidad depositada de revelador blanco debe ser tal que provea en primer lugar un buen agarre de capilaridad para el penetrante y en segundo lugar un buen contraste con fondo blanco para las marcas de fallas que son rojas por el penetrante teñido. Este no debe ser tan grueso o esconderá u opacará las indicaciones de fallas rojas. Dos o más aplicaciones ligeras de spray para alcanzar el nivel deseado de partículas blancas como capa son preferidas que una sola aplicación gruesa de la misma. Estas deben ser aplicadas a una distancia de 8 a 12 pulgadas del spray del revelador a la superficie que se prueba permitiendo así que el penetrante rojo en una falla o discontinuidad salga a la superficie por absorción.

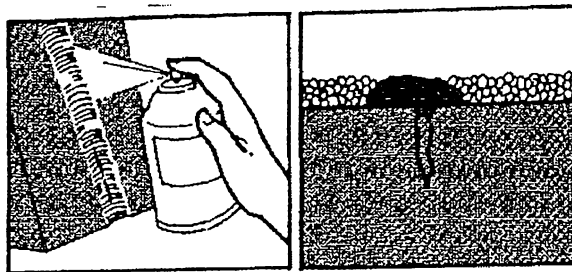


Figura 3.5: Rocíe el revelador en 2 ó 3 aplicaciones ligeras de una distancia de 8 a 12 pulgadas.

Dos reveladores no acuosos están generalmente disponibles: el revelador con contenido de alcohol y el que contiene halogenados. El primero usa un solvente de alcohol mientras que el otro un solvente halogenado que se evapora más rápido que el alcohol pero este último por ser más lento en evaporarse provee una sensibilidad máxima para fallas microscópicas en condiciones promedios. En situaciones de partes o ambientes con bajas temperaturas, el halogenado es preferido ya que el otro se llegará a evaporar muy lentamente. Recordemos que el solvente halogenado es prohibido donde hay llamas, arcos de soldaduras o superficies muy calientes. Ambos son usados de la manera descrita en el párrafo anterior con suspensiones de blancas partículas volátiles de solvente, ambas cuentan con la acción capilar de empujar el penetrante rojo hacia la superficie para delinear visiblemente la falla o discontinuidad en un contraste blanco de fondo.

Tan pronto que el revelador se ha secado, las indicaciones de fallas si están presentes aparecerán pero es sugerido que unos 5 minutos o más adicionales sean dados para permitir a las indicaciones que alcancen todo el patrón completo antes de una examinación visual final y la interpretación de las indicaciones. La necesidad de un tiempo de revelado mayor es esencial si se sospechan de quebraduras pequeñas.

Las líneas rojas indican rajaduras o falta de fusión, las rajaduras estrechas aparecerán como puntos en una línea o curva al igual que la porosidad que aparecerán con puntos rojos dispersos.

El criterio de rechazo de una parte está usualmente determinado por ingenieros de diseño porque no todas las fallas deben ser causa de rechazo: el tamaño, la localización y el tipo de indicación como el uso eventual de la parte y carga de trabajo influirán en la decisión del ingeniero de diseño.

Después de completar cualquier tipo de proceso de inspección, si no se requiere ninguna acción correctiva, todos los trazos de los residuos de materiales propios de la inspección deben ser removidos dentro de 4 horas. Limpieza total de la parte o de la estructura debe ser llevada a cabo por medio de un método apropiado. Normalmente, el polvo revelador blanco que queda en la superficie es removido antes de cualquier proceso subsecuente o el uso de la parte. Aunque un cepillado remueve el polvo seco, un método más rápido es limpiar con una toalla o trapo húmedo con agua seguido de una limpiada con una toalla seca. Después de este paso final, la superficie queda limpia pero si está sujeto a la corrosión, un tratamiento preventivo de la corrosión debe ser empleado.

PROCESO DE INSPECCIÓN POR PENETRANTES FLUORESCENTES

En el método fluorescente, el paso de remoción del penetrante y de la examinación de la superficie toman lugar bajo una luz negra y un área oscura. Sin embargo, el procedimiento de procesado del penetrante fluorescente no difiere del método del penetrante visible salvo en las indicaciones de fallas que aparecen en el método fluorescente como marcas amarillo-verdes bajo una luz negra en vez de las marcas rojas en un contraste blanco del otro método.

PROCESO DE INSPECCIÓN POR PENETRANTES DE DOBLE SENSIBILIDAD

Casas comerciales tienen penetrantes dos en uno que es un penetrante fluorescente bajo luz negra y un penetrante visible bajo una luz blanca o natural. Bajo una luz negra, los defectos son mostrados como marcas anaranjadas mientras que bajo luz blanca aparecen como marcas rojas en fondo blanco. Los procedimientos son básicamente los mismos que el método de penetrante visible.

CLASIFICACIÓN DE LA INSPECCIÓN POR PENETRANTES

Los procesos de inspección por penetrantes están contenidos en la MIL-STD-6866 y los clasifica de acuerdo a los tipos, métodos y niveles de sensibilidad según la tabla 3.6:

TIPOS	
TIPO 1	FLUORESCENTE
TIPO 2	VISIBLE
TIPO 3	DUAL
MÉTODOS	
MÉTODO A	LAVABLE EN AGUA
MÉTODO B	POST EMULSIFICABLE, LIPOFILICO.
MÉTODO C	REMOVIBLE POR SOLVENTES
MÉTODO D	POST EMULSIFICABLE, HIDROFILICO
SENSIBILIDAD	
NIVEL 1	BAJA
NIVEL 2	MEDIO
NIVEL 3	ALTA
NIVEL 4	ULTRA-ALTA
REVELADORES	
FORMA A	POLVO SECO
FORMA B	SOLUBLE EN AGUA
FORMA C	SUSPENSIÓN EN AGUA
FORMA D	NO ACUOSO
FORMA E	APLICACIÓN ESPECIFICA
REMOCIÓN POR SOLVENTES	
CLASE 1	HALOGENADOS
CLASE 2	NO HALOGENADOS
CLASE 3	APLICACIÓN ESPECIFICA

Tabla 3.6: Sistema de Clasificación de los Penetrantes ²⁴

3.3.3. EQUIPOS EN LA INSPECCIÓN POR PENETRANTES.

Tres materiales son usados en el proceso 1) penetrante teñido, 2) un limpiador / removedor, y 3) un develador. Las latas presurizadas son el tipo más común de empaque por ser de fácil manejo en la parte que se inspecciona al no

²⁴ ESPECIFICACION MILITAR E.E..U.U. : "INSPECTION MATERIALS, PENETRANTS, MIL-I-25135E", 26 JUNE 1989

haber cepillos que limpiar ni derrames además que evita la contaminación de las partes. El penetrante puede ser removido al secar la parte con una toalla seca o papel toalla con limpiadores y/o removedores. En el caso de los penetrantes lavables con agua, puede ser removida con una toalla húmeda o usar agua en spray. El develador es siempre aplicado con sprays.

Equipos portátiles están disponibles con todos los fluidos contenidos en forma de aerosol en latas presurizadas. Los equipos son útiles en operaciones de campos para inspeccionar miembros estructurales primarios cuando la luz disponible es suficientemente limitada para permitir indicaciones adecuadas bajo una luz negra si fuera el caso de penetrantes fluorescentes removibles con solventes. Las indicaciones son similares a esas obtenidas con otros métodos de inspección penetrantes por fluorescentes.

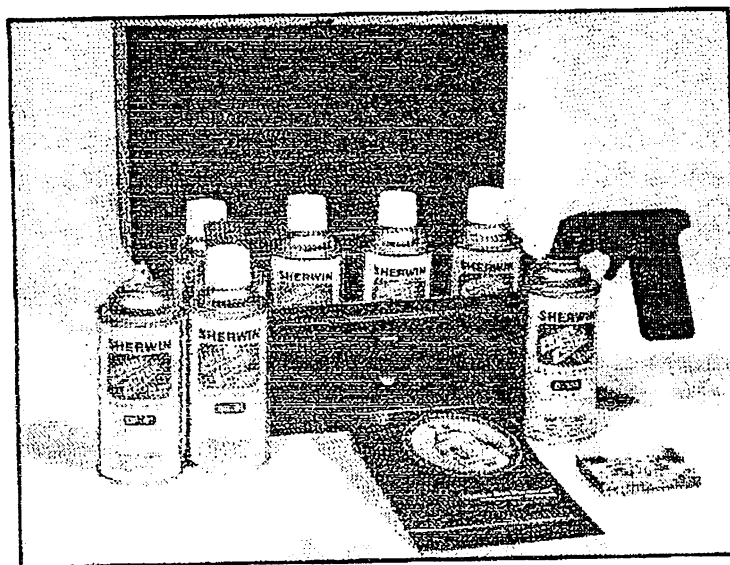


Figura 3.6: Equipo Portátil de Inspección por Penetrantes.²⁵

3.4 INSPECCIÓN POR PARTÍCULA MAGNÉTICA

INTRODUCCIÓN

La inspección por partícula magnética es un método de detectar quebraduras u otras fallas en la superficie o subsuperficies de materiales que han sido magnetizados. Este tipo de inspección generalmente encontrará utilidad con sujetadores de acero, componentes de trenes de aterrizajes y acoples de motores

²⁵ Tomado de "Visible Dye Penetrant Inspection Process: Spray can method" de Sherwin Inc. Procedure Manual pag 13. E.U. 1985

y de la cola de una aeronave. La inspección por partícula magnética proveerá una indicación excelente de todas las discontinuidades superficiales una vez que la parte este libre de grasas, aceite, suciedad, polvo o de acabados superficiales. Consecuentemente, este tipo de inspección generalmente aplicará a partes las cuales han sido desensambladas del avión usando generalmente corriente DC para los defectos de superficie y corriente AC para defectos subsuperficiales.

3.4.1. PRINCIPIOS DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULA MAGNÉTICA.

Los campos magnéticos son inducidos en partes ferro-magnéticas cuando son expuestos a una corriente eléctrica o campo de la corriente. Tal inspección no es aplicable a materiales no ferromagnéticos o aleaciones como aceros inoxidable austeníticos. Controlando la dirección de la corriente magnetizante, las líneas de fuerza magnética pueden ser inducidas a ángulos rectos de la discontinuidad o falla. La dirección del campo magnético es crítico: 1) Las líneas de fuerza deben estar a ángulos rectos de la dimensión más larga de la discontinuidad si mejores resultados de la inspección se esperan obtener; 2) Una regla general para la orientación del campo magnético es la regla de la "mano derecha". Esta regla señala que si se toma la parte que se magnetiza con la mano derecha de tal manera que el pulgar apunte en la dirección del flujo de la corriente, las líneas de fuerza en el campo magnético será representado por los otros 4 dedos de la mano tal como se muestra en la figura 3.7.

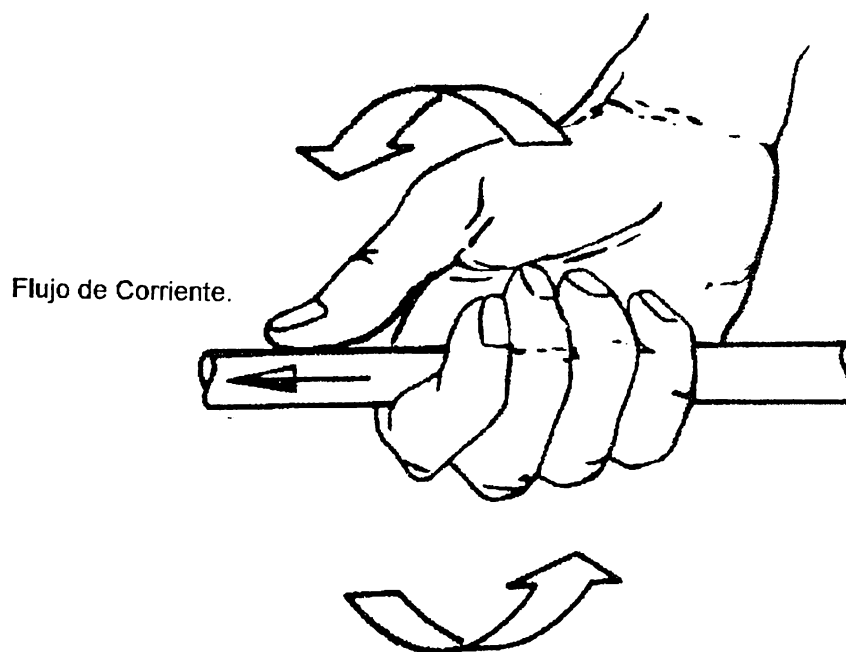


Figura 3.7: Regla de la mano derecha.²⁶

²⁶ Tomado de "Nondestructive testing for Aircraft" (AC 43-3), Capítulo 4 pág 15. Renton, WA. Estados Unidos.

PRINCIPIO BÁSICO: El método es basado en el principio de que el flujo magnético cerca de la superficie de un material magnetizado es distorsionado localmente por la presencia de discontinuidades. Esta distorsión del campo es capaz de atraer y sostener un patrón de las partículas magnéticas que permiten la inspección. La acumulación resultante de las partículas serán visibles bajo apropiadas condiciones de luz. La sensibilidad es mayor para discontinuidades en la superficie.

SENSIBILIDAD Y ALCANCES DEL MÉTODO: La máxima detección ocurre cuando la discontinuidad tiene una profundidad al menos 5 veces su abertura, una longitud al menos igual a su profundidad y si es posicionada perpendicularmente al flujo magnético. En orden de detectar discontinuidades en todas las direcciones, al menos 2 campos magnéticos perpendiculares el uno con el otro en un plano paralelo a la superficie que se inspecciona deben ser usados.

Partículas Magnéticas: Durante la magnetización de la parte, la falla o discontinuidad es hecha visible al cubrir el área de la parte con partículas magnéticas que se alinean por sí solas a lo largo de la falla o discontinuidad que encuentran. Hay dos tipos de partículas magnéticas para ser usadas en la inspección magnética siendo ellas las partículas húmedas y las secas.

a) **Partículas Húmedas o mojadas:** consiste de una suspensión de partículas magnéticas en un aceite ligero o de un ligero petróleo destilado. Las partículas están hechas de un material magnético cuidadosamente seleccionado con un tamaño adecuado y forma con pleno conocimiento de sus características magnéticas tales como permeabilidad magnética y retentiva. Ellos son coloreados para dar mejores contrastes con la superficie que se inspecciona o con coberturas fluorescentes para verlas con una fuente de luz negra. Las partículas mojadas son aplicadas sumergiendo la parte en la solución o a través de dispositivos que permitan similares resultados.

b) **Partículas Secas:** Estas son partículas en forma de polvo y pueden ser obtenidas en una gran variedad de colores y generalmente son usadas con equipo portátil. Estos tipos de partículas son suministrados con la ayuda del aire y son aplicadas con agitadores de mano, sprays de bulbos, pantallas agitadoras o corrientes de aire.

3.4.2. APLICACIONES DE LA TÉCNICA DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.

Métodos de aplicar los campos magnéticos a las partes para la inspección.

1) **Magnetismo Longitudinal:** es alcanzado por bobinas fijas de corriente por las que pasan corriente o bobinas de cables portables que encierran circularmente la

parte y le induce un campo magnético longitudinal tal como se muestra en la figura siguiente. El campo magnético efectivo se extiende de 6 a 9 pulgadas de cada terminal o fin de la bobina; partes largas deben ser magnetizadas en secciones las cuales son llevadas a cabo moviendo la parte a través de la bobina. Ver la figura 3.8.

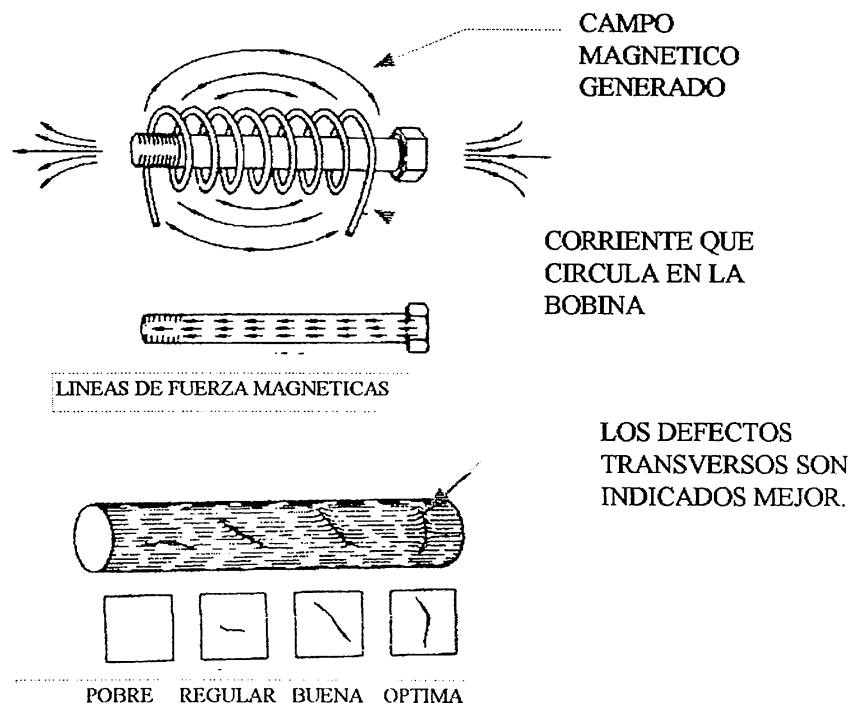


Figura 3.8: Magnetismo Longitudinal. ²⁷

2) Magnetismo circular: Es llevado a cabo al colocar contactos eléctricos a cada fin o tope de la parte o a cada lado del área que se inspecciona permitiendo así que la corriente fluya a través de ella como se muestra en la siguiente figura. Cuando la parte es muy larga para poner los contactos en cada extremo, la parte puede ser magnetizada por contactos tipo abrazaderas (ver figura 3.9).

²⁷ Tomado de "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods" de L. Libby, Capítulo I Figura 6. Nueva York, Estados Unidos, 1979.

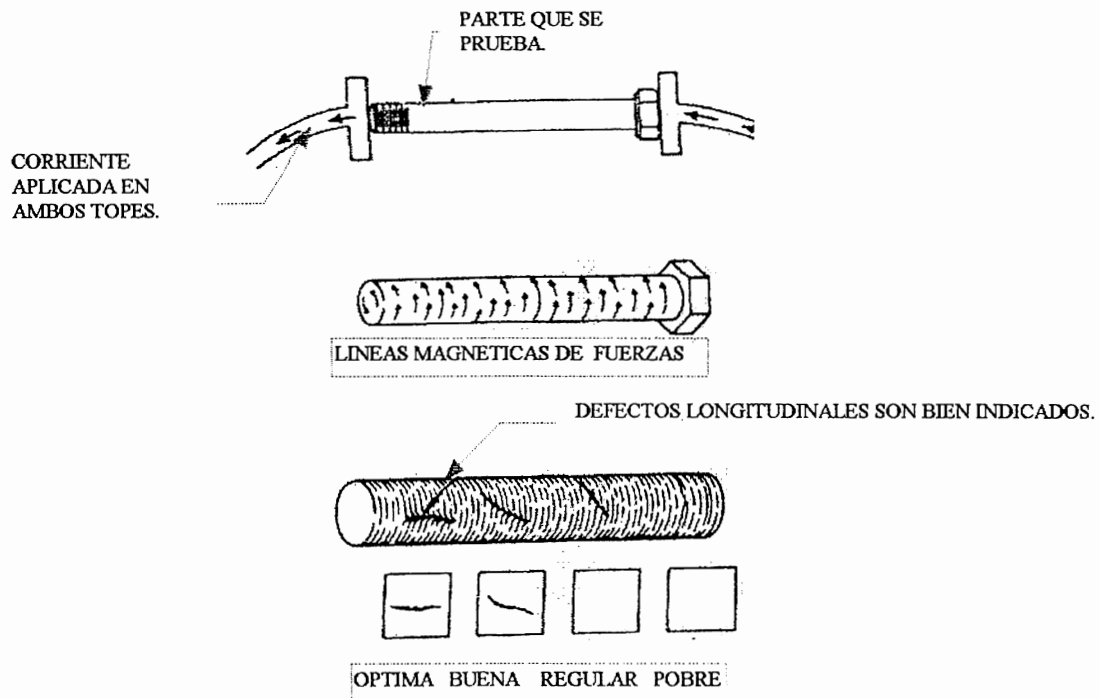


Figura 3.9: Magnetismo Circular. ²⁸

Indicaciones de Quebraduras.

Son detectadas al observar los patrones de las partículas que se forman en la superficie de la parte que se inspecciona. El tamaño y forma aproximada de la discontinuidad son indicadas por este patrón. Las discontinuidades finas revelarán indicaciones que no se pueden discernir fácilmente pero surgen entonces como opción las partículas fluorescentes que ayudan en gran parte a darle solución. Las ventajas del uso de las partículas mojadas y secas son las siguientes:

- Las partículas mojadas darán mejores indicaciones para quebraduras finas en la superficie. Ellos son usados en equipos estacionarios donde el baño puede ser usado fácilmente.
- Las partículas secas son mejor utilizadas en superficies rugosas con equipo portátil.

Precauciones.

Las partes deben de estar libres de grasa, aceite, polvo, pintura y otras sustancias que afectarán la inspección por partículas magnéticas:

- Si la parte que es inspeccionada es un acero altamente tratado térmicamente, usar solamente solventes aprobados.
- Mantener los fluidos limpiadores de partículas magnéticas lejos de las áreas donde podrían quedar atrapados.
- Metales disímiles deben ser removidos antes de la limpieza e inspección.
- No magnetizar los baleros.

²⁸ Tomado de "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods" de L. Libby, Capítulo I Figura 7. Nueva York, Estados Unidos, 1979.

- Evitar golpes de arco durante la magnetización para reducir un posible daño en partes críticas.

Procedimiento para la inspección por partículas magnéticas:

El procedimiento de la inspección por partículas magnéticas se encuentran contenidas en la MIL-STD-194 9. De ella se extraen los siguientes pasos:

- a) Limpieza de la parte. Se debe efectuar la limpieza de la misma manera que se limpia una parte que es sometida a una inspección por penetrantes.
- b) Magnetización de la parte. El equipo para magnetizar la parte dependerá del material, localización y el tipo de defecto que es sospechado.
- c) Cubra el área magnetizada con partículas magnéticas y examine la pieza por defectos en la superficie o subsuperficie.
- d) Después de haber sido magnetizada una parte para la inspección por partículas magnéticas, los materiales retienen un magnetismo residual por lo que la parte debe ser desmagnetizada.
- e) Examine la parte con un indicador estándar de campo magnético para asegurarse que la parte ha sido desmagnetizada completamente.
- f) Limpie la parte como sigue:
 - Sí la inspección ha sido hecha con el método de suspensión de aceite, los residuos de las partículas magnéticas deben ser removidos por un solvente limpiador o vapores desgrasantes.
 - Sí la inspección ha sido hecha con el método de suspensión de agua, solamente limpie la parte.
 - Sí la parte es revestida con cadmio, use un limpiador de vapor aire-agua para remover los residuos.
- g) Secar la parte y restaurar el acabado protector original.

3.4.3. EQUIPOS DE INSPECCIÓN

Hay muchos tipos de equipos disponibles para efectuar la inspección por partículas magnéticas. Ellos varían desde pequeños yunques manuales en forma de "U" los cuales consisten de magnetos permanentes a electromagnetos energizados a 115 V AC con unidades pesadas de 10,000 Amp. usadas para la inspección de colados, fundiciones, soldaduras o forjas. La selección del equipo que es usado dependerá de la disponibilidad del equipo en el tiempo y lugar

donde la inspección se lleve a cabo además de los niveles de magnetización requeridos en determinada dirección. A continuación se muestra un equipo tipo portátil para propósitos múltiples:

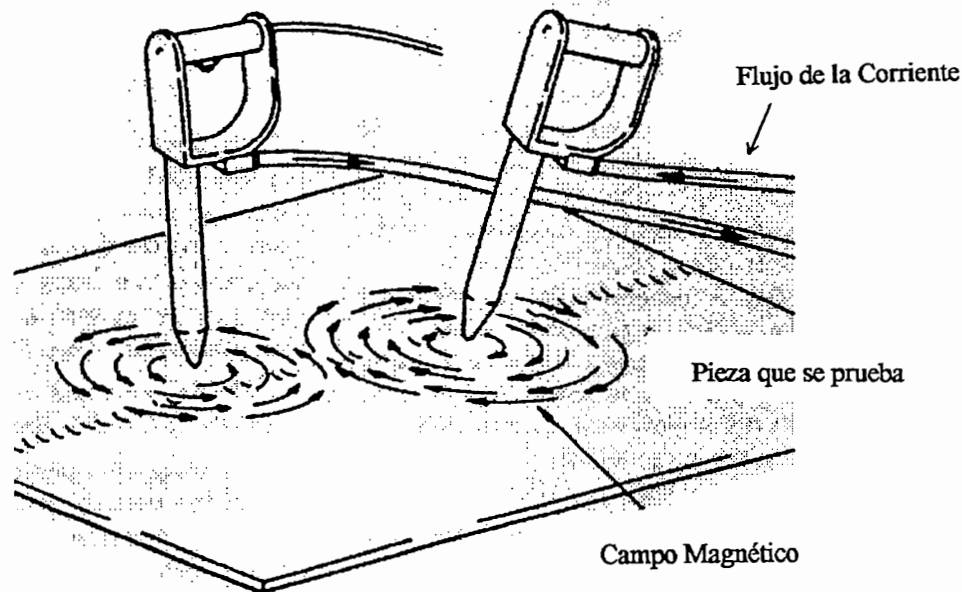


FIGURA 3.10 : Equipo portátil para propósitos múltiples.²⁹

La magnetización puede ser llevada a cabo pasando una corriente eléctrica directamente a través del material (método directo) o induciendo una corriente que fluya en la parte que se prueba (método de corriente inducida) o colocando el material entre el flujo magnético de una fuente externa como bobinas (método indirecto). Los tipos de equipos disponibles incluyen por lo tanto magnetos en formas de U, unidades portátiles, unidades móviles, unidades estacionarias y unidades de aplicación especial como las unidades que producen una sola o multidireccionales campos magnéticos). Los tipos de corrientes usadas para la magnetización son corrientes rectificadas de todo rango de ondas AC, de media onda rectificada AC y corriente alterna. El equipo usado debe suplir adecuadamente los requerimientos de magnetización y de desmagnetización sin dañar a la parte que se prueba proveyendo todo lo necesario para una operación segura de los mismos.

²⁹

Tomado de "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods" de L. Libby, Capítulo I Figura 8. Nueva York, Estados Unidos, 1979.

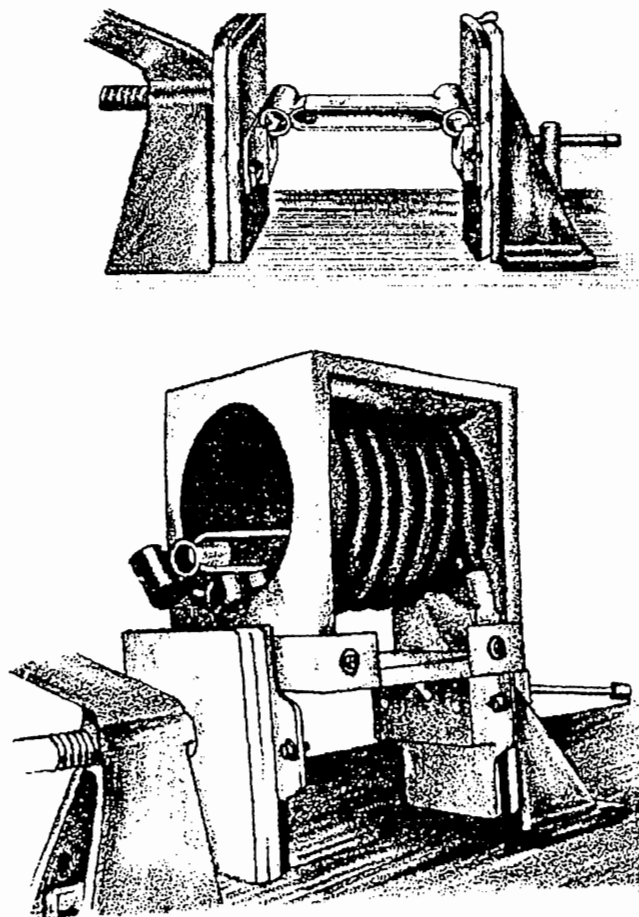


Figura 3.11: Componentes listos para ser examinados por Inspección de Partícula Magnética. ³⁰

3.5 INSPECCIÓN POR CORRIENTES DE EDDIE.

INTRODUCCIÓN

La inspección por corrientes de Eddie es un medio no destructivo para detectar discontinuidades en una parte. Para iniciar corrientes de Eddie en una parte o componente, una corriente alterna con una adecuada frecuencia es suministrada a la bobina de prueba. La bobina que conduce esta corriente, a su vez induce un campo magnético de la misma frecuencia en la parte y causa que las corrientes de Eddie fluyan. Variaciones en la magnitud de las corrientes de Eddie afectarán este campo magnético, y cuando sea analizado electrónicamente darán una información de cambios estructurales en la parte tales como fallas, discontinuidades, grosores, aleaciones o material tratado térmicamente. La inspección por corrientes de Eddie es usada para localizar defectos ya sea en la

³⁰ Tomado de "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods" de L. Libby, Capítulo I Figura 10. Nueva York, Estados Unidos, 1979.

superficie o subsuperficiales. Ajustes en el control electrónico permiten al mismo instrumento detectar variaciones en diámetro, grado y dureza.

Entre las ventajas del método tenemos de que como es una prueba electromagnética, sus señales se mueven a la velocidad de la luz por lo que sus mediciones pueden ser obtenidas rápidamente. Por su naturaleza eléctrica, puede ser fácilmente automatizada y sus señales pueden ser usadas para controlar otros dispositivos eléctricos además del hecho de que puede ser usado en el vacío.

3.5.1. PRINCIPIOS BÁSICOS

La prueba por Corrientes de Eddie es el proceso de inducir electromagnéticamente pequeñas corrientes eléctricas en un espécimen eléctricamente conductor y observando los cambios en los efectos causados por estas corrientes en los campos electromagnéticos. Cada variable que afecte la inducción de corrientes de Eddie, su flujo en el material y las reacciones a su campo electromagnético es capaz de ser utilizado como una variable de prueba.

Un conocimiento de las propiedades de la electricidad y el magnetismo en los materiales es requerido para entender la operación teórica de las corrientes de Eddie por lo que se dará por descontado la comprensión de los electromagnetos con el flujo de corriente por un conductor con su campo magnético originado (tal como la regla de la mano derecha lo sugiere), de las líneas de fuerzas magnéticas en una bobina, de la inducción electromagnética y la ley de Faraday, de la inducción mutua y de la autoinducción.

Corrientes de Eddie: Las corrientes de Eddie puede ser fácilmente explicadas al tomar un transformador como se muestra en la figura de la inducción electromagnética en un circuito DC al reemplazar la batería de DC con una fuente de AC como se muestra en la figura 3.14. Luego reemplazando la bobina secundaria con un material de prueba eléctricamente conductor como se muestra en la tercer figura respectivamente. Dicho material puede ser visto como una gran bobina con vueltas muy cerradas que hace la función de una bobina secundaria. La corriente inducida en la ahora "bobina secundaria" llega a ser corriente inducida dentro del mismo material de pruebas. Estas corrientes son las llamadas "Corrientes de Eddie". Al fluir dichas corrientes, ellas causan una inducción electromagnética que se opone a la inducción de la bobina primaria y el efecto será indicado por cambios en el voltaje y valores de corrientes y/o en las relaciones en sus fases en el circuito primario o en el circuito de prueba que esta localizado directamente en su vecindad.

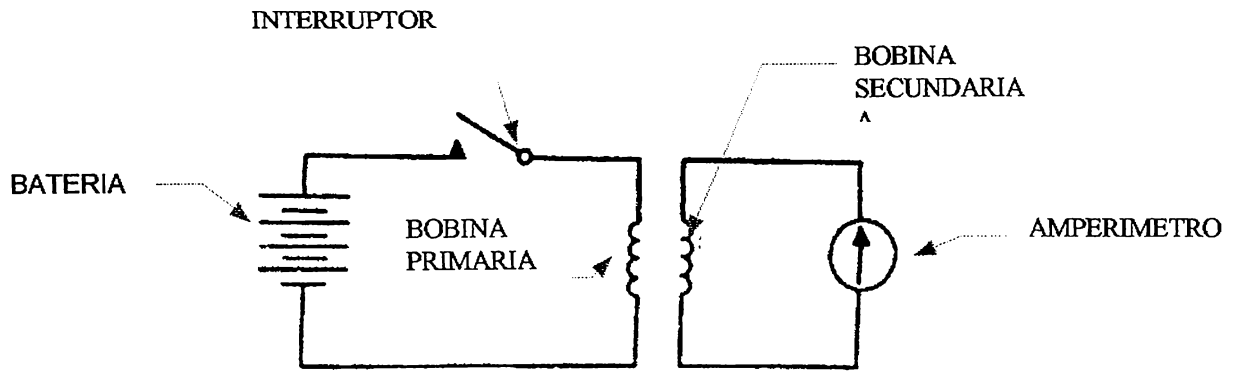


FIGURA 3.12: INDUCCION ELECTROMAGNETICA EN UN CIRCUITO DC ³¹

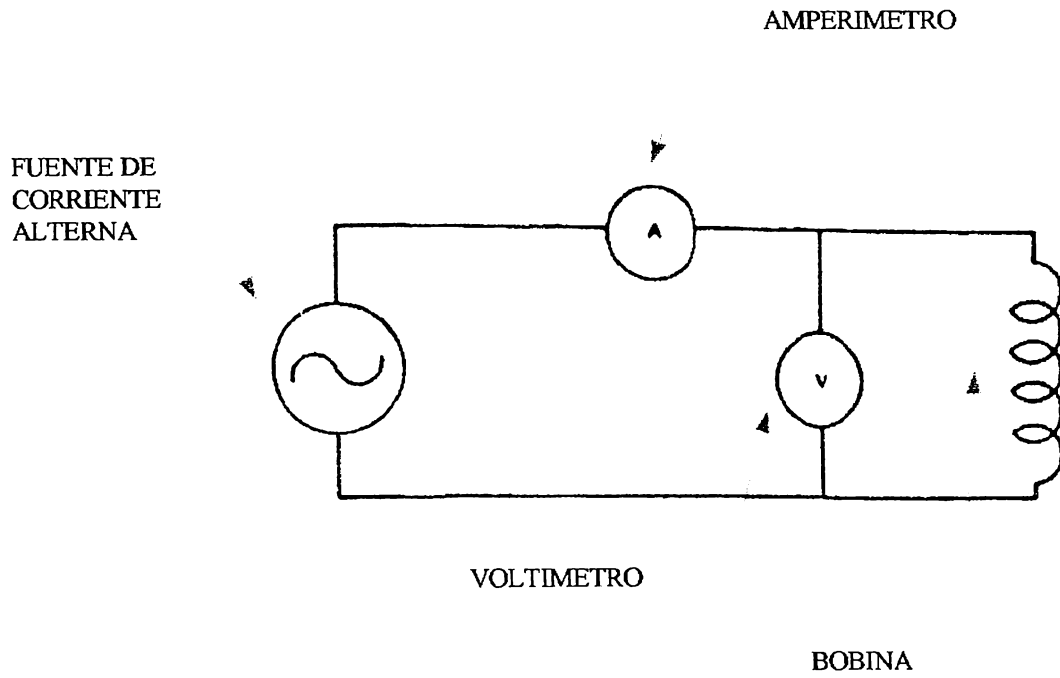
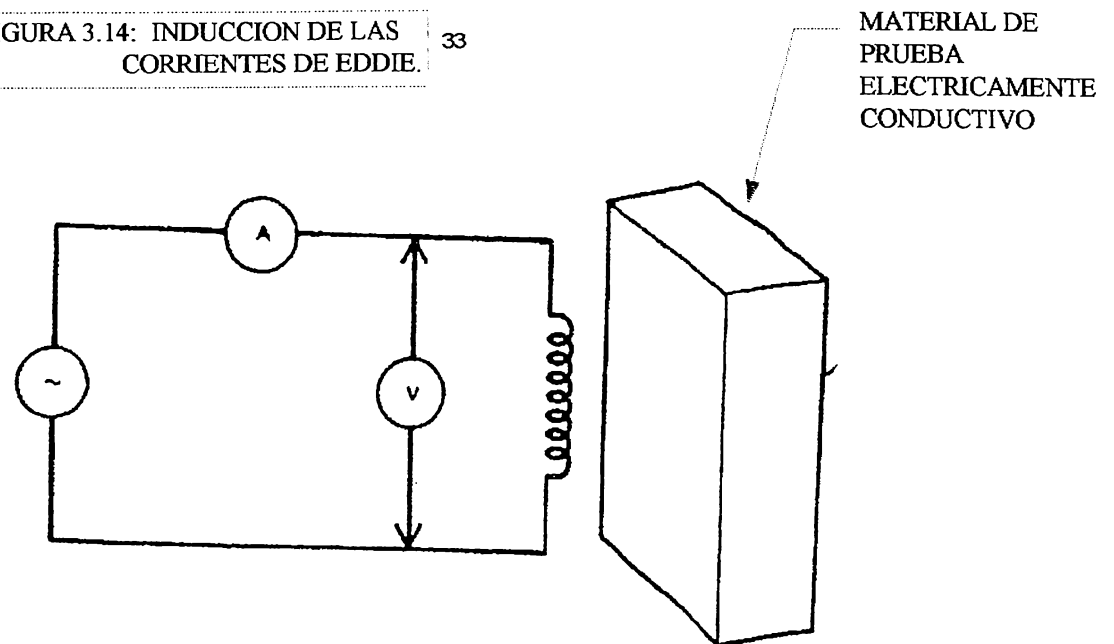


FIGURA 3.13: UN CIRCUITO CON VOLTAJE AC. ³²

³¹ ³² Tomado de "Standard Definition of Terms Relating to Electromagnetic Testing" (ASTM E-268) , Estados Unidos 1974.

FIGURA 3.14: INDUCCION DE LAS
CORRIENTES DE EDDIE ³³



Variables de las corrientes de Eddie: En el circuito primario (de prueba), la frecuencia y la magnitud de la fuente de voltaje y la resistencia y la autoinductancia del circuito de prueba son las variables de entrada básicas. Estas variables además del número de vueltas en la bobina y la forma y el tamaño de la bobina, determinan la fuerza y forma del campo electromagnético que se expande y colapsa alrededor de la bobina de prueba. La orientación y localización de esta bobina con respecto al material probado es un importante parámetro en el que entre más cerca se encuentre la bobina del material probado, mayor es la mutua inductancia que es establecida. Estas variables ayudan a determinar fuerzas magnéticas inducidas dentro del espécimen de prueba. El espesor y otras características geométricas del espécimen de prueba puede afectar la cantidad de corriente inducida en el espécimen por un circuito de pruebas. La conductividad eléctrica del material también afectará la cantidad de corriente inducida en el mismo como también la permeabilidad magnética que puede interferir con las corrientes de Eddie.

Limitaciones de las corrientes de Eddie: La inducción electromagnética de las corrientes de Eddie se opone a la inducción electromagnética de la bobina de prueba. Esta oposición tiene el efecto de restringir las corrientes de Eddie a la superficie o cerca de la región superficial del espécimen de pruebas. Cualquier corriente de Eddie presente en la superficie del material de pruebas reducirá el efecto de inducción de la bobina de pruebas en las regiones más profundas del material en una razón exponencial. Por tal razón, la inspección por corrientes de

Eddie debe ser limitada normalmente para localizar aquellas variables que están cerca o en la superficie de las partes inspeccionadas.

PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.

Los procedimientos de inspección de este método se encuentran contenidos en el MIL-HDBK-728/2.

- a) Inspección de la parte : La superficie de la parte que es inspeccionada debe ser totalmente limpiada de tal manera que la sonda de la corriente de Eddie pueda tener un buen contacto. El polvo, carbón o depósitos de grasa deben ser limpiados con solventes y si la parte es de un acero con alto tratamiento térmico, usar solamente un solvente aprobado.
- b) Calibración del medidor de Corrientes de Eddie. Los siguientes pasos subrayan el proceso básico requerido para la calibración de un medidor de corrientes de Eddie:
 - conecte la sonda al instrumento,
 - encienda el instrumento dejando la sensibilidad al mínimo
 - deje calentar el equipo de unos 20 a 30 minutos.
 - Coloque el control de frecuencia al No. 1 y rote la perilla "Lift off" en sentido horario hasta parar.
 - Rote el control de Balance de tal manera que se lea entre 100 y 200 microamps.
 - Ajuste el collar de la sonda de tal manera que la bobina sensora se extienda aproximadamente a la mitad de la parte.
 - Coloque la sonda en el orificio diseñado para tal efecto y rote la perilla "Lift off" en sentido antihorario y note la deflección reversa en el medidor. Si esto sucede, continúe 3 pasos más adelante. Para sondas de superficie, coloque la bobina en superficies planas y continúe con el procedimiento.
 - Si la deflección del medidor no se lleva a cabo, regrese la perilla "Lift off" a la posición completamente en sentido horario e incremente el Control de Frecuencia un paso más (al No.2). Ajuste el control de balance si fuera necesario para mantener la aguja del medidor en escala.
 - Repita el paso anterior hasta que la dirección del medidor tenga una deflección reversa.
 - Alternadamente coloque la sonda adentro y remuévala del orificio a ser probado; note la dirección y cantidad de deflección del medidor. Después de cada remoción, rote el control de "lift off" hasta que el medidor lea aproximadamente lo mismo cuando la sonda es completamente removida que como cuando la sonda está completamente adentro del orificio. (Ajustes menores del control de balance podría ser necesario para traer la aguja del medidor en escala).
 - incremente la sensibilidad y repita el paso anterior. Haga esto hasta que el control de SENSIBILIDAD esté completamente en sentido horario usando el control de BALANCE para mantener la aguja del medidor en escala.

- Con la sonda en el orificio, presione hacia los lados en la sonda de tal manera de forzar a la bobina sensora alejarse de las paredes del orificio. Note el grado de deflección.
- Rote el control de "Lift off" en sentido horario y repita el primer paso. La deflección en este caso será menos. Repita esto hasta que el medidor lea lo mismo cuando esté en contra de la pared del orificio como lo hace cuando es removido de la pared uno o dos milésimas de pulgadas. En este punto, balanceo para el "lift off" es completo. La elongación del orificio y la rugosidad de la superficie tendrá un menor efecto en el medidor, sin embargo, la sensibilidad a las quebraduras es mayor que con cualquier otro método de ajuste de "lift off".
- Una vez la sonda ha sido balanceada apropiadamente, el orificio es inspeccionado al rotar la sonda de tal manera que la bobina recogedora pase sobre todas las superficies. Si un quebradura existe, el instrumento mostrará una deflección aguda cuando la bobina pase por ella. Esta deflección aguda no debe ser confundida con los lentos cambios menores que ocurrirán por cambios menores en la conductividad del material.
- Ajustes menores del control de Balance podría ser requerido para traer la aguja del medidor a escala cuando la bobina alcance la superficie o filo del orificio.
- Para la calibración de la sonda de superficie, coloque una simple hoja de papel (0.002 a 0.003 pulgadas de espesor) entre la sonda y la muestra notando la cantidad y dirección de la deflección métrica. Rote el control de "Lift off" hasta que el medidor lea aproximadamente lo mismo cuando la sonda esté en el papel como cuando esté en la muestra.

ÁREA DE INSPECCIÓN

Después de una calibración del medidor, proceda como sigue:

- 1) Usando la sonda de superficie, trabaje hacia adelante y hacia atrás sobre el área sospechosa o usando la sonda interna, rótelea adentro del orificio y hacia arriba y hacia abajo de las paredes.
- 2) Cuando un área dañada es encontrada con quebraduras, inclusiones, corrosión, etc, la aguja del medidor de repente deflejará debido a un cambio brusco en la conductividad del material.
- 3) Al trabajar la sonda alrededor del área, observando la deflección de la aguja del medidor y con la ayuda de una alarma audible, será posible obtener una localización precisa del área dañada que puede ser marcada. Personal inexperto no tendría que interpretar dichos resultados por que una mala interpretación de los mismos pueden resultar que partes con vida útil sean rechazadas y partes defectuosas que sean aceptadas.

3. 5. 2. APLICACIONES DEL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR CORRIENTES DE EDDIE

Las aplicaciones por corrientes de Eddie son extensivas por ser empleadas en las materias primas de las plantas manufactureras para partes pequeñas o grandes. Por corrientes de Eddie se puede medir de manera muy confiable el espesor de pintura o coberturas, la separación de aleaciones, los valores de conductividad eléctrica y cualquier propiedad electromagnética o variable geométrica que pueda ser considerada. La principal limitación es de que el material debe de incluir al menos un elemento que es eléctricamente conductor siendo la otra limitación que se limita la profundidad de penetración al ser más concentrada en la superficie que bajo ella.

En un aeroplano, cuando se llevan a cabo estas inspecciones cerca de áreas de tanques de combustibles, el aeroplano tiene que ser vaciado de combustible. Sin embargo, no es necesaria otro tipo de preparación cuando se llevan a cabo inspecciones por medio de corrientes de Eddie. La parte que es inspeccionada debe de limpiarse totalmente de depósitos de polvo, grasa, carbón y polvo. En un aeroplano, las inspecciones más representativas por Corrientes de Eddie son a) Rines de las llantas de los trenes de aterrizajes, b) Orificios de los sujetadores en todas las pieles metálicas de todo el fuselaje, c) Disco de compresor del motor de turbina que son partes que deben de ser inspeccionadas por quebraduras que se propagarían al disco de manera radial, d) Piel del fuselaje en donde se podrían encontrar quebraduras en sujetadores o en soldaduras, e) en trenes de aterrizaje por la inspección a los baleros y el "housing" del mismo en el soporte de la viga y f) en el estabilizador horizontal en las cuerdas superiores de los largueros traseros.

3.5.3. EQUIPOS DE CORRIENTES DE EDDIE.

Una gran variedad de instrumentos comerciales de pruebas por corrientes de Eddie están disponibles. Ellos están diseñados para medir, detectar o medir parámetros específicos del material que se prueba como la conductividad, fallas y espesores.

El equipo de corrientes de Eddie consiste esencialmente de una sonda y un instrumento electrónico. La sonda contiene una bobina usada para inducir la corriente eléctrica en la parte que se inspecciona mientras que el equipo electrónico contiene la circuitería que mide las variaciones en el flujo de la corriente eléctrica y graba o guarda estos cambios en medidores o en un tubo de rayos catódico o una combinación de estos. Muchos tipos de equipos están disponibles para la inspección por corrientes de Eddie como los portátiles,

transistorizados, instrumentos operados por baterías para la medición de conductividad tal como se muestran en la siguiente figura en la que 1: Estándar de alta conductividad, 2: Estándar de baja conductividad, 3: Medidor, 4,5 y 6: perillas ajustadoras, 7: interruptor, 8: sonda y 9: dial de conductividad.

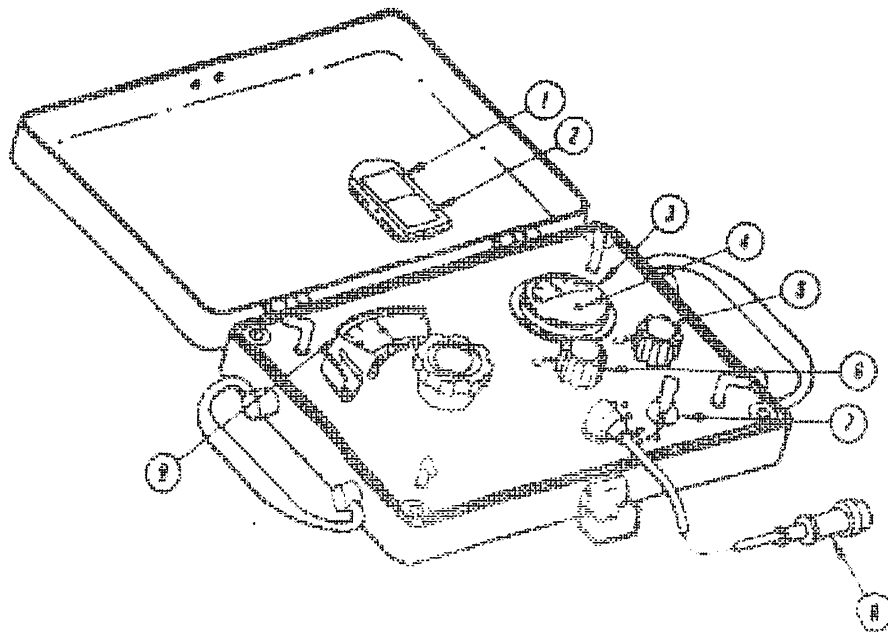


Figura 3.15: Equipo de Corrientes de Eddie portátil.³⁴

En los instrumentos típicos usados para la inspección en un banco de pruebas que analizan los materiales, los tipos de sondas recomendados son:

- 1) Sondas con bobinas adentro de la misma (internas) : las cuales son insertadas en las cavidades interiores de la sonda por orificios taladrados o tubos huecos.
- 2) Sondas con bobinas externas: las cuales son colocadas en la superficie del objeto que se prueba.

El tamaño y la forma de la bobina gobierna en gran parte la resolución de las pruebas por lo que las sondas (que contienen a las bobinas) forman una parte directa del circuito de pruebas teniendo a su vez un efecto directo en la frecuencia aplicada al mismo circuito. Hay un tercer tipo de sondas y es la bobina de superficie como se muestra a continuación en la figura 3.16 con los tipos anteriores de bobinas.

³⁴

Tomado de "Nondestructive testing for Aircraft" (AC 43-3), Capítulo 5 pág 19. Renton, WA. Estados Unidos.

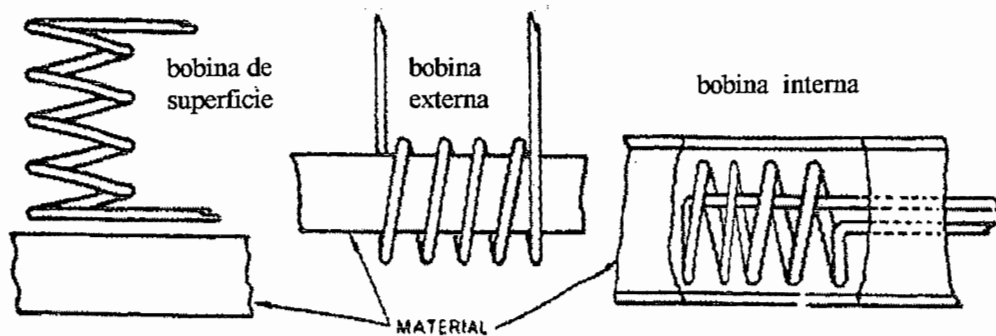


Figura 3.16: Tipos de bobinas de Corrientes de Eddie.³⁵

Debe de asegurarse que el equipo de corrientes de Eddie sea diseñado para cumplir con los requerimientos del trabajo de inspección. Han habido casos donde equipo incorrecto ha sido empleado al haber equipos diseñados para ser usado en materiales magnéticos, otros en materiales no magnéticos y algunos modelos usados para ambos tipos de materiales. Las especificaciones del fabricante deben siempre ser consultadas para asegurar que el equipo de corrientes de Eddie tiene la capacidad de cumplir con determinada aplicación de inspección.

Instrumentos absolutos y diferenciales: Básicamente, los 2 tipos de instrumentos son los diferenciales y los absolutos. El número de sondas de prueba asociadas con un instrumento es indicativo de su tipo. Por ejemplo, un instrumento diferencial tiene 2 idénticas sondas de prueba (bobinas) que son eléctricamente opuestas mientras que el instrumento de pruebas absoluto tiene solo una bobina de prueba o sonda asociada con ella.

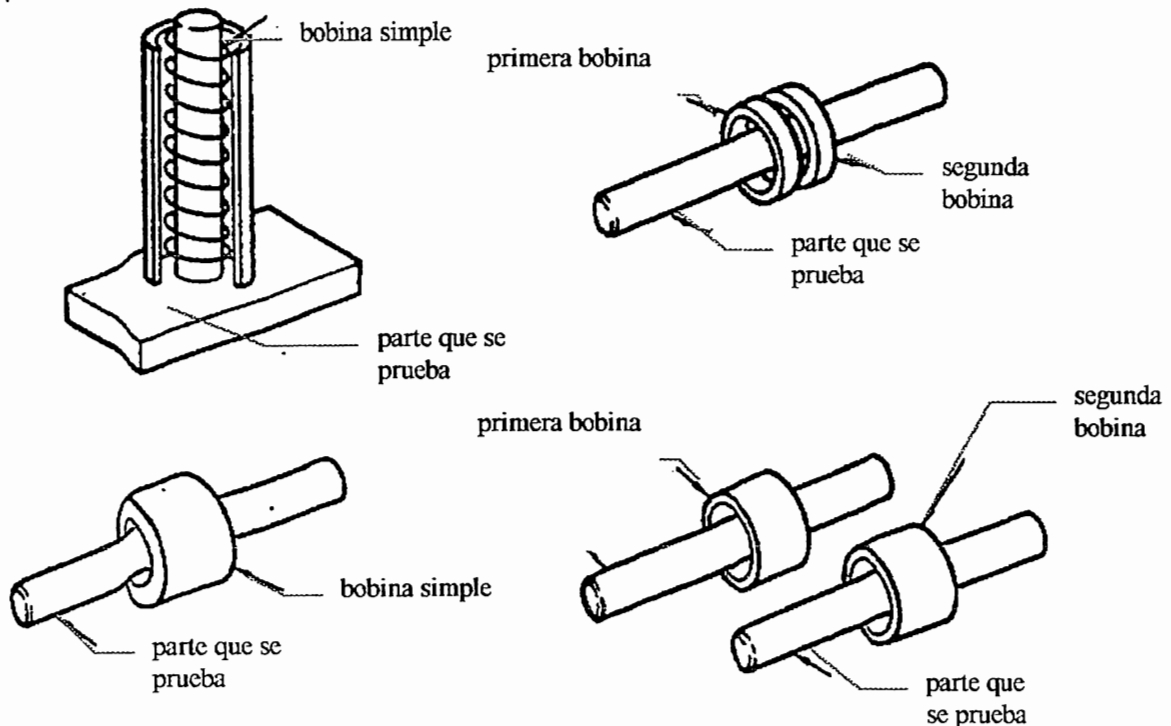


Figura 3.17: Bobinas absolutas y diferenciales³⁶

³⁵ ³⁶ Tomado del MIL-HDBK-728/2 figura 2.3 (1) y 2.3 (2) Capítulo 2: "Equipo y Métodos".

En los instrumentos diferenciales la señal desplegada es la diferencia entre las variables que simultáneamente afectan a las 2 bobinas mientras que en los instrumentos absolutos es el cambio en la señal de una simple bobina que varía de una posición a otra y que debe ser atribuida a diferencias en las variables que se prueban. Ambos instrumentos producen similar información acerca de las propiedades de los items de prueba pero sus características de operación son levemente diferentes. Esta diferencia en la operación juega un rol importante en la selección de un instrumento de corrientes de Eddie para una aplicación dada.

Equipos modernos: Los avances en microprocesadores, computadoras y en la automatización han afectado grandemente a los equipos que se disponen actualmente para las inspecciones por corrientes de Eddie. Básicamente la forma de obtener la información es la misma, lo que cambia es la facilidad de la calibración, del "seteo" e instalación del equipo, de los cálculos y la pantalla que se ha incrementado grandemente con guardado y pantallas digitales. Un avance importante en la tecnología por corrientes de Eddie es la miniturización de las sondas que aumenta la sensibilidad del equipo para discontinuidades o defectos.

3.6 INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO

Un haz de sonido es similar a uno de rayos X en el sentido de que ambas ondas transmiten energía. Una de las mayores diferencias es que los rayos X pasan sin dificultad por el vacío mientras que el sonido requiere un medio conductor para su transmisión.

La inspección por ultrasonido utiliza una onda de sonido de alta frecuencia como medio de detectar discontinuidades en partes o componentes. Esto es llevado a cabo al dirigir una onda de alta frecuencia a través de la parte y viendo el patrón de respuesta en un osciloscopio (tubo de rayos catódicos). Al examinar las variaciones de un patrón de respuesta, se pueden detectar discontinuidades, fallas o condiciones de frontera. La inspección por ultrasonido en un avión es útil en las juntas de los sujetadores o áreas susceptibles alrededor de los orificios de los sujetadores. Las ondas de sonido de alta frecuencia son de corto largo de onda y relativamente con niveles de baja energía para prevenir daños a la estructura. El uso del equipo de ultrasonido bajo condiciones normales no requiere de precauciones especiales de seguridad para el personal.

3.6.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE ULTRASONIDO.

Ultrasonido es el sonido con una frecuencia mayor que 20,000 ciclos/seg (Hz). Estas altas frecuencias están producidas al someter un material cerámico especial, un cristal piezoeléctrico, a un bajo voltaje pico. Los cristales podrían

estar hechos de cuarzo, de sulfato de litio, pero más comúnmente son cerámicas sintéticas de titanio de bario, o titanio de zirconato de plomo. La prueba por ultrasonido usa el efecto piezoeléctrico para generar las vibraciones de ultrasonido que sostiene que los cristales cuando están sometidos a una carga eléctrica alterna se expande y contraen bajo la influencia de estas cargas desarrollando a su vez cargas eléctricas en sus caras. El centro del sistema de pruebas por ultrasonido es la conversión de la energía eléctrica en vibraciones mecánicas y la conversión de la energía mecánica otra vez a energía eléctrica. El campo eléctrico creado por el pico de voltaje, realinea los elementos cristalinos (dipolos) en el cerámico (material piezoeléctrico) por lo que cambia repentinamente el grosor de los cristales (de unos pocos micrones). El repentino cambio en el espesor empieza una serie de vibraciones que producen ondas de sonido.

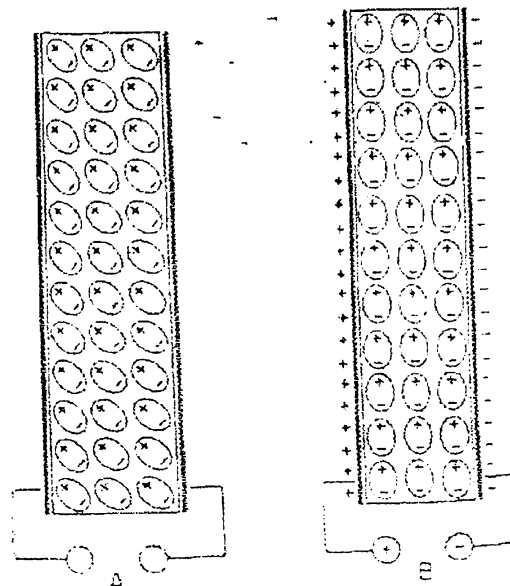


Figura 3.18: Un campo eléctrico realinea los dipolos en el cristal piezoeléctrico ³⁷

El cristal piezoeléctrico está contenido en el frente de un transductor, una caja plástica que protege el cristal de un golpe mecánico y provee un aislante sónico y eléctrico. El transductor puede ser usado para generar múltiples pulsos cortos de sonido y cumple con la segunda función de recoger las señales de retorno (ecos) en su etapa de relajación cuando no genera los pulsos. Cada transductor vibra a su propia frecuencia natural llamada frecuencia de resonancia cuando es golpeado con los picos de cortos voltajes. Los cristales piezoeléctricos pueden ser dañados por el calor por lo que el cristal al llegar arriba de su temperatura crítica, llamada temperatura de Curie, pierde sus propiedades piezoeléctricas (de polarización) y llega a convertirse a un simple pieza de cerámica sin valor. El factor Q es una medida de la pureza del tono y del tiempo que le toma al transductor parar de vibrar. Un transductor que es a la vez transmisor y receptor, si es de un alto factor Q produce un sonido muy puro pero

³⁷ Tomado de "Ultrasonic testing for Aircraft" (AC 43-7), Capítulo 2 pág 3. Renton, WA. Estados Unidos.

en un rango estrecho de frecuencias pero un transductor con bajo factor Q producirá todo el espectro de sonido en un amplio rango de frecuencias.

Un haz ultrasónico es una serie de ondas longitudinales que transmiten energía. La longitud de la onda longitudinal es la distancia entre dos bandas de compresión o de relajación y es representada por λ . Ellos viajan a una velocidad promedio de 1540 m/sec a través de un cuerpo siendo independiente la velocidad de la frecuencia. La velocidad del sonido depende ya sea de la densidad o de la compresibilidad del medio conductor y es igual a la frecuencia por la longitud de onda. Esto es, entre menos compresible sea un material, más rápidamente transmite el sonido por lo que los líquidos y sólidos propagan más fácil el sonido que los gases. Como un haz de sonido pasa a través del cuerpo, el haz es atenuado o reducido en intensidad por una combinación de difusión, reflexión, refracción y absorción. El haz de sonido es rápidamente atenuado por dispersión en la zona lejana llamada zona Fraunhofer mientras que la zona cercana al transductor es conocida como la zona Fresnel. La reflexión ocurre en las interfaces del objeto siendo el ángulo de incidencia y el reflejado iguales. La cantidad de reflexión depende de la diferencia de la impedancia acústica de las 2 superficies y el ángulo de incidencia del haz. La impedancia acústica es el producto de la densidad y velocidad del sonido en el medio conductor.

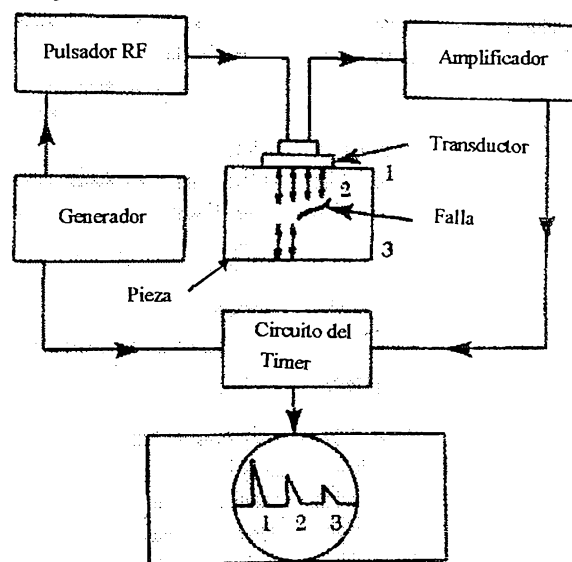


Figura 3.19: Diagrama de Bloques de un sistema básico de pulsos y reflejos³⁸

Cuando la velocidad del sonido cambia cuando pasa de un medio a otro, la frecuencia permanece constante pero la longitud de onda cambia. Si el frente de onda golpea al segundo medio a un ángulo, el sonido es refractado o doblado. El grado de refracción depende del ángulo de incidencia y la diferencia en la velocidad del sonido en los 2 medios. La absorción es la conversión del sonido en calor que depende de la frecuencia del sonido y de la viscosidad y el tiempo de relajación del medio conductor. La Absorción es directamente proporcional a la frecuencia pero sin poder utilizar alta frecuencia para examinar partes gruesas.

³⁸ Tomado de "Ultrasonic testing for Aircraft" (AC 43-7), Capítulo 5, pág 11, fig. 21. Renton, WA. Estados Unidos.

Una onda longitudinal es propagada por múltiples partículas (moléculas) que oscilan hacia adelante y hacia atrás para producir bandas de compresión y relajamiento en el medio conductor. Cuando estas bandas son esparcidas de regreso a los cristales piezoeléctricos como ecos, ellos cambian el espesor de los cristales los cuales producen una señal eléctrica siendo esta señal la base de la imagen de ultrasonido. El sonido es transmitido en cortos pulsos, usualmente de 1000 por segundo de cerca de una millonésima de segundo de duración. Entre los pulsos, el transductor actúa como receptor guardando todas las señales de retorno o ecos. El tiempo transcurrido entre el inicio de un pulso y el retorno de un eco es convertido en profundidad en todos los modos de imágenes posibles.

Estas pueden ser desplegadas en diferentes modos como el modo A que despliega una imagen estática de una sola dimensión que muestra los ecos como picos que se proyectan de una línea de base. La línea de base identifica el eje central del haz. El modo TM es similar al modo A excepto que los ecos están reordenados como puntos en vez de picos y es utilizado para estudiar partes en

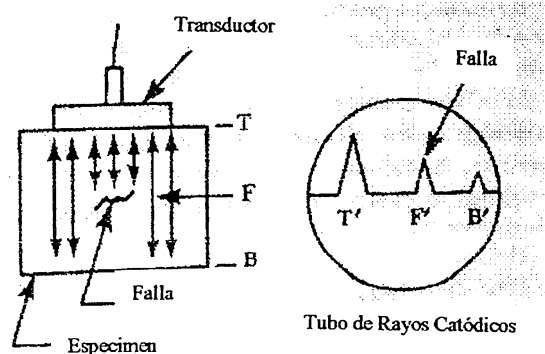


Figura 3.20: Tipo de onda longitudinal.³⁹

movimiento. La movilidad es guardada en una grabadora de gráficos de tiras o barriendo los puntos a través de un osciloscopio durante un tiempo de exposición. El modo B es una imagen bi-dimensional de la producida por el movimiento del transductor ya sea longitudinal o en una sección transversal. Controles múltiples son provistos para aumentar señales débiles siendo lo más importante el tiempo de ganancia del compensador el cual logarítmicamente refuerza los ecos de profundidades seleccionadas después de un intervalo ajustable.

3.6.2 APLICACIONES DE LAS PRUEBAS POR ULTRASONIDO.

El ultrasonido es un método no destructivo rápido y confiable que emplea ondas de sonido de alta frecuencia electrónicamente producidos que penetrarán los metales, líquidos y muchos otros materiales a velocidades de varios miles de pies por segundo. Por el hecho de que las técnicas de ultrasonido son fenómenos mecánicos básicamente, ellos son particularmente adaptables en la determinación de la integridad estructural de diversos materiales. Su principio de aplicación consiste de:

³⁹ Tomado de "Ultrasonic testing for Aircraft" (AC 43-7), Capítulo 5, pág 11, fig. 22. Renton, WA. Estados Unidos.

- a) Detección de fallas
- b) Medición de espesores
- c) Determinación del módulo elástico
- d) Evaluación de la influencia del procesamiento de variables en el espécimen.

Entre las características deseables del método de ultrasonido se encuentran:

- a) Versatilidad en la que al menos un acceso a una superficie del espécimen es necesitado como también el equipo de pruebas debe de ser llevado al lugar necesitado.
- b) Una rápida respuesta es requerida permitiendo una rápida inspección con resultados inmediatos.
- c) Precisión en la localización de la falla y la estimación del tamaño de la misma.
- d) Gran poder de penetración permitiendo la examinación de secciones extremadamente gruesas.
- e) Alta sensibilidad permitiendo la detección de defectos diminutos.

EJEMPLOS DE APLICACIONES

Las siguientes son unas pocas aplicaciones las cuales indican las capacidades del ultrasonido tal como se practica hoy en día:

- a. Utilizado para detectar costuras, delaminaciones, inclusiones, rajaduras, quebraduras y otros defectos en láminas de acero de cerca de un cuarto de pulgadas a 12" de grosor. También son detectadas discontinuidades tan pequeñas como del 0.5% del grosor de las mismas láminas como también delaminaciones abajo de 0.00002" de grosor.
- b. El ultrasonido es empleado para localizar porosidades, rupturas internas e inclusiones no metálicas en barras y lingotes con tamaños de hasta 48" de diámetro.
- c. El ultrasonido detecta quebraduras, orificios, insuficiente penetración, falta de fusión y otras discontinuidades en soldaduras. El ultrasonido es usado para evaluar la calidad de pegado en juntas y ensamblajes con estructura de "panal de abeja" propio de compuestos.
- d. El ultrasonido es empleado para inspeccionar forjados como ejes de turbina y rotores.

LIMITACIONES

Hay muchos factores que limitan la aplicación del ultrasonido. Entre los más importantes tenemos la sensibilidad, la resolución y la discriminación del ruido. La Sensibilidad es la habilidad del instrumento para detectar pequeñas cantidades de energía reflejadas por una discontinuidad. La resolución es la habilidad del instrumento para detectar fallas cercanas a la superficie que se prueba o separar y distinguir las indicaciones de varios defectos que ocurren juntas dentro del mismo espécimen. La discriminación del ruido es la capacidad del instrumento para diferenciar entre las señales provenientes de defectos o ruido parásito de naturaleza eléctrica o acústica.

Estas variables en cambio son afectadas por otras como la frecuencia y la energía de pulso. Por ejemplo, cuando la frecuencia es incrementada, la sensibilidad aumenta también. Con el incremento de la sensibilidad, pequeñas heterogeneidades dentro del material llegarán a ser detectables lo que incrementará el nivel de ruido sin poder discriminar señales. Con el incremento de la energía de pulso, el ruido del material incrementará y la resolución se reducirá. En adición, la geometría y condiciones del material de pruebas podrían limitar la aplicación de la técnica de ultrasonido. Por ejemplo, el tamaño, el contorno, la complejidad, la orientación del defecto y la indeseable estructura interna como el tamaño del grano, porosidad, contenido de inclusión y dispersas precipitaciones finas. Otros problemas como la rugosidad limitarán también el ultrasonido.

REQUERIMIENTOS

Debido a varias condiciones las cuales pueden restringir la aplicación del ultrasonido, una inspección exitosa no puede llevarse a cabo a menos que se cuenten con operadores capacitados y experimentados, que se tenga una clara definición del problema que se quiere probar, referencias estándares adecuadas, especificaciones de pruebas prácticas, criterio de aceptación realístico, récords de prueba bien detallados y la inspección y calibración frecuente del equipo. La condición de la superficie de la parte debe ser determinada al conocer de antemano si es una superficie áspera y rugosa por ser difícil su inspección y poseer un patrón de respuesta inestable. Se requiere la remoción de corrosiones por leves que sean para proveer superficies lisas al igual que la pintura y polvo por absorber la primera la mayoría de la energía de sonido.

INSPECCIONES REPRESENTATIVAS EN UNA AERONAVE: Corrosiones en los tanques integrales de combustibles de alas, Inspección de las orejas de sujeción de las juntas de torsión del tren principal, Rines de las llantas principales y de nariz , Juntas de torsión del tren principal de aterrizaje, Motores P&W JTXD, Paneles de las alas y en las ventanas en las cabinas de pasajeros y pilotos.

3.6.3 EQUIPO DE ULTRASONIDO

Hay 2 métodos básicos de inspección por ultrasonido y ellos determinan el equipo requerido. El primer método es la inspección por inmersión y el segundo es la inspección por contacto. El equipo por inmersión es pesado y estacionario mientras que el equipo de contacto es más pequeño y portátil. Los requerimientos de inspección en esta sección están confinados al tipo de inspección de campo en el que se requiere solamente el equipo de inspección de contacto.

COMPONENTES

Los componentes básicos de un detector de falla por ultrasonido consiste de:

- Una fuente de poder para producir los variados voltajes requeridos.
- Un temporizador o generador cuya función es empezar y sincronizar todas las otras funciones.
- El pulsador que genera un pico de alto voltaje y de corta duración para mantener el cristal en vibración por resonancia.
- El transductor o cristal que transmite una onda de sonido de alta frecuencia en la pieza que se prueba, recibe el eco reflejado y lo convierte en impulsos eléctricos.
- El amplificador o receptor amplifica y prepara apropiadamente la señal eco para desplegarla en pantalla.
- El generador de barrido el cual empieza a trazar una línea horizontal a través de la pantalla del tubo de rayos catódicos al mismo tiempo que el pulso pone al transductor en acción.
- El generador marcador el cual produce marcas de tiempo tales como ondas cuadradas para presentarlas simultáneamente con el barrido horizontal para ayudar en la medida de profundidad.
- El tubo de rayos catódicos u osciloscopio el cual es el instrumento que presenta el cuadro de las señales reflejadas.

Los materiales del transductor suelen ser de 3 tipos los que utilizan los fabricantes como son los cristales naturales de cuarzo, sulfato de litio y cerámicas cristalinas polarizadas.

REQUERIMIENTOS DE LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO.

Esta inspección debe ser llevada únicamente por personal calificado quienes son los que pueden operar los equipos y seguir los procedimientos.

Bloque de Pruebas Estándar. El equipo de ultrasonido es calibrado usando un bloque de pruebas estándar del mismo material y medida de la parte a ser probada. Bloques recomendados de pruebas para inspecciones pueden ser localmente fabricados de materiales adecuados. La figura 13 lista materiales y fabricaciones de bloques de pruebas que son recomendados para la calibración de equipos de inspecciones. Cuando es requerido, bloques de pruebas especializados e instrucciones de fabricación se podrán encontrar con las instrucciones de inspección.

MATERIAL	ALEACIÓN	TRATAMIENTO	APUNTES
ALUMINIO	2014 O 7075	F, T6	Para todas las Aleaciones con base de Aluminio.
MAGNESIO	AZ80A	F	Para todas las aleaciones con base de Magnesio.
TITANIO	T1 6AL-4V	templado	Para todas las aleaciones con base de Titanio.
ACERO	AISI 4130 O AISI 4340.	templado templado	Para todas las aleaciones de acero SAE-AISI series 1000, 2000, 3000 y 4000.
ALEACIONES DE NICKEL	Rene'41 por el BMS 7-96.	Solución tratada térmicamente.	Para todas las aleaciones con base de Nickel, Cr, Mo y Co.
ACERO COLADO	Acero colado por QQ-S-681 clase4B1	Normalizado	Para todas las partes de acero colado.

Tabla 3.7: Bloques de prueba estándares.⁴⁰

CALIBRACIÓN DEL EQUIPO. El equipo de pruebas de ultrasonido es calibrado cada cierto tiempo según las regulaciones del fabricante o agencia reguladora. La sensibilidad del equipo es ajustada hasta que la apropiada indicación de respuesta es obtenida en el tubo de rayos catódicos de aproximadamente 50% de saturación.

⁴⁰ TOMADO DEL CAPITULO 6 DE "ULTRASONIC TESTING FOR AIRCRAFT" AC 43-7, RENTON, WA 98059-3153 E.E.U.U.

CAPITULO IV

SELECCION DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

4.1 GENERALIDADES

En el campo de las Pruebas No Destructivas (PND) hay una cantidad numerosa de métodos básicos de uso común en las industrias, que son aplicados para todos los tipos de materiales en cualquier tamaño y forma, pero en ciertas ocasiones al enfrentar un problema no muy común, para localizar la más importante discontinuidad o desperfecto, podríamos no encontrar la PND más adecuada que nos dé la información precisa sobre las condiciones de servicio del objeto examinado.

El propósito de los cuadros de comparación de los métodos de pruebas que se presentan en éste capítulo, están diseñados para ser la primera fuente de información a revisar en el momento de seleccionar el uso de alguna técnica PND. Los cuadros sólo son indicativos y en ningún momento son conclusivos. Los datos de tales cuadros son promedios de opiniones de expertos.

Entre las condiciones para las pruebas, se asume que el equipo usado será el apropiado para su aplicación, que se encuentra en buenas condiciones y calibrado. Los materiales de pruebas (placas y películas radiográficas, partículas magnéticas o penetrantes) deberán ser de calidad estandarizada y uniforme con el tipo y grado correcto para el trabajo específico que desarrolla. El personal que ejecuta las pruebas también deberá tener un entrenamiento teórico y práctico suficiente para ser capaz de efectuar las pruebas, operar el equipo e interpretar los resultados.

Algunas pruebas deben ser aplicadas bajo condiciones normales de uso y sus resultados no deben ser comparados con pruebas similares bajo condiciones controladas en un espacio confinado. Por ejemplo, algunas pruebas pueden ser llevadas a cabo en un laboratorio con un control extremadamente cerrado de todas las variables, por lo que resultados que se obtengan pueden ser diferentes a los que se obtengan en condiciones de uso en el campo.

Los cuadros muestran los resultados en situación de uso normal con el equipo apropiado.

4.2 BASES DE LOS CUADROS DE PND

Los primeros tres cuadros que se presentan fueron preparados por numerosas autoridades en Pruebas No Destructivas y los diferentes métodos de

pruebas han sido categorizados por ellos mismos. Los cuadros es una mezcla de muchas opiniones compuestas basadas en varias experiencias de los contribuidores por lo que no son infalibles.

La intención de los cuadros es el de ser una guía de las habilidades generales de cada método de PND. Se espera que el usuario usualmente tenga problemas tratando de localizar algún tipo de discontinuidad en un tipo específico de material por lo que estos cuadros están diseñados para ayudar a determinar que PND estándar podría ser usada para localizar dicha anomalía.

La discontinuidad, el tipo y forma del material están ubicadas en la lista horizontal de las discontinuidades en el tope superior de los cuadros. Las columnas verticales en el extremo izquierdo de los cuadros listan los métodos de pruebas no destructivas generales y las mayores variaciones en los métodos de pruebas.

La tabla 4.1 cubre todos los metales pesados o magnéticos, mientras que la tabla 4.2 cubre los metales ligeros o no magnéticos. La tabla 4.3 cubre algunos materiales no metálicos por lo que esta división es principalmente para ayudar a mostrar las mayores diferencias en los métodos radiográficos, partículas magnéticas y corrientes de Eddie. En cada cuadro se ha hecho el intento de mostrar las formas de fabricación mayores de materiales como los colados y forjas con las mayores formas como barras, láminas, tubos y placas.

Los tipos de discontinuidades específicas listadas son las más típicas en cada forma de fabricación y de material. Algunas discontinuidades y las variaciones frecuentemente observadas con los métodos de PND están listados bajo un encabezado general. Las quebraduras están divididas en minúsculas y de tamaño normal. La intención es mostrar que mientras varios métodos pueden encontrar quebraduras en general, algunos métodos son más sensitivos para quebraduras todavía más minúsculas.

Las siguientes tablas (tabla 4.4 a la tabla 4.11) presentan los Objetivos principales y específicos de las técnicas de Pruebas No Destructivas agrupadas en cada una de los 8 categorías de clasificación según el estadounidense Comité Nacional Asesor de Materiales de acuerdo a los atributos medidos y detectados en cada una de ellas.

TABLA 4.1 CUADRO GENERAL DE COMPARACION PARA PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS DE METALES MAGNETICOS (PESADOS).

Clasificación general de métodos de pruebas	MAYORES VARIACIONES EN LOS METODOS DE PRUEBA	GENERAL	LAMINAS	BARRAS/TUBOS	COLADOS	FORJAS	SOLDADURAS	PROC.	SERVICIO
		QUEBRADURAS DIMINUTAS DE SUPERFICIE QUEBRADURAS NORMALES DE SUPERFICIES QUEBRADURAS INTERNAS VACIOS INTERNOS ESPESORES VARIACIONES METALURGICAS	ESPESORES DELAMINACIONES HOYOS	COSTURAS CAÑERIAS ACOPLES INCLUSIONES	PUNTOS FRIOS QUEBRADURAS SUPERFICIALES ARRUGAS INTERNAS HOYOS (POROSIDAD) LEVANTAMIENTO DE NUCLEO (ALMA)	JUNTAS INCLUSIONES REBABS INTERNAS HOJUELAS INTERNAS QUEBRADURAS	QUEBRADURAS POR ARRUGAS INCLUSIONES FALTA DE FUSION POROSIDAD FALTA DE PENETRACION	QUEBRADURAS POR TRATAMIENTOS TERMICOS QUEBRADURAS POR MAQUINADO	QUEBRADURAS POR FATIGA CORROSION POR ESFUERZOS AMPOLLAMIENTO ADELGAZAMIENTO PUNTOS DE CORROSIONES
Pruebas de radiación penetrante	radiografía de película fluoroscopia radioisótopos	I A A E A A I I P A I I I A A E A A	E I E I I E E I E	P E E A I I I A P A A A	E A E E E A I A A A E E A E E E	A A A A A I I I I I I I E I A	E E E E E A A A A A E E E E E E	P I I I I I I I I	P A P A E I I I P P P P P A P
Ultrasonido y pruebas sónicas	reflexión pulsos haz normal	I I E E P P	P E E	I E E A	A I A A A	A E E E P	A A A A P	I I I	I I I I P
	onda cortante	I P E E I I	I A A	A I I A	A P A A I	P A E A A	A A A P A	A I I	A I I I P
	onda de superficie	I E I I I I	I I I	A I I I	P I I I I	P I I I A	A I I I I	A I I	A A I I I
	pulsos por inmersión haz natural	I I E E A A	A E E	I E A E	A I P A P	P E E A A	A A A A A	I I I	I I I I I
	haz con ángulo	I A E E I I	I A A	A P I A	A P P A I	I A E A E	A A A A A	A I I	A I I I I
onda de superficie	I A I I I I	I I I	A I I I	I P I I I	P I I I I	P I I I I	I I I	I P A I I	
transmisión completa	I I A E I A	I E I	A E E A	A I A A I	I E E E I	P A E A I	I I I	I P A I I	
resonancia	I I P P E I	E E P	P E P I	I I I P E	I I I I I	P I I I I	I I I	I I E E A	
frecuencia natural	I P I I I I	I I I	I I I I	I P P I I	I I I I P	I I I I P	I I I I I	I I I I I	
Pruebas de Partículas Magnéticas	corriente alterna(método húmedo)	E E I I I I	I A I	E P I A	E E I I I	E A I I E	E I A I I	E E	E E A I I
	corriente alterna(método seco)	A E I I I I	I A I	E I I I	E E I I I	E A I I E	E I A I I	E E	A A I I P
	corriente directa(método húmedo)	E E P I I I	I E I	E P I E	E E P I I	E E A A E	E P A I I	E E	E E I I I
	corriente directa(método seco)	A E A P I I	I E I	E I P I	E E A P I	E A A A E	E E E A A	E E	A A I I P
Pbas Electromagnéticas	corrientes de Eddie	A A I I P E	P I I	A I I I	P A P I P	P I I I P	A P A I P	E A	A I I A I
	Campo magnético	P A P P A E	A I I	E A A P	P A P P P	P P A P P	P P P I P	E A	A I I P I
	Por fuga de campo	A E A I I I	I I P	E I P P	P A I P I	A P P P A	E A P I A	E A	A I I I I
conducción de corriente DC	A A P P A P	A P P	A I P I	I A I I P	A I I I A	A I P I I	A A	A A I A I	
Pruebas con Líquidos Penetrantes	penetrantes visibles (dye)	A E I I I I	I A P	E A I I	A E I E I	A I I I E	E I I I I	E E	E E I I A
	penetrantes fluorescentes	E E I I I I	I A P	E A I I	A E I E I	A I I I E	E I I A I	E E	E E I I A
	partículas filtradas	I I I I I I	I I I	I I I I	I I I I I	I I I I I	I I I I I	I I	I I I I I
Otras	partículas filtradas	I I I I I I	I I I	I I I I	I I I I I	I I I I I	I I	I I I I I	

(E)EXCELENTE (A)ADECUADA (P)POBRE (I) INSATISFACTORIA

41 Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program",Cap.2 ,Parte 6 , pág. 91.

TABLA 4.2 CUADRO GENERAL DE COMPARACION PARA PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS DE METALES MAGNETICOS O LIGEROS. ⁴²

CLASIFICACION GENERAL DE LOS METODOS DE PRUEBAS.		GENERAL	LAMINAS Y PLACAS	BARRAS Y TUBOS	COLADOS	FORJADOS	SOLDADURAS	PROCEBOS	SERVICIO
VARIACIONES MAYORES EN LOS METODOS DE PRUEBAS.		QUEBRADURAS DE SUPERFICIES PEQUENAS QUEBRADURAS NORMALES DE SUPERFICIE QUEBRADURAS INTERNAS VACIOS INTERNOS ESPESORES VARIACIONES METALURGICAS	ESPESORES DELAMINACIONES HOYOS U ORIFICIOS	COSTURAS CAÑERIAS ACOPLES INCLUSIONES COLD SHUTS	QUEBRADURAS DE SUPERFICIE ENCOGIMIENTO INTERNO HOYOS (POROSIDAD) LEVANTAMIENTO DE NUCLEO	EMPALMES Y TRASLAPES INCLUSIONES REBABAS INTERNAS DELAMINACION INTERNA EN FORMA DE HOJUELAS QUEBRADURAS Y RAJADURAS	QUEBRADURAS POR ARRUGAMIENTO INCLUSIONES FALTA DE FUSION POROSIDAD FALTA DE PENETRACION	QUEBRADURAS POR TRATAMIENTO TERMICO QUEBRADURAS POR ESMERIL	QUEBRADURAS POR FATIGA (TERMICOS) CORROSION POR ESFUERZOS (STRESS) AMPOLLAMIENTO ADELGAZAMIENTO O DESGASTE PUNTOS DE CORROSION
Radiación penetrante	radiografía de placa o pellic.	A A E A A	E I E	P E E A	E A E E E	A A E A A	E E E E E	I I	A A P A E
	fluoroscopia	A A E A P	I I E	P A A A	A A E E E	P A A I A	E A A A A	I I	I I I P P
	radioisótopos	A A E A A	E I E	P E E A	E A E E E	A A E I A	E E E E E	I I	P P P A P
Ultrasonido	reflexión de pulsos haz normal	I E E A A	A A I	I E E A	A I A A E	A A E E A	I A I A I	I I	I I A A P
	onda cortante	I E E P P	I A A	A A P A	A A I A I	A A E E A	A A A P A	A P	A I I I P
	onda de superficie	A I I I I	I I I	A I I I	A I I I I	A I I E A	P I I P A	A A	I I I I I
	inmersión haz normal	A E E A E	A E A	A E P E	A I A A A	A E E E E	A E A A P	P I	P I A A P
	haz en ángulo	A E E P P	P A A	A P I P	A I I I I	P A E A A	A A E A A	P I	P I I I P
	onda de superficie	A I I I I	I I I	A I I I	I P I I I	P I I I I	P I I I I	A A	A P I I I
transmisión completa	I A E I A	I E I	A E E A	A I A A I	I E E E I	P A E A I	I I	I I P A I	
resonancia	I P P E I	E E I	I E P I	I I I P E	I I I I I	P I I I I	I I	I I E E A	
frecuencia natural	P I I I I	I I I	I I I I	I P P I I	I I I I P	I I I I P	I I	I I I I I	
Partícula Magnética	corriente alterna(método húmedo)	I I I I I	I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I	I I I I I
	corriente alterna(método seco)	I I I I I	I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I	I I I I I
	corriente directa(método húmedo)	I I I I I	I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I	I I I I I
	corriente directa(método seco)	I I I I I	I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I I I	I I	I I I I I
Pbas. Electromagnéticas	corrientes de Eddie	A E A P E E	A I I	E P P A	E E P P P	E P I I A	A P P I I	E E	E P I A I
	Campo magnético	I I I I I	I I I	I I I I	I I I I I	I I I I I	I I I I I	I I	I I I I I
	Por fuga de campo. conducción de corriente DC	A A P P A P	A P P	A I P I	I A I P	A I I I A	A I P I I	A A	A A I A I
Pruebas con líquidos Penetrantes	penetrantes visibles (dye)	E E I I I I	A P	E A I I	A E I E I	A I I I E	E I E A I	E E	E P I I I
	penetrantes fluorescentes	E E I I I I	A P	E A I I	A E I E I	A I I I E	E I E A I	E E	E P I I I
	partículas filtradas	I I I I I I	I I I	I I I I	I I I I I	I I I I I	I I I I I	I I	I I I I I
Otras	partículas filtradas	I I I I I I	I I I	I I I I	I I I I I	I I I I I	I I	I I I I I	

(E)EXCELENTE (A)ADECUADA (P)POBRE (I) INSATISFACTORIA

⁴² Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.2 ,Parte 6 , pág. 92.

TABLA 4.3. CUADRO GENERAL DE COMPARACION PARA PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS DE OTROS MATERIALES ⁴³

CLASIFICACION GENERAL DE LOS METODOS DE PRUEBAS	MAYORES VARIACIONES EN LOS METODOS DE PRUEBAS	VIDRIO	UTENSILIOS VIDRIADOS	MATERIALES POROSOS	PLASTICOS	ENSAMBLES INTERNOS	ESPESOR DE COBERTURAS	FALTA DE ADHESION
Radiación penetrante	radiografía de placa o pelíc.	I	I	I	E	E	A	A
	fluoroscopia	I	I	I	E	E	I	I
	radioisótopos	I	I	I	A	E	A	I
Ultrasonido	reflexión de pulsos haz normal	A	I	I	A	I	I	A
	onda cortante	A	I	I	A	I	I	A
	onda de superficie	P	I	I	P	I	I	I
	inmersión haz normal	A	I	I	A	I	I	A
	haz en ángulo	A	I	I	A	I	I	A
	onda de superficie	I	I	I	I	I	I	I
	transmisión completa	E	I	I	E	I	I	E
resonancia frecuencia natural	E	I	I	E	I	I	E	
Partícula Magnética	corriente alterna(método húmedo)	I	I	I	I	I	I	I
	corriente alterna(método seco)	I	I	I	I	I	I	I
	corriente directa(método húmedo)	I	I	I	I	I	I	I
	corriente directa(método seco)	I	I	I	I	I	I	I
Pbas. Electromagnéticas	corrientes de Eddie	I	I	I	I	I	A	I
	Campo magnético	I	I	I	I	I	I	I
	Por fuga de campo.	I	I	I	I	I	I	I
	conducción de corriente DC	I	I	I	I	I	I	I
Pruebas con líquidos Penetrantes	penetrantes visibles (dye)	E	E	I	E	I	I	I
	penetrantes fluorescentes	E	E	I	E	I	I	I
	partículas filtradas	I	E	E	I	I	I	I
Otras	partículas filtradas	E	E	I	A	I	I	I

(E)EXCELENTE

(A)ADECUADA

(P)POBRE

(I)INSATISFACTORIO

⁴³ Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.2 ,Parte 6 , pág. 93.

TABLA 4.4 : ATRIBUTOS MEDIDOS O DETECTADOS CON LAS TECNICAS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS OPTICO-MECANICAS ⁴⁴

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas								
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Optico-visual	Capa fotoelástica	Capa quebradiza	Medidor de tensión	micro-dureza	Líquido penetrante	Líquido volátil	Partícula filtrada	Detección de Fugas
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies	A	B			C	A	B	A	C
	Fallas internas		C							
Estructura	Microestructura									
	Estructura Matriz									
	Fallas estructurales pequeñas	A					C			A
	Fallas estructurales gruesas	A								
Dimensiones y metrología	Desplazamiento	C								
	Variaciones dimensionales	C								
	grosor o densidad									
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas									
	Propiedades Magnéticas									
	Propiedades Térmicas									
	Propiedades Mecánicas					B				
	Propiedades de superficie	A								
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas									
	contenido metalúrgico									
	Estado físico-químico									
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga		A	A	A					
	Daño mecánico	A								
	Daño químico	B								
	Otros Daños									
	Funcionamiento Dinámico	C	B		B					
Análisis de señales	Campo electromagnético									
	Campo térmico									
	Señal acústica									
	Señal radioactiva									

A: técnica muy satisfactoria, B: técnica satisfactoria, C: técnica de uso restringido, D: técnica de uso potencial y E: experimental

⁴⁴ Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.1 ,Parte 4 , pág.17.

TABLA 4.5

ATRIBUTOS MEDIDOS Y DETECTADOS CON LA TECNICA NO DESTRUCTIVA DE RADIACION PENETRANTE.⁴⁵

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas						
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Rayos X	Rayos Gamma	Rayos de neutrones	Radiometría Penetrante	Autoradio-grafía	Penetrante radio activo	Tomografía
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies						A	B
	Fallas internas	B	C	C	C			A
Estructura	Microestructura	A						
	Estructura Matriz	A						
	Fallas estructurales pequeñas	B	C	C				A
	Fallas estructurales gruesas	A	A	A				A
Dimensiones y metrología	Desplazamiento	A	A	A				B
	Variaciones dimensionales	A	A	A				B
	grosor o densidad	C	C	C	A	A		A
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas							
	Propiedades Magnéticas							
	Propiedades Térmicas							
	Propiedades Mecánicas							
	Propiedades de superficie							
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas							D
	contenido metalúrgico							
	Estado físico-químico							
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga							
	Daño mecánico	C	D	C	B	A	B	
	Daño químico				D	B	C	
	Otros Daños			D				
	Funcionamiento Dinámico	A		A	B			
Análisis de señales	Campo electromagnético							
	Campo Térmico							
	Señal acústica							
	Señal radioactiva				B	A	C	

A: técnica muy satisfactoria, B: técnica satisfactoria, C: técnica de uso restringido, D: técnica de uso potencial, E: experimental.

⁴⁵ Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.1 ,Parte 4 , pág.18.

**TABLA 4.6 ATRIBUTOS MEDIDOS O DETECTADOS CON LA TECNICA NO DESTRUCTIVA 46
ELECTROMAGNETICA.**

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas							
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Campo Magnético Estático	Partícula Magnética	Resonancia Magnética nuclear	Eddie Current	Corriente eléctrica	Partícula electrificada	Dieléctrico	Radiación de microondas
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies	A	A		A	A	A		C
	Fallas internas	C	C		B	B			C
Estructura	Microestructura			A					
	Estructura Matriz	C			C			C	
	Fallas estructurales nuevas								
	Fallas estructurales gruesas								
Dimensiones y metrología	Desplazamiento								C
	Variaciones dimensionales								
	grosor o densidad	A			A	B		B	A
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas				A	A		A	B
	Propiedades Magnéticas	A	C		A				
	Propiedades Térmicas								
	Propiedades Mecánicas	C							
	Propiedades de superficie								
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas			C					C
	contenido metalúrgico	B			B				
	Estado físico-químico								B
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga			C	B	C			
	Daño mecánico	C				B			
	Daño químico					B			
	Otros Daños							B	
	Funcionamiento Dinámico	A				B	C		C
Análisis de señales	Campo electromagnético	D	C						
	Campo Térmico								
	Señal acústica								
	Señal radioactiva								

A: Técnica muy satisfactoria. B: Técnica Satisfactoria. C: De uso restringido. D: De uso potencial. E. Experimental

TABLA 4.7

ATRIBUTOS MEDIDOS O DETECTADOS CON LA PRUEBA NO DESTRUCTIVA DE ULTRASONIDO.

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas						
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Impacto Acústico	Vibración Sónica	Emisión Acústica	Ultrasonido Pulso-eco	Transmisión de Ultrasonido	Resonancia de Ultrasonido	Onda superficial de Ultrasonido
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies	D			A	C		A
	Fallas internas	C	C		A	B	C	
Estructura	Microestructura							
	Estructura Matriz				B		C	
	Fallas estructurales pequeñas	B	B	A				
	Fallas estructurales gruesas	C						
Dimensiones y metrología	Desplazamiento				A	C		C
	Variaciones dimensionales	B	B					C
	grosor o densidad	C	C		C	C	A	B
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas							
	Propiedades Magnéticas							
	Propiedades Térmicas							
	Propiedades Mecánicas		A		B	B	A	
	Propiedades de superficie							
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas							
	contenido metalúrgico							
	Estado físico-químico							
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga			B				B
	Daño mecánico				C		C	
	Daño químico							
	Otros Daños							
	Funcionamiento Dinámico	C	C		A	A		
Análisis de señales	Campo electromagnético							
	Campo Térmico							
	Señal acústica	D	B	A				
	Señal radioactiva							

A: Técnica muy satisfactoria. B: Técnica Satisfactoria. C: De uso restringido. D: De uso potencial . E. Experimental

TABLA 4.8
ATRIBUTOS MEDIDOS O DETECTADOS CON LAS TECNICAS NO DESTRUCTIVAS TERMICAS⁴⁸

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas			
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Contacto Termométrico	Sonda Termoelectrónica	Radiometría Infrarroja	Electrotérmica
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies	C	B	B	
	Fallas internas			A	B
Estructura	Microestructura				
	Estructura Matriz		C		
	Fallas estructurales pequeñas				
	Fallas estructurales gruesas				
Dimensiones y metrología	Desplazamiento				
	Variaciones dimensionales, grosor o densidad	C	C	C	C
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas				C
	Propiedades Magnéticas				
	Propiedades Térmicas	B	C	A	C
	Propiedades Mecánicas	D			
	Propiedades de superficie		C	A	
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas				
	contenido metalúrgico				
	Estado físico-químico				
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga				
	Daño mecánico				
	Daño químico				
	Otros Daños				
	Funcionamiento Dinámico				C
Análisis de señales	Campo electromagnético				
	Campo Térmico	C		A	
	Señal acústica				
	Señal radioactiva				

A: Técnica muy satisfactoria. B: Técnica Satisfactoria. C: De uso restringido. D: De uso potencial. E: Experimental

48 Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.1, Parte 4, pág. 21.

TABLA 4.9

ATRIBUTOS MEDIDOS Y DETECTADOS CON LA TECNICA DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVA DE ANALISIS QUIMICO ⁴⁹

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas							
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Prueba Química	Sonda Electrolytica	Sonda Laser	Sonda Iónica	Rayos X Fluorescencia	Rayos X Difracción	Activación de neutrones	Activación de Partícula cargada
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies		C						
	Fallas internas								
Estructura	Microestructura			B	B		B		
	Estructura Matriz						B		
	Fallas estructurales pequeñas								
	Fallas estructurales grandes								
Dimensiones y metrología	Desplazamiento								
	Variaciones dimensionales, grosor o densidad					C			E
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas								
	Propiedades Magnéticas								
	Propiedades Térmicas								
	Propiedades Mecánicas								
	Propiedades de superficie								
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas		D	B	B	B	C		B
	contenido metalúrgico, Estado físico-químico	B		C	D				C
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga		E				A		
	Daño mecánico								
	Daño químico			B	B	B	C	C	
	Otros Daños								
	Funcionamiento Dinámico								
Análisis de señales	Campo electromagnético								
	Campo Térmico								
	Señal acústica								
	Señal radioactiva								D

A: Técnica muy satisfactoria. B: Técnica Satisfactoria. C: De uso restringido. D: De uso potencial. E: Experimental

⁴⁹ Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.1, Parte 4, pág. 22.

TABLA 4.10

ATRIBUTOS MEDIDOS O DETECTADOS CON LA TECNICA NO DESTRUCTIVA DE GENERACION DE IMAGENES. ⁵⁰

Objetivos de las PND		Técnicas de Pruebas No Destructivas							
Objetivos Principales	Objetivos Específicos	Película radiográfica	Xero-radiografía	Fluoroscopia	Video radiografía	Inmersión ultrasonido	Videografía de ultrasonido	Holografía de ultrasonido	Videotermografía
Discontinuidades y separaciones	Fallas de superficies	C				A	C	B	B
	Fallas internas	A	B	C	B	A	B	B	B
Estructura	Microestructura						E		
	Estructura Matriz					C	D		
	Fallas estructurales pequeñas	B	B	B	B	C	C	C	
	Fallas estructurales gruesas	A	A	A	B				
Dimensiones y metrología	Desplazamiento	A	A	C	C	C	C		
	Variaciones dimensionales	A	B	C	B				
	grosor o densidad	C	C	D	C	C	D		C
Físicas y propiedades mecánicas	Propiedades Eléctricas								
	Propiedades Magnéticas								
	Propiedades Térmicas								C
	Propiedades Mecánicas					D			
	Propiedades de superficie								C
Composición Química y análisis	Concentración de impurezas								
	contenido metalúrgico								
	Estado físico-químico								
Esfuerzos y respuestas dinámicas	Esfuerzos y Fatiga						E		
	Daño mecánico	D	D	D	D				
	Daño químico								
	Otros Daños								
	Funcionamiento Dinámico			C	B		D	D	
Análisis de señales	Campo electromagnético								
	Campo Térmico								A
	Señal acústica								
	Señal radioactiva	A	D	D	A				

A: Técnica muy satisfactoria. B: Técnica Satisfactoria. C: De uso restringido. D: De uso potencial. E: Experimental

⁵⁰

Tomado de "Choosing NDT. Applications, Costs and Benefits of NDTs in your Quality Assurance Program", Cap.1, Parte 4, pág. 23.

CAPITULO V

APLICACIONES DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN UNA AERONAVE COMERCIAL SEGUN RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE

INTRODUCCION

La detección de un daño estructural y de los defectos antes de que se deterioren a proporciones críticamente peligrosas se hace necesario para asegurar la integridad estructural de todo el avión. Las técnicas de inspección desarrolladas para descubrir defectos en el avión son presentadas en el presente capítulo: rayos X, para la examinación de áreas escondidas donde el desensamble para una inspección visual es muy cara y consumidora de tiempo; las corrientes de Eddie y el ultrasonido para la examinación de componentes individuales que ubican fallas internas y superficiales que no son detectables a simple vista. La empresa manufacturadora de este modelo de aeronave comercial está impulsando un agresivo programa para mejorar las técnicas de Pruebas No Destructivas. Esto debido a la ayuda de todos los operadores que desarrollan las técnicas que ellos mismos emplean, sirviendo su experiencia a otros operadores.

A pesar de que el presente capítulo contiene varias técnicas de inspección, éstas no constituyen un requerimiento de inspección por parte del fabricante ni mucho menos uno de carácter mandatorio. La intención es proveer a los operadores de un procedimiento de inspección aprobado que pueda ser adaptado a satisfacer a sus propios equipos o configuraciones particulares de aeronaves. Existen técnicas de inspección alternas que podrían ser igualmente satisfactorias pero las que se utilizan aquí han sido desarrolladas para ser utilizadas en aeroplanos.

Este capítulo se dividirá en varias partes: en la primera parte se presentan las aplicaciones e información que son generales a cada tipo de PND. En la segunda parte se presenta información específica y procedimientos pertinentes a cada categoría de prueba en forma ilustrativa. Se considerará que el personal de las aerolíneas que se dedican a efectuar dichas inspecciones y trabajos de mantenimiento están muy bien entrenados pues acá no se hace esfuerzo alguno para incluir instrucciones para la operación de los diversos equipos.

La preparación para las Pruebas No Destructivas normalmente es pequeña. Cuando una inspección es requerida en un área de tanques de combustible, será necesario quitarle todo el combustible a la aeronave. La preparación consiste en llegar a los accesos del área a inspeccionarse removiendo puertas, paneles, partes estructurales, equipos o decorados. Con la inspección de los rayos X, será

necesario limpiar el área de inspección y en algunos casos la remoción de acabados como la pintura o sellantes.

5.1 INSPECCIONES GENERALES EN ESTRUCTURAS DE COMPUESTOS.

5.1.1 INSPECCIÓN DE REPARACIONES DE COMPUESTOS⁵¹

PROPOSITO:

Encontrar delaminaciones o separaciones en estructuras de compuestos metálicas y no metálicas reparadas. Este procedimiento ayuda a los operadores identificar el procedimiento de inspección que puede ser usado para examinar reparaciones hechas de compuestos como estructuras.

EQUIPO:

Para ayudar con las inspecciones de reparaciones de compuestos no metálicos, referencias estándares de reparación pueden ser obtenidos del fabricante. Estas referencias pueden ser usadas para comparar las indicaciones con probadores de adhesión, instrumentos de ultrasonido de pulso-ecos, de transmisión total y probadores de golpes. Estas referencias de reparaciones se encuentran disponibles en varias configuraciones por lo que en general el fabricante recomienda un juego básico de 4 referencias que se muestra a continuación:

- a) Referencia estándar C12-DIS-3C1N (Pieles de carbón con núcleo con estructura "panal de abeja" y despegue de la piel con el núcleo).
- b) Referencia estándar C12-DEL-3C1N (Pieles de carbón con núcleo con estructura "panal de abeja" y delaminación entre pliegos).
- c) Referencia estándar C12-PCS-3C1N (Pieles de carbón con núcleo con estructura "panal de abeja" y áreas con rellenos y empalmes de núcleo).
- d) Referencia estándar C12-POT-3C1N (Pieles de carbón con núcleo con estructura "panal de abeja" y despegue de la piel con rellenos de compuesto).

Preparación para la inspección

- Si no puede acceder la parte para realizar la inspección, remuévala del avión.
- Obtenga los récords de reparación que muestren la localización inicial del daño, las dimensiones y el tipo de reparación.
- Identifique el grosor de los pliegues de reparación y los refuerzos usados, la localización de los tapones del núcleo y compuesto, y el área de la superficie de la parte donde calor fué aplicado.
- Obtenga los gráficos de ingeniería que muestre la estructura de la parte en el área reparada.
- Examine la reparación y use el flujograma de la figura 5.1 y 5.2, para identificar el procedimiento de inspección.

⁵¹ Nondestructive Test, Boeing Co May 5/96, Parte 1, 51-01-01 página 1.

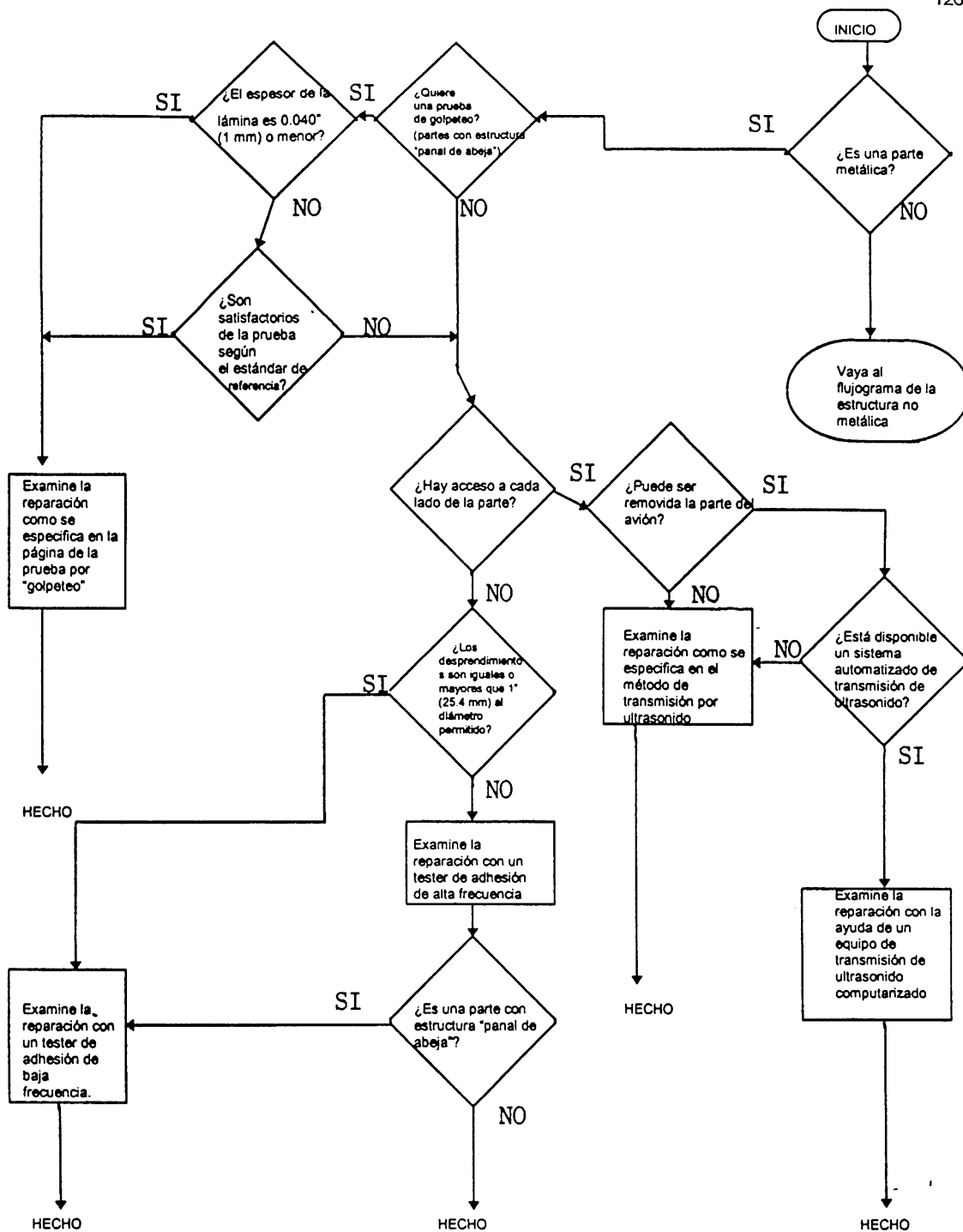


Figura 5.1: Flujograma de Inspección de reparación para estructuras metálicas⁵²

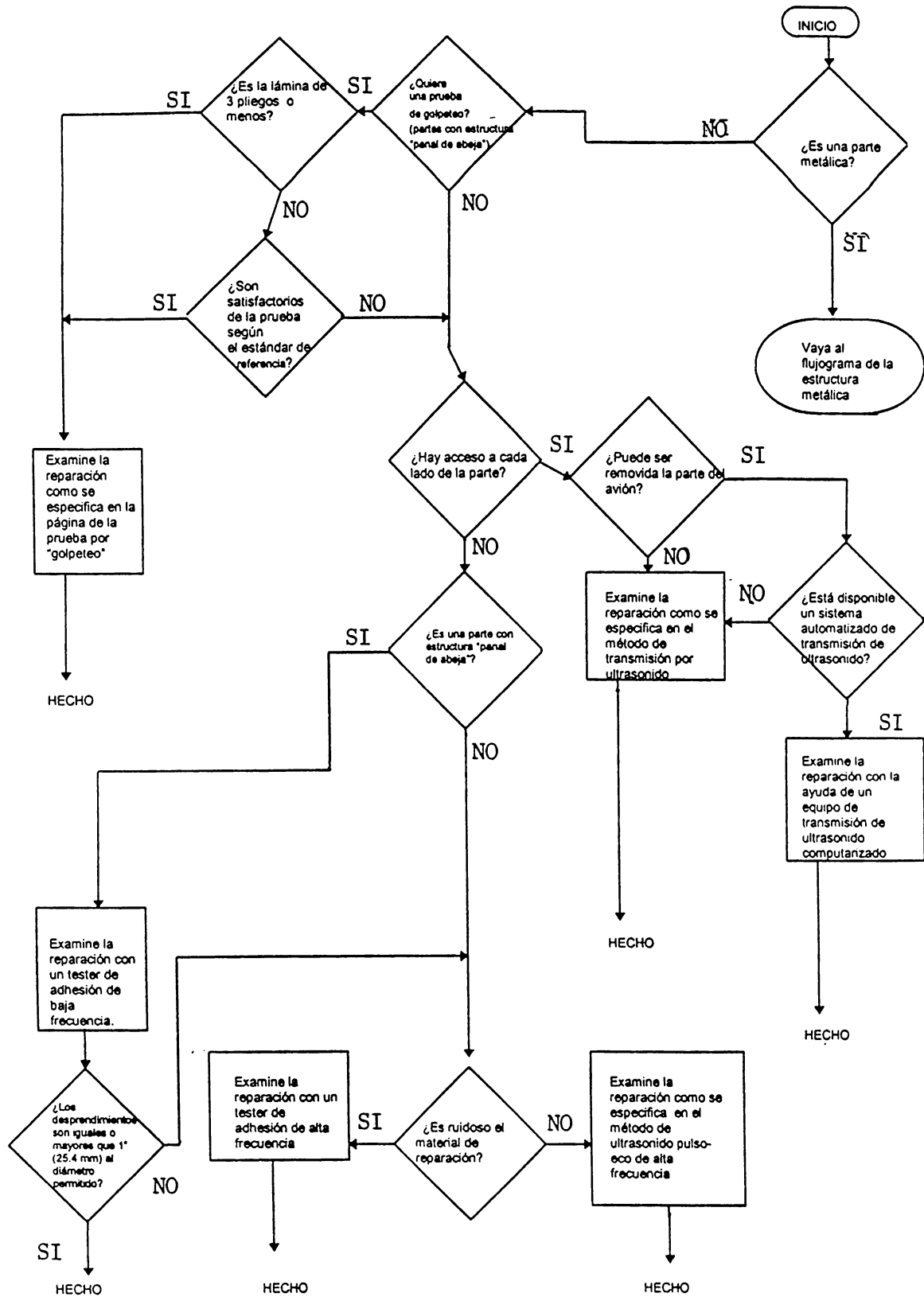


Figura 5.2: Flujograma de Inspección de reparación para estructuras no metálicas⁵³

² Nondestructive Test, May 5/96, Figura 7, Parte 1, 51-01-01 pag 14.

Calibración de los instrumentos

Use las referencias estándares de calibración según el material de la piel, el grosor de la misma, según el generador de indicación, de la densidad o grado del núcleo, la profundidad del núcleo, el tamaño o tipo de la celda del núcleo y el material o clase del núcleo.

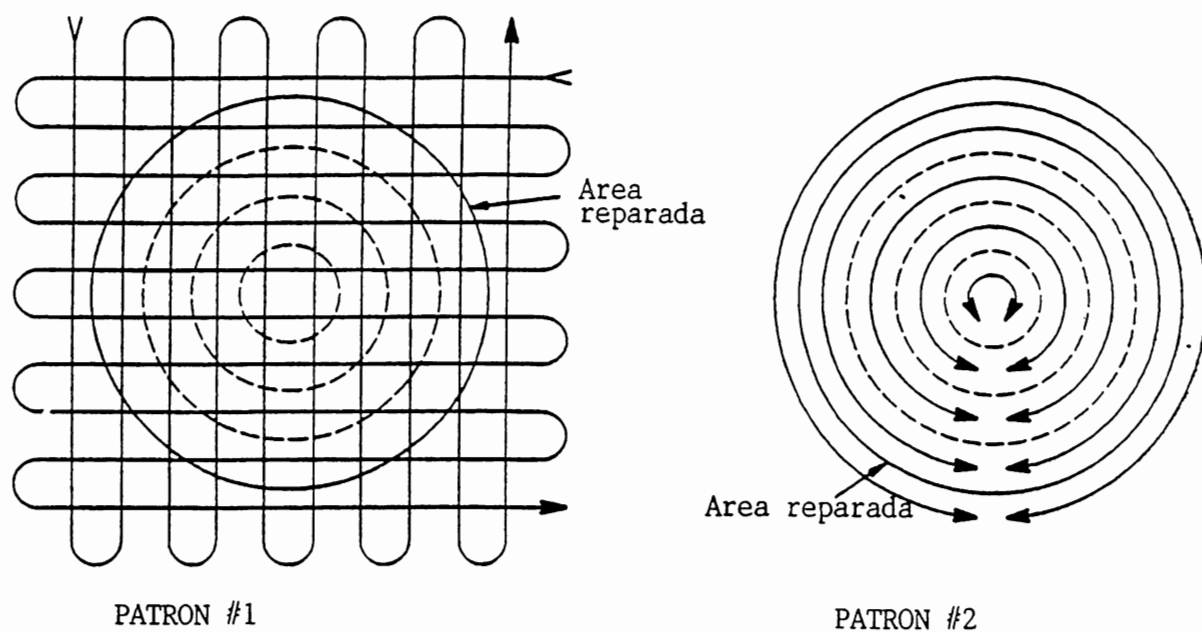
Un ejemplo de una referencia estándar es la que tiene el número de parte C12-DEL-3C2N que es de 3 a 12 pliegos como referencia estándar para delaminación entre pliegos con 3.0 libras de densidad y 1 pulgada de grosor de núcleo. La piel es hecha de un material de carbón, siendo el núcleo NOMEX y el tamaño de la celda de 0.187 (Tipo I).⁵⁴

Procedimiento de Inspección

Haga una examinación del área reparada y el área alrededor de la reparación como sigue:

- Use uno de los patrones mostrados en la figura 5.3. Use el patrón No 1 para la inspección con transmisión total de ultrasonido o procedimiento de baja frecuencia con un probador de adhesión. Use el patrón No 2 para la inspección con pulso-ecos o procedimiento de alta frecuencia con un probador de adhesión. Para la inspección por prueba de golpeteo, referirse a la parte de inspección por "golpeteo" en estructuras "panal de abeja" para el patrón de inspección correcto.
- Examine la parte reparada con incrementos que sean 1/3 del diámetro del defecto cuando lo haga con los patrones 1 o 2. Cuando sea posible, se recomienda que se use una guía o escuadra para controlar el movimiento del transductor durante estas inspecciones.
- Examine al menos 6 pulgadas alrededor del área donde el calor fué aplicado para asegurarse que la aplicación de calor no dañó la estructura cerca de la reparación.

⁵⁴ Nondestructive Test. Boeing Co, May 5/96 Parte 1, 51-01-01 pág. 9



PATRON # 1: Inspección por transmisión de ultrasonido o procedimiento de baja frecuencia con un examinador de adhesión.

PATRON # 2 : Inspección por eco-pulsos o procedimiento de alta frecuencia con un examinador de adhesión.

Figura 5.3 : Patrones de Inspección en áreas dañadas o reparadas ⁵⁵

Resultados de la Inspección.

Si se encontraran indicaciones de no adhesión que sean más grandes de lo permitido, se deben de examinar el área de reparación más a fondo. Los resultados obtenidos deben de estar dentro de los límites aceptados para la inspección de ultrasonido de la estructura de “panal de abeja” que se muestra a continuación (sistema de inspección por transmisión de ultrasonido de 1 Mhz) :

Tabla N° 5.1⁵⁶

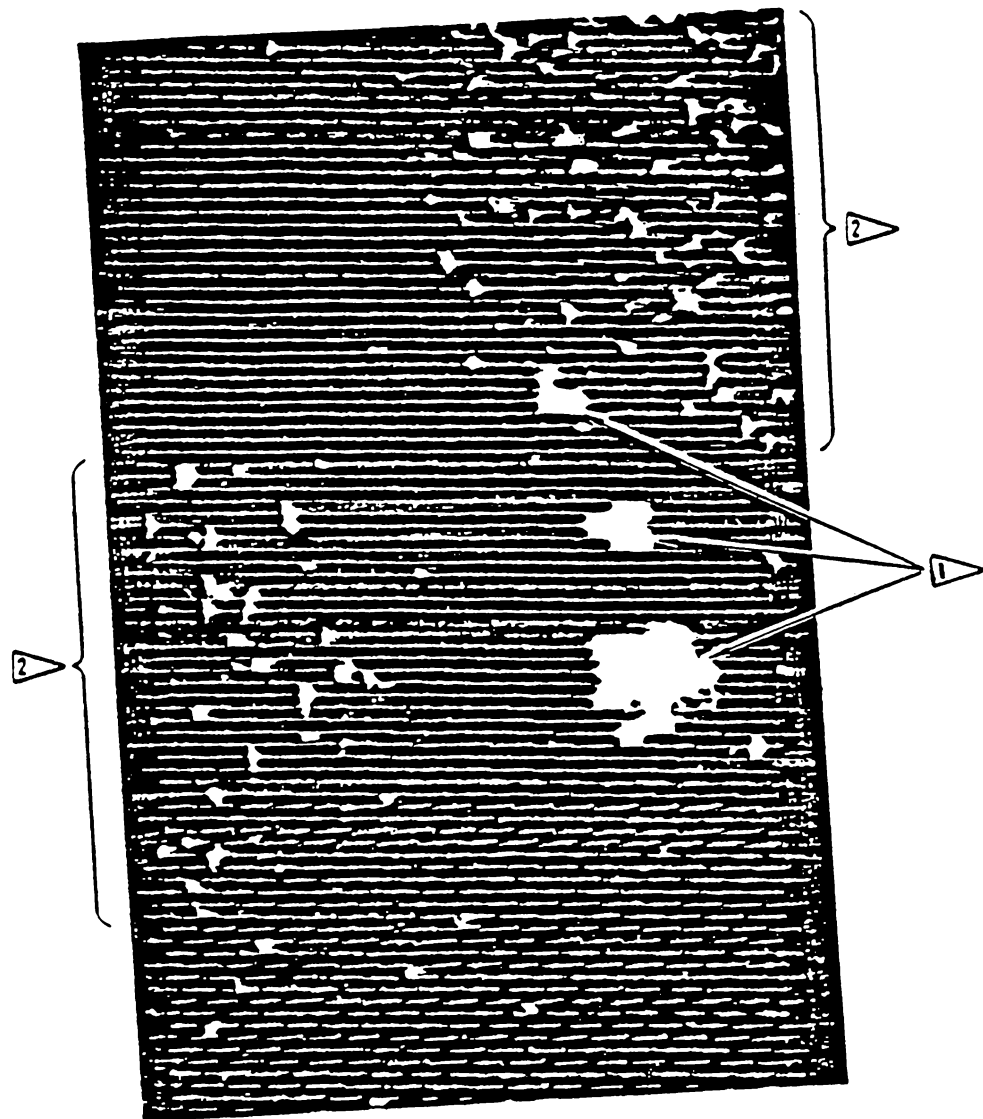
REFERENCIA ESTANDAR	LIMITES DE ACEPTACION
XXX-DIS-XXXX	La atenuación de ultrasonido de las áreas defectuosas debe ser al menos 12 dB más grandes que la atenuación de las áreas de “panal de abeja” sin defectos.
XXX-POT-XXXX	La atenuación de ultrasonido de las áreas defectuosas debe ser al menos 6 dB más grandes que la atenuación de las áreas de “panal de abeja” sin defectos. La atenuación de ultrasonido de las áreas rellenas con compuesto deben ser al menos 6 dB menos que la atenuación de las áreas de “panal de abeja” adyacentes sin defectos.
XXX-PCS-XXXX	La atenuación de ultrasonido de las áreas rellenas debe ser al menos 6 dB menos que la atenuación de las áreas “panal de abeja” adyacentes sin defectos.
XXX-DEL-XXXX	La atenuación de ultrasonido de las áreas defectuosas debe ser al menos 6 dB más grandes que la atenuación de las áreas “panal de abeja” sin defectos.

- Utilizar otros procedimientos de inspección para examinar el área, pero el procedimiento que se muestra en el flujograma para los tipos de reparaciones que se presentan allí debe ser usado para aceptar o rechazar las indicaciones que podríamos obtener. Por ejemplo, no se podría aceptar una indicación con un probador de adhesión que se halla rechazado con una inspección de transmisión total de ultrasonido.

5.1.2 RADIOGRAFIA DE RAYOS X EN GENERAL

El principal uso de la inspección de rayos X (radiografía) es el detectar quebraduras y fallas en la estructura de la aeronave en áreas que no son accesibles a una inspección visual. Las técnicas radiográficas provistas detectarán estructuras quebradas, grandes rajaduras cuando hay un desplazamiento de miembros y pequeñas quebraduras cuando la geometría de la estructura, el grosor del material y la localización del generador de rayos X en relación a la quebradura es la ideal. La inspección de rayos X no es recomendada como una técnica exploratoria para uso general cuando la inspección visual resulta ser la más práctica.

⁵⁶ Nondestructive Test, Boeing Co, May 5/96, figura 6 de la Parte 1, 51-01-01, página 13.



NOTA 1 : CELDAS DE "PANAL DE ABEJA" QUE CONTIENEN AGUA.
 NOTA 2 : AREAS CON CELDAS CONTAMINADAS EN DIVERSOS GRADOS

RADIOGRAFIA TIPICA CUANDO LA RADIACION NO ES PARALELA A LAS PAREDES DE LAS CELDAS DE UNA ESTRUCTURA "PANAL DE ABEJA".

Figura 5.4: RADIOGRAFIA QUE DETERMINA LA EXISTENCIA DE AGUA EN UNA ESTRUCTURA "PANAL DE ABEJAS".⁵⁷

La inspección radiográfica de estructuras compuestas es empleada para determinar la magnitud de un daño detectado visualmente y ayudar en el asegurar la integridad de un panel con superficies adheridas. Los defectos como núcleos estrujados y fracturas asociadas con un daño de impacto caen dentro de una evaluación radiográfica. La inspección radiográfica por golpes de relámpagos pueden aumentar la información recabada acerca del daño en el núcleo en una estructura de "panal de abeja".

Las condiciones subsuperficiales tales como agua entrampada en la estructura de 'panal de abeja' y largas fracturas pueden ser detectadas por inspección radiográfica. La presencia de un empalme de núcleo o reparación, un relleno de compuesto, un llenado de espuma o excesivo adhesivos pueden ser mostradas también por radiografía.

Usualmente cuando la inspección por rayos X es llevada a cabo, es porque la localización y la orientación de una falla sospechosa son conocidas por previa experiencia producto de las condiciones de servicio de todos los operadores. En la figura 5.4 se puede ver una radiografía típica en celdas "panal de abeja".

5.1.3 INSPECCION POR ULTRASONIDO EN GENERAL

INTRODUCCIÓN

La inspección por ultrasonido está dividido en 2 áreas principales: Detección de fallas y de adhesión por ultrasonido. Esta última es dividida para cubrir estructuras metálicas y compuestas.

5.1.3.1 DETECCION DE FALLAS POR ULTRASONIDO.

Inspección por ultrasonido puede ser llevada a cabo en virtualmente todos los tipos de materiales utilizados en la estructura de una aeronave. Es un método extremadamente sensitivo de detección de fallas tanto superficiales como subsuperficiales. Las técnicas de inspección han sido desarrolladas para componentes mayores del sistema de trenes de aterrizajes principalmente como los rines, llantas, cilindros, orejas de las articulaciones de torsión y soportes del tren.

Hay 3 métodos básicos de inspeccionar por ultrasonido: a) pulso-eco, b) resonancia, y c) transmisión de ultrasonido. De los 3, el método más comúnmente utilizado es el pulso-eco.

Descripción del método Pulso-eco.

En este método, pulsos de ondas de sonido de ultra alta frecuencia es transmitida a través de una parte con un transductor piezoeléctrico (cristal). Cuando estas ondas de sonido son reflejadas por las superficies o por una falla encontrada, son detectadas por el transductor. Estas ondas reflejadas y el tiempo requerido por el sonido para viajar entre las superficies o la falla es desplegado en la pantalla del tubo de rayos catódicos. El tamaño de la falla puede ser determinado midiendo la amplitud de estas reflexiones.

Existen 3 modos de ondas utilizados en el método pulso-eco: 1) longitudinal, 2) cortante, y 3) de superficie o Rayleigh. Estos modos se ilustran en la figura 5.5 y se describe de la siguiente manera:

LONGITUDINAL: Estas ondas usualmente son transmitidas a la parte en ángulos rectos a la superficie. De las 3 formas de ondas, la longitudinal obtiene la más alta velocidad a través de la parte. Este modo puede ser usado para medir espesores de una parte y detectar a la vez discontinuidades. (ver figura 5.6)

CORTANTE O TRANSVERSAL: Para inducir una onda cortante en una parte, una cuña plástica es colocada entre el transductor de onda longitudinal y la superficie de la parte. La velocidad de la onda cortante es cerca de la mitad de la onda longitudinal. Es muy útil para encontrar una falla en un área escondida.

SUPERFICIAL O RAYLEIGH: Las ondas superficiales viajan sobre la superficie de una parte sin una penetración apreciable en ella. Su velocidad y largo de onda es cerca de 9/10 de una onda cortante. Una cuña plástica es también utilizada como en la cortante siendo el ángulo óptimo para producir una onda de superficie en aluminio de 64 grados. El modo se utiliza para detectar fallas de superficies.

En las figura 5.7, se muestran los modos de onda cortante y de superficie.

El patrón de respuesta de cualquier de los 3 modos de onda pueden ser mostrados en un tubo de rayos catódicos en cualquiera de los siguientes patrones:

- a) Scan tipo A: El más común y ampliamente utilizado. Muestra la señal como un pico en una línea recta a través de la cara del tubo de rayos catódicos.
- b) Scan tipo B: Raramente utilizado, presenta el gráfico en la cara del tubo de rayos catódicos en forma de bloques.
- c) Scan tipo C: Requiere equipo especial presentando el gráfico en un papel.

Preparación de la aeronave para la inspección:

Para la inspección por ultrasonido generalmente no es necesario desensamblar o remover partes del avión, sin embargo, usualmente es necesario que se

U L T R A S O N I D O

DETECCION DE FALLAS POR ULTRASONIDO

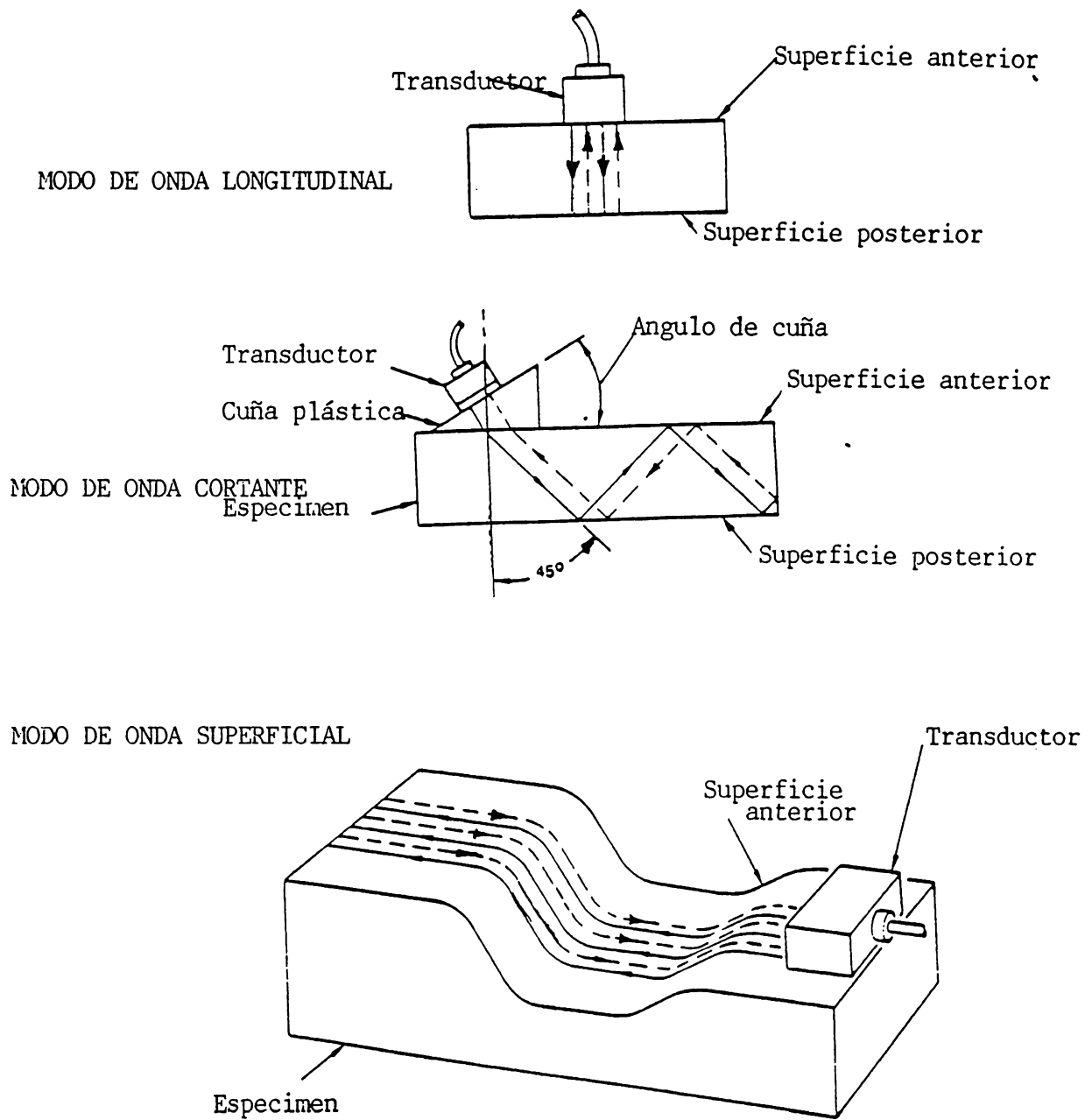


FIGURA 5.5: MODOS DE ONDAS DE ULTRASONIDO ⁵⁸

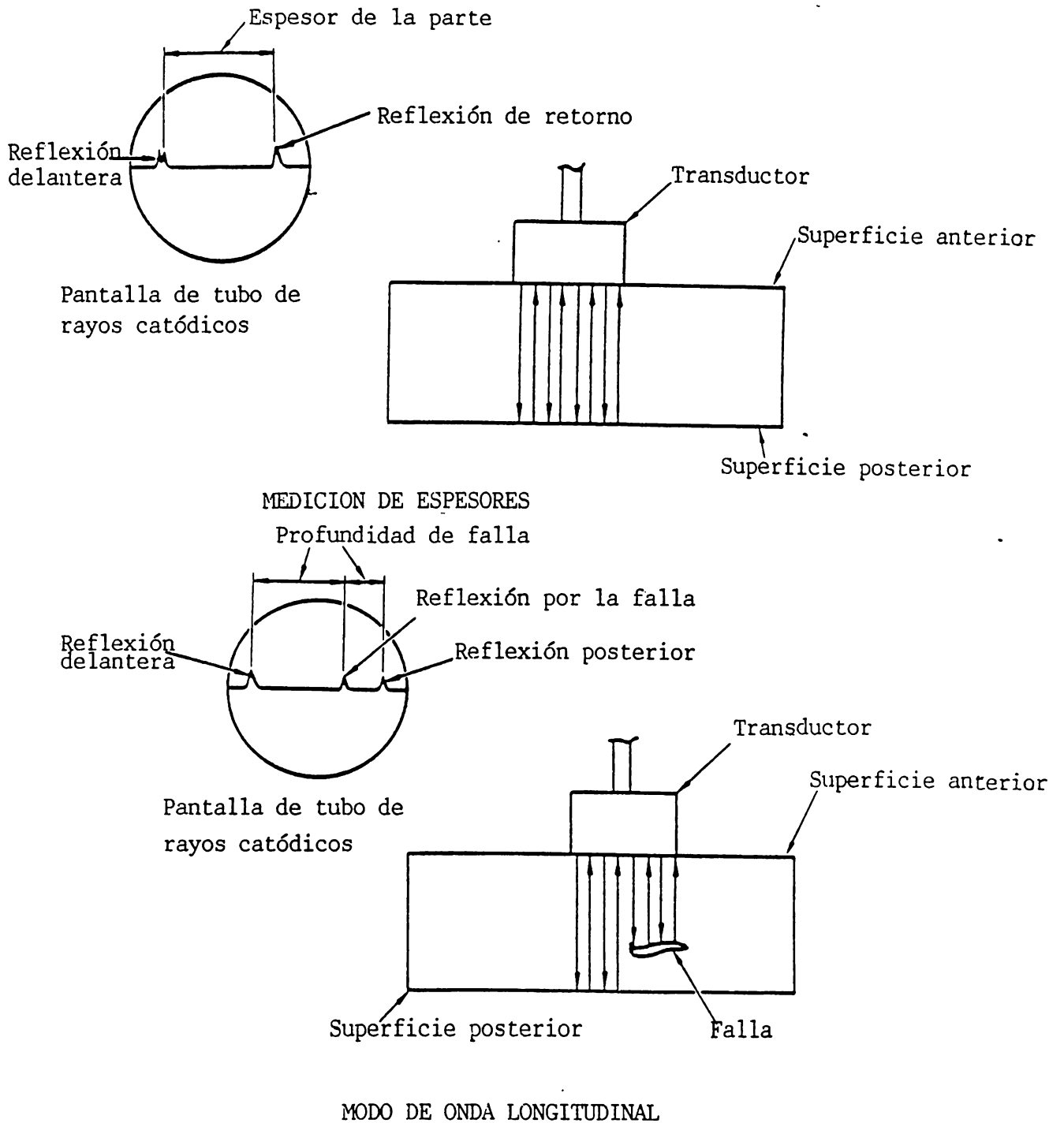
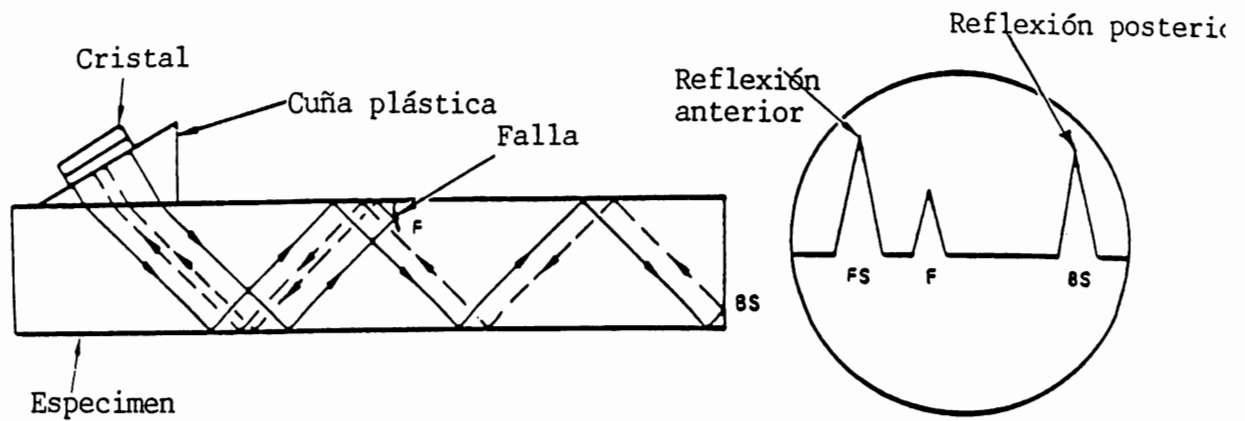
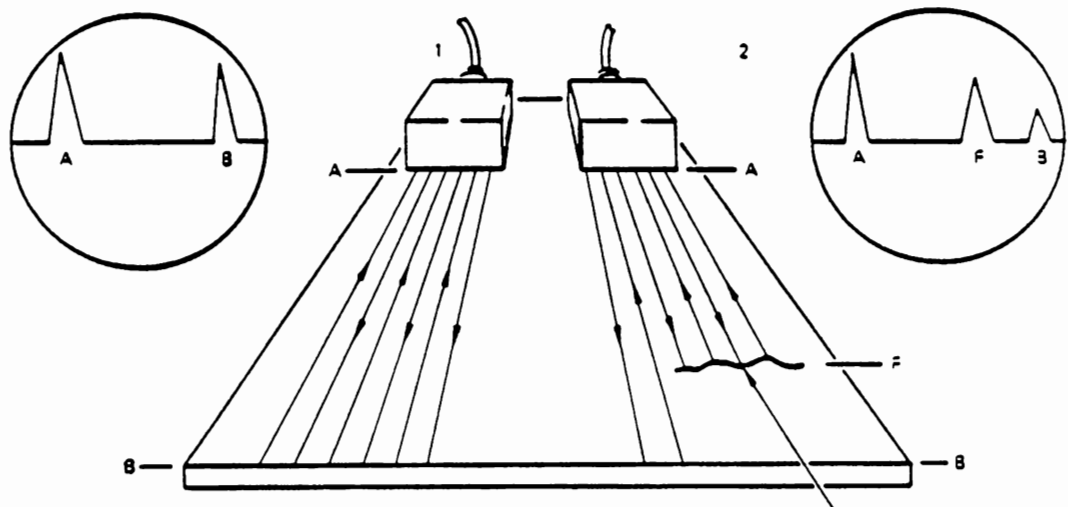


FIGURA 5.6 : FALLAS EN EL OSCILOSCOPIO⁵⁹

⁵⁹ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, FIGURA 2 PARTE 1, 51-04-00, PAGINA 6, MAYO 15/72



DETECCION DE FALLAS CON MODO DE ONDA CORTANTE.



DETECCION DE FALLAS CON MODO DE ONDA DE SUPERFICIE

FIGURA 5. 7: MODOS DE DETECCION DE FALLAS⁶⁰

⁶⁰ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, FIGURA 3, PARTE 1, 51-04-00, PAGINA 7.

remuevan las puertas de acceso, cubiertas, superficies aerodinámicas o equipos para llegar al área de inspección.

Después de tener listo el acceso para inspeccionar, una limitada cantidad de corrosión debe ser removida de las partes para proveer una superficie lisa. Una superficie áspera con numerosos puntos, ampollas y cráteres dificulta la inspección por el patrón de respuesta inestable. Ningún resultado satisfactorio podría ser esperado si se tiene una rugosidad mayor a 250 micropulgadas.

La pintura y la suciedad obvia debe ser removida al absorber ambos una mayor cantidad de energía del sonido.

En la figura 5.8, se muestran daños típicos en superficies de compuestos.

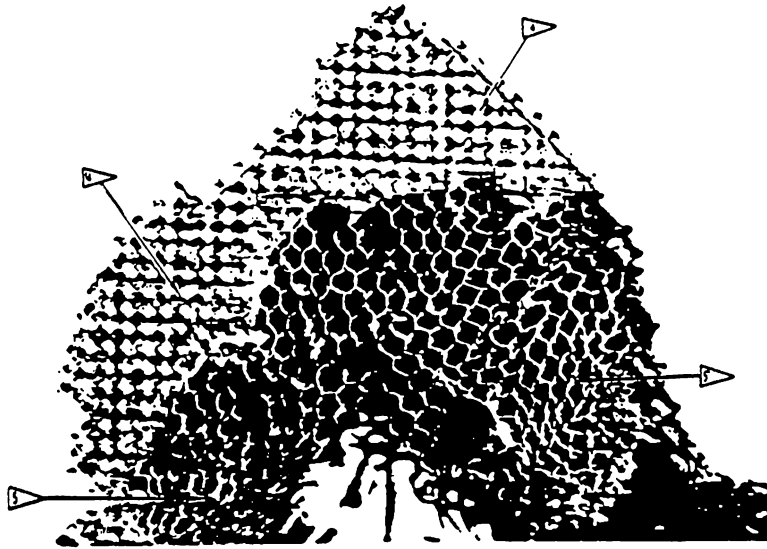
5.1.3.2 INSPECCION DE ADHESION POR ULTRASONIDO DE ESTRUCTURAS METAL-A-METAL Y "PANAL DE ABEJA".

En configuraciones estructurales de las aeronaves en que existen adhesión metal a metal y estructuras "panal de abeja", resulta muy difícil el utilizar métodos de inspección relativamente simples. Cuando 2 piezas de metal se pegan juntas tal como lo hace un "dobler" a una piel metálica para proveerle de resistencia adicional, la separación de las mismas o la delaminación es muy difícil de detectar. La misma situación existe cuando se pegan hojas metálicas en una estructura "panal de abeja" que se está utilizando mucho en la industria aeronáutica debido al incremento de la resistencia de dichas estructuras con menos peso.

Descripción del Método

Algunos métodos de pruebas de adhesión por ultrasonido involucran dispositivos portátiles que incluyen indicador de sonidos S-2, S-2B y S-1A, probadores audibles, detectores de falla acústica, probador armónico, y probador 210 entre otros. Algunos inducen alguna forma de vibración en la parte que es inspeccionada y entonces reacciona y despliega o guarda una respuesta.

El principio de operación es algunos de estos probadores de adhesión es la impedancia mecánica que mide la impedancia (lo compactado) de la estructura con energía de pulsos de ultrasonido de baja frecuencia la cual es transmitida a la estructura por una sonda de contacto. Esta sonda de contacto contiene el elemento transductor piezoeléctrico que es el transmisor y receptor. El transductor transmisor convierte la energía eléctrica a energía mecánica que entra en la estructura generando una onda de forma compleja y que viaja (vibra) lateralmente a través de la estructura hasta un transductor receptor que cambia de regreso la energía mecánica a eléctrica. Esta señal recibida es amplificada y desplegada en una pantalla de cristal líquido. Cualquier cambio en la estructura causará un cambio en



FLECHA 4 : PERDIDA PARCIAL DE LA CONFIGURACION ORIGINAL
 FLECHA 5 : PERDIDA TOTAL DEL PLIEGO Y SU ESTRUCTURA INTERNA DE PANAL DE ABEJA.



FLECHA 5 : PERDIDA PARCIAL DE LA CONFIGURACION ORIGINAL
 FLECHA 6 : PERDIDA TOTAL DEL PLIEGO Y SU ESTRUCTURA INTERNA DE PANAL DE ABEJA.

FIGURA 5.8 : DAÑOS TIPICOS POR IMPACTO.⁶¹

⁶¹ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 1, 51-01-02, PAGINA 6, FIGURA 1, ENE 15/97

mecánica a eléctrica. Esta señal recibida es amplificada y desplegada en una pantalla de cristal líquido. Cualquier cambio en la estructura causará un cambio en la amplitud y/o señal de fase que puede ser entonces comparada con una señal de condición original conocida de antemano.

Preparación de la Aeronave para inspeccionar

El polvo suelto, capas o ampollas de pinturas o grasa deben ser removidas del área para realizar la inspección.

5.1.4 INSPECCION POR METODO DE GOLPETEO EN ESTRUCTURAS “PANAL DE ABEJAS”.⁶²

PROPOSITO:

- Use este tipo general de prueba de golpeteo para daños y reparaciones en estructuras “panal de abejas” con pieles delgadas.
- Este procedimiento encontrará delaminaciones con diámetros de 1.0 pulgadas (25mm) o mayores entre pliegos y desprendimientos entre la piel y la estructura “panal de abeja” siempre que el espesor de la piel sea 3 pliegos o menos.
- Este procedimiento encontrará delaminaciones con diámetros de 1.0 pulgadas (25mm) o mayores entre la piel y una estructura “panal de abeja” siempre que el espesor de la piel sea menor a 0.040 pulgadas (1.0 mm).
- Este procedimiento puede ser usado en áreas donde el nivel de ruido es lo suficientemente bajo para permitir al inspector oír cambios en el sonido durante la prueba por golpeteo.

EQUIPO:

La herramienta de golpeteo tiene una tapa con superficie de bronce, aluminio o de acero con un radio de 0.060 pulgadas (1.5mm) a 0.5 pulgadas (12.5mm). Esa herramienta debe de pesar menos de 4 onzas o 114 gramos.

NOTA: Para estructuras no metálicas, diferentes defectos causarán diferentes sonidos durante las pruebas por golpeteo.

Preparación para la inspección

- Haga una inspección visual de la parte buscando superficies irregulares, líneas de esfuerzos, erosión, quebraduras u otros signos de daño.
- Examine la estructura del área con la ayuda de los gráficos de diseño o de ingeniería para determinar cómo fue ensamblada.
- Golpetee con la herramienta en un área que se sabe de antemano que se encuentra en buenas condiciones para comparar el sonido que produce con el

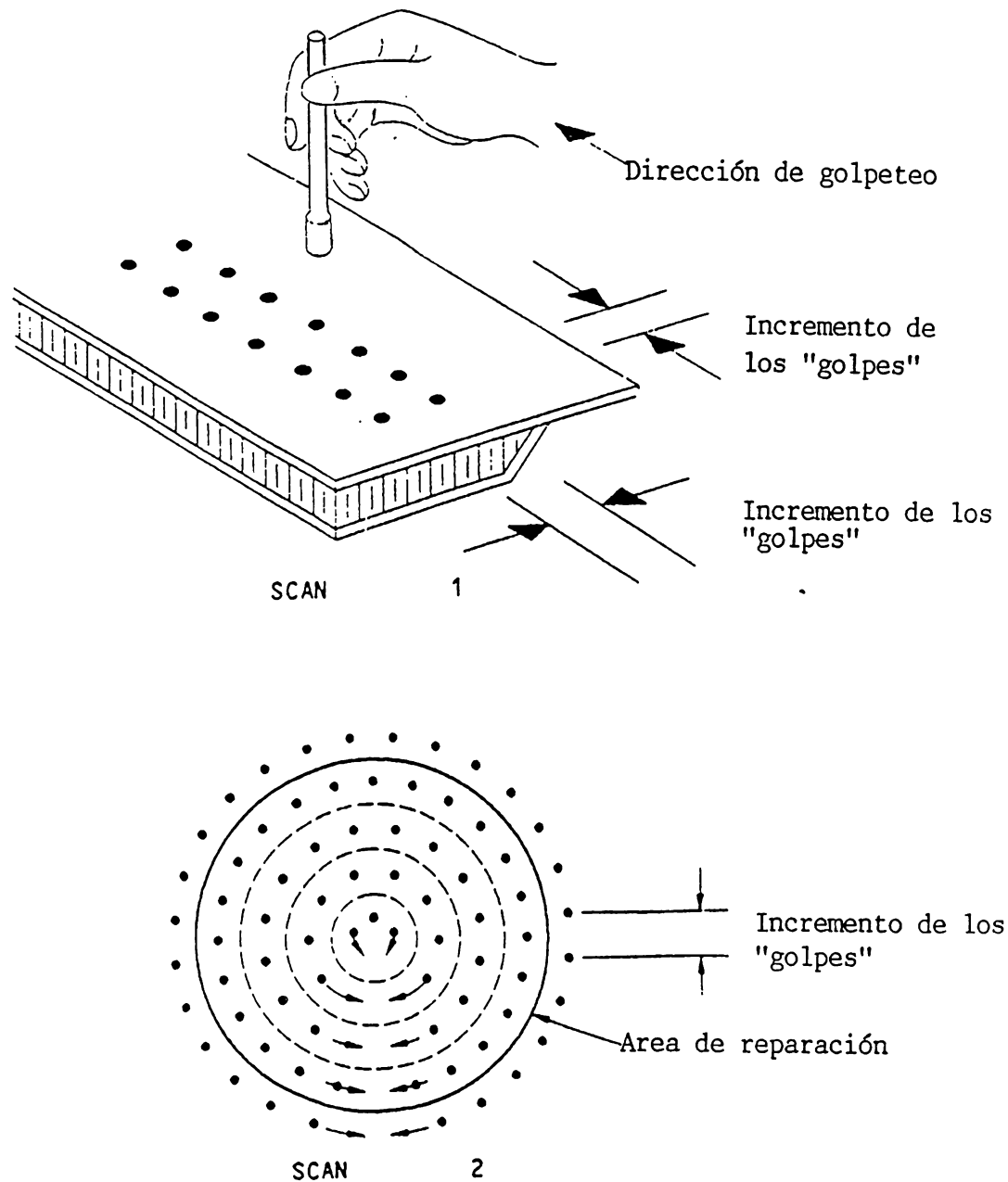
sonido del área que se inspecciona para identificar defectos. Asegúrese que las áreas tienen el mismo grosor de lámina que el área que se inspeccionará.

Procedimiento de Inspección

- Golpetee el área de inspección totalmente con un incremento de un tercio del diámetro permitido de desprendimiento como se especifica en la figura 5.9
- Golpetee a lo largo de contornos de estructura y espesores constantes. En áreas grandes se usan líneas en la superficie para asegurarse que el área de inspección es completamente examinada.
- Escuche los cambios en la frecuencia del sonido de golpeteo.
- Haga una marca en los filos externos de las áreas que causan cambio en la frecuencia del sonido de golpeteo.

Resultados de Inspección

- Areas donde no hay desprendimiento tendrán un sonido de golpe de frecuencia constante.
- Areas con desprendimientos causarán un sonido de golpe de más baja frecuencia.
- Cambios de estructura como los cambios en los espesores de los pliegos, núcleos rellenos con compuestos, empalmes de núcleos causarán un sonido de golpe de más alta frecuencia.
- Si se cuenta con una referencia estándar, compare los cambios en la frecuencia del sonido del golpeteo en el área de inspección con los cambios que se obtienen con dicha referencia estándar.
- Las áreas con núcleo estrujado pueden causar un cambio en la frecuencia del sonido de golpeteo que es equivalente a un desprendimiento.
- Se recomienda un procedimiento de inspección por PND diferente si es necesario examinar el área más detenidamente con la Transmisión de ultrasonido, probadores de adhesión de baja frecuencia y radiografía únicamente para detalles estructurales o núcleos estrujados porque no se encontrará con ella los desprendimientos de la piel con el núcleo o fractura de éste último.



NOTAS:

- USE EL PATRON No 1 PARA INSPECCIONES DE ESTRUCTURAS QUE NO HAN SIDO REPARADOS Y EL PATRON No 2 PARA INSPECCIONES DE LAS AREAS REPARADAS.
- USE UN INCREMENTO DE EXAMINACION 1/3 DEL DIAMETRO DEL DEFECTO.

FIGURA 5.9 : PATRONES DE EXAMINACION⁶³

5.1.5 INSPECCION POR CORRIENTES DE EDDIE EN GENERAL

Descripción del método

Los instrumentos de pruebas de Eddie responden a cambios en las características eléctricas de la bobina de la sonda causado a su vez por las variaciones en un segundo campo magnético que se origina por los cambios en el flujo de las corrientes de Eddie. Estos cambios en el flujo de corrientes de Eddie resultan de:

- a) Cambios en forma o dimensión de la parte que se prueba.
- b) Quebraduras, puntos, porosidades, vacíos, costuras, inclusiones.
- c) Variaciones en la química o contenido de aleación.
- d) Tratamiento térmico o mecánico.
- e) Cambios en la permeabilidad magnética (sólo en metales ferromagnéticos).

Una variedad de inspecciones de corrientes de Eddie son efectuadas en la estructura de una aeronave. Las inspecciones listadas a continuación son las más utilizadas en aluminio o aleaciones no magnéticas:

- a) Detección de quebraduras en una gran variedad de situaciones.
- b) Detección de corrosión y la resultante pérdida de metal entre la piel de aluminio y los otros miembros.
- c) Identificación de aleación o condición de tratamiento térmico.
- d) Evaluación de daño por calor en estructura expuesta al fuego o altas temperaturas.

Preparación para la Inspección.

Normalmente no es necesario desensamblar o remover una parte de la aeronave, sin embargo será necesario remover las puertas de acceso, superficies aerodinámicas o algunos equipos para llegar al área de inspección. Cuando se inspeccionen los agujeros de los sujetadores o remaches, éstos tendrán que ser removidos. Ninguna otra preparación en el avión es necesaria, excepto cuando la inspección es llevada a cabo dentro de los tanques de combustibles al tener que ser drenados y purgados.

Las partes que se inspeccionarán requerirán únicamente una mínima limpieza antes de la inspección ya que una inspección por corrientes de Eddie puede ser hecha con pintura o aceite.

Aplicación de las corrientes de Eddie.

Las aplicaciones de las corrientes de Eddie pueden ser clasificadas en 3 categorías generales:

a) Alta frecuencia o inspección superficial: (Las frecuencias arriba de 50 kHz son consideradas de alta frecuencia). Para inspecciones por quebraduras o defectos similares que están abiertas o justo abajo de superficies accesibles. Esto incluye la inspección de los agujeros de remaches y las inspecciones por fallas superficiales.

b) Baja frecuencia o inspección subsuperficial: Para inspecciones por quebraduras subsuperficiales con equipo y sondas diseñados para aplicaciones de baja frecuencia. También para inspección y estimación de pérdidas por corrosión en la superficie interior de las pieles de aluminio y los miembros adyacentes si los hubiera.

c) Medición de Conductividad: Para lecturas de conductividad eléctrica en unidades IACS o micro-ohm centímetros. También para evaluar daños por fuego o determinar condición de tratamiento térmico de aleaciones de aluminio.

Factores que se deben considerar cuando se selecciona el tipo de sonda, tamaño y la frecuencia son:

- Tipo de material (aleación, condición de tratamiento térmico).
- Espesor del material o capas arriba de la localización del daño estimado.
- Espesores y el material de las capas a ser inspeccionado por quebraduras posibles.
- Dirección estimada de la quebradura.
- Tipo del sujetador, material, tamaño y espaciado de los mismos.
- Márgenes de filo, tanto superficial como subsuperficiales.
- Estructura adyacente que podría obstaculizar.

5.2 RADIOGRAFIA POR RAYOS X

5.2.1 DETECCION DE AGUA EN ESTRUCTURAS 'PANAL DE ABEJA'.

PROPÓSITO:

Detectar agua en estructuras "panal de abeja" con cualquier combinación de núcleos y pieles metálicos y/o no metálicos usando radiografía.

EQUIPO:

- a) Generador de rayos X capaz de operar en el rango de 30 a 100 KV.
- b) Placa o película de cualquier rango radiográfico. La película radiográfica ASTM clase II ha sido desarrollada para este procedimiento.
- c) Procesador manual o automático.

Preparación para inspección:

Extienda la superficie de control de vuelo o remueva el panel si fuera necesario para proveer un acceso libre a la exposición radiográfica según la figura 5.10.

Procedimiento de Inspección:

- a) Coloque el generador de rayos X perpendicular a la superficie de "panal de abeja" en el área a ser inspeccionada. Expóngala del lado inferior para superficies de control de vuelo y flaps según se muestra en la figura 5.10. Observe la figura 5.16 para una orientación típica de la cabeza del tubo de rayos X y el miembro inspeccionado.
- b) Coloque la película en el lado superior de la superficie de control de vuelo o en el lado de la parte opuesto a la cabeza del tubo de rayos X cubriendo el área que se sospecha contiene agua como se muestra en la figura 5.10. Coloque el generador a una distancia de 120 pulgadas (305 cm) de la película.
- c) En el generador de rayos X, haga tantas exposiciones como sean necesarias para inspeccionar el área de interés y obtenga una densidad de celda de 2.0 a 3.0 miliamperios segundos.
- d) Repita el procedimiento anterior para todas las áreas sospechosas de estar contaminadas de agua.

Resultados de la Inspección:

La interpretación de las radiografías depende del número de celdas que contiene agua, el volumen de agua por celdas; el espesor del núcleo de panal de abeja y la orientación de los rayos X a las paredes de las celdas de panel de abeja. El agua

es detectable cuando las paredes del núcleo de panal de abeja están alineadas dentro de 45 grados de la radiación recibida.

Imágenes del agua usualmente tiene una densidad constante de película en cualquier celda en particular cuando se sacan radiografías. La contaminación de agua usualmente involucran varias celdas adyacentes siendo las pequeñas cantidades de agua difíciles de detectar.

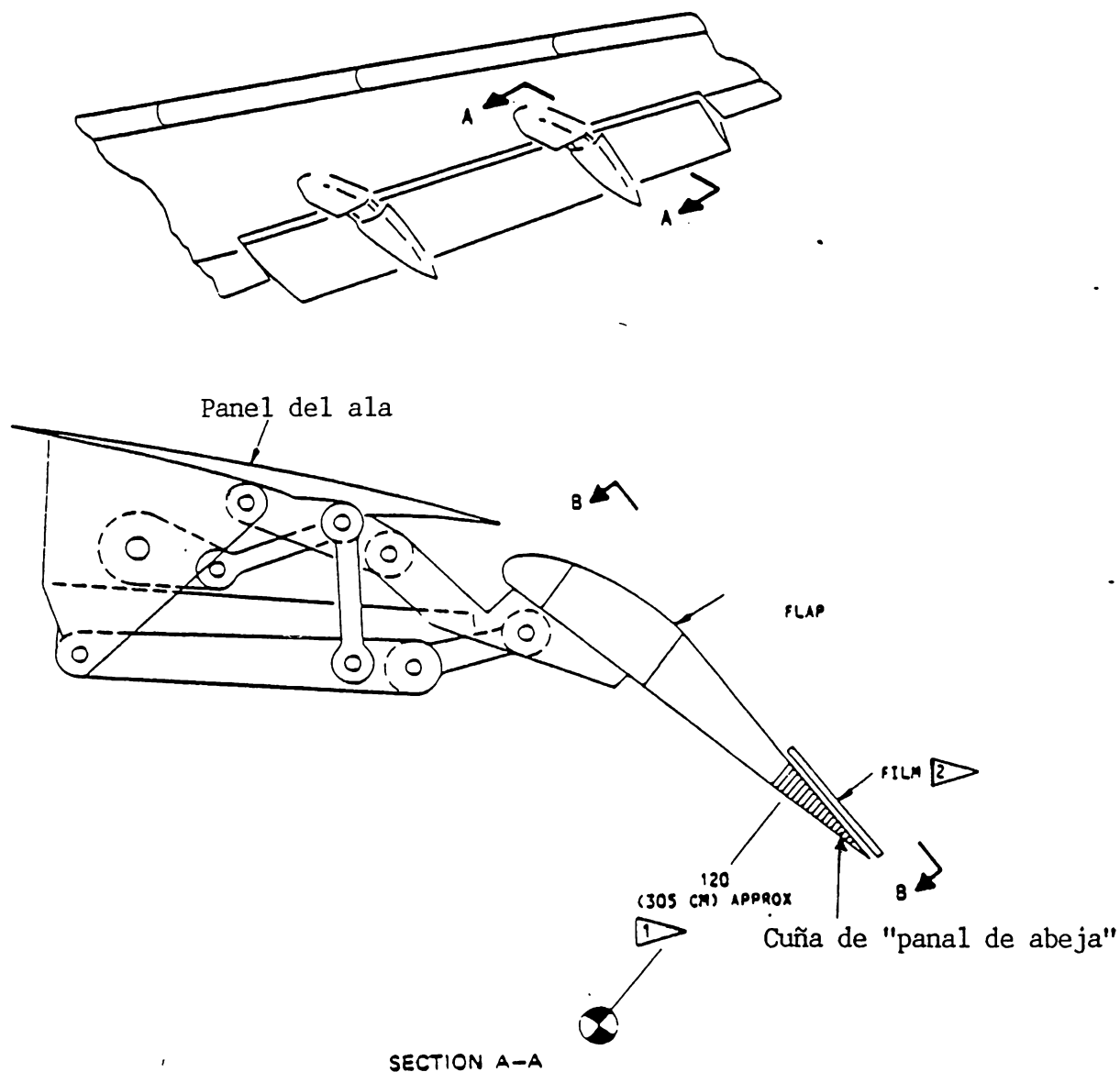


FIGURA 5.10 : DETECCION DE AGUA EN ESTRUCTURAS "PANAL DE ABEJA". 64

5.2.2 INSPECCION DE ESTRUCTURA 'PANAL DE ABEJA'.⁶⁵

PROPÓSITO:

Para detectar los siguientes defectos en estructuras no metálicas de 'panal de abeja':

- a) Daño causado por golpe de relámpago.
- b) Aplastamiento o distorsión del "panal de abeja" por un impacto severo.

EQUIPO:

El mismo utilizado en la detección de agua en estructuras "panal de abeja".

Preparación:

- a) Remueva la parte a ser inspeccionado del aeroplano si es práctico.
- b) Identifique el área de inspección y limpie la superficie.

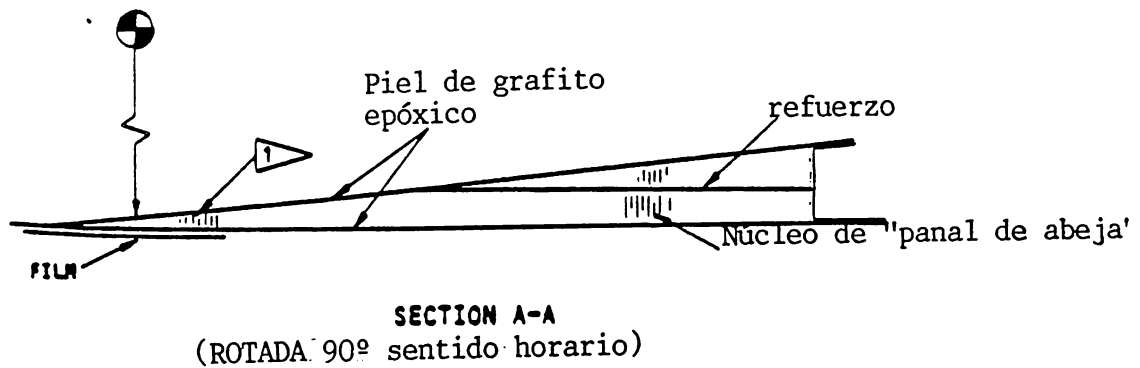
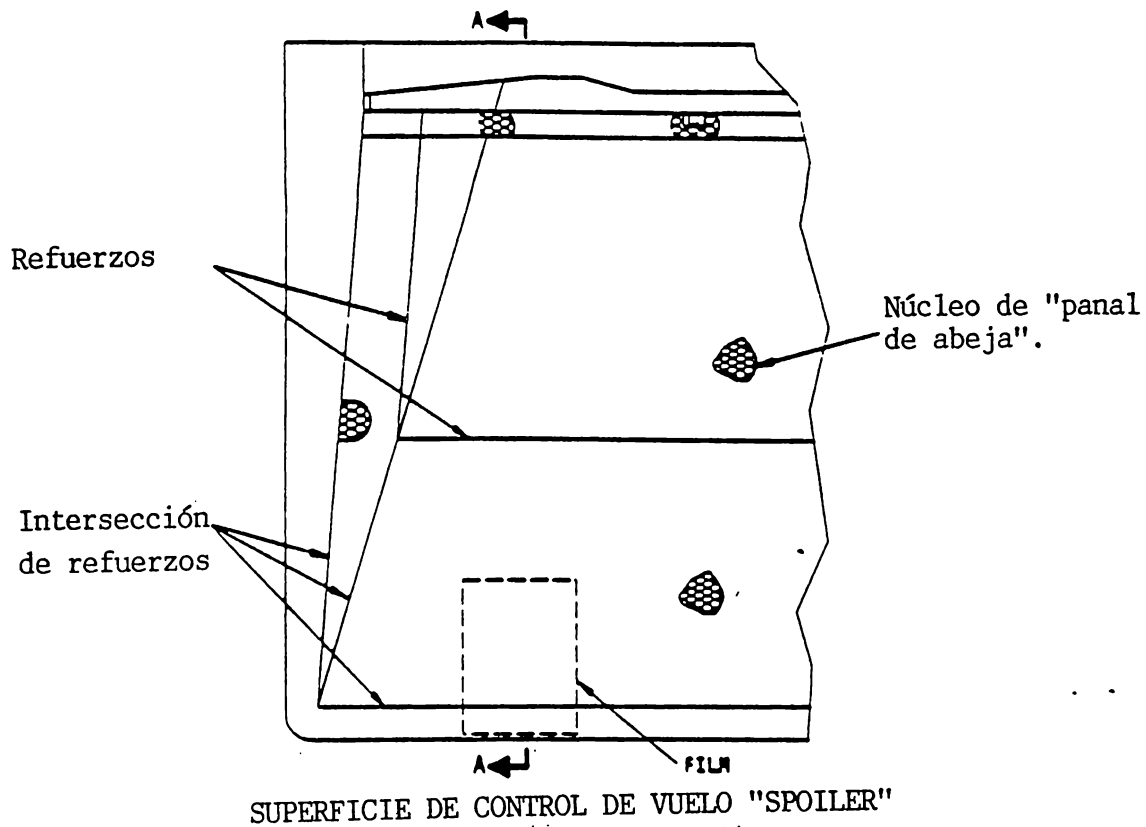
Procedimiento de Inspección:

- a) Posicione el generador de rayos X perpendicular al panel que se inspecciona. (figura 5.11)
- b) Coloque la película en el lado opuesto de la parte cubriendo el área sospechosa de encontrarse dañada.
- c) Coloque los controles del generador para efectuar una exposición con una densidad de 1.8 a 2.5 miliamperios segundo.

Resultados de Inspección:

- a) Daño por impacto de relámpago: compare la radiografía con el área dañada para determinar la magnitud total del daño por el impacto. Inspeccione por aplastamiento o distorsión del núcleo y signos de quebraduras en los pliegos de piel más interna. (figura 5.12)
- b) Daño por severo impacto: Inspeccione por aplastamiento o distorsión del núcleo 'panal de abeja' y signos de quebradura en los pliegos de piel más interna (figura 5.13)

⁶⁵ NONDESTRUCTIVE TEST BOEING CO, PARTE 2, 51-00-03 PAGINA 1. JULIO 15/85



NOTAS:

- CIRCULO BLANCO Y NEGRO: GENERADOR DE RAYOS X.
- FLECHA 1: ALINEAR LAS PAREDES DEL NUCLEO DE PANAL DE ABEJA PARALELAS A LA RADIACION

FIGURA 5.11 Inspección Típica de una estructura "Panal de Abeja"⁶⁶

⁶⁶ NONDESTRUCTIVE TEST BOEING CO, PARTE 2, 51-00-03 PAGINA 3. julio 15/85.

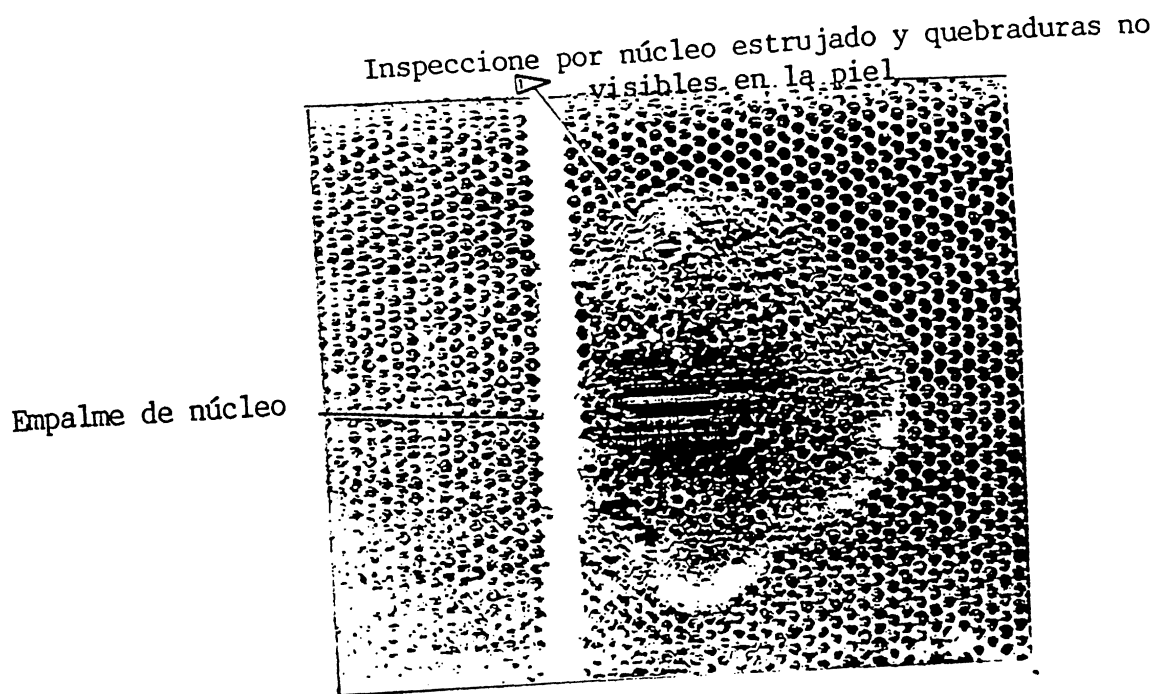


Figura 5.12

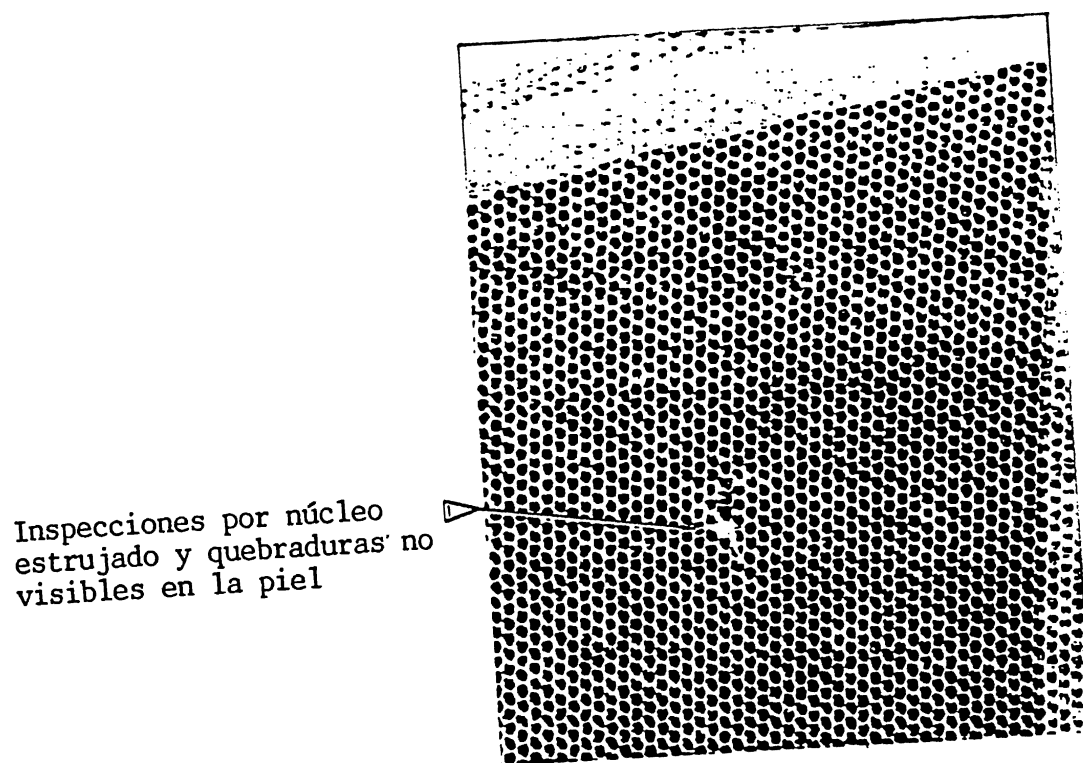


Figura 5.13

Figuras 5.12 y 5.13 son radiografías típicas por impacto en paneles con estructura "Panal de abejas". 67

5.2.3 EMPALMES DE LA PIEL Y LARGUERILLOS EN EL AREA DE LA CORONA³⁴

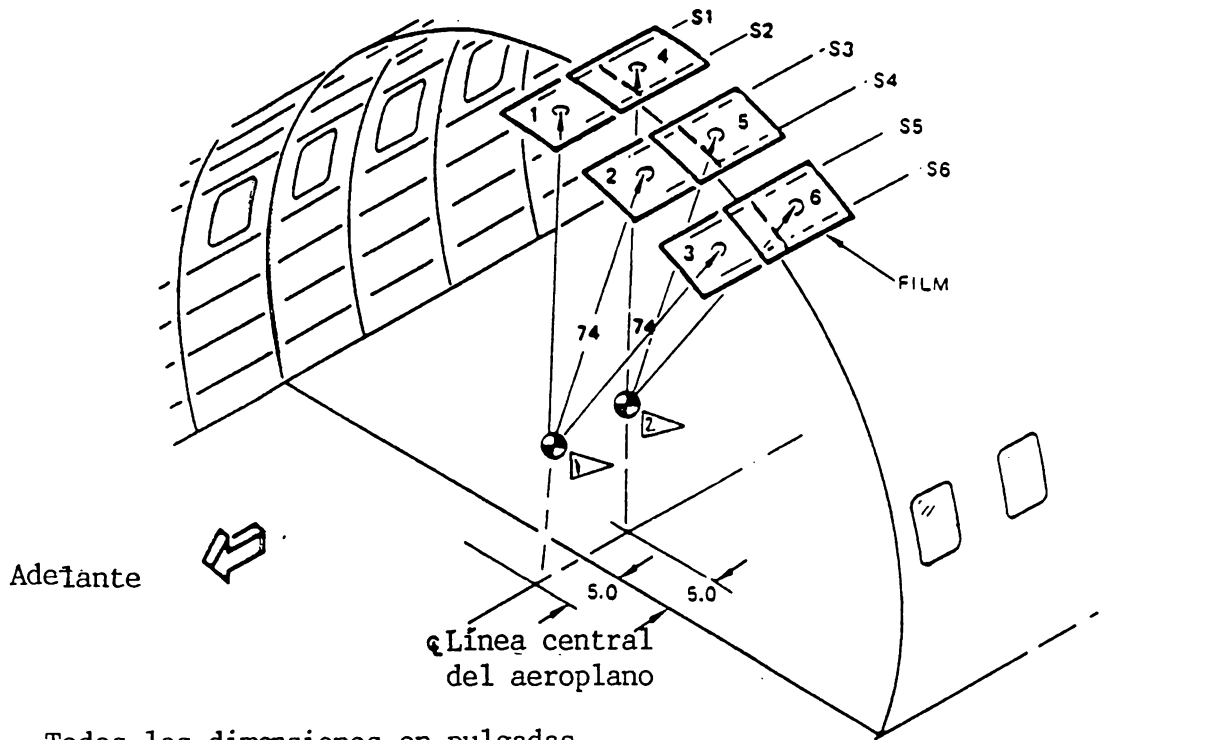
PROPÓSITO:

Detectar quebraduras en los larguerillos, empalmes de larguerillos y empalmes de piel en el área de corona del fuselaje (larguerillo S6 al S1, lado derecho e izquierdo) en la estación de fuselaje BSTA 360. Ver la figura 5.14

Tabla N° 5.2

PARAMETROS DE RAYOS X						
NUMERO DE EXPOSICION	PELICULA			DISTANCIA G. A. P.	CONTROL DEL GENERADOR	
	POSICION	CLASE ASTM	TAMAÑO		KV	MAS
1	1 A LA 3	I	14X17	74	150	1260
2	4 A LA 6	I	14X17	74	150	1260

En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A. P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.



. Todas las dimensiones en pulgadas

- Posición del generador de rayos X
- Localización para exposiciones 1 y 3
- Localización para exposiciones 2 y 4

Figura 5.14: Posición del generador de rayos X y de la película ⁶⁸

5.2.4 MARCOS FORMADORES, LARGUERILLOS Y CLIPS EN LA BSTA 400,520, 685, 747 Y 887.⁶⁹

PROPÓSITO:

Detectar quebraduras en marcos formadores, larguerillos y clips o sujetadores en dichas estaciones del fuselaje desde el larguerillo S6 del lado derecho al S6 del izquierdo y desde el larguerillo S10 al piso. Ver figura 5.15.

Esta técnica está limitada a una inspección exploratoria y no una específica para una falla en particular y es considerada adecuada para detectar grandes quebraduras en miembros que han fallado.

EQUIPO:

Un generador portátil de 150 KVP, 35 grados de emisión lateral de rayos X es utilizado en esta técnica.

Preparación para la inspección

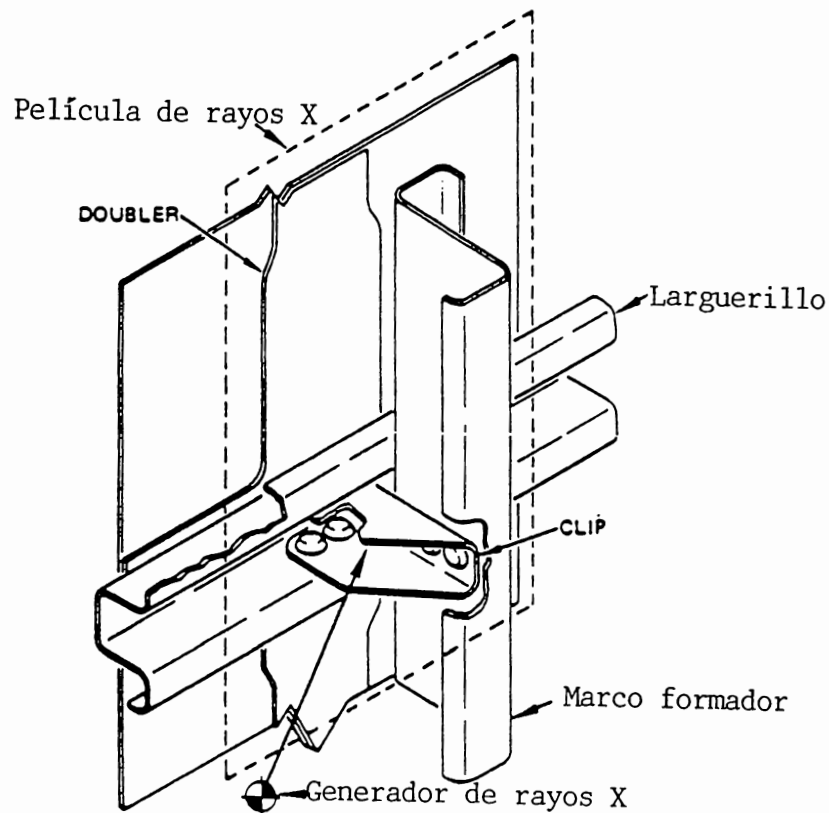
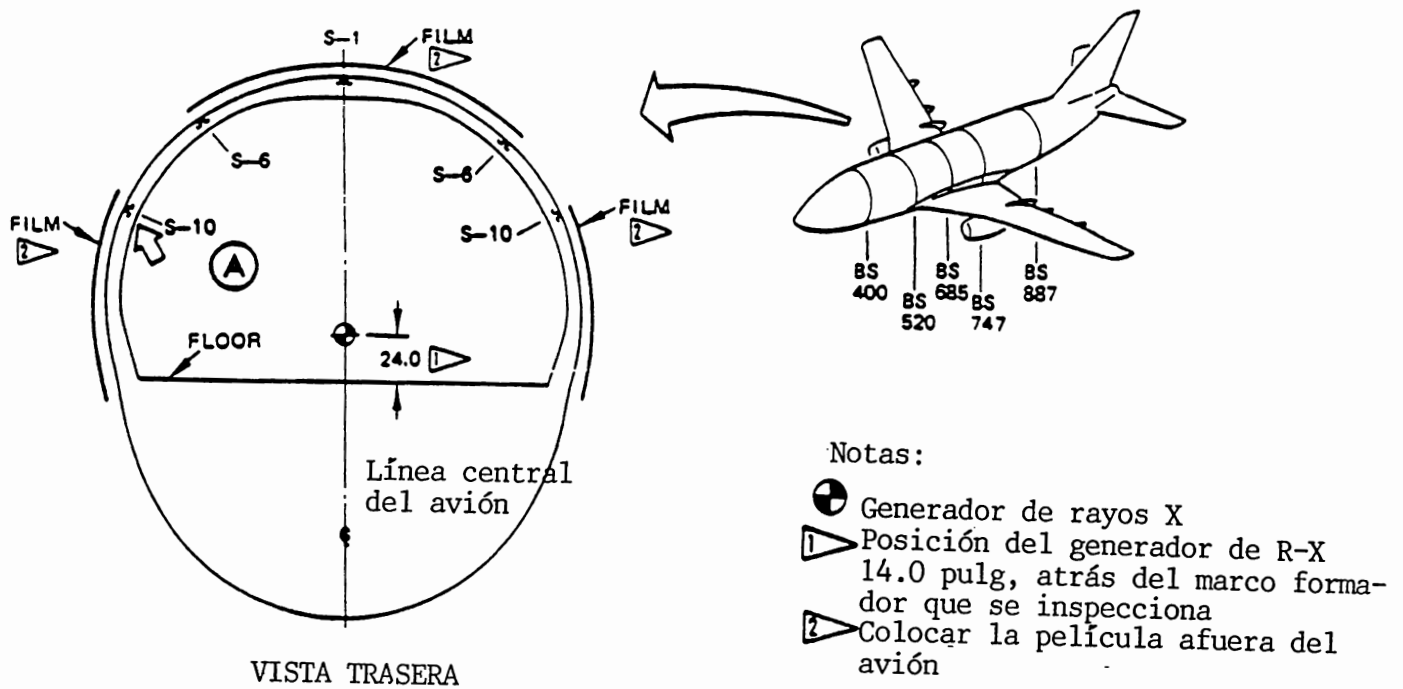
Ajuste a los siguientes parámetros:

Tabla N° 5.3

PARAMETROS DE RAYOS X						
NUMERO DE EXPOSICION	PELICULA			DISTANCIA G. A P.	CONTROL DEL GENERADOR	
	POSICION	CLASE ASTM	TAMAÑO		KV	MAS
1	1 A LA 5	I	14X17	74	145-155	1260

En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.

⁶⁹ NONDESTRUCTIVE TEST BOEING CO, PARTE 2, 53-10-04 PAGINA 1. Abril 15/95



Arreglo de estructura típica y colocación de la película.

(A)

Figura 5.15: Generador de Rayos X y Posición de la Película⁷⁰

5.2.5 ABERTURA DE LA PUERTA DE LA ESCALERA DELANTERA EN LA BSTA 351 Y EL LARGUERILLO S20.

PROPÓSITO:

Detectar quebraduras en la piel, doblers o tiras de refuerzos en la esquina inferior trasera de la abertura de la escalera delantera ubicada en la BSTA 351 y el larguerillo S20.

EQUIPO:

Generador de rayos X portátil de 160 KV, 5 MA, de emisión lateral.

Preparación de la aeronave:

Extender la escalera delantera. (ver figura 5.16)

Tabla N° 5.4

PARAMETROS DE RAYOS X						
NUMERO DE EXPOSICION	PELICULA			DISTANCIA G. A P.	CONTROL DEL GENERADOR	
	POSICION	CLASE ASTM	TAMAÑO		KV	MAS
1	1	I	5 x 7	36	75	300

En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.

Figura 5.16.

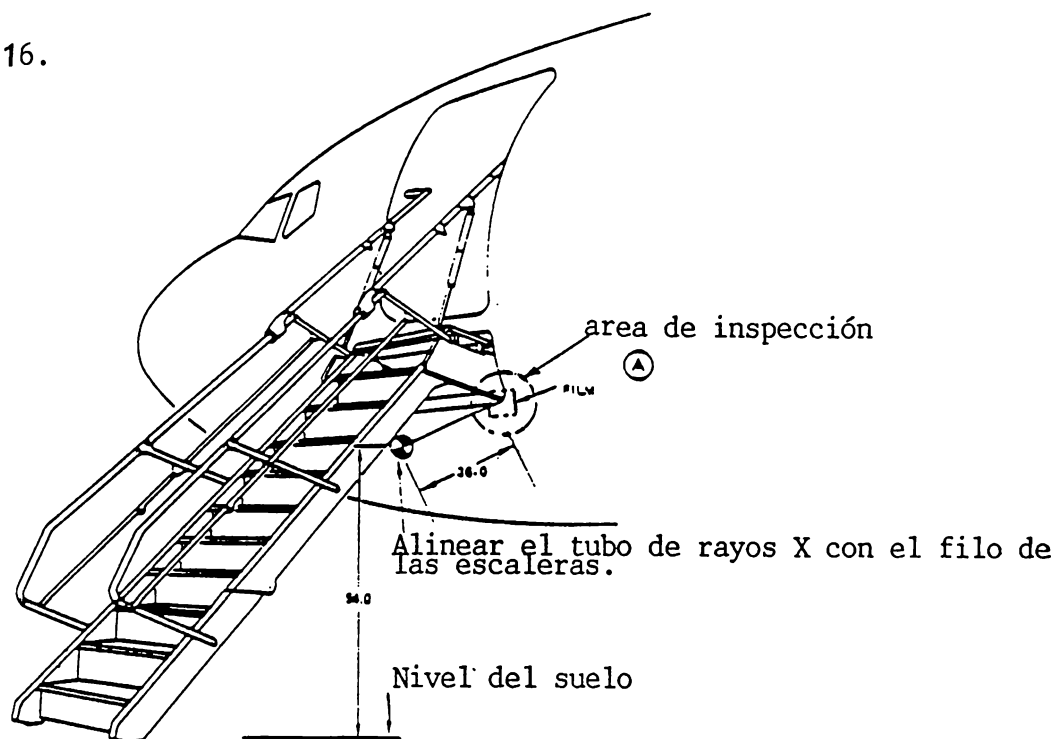


FIGURA 5.16: POSICION DEL GENERADOR Y PELICULA DE RAYOS X⁷¹

⁷¹ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 2, 53-10-08 PAGINA 2. JUL. 15/83.

5.2.6 MARCOS FORMADORES DE LOS FLANGES DE LAS CUERDAS INTERNAS DE LA BAHIA DE CARGA DELANTERA Y TRASERA.⁷²

PROPÓSITO:

Detectar quebraduras en las cuerdas de los flanges internos en los marcos formadores inferiores de las bahías de carga delantera y trasera.

EQUIPO:

a) Generador de rayos X que penetre 0.3 pulgadas de aluminio y que satisfaga los requerimientos de este procedimiento. Se recomienda el equipo Baltospot de 150 KV de tipo panorámico o de 360 grados.

b) Película de baja velocidad, de grano fino y alto contraste (ASTM clase I y II).

Preparación para inspección:

a) Remueva la superficie aerodinámica que obstruya la colocación de la película.

b) Limpie el área y la piel antes de colocar la película.

Procedimiento de Inspección:

a) Cumpla con los requerimientos del generador y la película según la tabla 5.6

b) Refiérase a las figuras 5.17 y 5.18 para la inspección de las áreas, localización del generador y de la película.

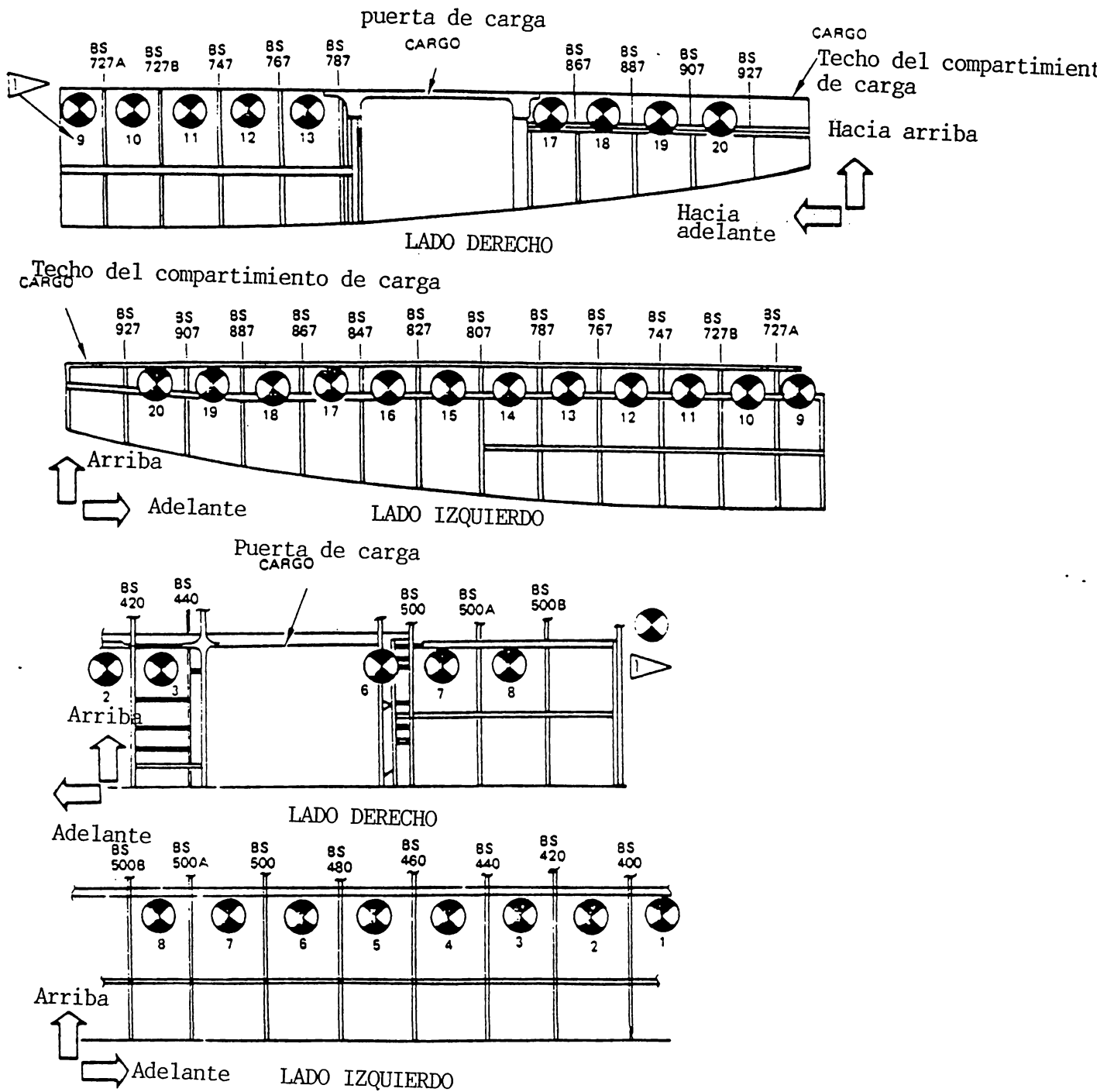
c) Exponga la película hasta obtener 2.0 a 3.5 alta densidad en la cuerda de los flanges internos de los marcos formadores.

Tabla N° 5.5

ESTACIONES DE FUSELAJE	PARAMETROS DE RAYOS X				CONTROL DEL GENERADOR			
	PELICULA		TAMAÑO	DISTANCIA G. A. P.	KV	MAS		
POSICION	CLASE ASTM							
400	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
420	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
440	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
460	1 A 4	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
480	1 A 4	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
500	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
500A	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
500B	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 62	100	900		
727A	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 65	100	900		
727B	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 65	100	900		
747	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 65	100	900		
767	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 65	100	900		
787	1 A 8	I	7 x 14.5	49 a 65	100	900		
807	1 A 4	I	7 x 14.5	47 a 63	100	838		
827	1 A 4	I	7 x 14.5	47 a 63	100	838		
847	1 A 4	I	7 x 14.5	44 a 62	100	778		
867	1 A 8	I	7 x 14.5	41 a 61	100	720		
887	1 A 8	I	7 x 14.5	39 a 59	100	665		
907	1,5	2,3,4,6,7,8	II	I	7 x 14.5	35 a 57	100	586
927	1,5	2,3,6,7	II	I	7 x 14.5	33 a 55	100	536

En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A. P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.

⁷² Nondestructive Test Manual, Boeing Co., Parte 2, 53-10-16, pag. 1. Ene 15 / 84.



737-200, 737-200C

Figura 5.17: Inspección de los marcos formadores inferiores del avión ⁷³

⁷³ Nondestructive Test Manual, Boeing Co., Parte 2, 53-10-16, pag. 8. Abril 15 / 83.

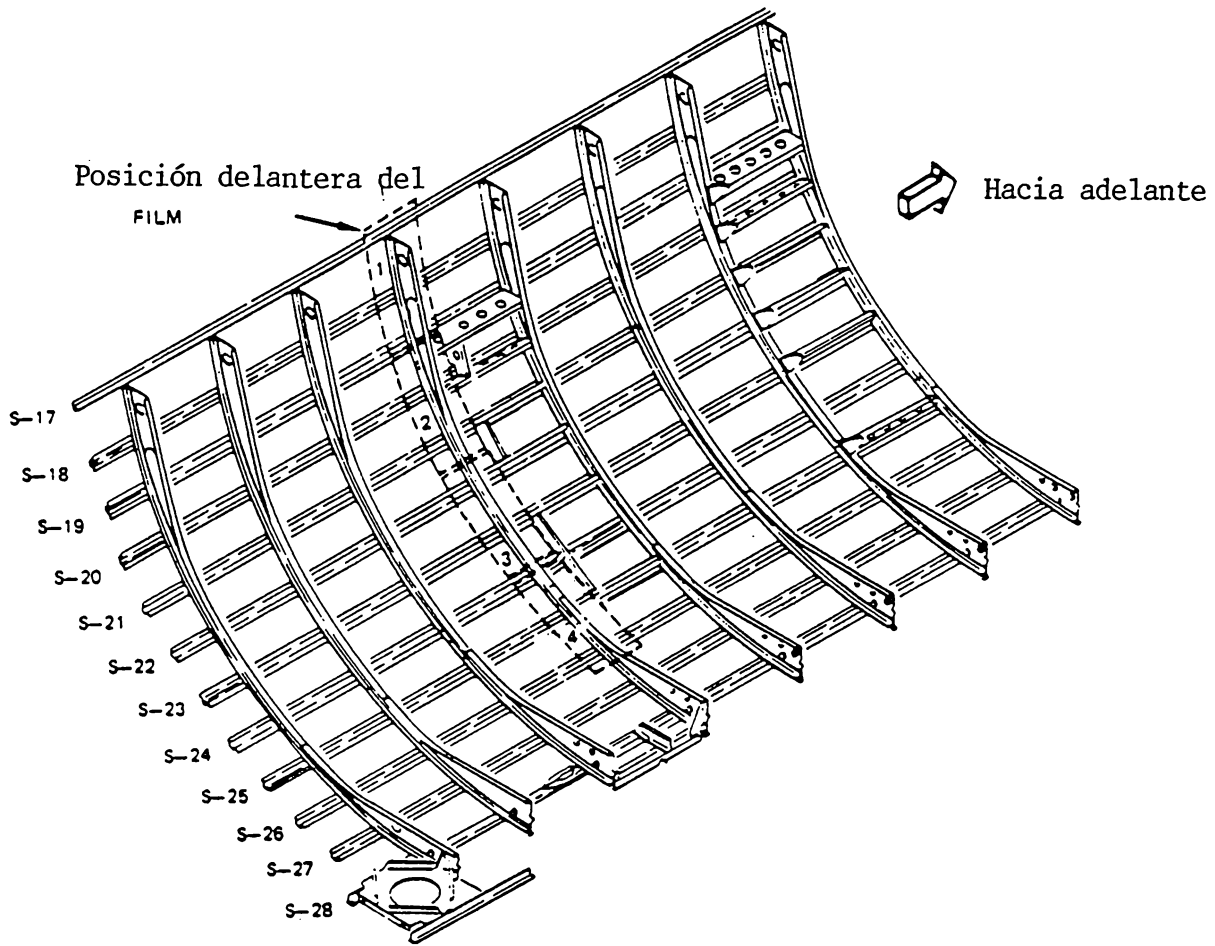


Figura 5.18: Vista Interior del lado inferior izquierdo⁷⁴

DETAIL I

⁷⁴ Nondestructive Test Manual, Boeing Co., Parte 2, 53-10-16, pag. 6. Ene 15 / 84.

5.2.7. DETERMINACION DE LA DISTANCIA DE LOS REMACHES AL FILO DE LOS LARGUERILLOS ENTRE LA BSTA 1016 A LA BSTA 1088.⁷⁵

PROPÓSITO:

Determinar la distancia de los sujetadores o remaches de los larguerillos a su mismo margen de filo entre la estación de fuselaje BSTA 1016 a la BSTA 1088 tal como se muestra en la figura 5.19 Esta inspección aplica únicamente en los larguerillos en que no se pueden determinar dichas distancias por una simple inspección visual.

EQUIPO:

- Generador de rayos X que penetre 0.125 pulgs de aluminio y que opere efectivamente a 50 Kv. Este procedimiento ha sido desarrollado utilizando un equipo Sperry 160 Kv de 5 ma y emisión lateral.
- Película: Cualquier baja velocidad de grano fino y alto contraste (ASTM clase 1)

Procedimiento de Inspección:

- Coloque la película de rayos X según lo muestra la figura 5.19
- Coloque el generador de rayos X perpendicular al exterior del aeroplano en la posición de la figura 5.19
- Ajuste el generador según el siguiente cuadro:

Tabla N° 5.6

PARAMETROS DE RAYOS X						
ESTACION DE FUSELAJE	PELICULA			DISTANCIA G. A P.	CONTROL DEL GENERADOR	
	POSICION	CLASE ASTM	TAMAÑO		KV	MAS
1016-1040	S6R	I	4.5 X 17	36	50	240
1016-1040	S7R	I	4.5 X 17	36	50	240
1016-1040	S8R	I	4.5 X 17	36	50	240
1040-1064	S12L	I	4.5 X 17	36	50	240
1040-1064	S13L	I	4.5 X 17	36	50	240
1040-1064	S14L	I	4.5 X 17	36	50	240
1040-1064	S15L	I	4.5 X 17	36	50	240
1040-1064	S16L	I	4.5 X 17	36	55	240
1064-1088	S13L	I	4.5 X 17	36	50	240
1064-1088	S14L	I	4.5 X 17	36	50	240
1064-1088	S15L	I	4.5 X 17	36	50	240
1064-1088	S16L	I	4.5 X 17	36	55	240

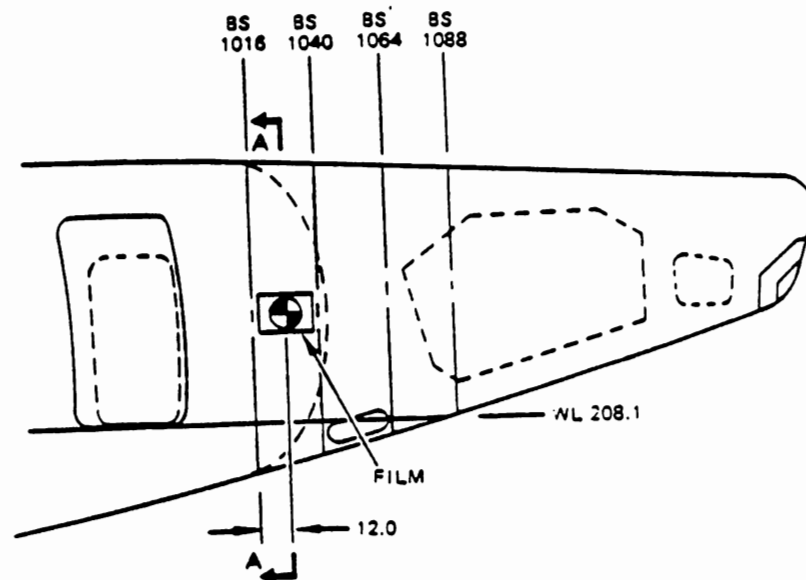
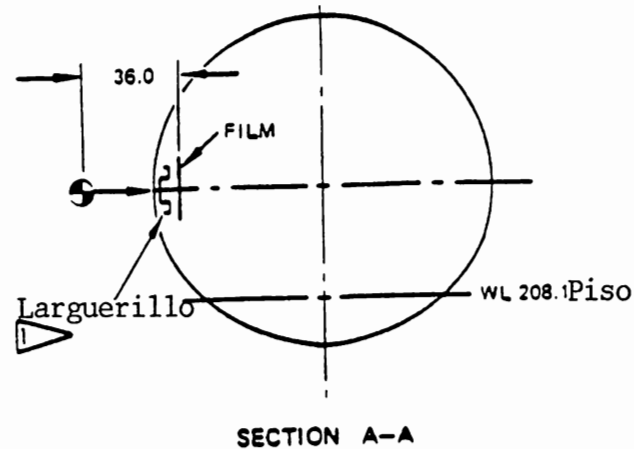
En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.

- Exponga a la película a que obtenga una densidad de 2.0 a 3.0 en las áreas que son comunes a la piel y larguerillos.
- Repita los pasos anteriores para todas las demás exposiciones.

⁷⁵ Nondestructive Test Manual, Boeing Co., Parte 2, 53-30-01, pag. 3. Ene 15 / 87.

Resultados de la Inspección:

Evalúe la película poniendo una atención particular a la distancia desde el centro de los orificios de los remaches al margen o filo de los larguerillos,
La mínima distancia debe ser 0.125 pulgs. para remaches de 5/32 pulgs. de diámetro y 0.150 pulgs para remachas de 3/16 pulgs de diámetro (estos son los que van localizados en las juntas de pieles).



NOTAS:

- TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN PULGADAS
 - LOCALIZACIONES TÍPICAS DE INSPECCION
 - CÍRCULO NEGRO Y BLANCO ES EL GENERADOR DE RAYOS X.
- POSICION DEL GENERADOR PERPENDICULAR AL EXTERIOR DEL AEROPLANO EN EL PUNTO DE INSPECCION.

Figura 5.19: Posición del Generador y de la Película ⁷⁶

⁷⁶ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO. PARTE 2, 53-30-01, PAG. 4, FIGURA 2. ENERO 15/87.

5.2.8 LADO INTERNO DE LA PIEL INFERIOR DEL ALA EN EL REFUERZO S8C AL LADO DEL EMPALME EN LA WBL 71.24.⁷⁷

PROPÓSITO:

Detectar quebraduras en la piel inferior del ala en la sección central del ala en el refuerzo S-8C ubicado en el empalme con la estación del ala WBL 71.24 tal como se muestra en la figura 5.20.

Este procedimiento es para una inspección exploratoria y no es una detallada para un defecto determinado. Es considerada adecuada para la localización de grandes quebraduras en miembros que han fallado.

EQUIPO:

Un generador Baltospot portátil de 150 KV y emisión lateral de 35 grados.

Preparación de la aeronave:

- a) Remueva las superficies aerodinámicas en el pegue inferior del cuerpo al ala como sea requerido para llegar al área de empalme.
- b) Drene y purge el combustible de los tanques.
- c) Cumpla con los siguientes parámetros:

Tabla N° 5.7

PARAMETROS DE RAYOS X						
NUMERO DE EXPOSICION	PELICULA			DISTANCIA G. A. P.	CONTROL DEL GENERADOR	
	POSICION	CLASE ASTM	TAMAÑO		KV	MAS
1	1	I y II	8 x 10	49.0	150	1800

En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A. P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.

⁷⁷ EL TEMA Y LAS FIGURAS 5.40 Y 5.41 ESTAN TOMADAS DEL MISMO NDT BOEING CO, PARTE 2 57-10-02, PAGINA 1,2 Y 4. ABRIL 15/92.

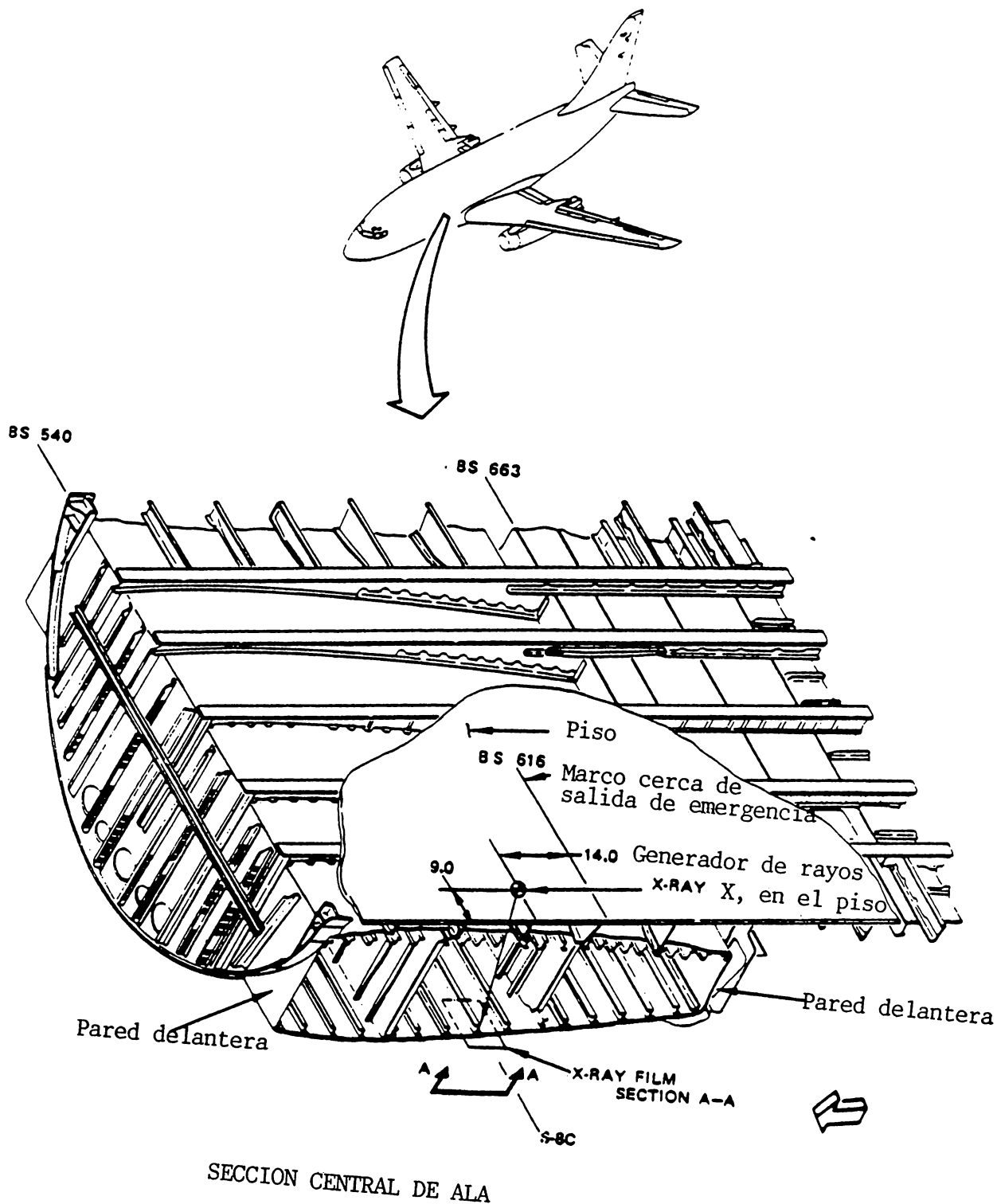


Figura 5.20: Generador de Rayos X y colocación de la película de Rayos X ⁷⁸

⁷⁸ Nondestructive Test Manual, Boeing Co., Parte 2, 57-10-02, pag. 2, fig. 1. Ene 15/82.

5.2.9 PLACAS INTERIORES DE EMPALMES DE LA CUERDA INFERIOR DE LA PARED DELANTERA DEL ALA EN LA BBL 70.85.⁷⁹

PROPÓSITO:

Detectar quebraduras las cuales se propagan de posiciones específicas en la cuerda inferior de la pared delantera, en los platos interiores de empalme del lado interno y externo de la BBL 70.85.

Esta inspección requiere de la entrada a los tanques de combustibles del ala por lo que los tanques tienen que ser drenados y purgados a una condición segura para la salud según el manual de mantenimiento del fabricante antes de entrar.

EQUIPO:

- Generador de rayos X con penetración efectiva de 2.0 pulgs (5.1 cm) en el Al. Se desarrolla con un equipo Sperry de 160 KV, 5 ma, autorectificado y portátil.
- Película de cualquier baja velocidad, fino grano y alto contraste (ASTM clase I).
- Pantalla intensificadora, pantalla de plomo con frente de 0.005 pulgs y 0.010 pulgs atrás para intensificación y reducción de la radiación dispersa.
- Indicadores de Calidad de Imágen (IQI): Se desarrolla esta inspección utilizando penetrómetros de alambre de tipo DIN para obtener una sensibilidad mejor que 1% en el área de interés radiográfico.

Preparación para la Inspección:

- Drene y purge los tanques de combustible.
- Obtenga el acceso a los tanque removiendo las puertas de acceso a la sección central del ala.
- Remueva las superficies aerodinámicas en el pegue del ala al fuselaje atrás de la pared delantera del ala.
- Siga las instrucciones relativas a las precauciones estándares de seguridad por radiación.

Procedimiento de Inspección:

- Identifique el área de inspección según la figura 5.21
- Coloque la película y las pantallas intensificadoras para la exposición como se muestra en las figuras 5.21
- Coloque el generador de rayos X según la figura 5.21
- Ajuste el generador para que penetre 2.0 pulgadas (5.1cm) en el aluminio según la tabla 5.8 :

Tabla N°5.8

NUMERO DE EXPOSICION	PARAMETROS DE RAYOS X				DISTANCIA G. A P.	CONTROL DEL GENERADOR	
	PELICULA		CLASE ASTM	TAMAÑO		KV	MAS
1	pantalla delantera 0.005 pulgs	pantalla trasera 0.010 pulgs			I		

En donde: MAS: miliamperio segundo, TAMAÑO: el tamaño de la película en pulgadas, DISTANCIA G. A P.: la distancia del generador a la película dado en pulgadas.

⁷⁹ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO. PARTE 2, 57-10-05 PAGINA 1.

- e) Exponga la película para obtener una densidad entre 2 y 3.5 en el área de interés.
- f) Use un indicador de calidad de imagen (IQI) para obtener una sensibilidad de película mejor a 1% en el área de interés.
- g) Haga los mismos pasos y las mismas exposiciones en el ala opuesta.

Resultados de la Inspección:

Revise las radiografías poniendo especial cuidado a las quebraduras que se inician de los orificios de los sujetadores hacia adelante y hacia atrás.

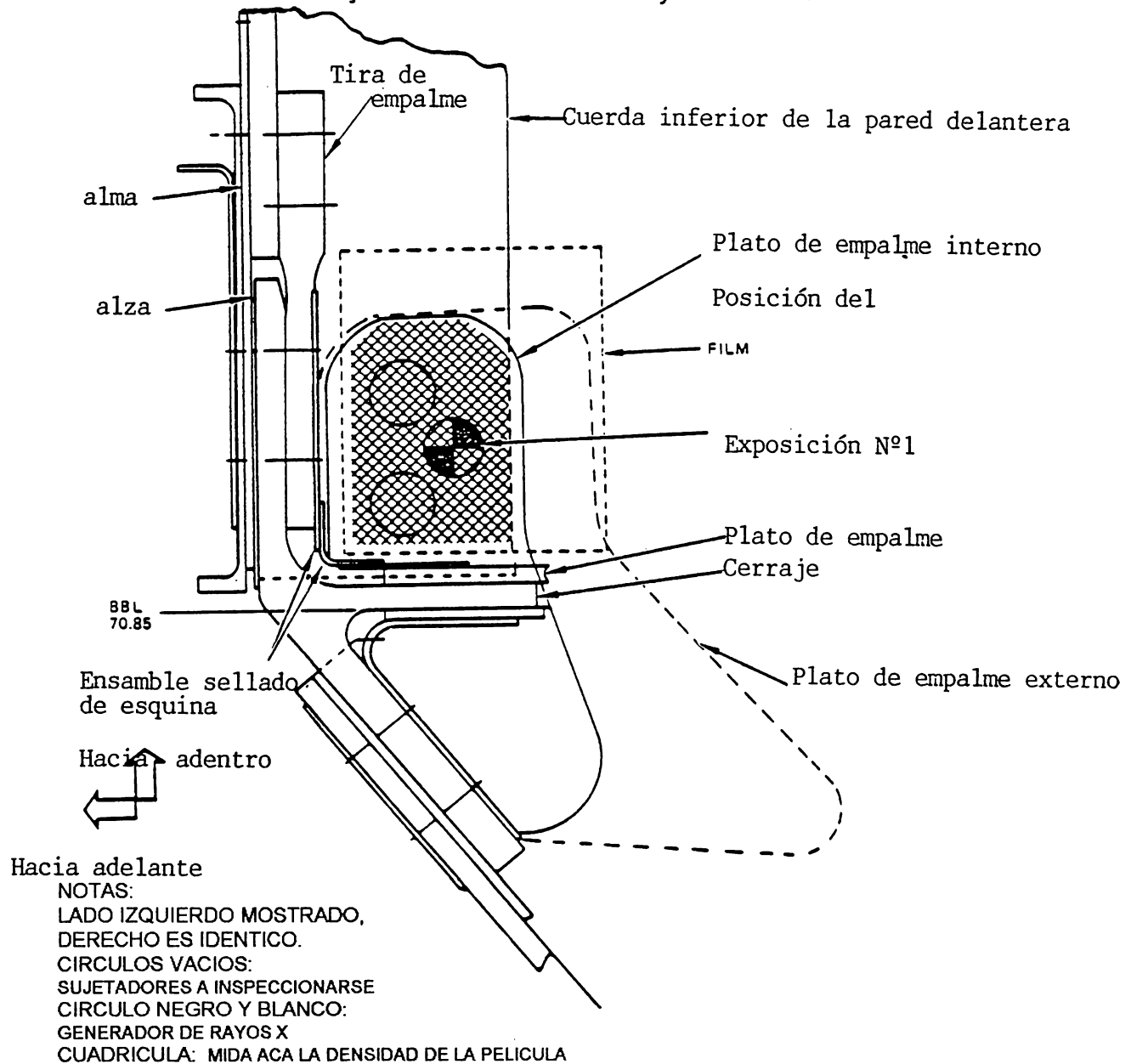


FIGURA 5.21 FLANGE DE LA CUERDA INFERIOR DE LA PARED DELANTERA ⁸⁰

5.3 ULTRASONIDO

5.3.1 PIN EN LAS JUNTAS DE TORSION SUPERIORES DEL TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL.

PROPÓSITO:

Detectar quebraduras que se propagan desde el orificio del perno anti-rotación en los pines de las juntas de torsión superiores del tren principal de aterrizaje. (ver figura 5.22)

EQUIPO:

Cualquier equipo que satisfaga los requerimientos de este procedimiento. El siguiente ha sido usado para desarrollar el siguiente procedimiento y fué encontrado satisfactorio:

- a) Instrumento (Nortec NDT 131)
- b) Transductor de 5 Mhz, elemento de 0.25 pul de diámetro.
- c) Obtenga la referencia estándar 349 de la figura 5.24
- d) La gel acopladora es una grasa ligera, de aceite o un acoplador comercial compatible con la estructura de una aeronave.

Preparación para la Inspección:

- a) Remueva la pintura de los topes del pin de las juntas de torsión.
- b) Totalmente limpie la superficie a ser inspeccionada.
- c) Aplique una delgada película de gel.

Calibración del instrumento:

Calibración :

- a) obtenga la referencia estándar, aplique una delgada película de gel y haga los ajustes preliminares del instrumento (figura 5.25).
- b) Aplique una delgada película de gel al transductor y coloque el transductor en el final de la referencia estándar y ajuste el tiempo de barrido de tal manera que la reflexión de retorno es 90% del total de la pantalla del pulso inicial.
- c) Obtenga la reflexión de retorno del orificio de 0.375 pulg. Esta señal debe aparecer aproximadamente 40% del total de la pantalla del pulso inicial. Ajuste la ganancia para obtener 50% de la escala de altura total para la señal del orificio.
- d) Mueva el transductor para detectar la minúscula incisión en un lado del orificio. Note la posición de la señal de la misma y su magnitud.

Procedimiento de Inspección:

- a) Aplique gel a la superficie a ser inspeccionada
- b) Coloque el transductor en el tope de la junta del pin de torsión en la posición 1 de la figura 5.26 para detectar el orificio del perno anti-rotación. Ajuste la sensibilidad para obtener un 50% de respuesta de la escala total del orificio del

perno. La localización aproximada de la reflexión del orificio debe ser como la encontrada en la posición 1 de la figura 5.26 Si el tope de los orificios en el pin caen en línea con el orificio anti-rotación, coloque el transductor adyacente a la ranura.

- c) Examine con el transductor alrededor del tope del pin. La señal proveniente del orificio del perno anti-rotación y la reflexión de retorno del tope del pin ocurrirán en la pantalla en las localizaciones indicadas con la amplitud aproximada mostrada en la figura 5.26
- d) Las señales de las posiciones 3 y 4 como se muestran en la figura 5.26 ayudarán a determinar si el pin está quebrado. El pin debe ser posteriormente investigado si:
- El transductor es colocado en las posiciones 3 o 4 por la figura 5.26 y una señal fuerte, de 50% o de mayor amplitud es obtenida aproximadamente con el 5% del total de la pantalla de la señal de orificio del perno anti-rotación. Esto es una evidencia de una quebradura.
 - El transductor es colocado en las posiciones 3 o 4 por la figura 5.26 y una significativa pérdida ocurre en la reflexión de retorno del tope opuesto del pin. Esto es evidencia también de una quebradura.

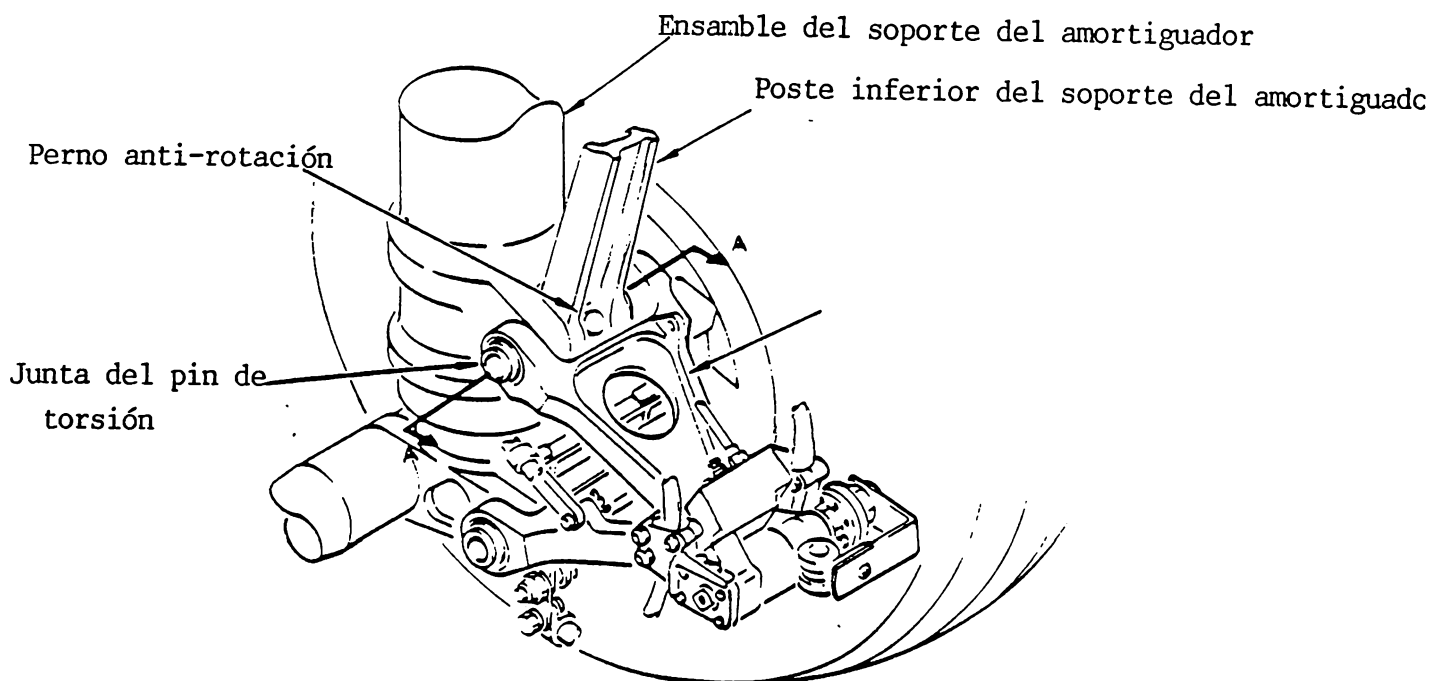
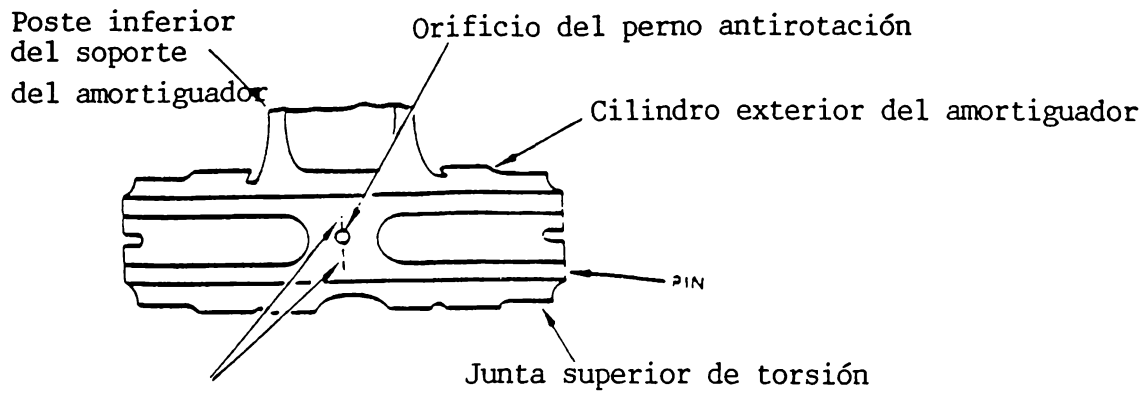


FIGURA 5.22 JUNTAS DE TORSION SUPERIORES DEL TREN DE ATERRIZAJE⁸¹

⁸¹NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 32-10-01 PAG 4, ABRIL 15/86



Típicas quebraduras localizadas

FIGURA 5.23 CORTE A-A DE LA FIGURA 5.22

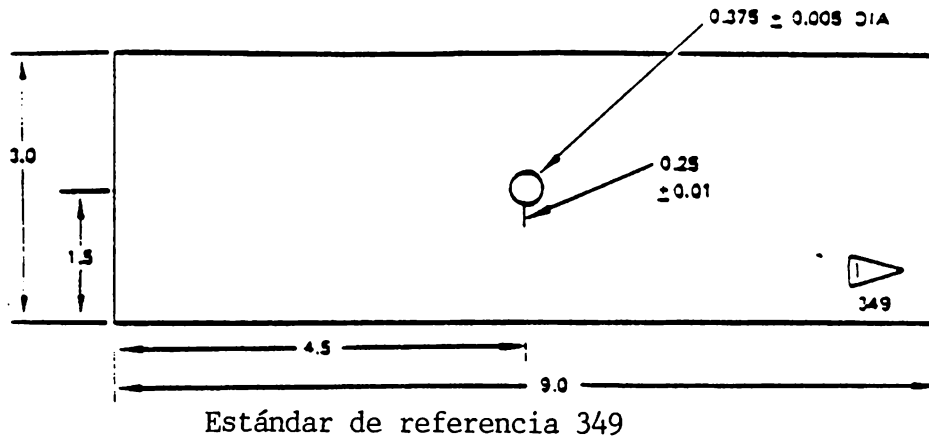
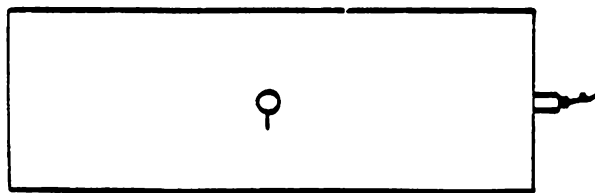


FIGURA 5.24 REFERENCIA ESTANDAR 349



CALIBRACION A

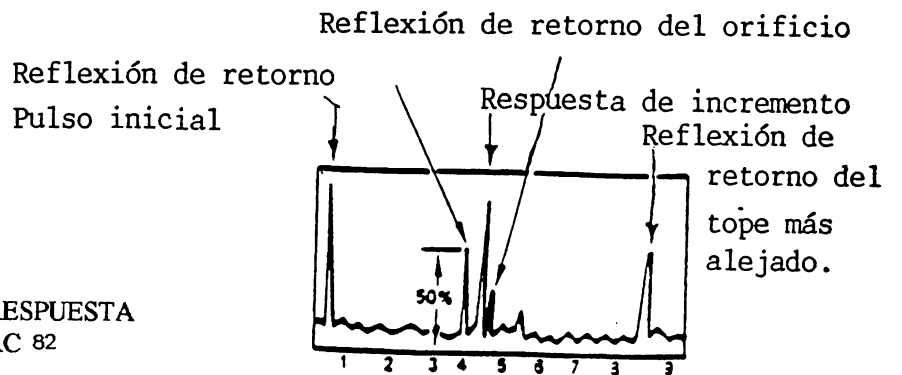
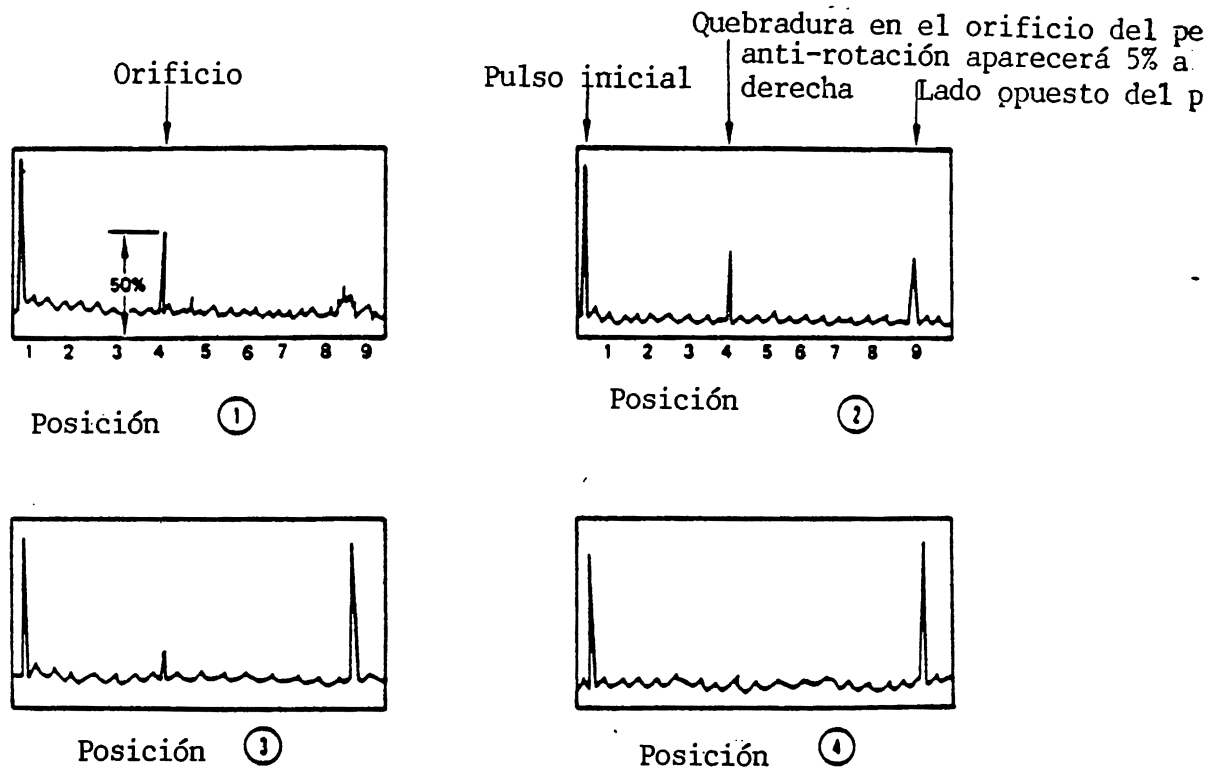
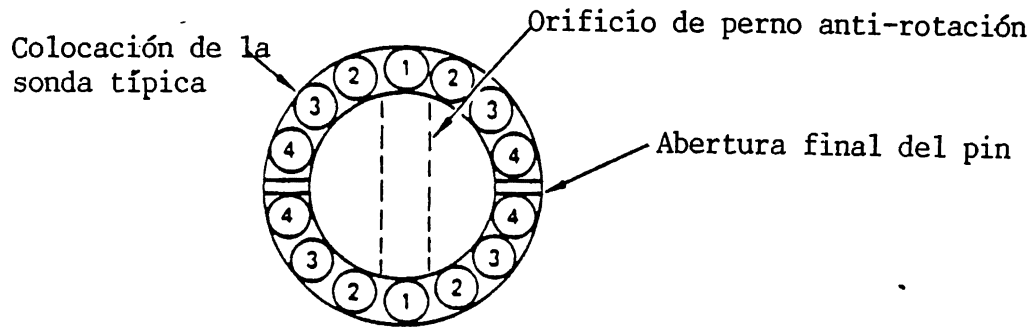


FIGURA: 5.25 CALIBRACION A Y RESPUESTA OBTENIDA EN EL TRC 82



NOTA: Estos resultados son sólo para pines no dañados .

Figura 5.26: Posición del transductor para la calibración A. ⁸³

5.3.2 SUJETADORES

PROPÓSITO:

Para detectar pernos quebrados o severamente rajados usando la inspección de ultrasonido. (Ver figura 5.27).

EQUIPO:

- a) Instrumento transductor: cualquier equipo pulso-eco de ultrasonido y una combinación de transductor que opere en un rango entre 5 a 10 Mhz. El siguiente equipo satisface los requerimientos de esta inspección:
Instrumento USL38 de Krautkramer Branson, transductor de 0.25 pulgs. de diámetro y 10 Mhz.
- b) Estándar de referencia con un perno y bloque de calibración:
 - Perno de Calibración: use un perno del mismo material, tipo y longitud como el perno a ser examinado.
 - Bloque de Calibración: un bloque de una pulgada de espesor del mismo material que el perno a ser examinado.
- c) Gel o acople: grasa ligera o equivalente, compatible con la estructura de la aeronave.

Preparación para la Inspección:

Localice el perno de inspección y asegurese que el tope del perno que contacta al transductor esté limpio y libre de sellantes.

Calibración del Instrumento:

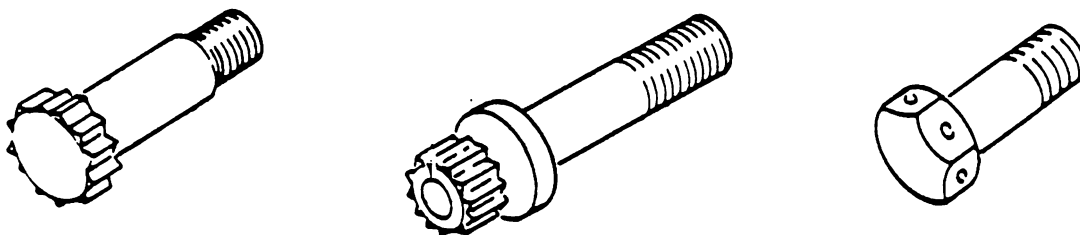
- a) Aplique gel al bloque de calibración y a los topes del perno de calibración.
- b) Efectúe un ajuste preliminar del instrumento según el manual del operador.
- c) Coloque el transductor en el bloque de calibración. Ajuste el rango de pantalla a igualar una división mayor en la pantalla cuadrículada por una pulgada de largo del bloque de calibración.
- d) Ajuste la ganancia del instrumento usando el perno de calibración para la inspección conducida de:
 - ◆ Cabeza del perno: Coloque el transductor firmemente en la superficie aplanada de la cabeza del perno de calibración. Ajuste la ganancia para obtener una amplitud de reflexión de superficie de retorno de 40% de la altura de toda la pantalla.
 - ◆ Tope roscado del perno: Coloque el transductor firmemente en la superficie aplanada del tope roscado del perno de calibración. Ajuste la ganancia para obtener una amplitud de reflexión de superficie de retorno de 60% de la altura de toda la pantalla. Ver figura 5.28

Procedimiento de Inspección:

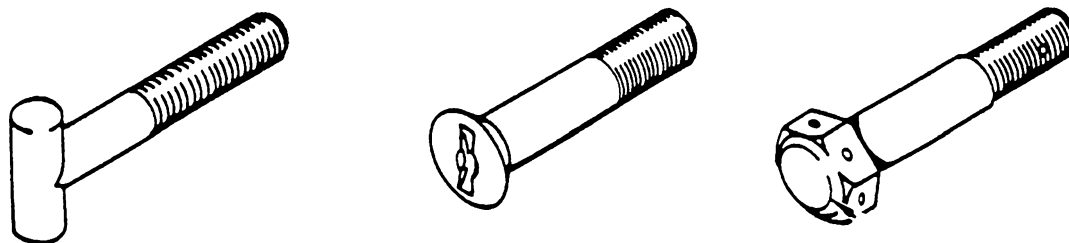
- Determine las propiedades del perno y el tope del perno a ser inspeccionado.
- Calibre el instrumento como se explicó en el apartado anterior.
- Aplique gel acopladora al tope del perno.
- Coloque el transductor firmemente en la superficie plana del tope del perno y examínelo. La presentación de la pantalla debe aparecer como se observó en la calibración.

Resultados de la Inspección:

- Una fractura a lo largo del área no roscada será notada por una indicación de la cara fracturada con una ausencia de la reflexión esperada de retorno. (ver figura 5.29)
- Una quebradura larga sin separación del vástago será notada por una indicación del 20% de la altura de la pantalla o una cantidad mayor a ese porcentaje, con la reflexión esperada de retorno de la superficie todavía visible.
- Si la cara fracturada del perno es irregular, el ultrasonido relectado podría deflectarse lejos del transductor. La pérdida de la amplitud de la reflexión de retorno de la superficie indica un perno portencialmente quebrado o fracturado.
- Compare todos los resultados con los obtenidos de los pernos de calibración.



PERNOS TIPICOS QUE PUEDEN SER INSPECCIONADOS DE CUALQUIER TOPE



PERNOS TIPICOS QUE PUEDEN SER INSPECCIONADOS DE LA ROSCA

Figura 5.27 Pernos utilizados en aviación inspeccionados por ultrasonido⁸⁴

⁸⁴NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 51-00-00 PAG 3, FIGURA I. AGOSTO 15/87

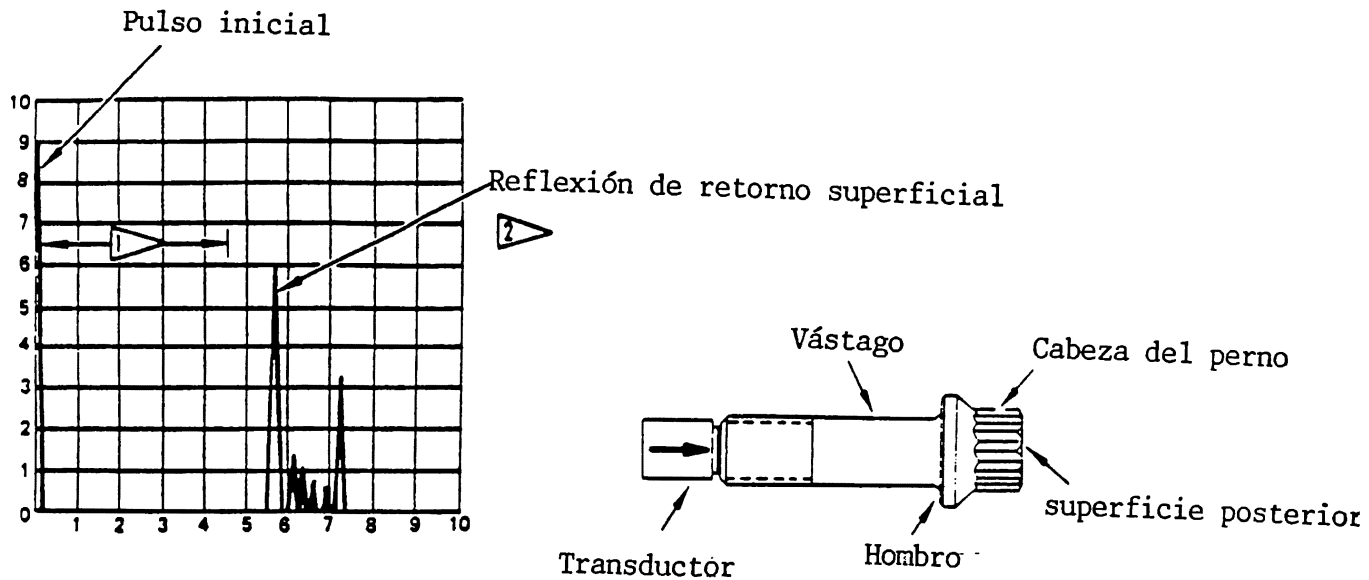


Figura 5.28 Respuesta en el tope roscado

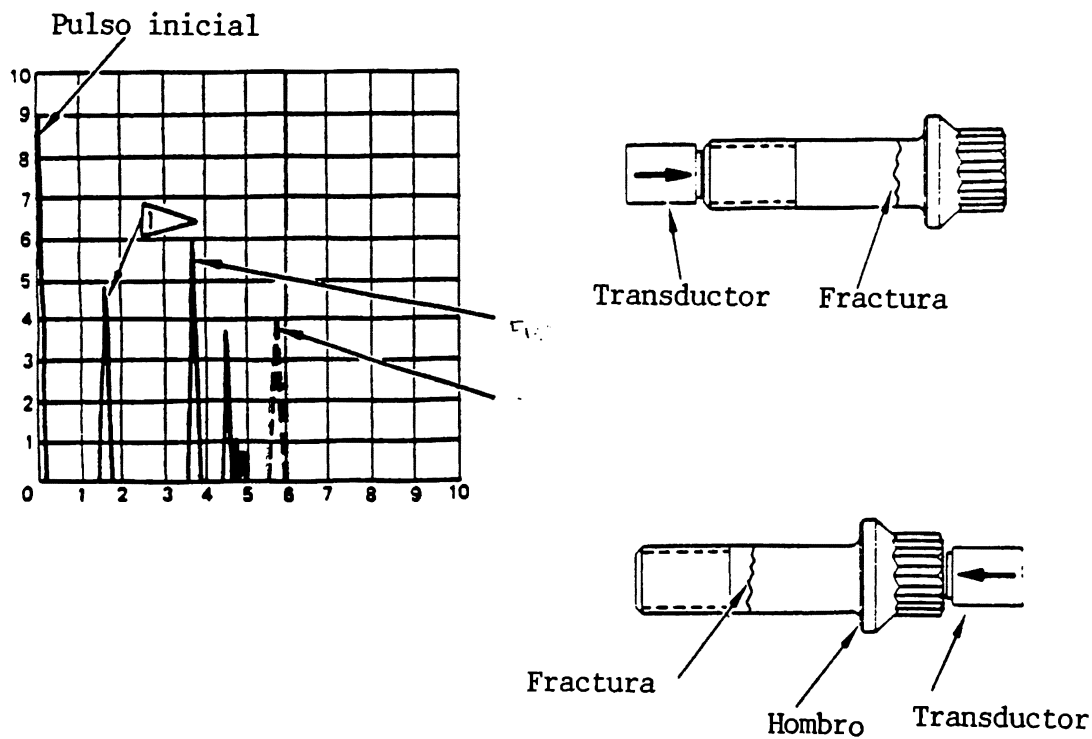


Figura 5.29 Respuesta de fractura en el área no roscada.⁸⁵

⁸⁵ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 51-00-00 PAG 4, FIGURA 2 y 3. AGOSTO 15/87

5.3.3. CUERDA EXTERIOR EN EL LARGUERILLO 18A Y LA ESTACION 727⁸⁶

PROPOSITO:

El procedimiento de inspección por ultrasonido es usado para examinar la cuerda externa en la intersección del larguerillo 18A y la estación 727 por quebraduras. Las quebraduras pueden ocurrir en los orificios de los sujetadores o entre ellos como se muestra en la figura: 5.30

EQUIPO:

Transductor de Ultrasonido con un modo de onda cortante angular de 70 grados en el aluminio y que opere a 5 Mhz. Como equipo adicional tenemos toda la instrumentación que se ha descrito anteriormente con las otras inspecciones por ultrasonido.

Preparación para la inspección:

Remueva la pintura del lado interior de la cuerda externa en el área de inspección. También remover la pintura en el lado exterior de la cuerda externa inmediatamente abajo de la cuerda externa.

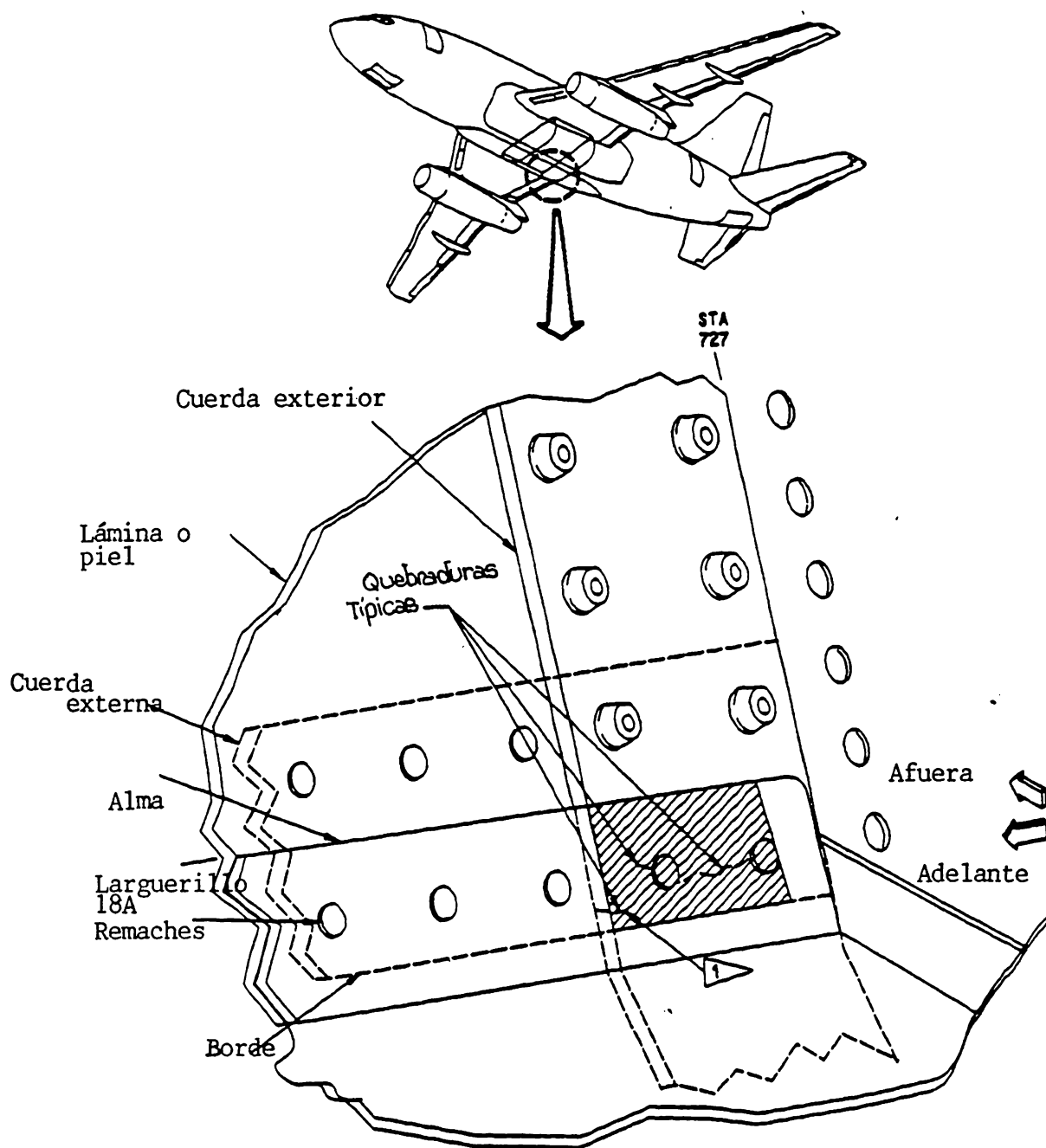
Procedimiento de Inspección:

Las inspecciones se llevan a cabo en el lado interior y exterior de la cuerda exterior después de haber sido calibrado el equipo, aplicado suficiente gel acopladora colocado el transductor en un movimiento hacia adelante y al mismo tiempo girandolo unos 15 grados sentido horario y antihorario en toda la prueba y hacia abajo y hacia arriba aproximadamente ¼ de pulgada.

Resultados de la Inspección:

Las señales que son 50% de la altura de toda la pantalla o mayores y estan entre 3.0 y 9.5 en la linea horizontal son indicaciones de quebraduras. Asegurese que el orificio del sujetador no es la causa que origina la señal.

⁸⁶ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 53-10-01 PAG 6, FIGURA 1 (5.60). AGOSTO 5/94



NOTAS:

- ZONA RAYADA: AREA DE INSPECCION
- EL LADO DERECHO DE LA CUERDA EXTERIOR DEL AVION ES MOSTRADO. LA DEL LADO IZQUIERDO ES SIMILAR.
- BANDERA 1: ES POSIBLE QUE LAS QUEBRADURES ESTEN RETIRADAS DE LOS ORIFICIOS DE LOS SUJETADORES.

INSPECCION DE LA CUERDA EXTERNA EN EL LARGUERILLO 18A Y LA BSTA 727. ⁸⁷
 FIGURA 5.30

5.3.4 INSPECCION DEL MAMPARO DE PRESURIZACION EN LA BSTA 178.

PROPOSITO:

El procedimiento es indicado para examinar áreas de la piel que están detrás de los refuerzos en el mamparo de la BSTA 178. Generalmente se utiliza para encontrar quebraduras que sean 0.2 o más de pulgadas de longitud.

EQUIPO:

Se recomienda un equipo de ultrasonido de inspección pulso-eco que opere a una frecuencia de 8 a 12 Mhz. Se utilizarán transductores con la misma frecuencia y todos los demás instrumentos utilizados en la inspección por ultrasonido.

Preparación para la inspección:

Si hay pintura de Enamel en el lado delantero del mamparo de presurización, remuévalo del área en que se examinará la parte de la misma manera que el polvo y sellantes.

Procedimiento de la Inspección:

- Coloque el transductor en el área que se examinará.
- Mueva el transductor suavemente a lo largo del mamparo de presurización.
- Gire suavemente el transductor a una corta distancia aproximadamente 30 grados de izquierda a derecha para encontrar cualquier posible quebradura que no esté paralela al filo de los refuerzos.
- Marque la localización de las zonas en que las señales originales sean mayores a un 50% del total de la altura de la pantalla y entre 28% y 90% del horizontal.
- Efectúe una frecuente calibración con el estándar de referencia empleado en la calibración. Si la señal ha disminuido un 10% o más, efectúe una nueva calibración y caso contrario (si no ha disminuído más del 10%), aumente la ganancia a 18dB y continúe la inspección.

Resultados de la Inspección:

Las señales que sean 50% de la altura de la pantalla o mayor y entre 28% y 90% de la línea base horizontal, serán posibles indicaciones de quebraduras. Compare las señales que ocurre durante la inspección y la que se obtiene del borde de la referencia estándar durante la calibración. Asegúrese que la indicación de ultrasonido no es un resultado de otras causas como la contaminación de la superficie ó la reflexión de un orificio de sujetador.

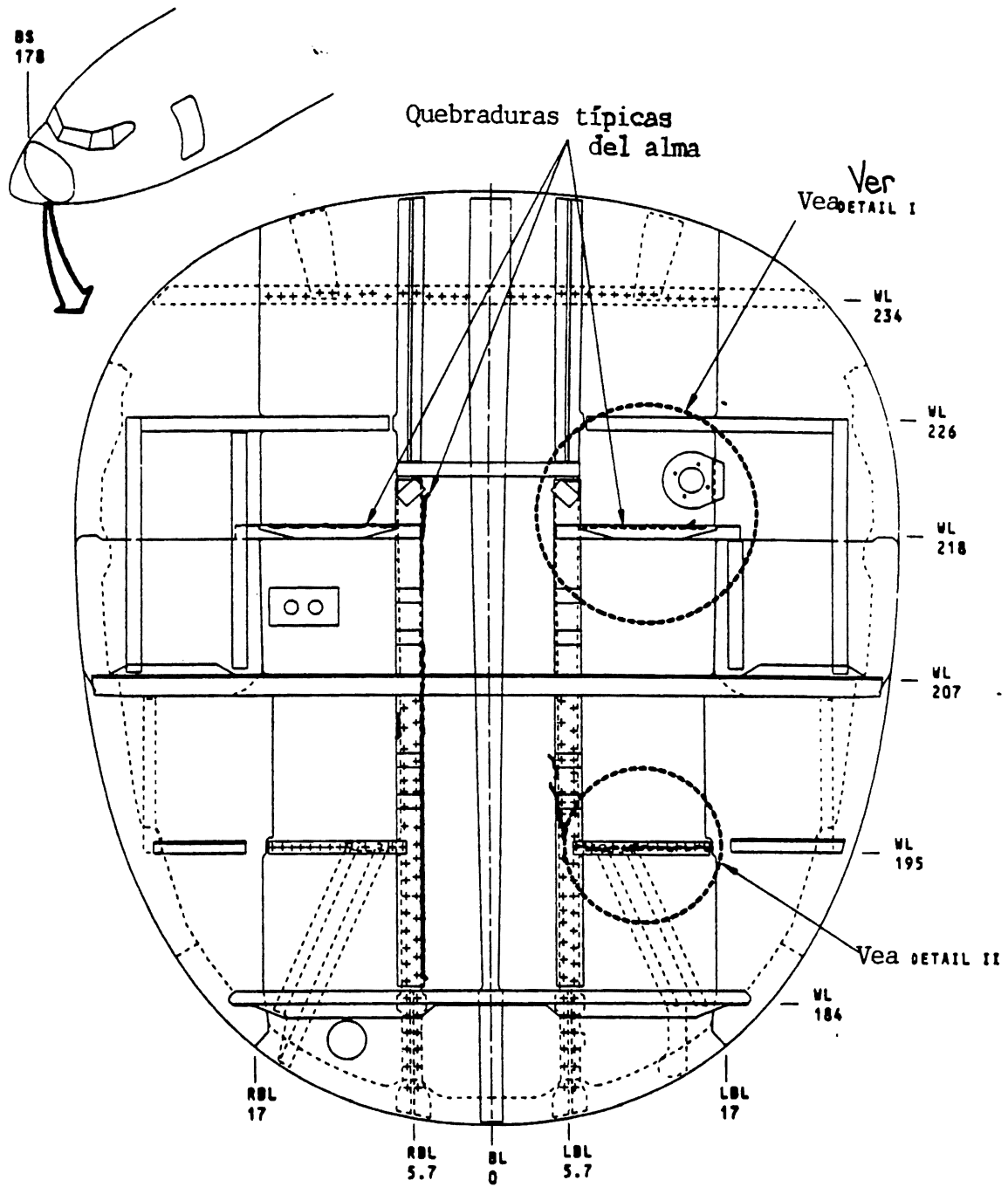


Figura 5.31: INSPECCION DE MAMPARO DE PRESION EN LA BSTA 178⁸⁸

⁸⁸ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 53-10-02 PAG 6, FIGURA I. NOV 5/94.

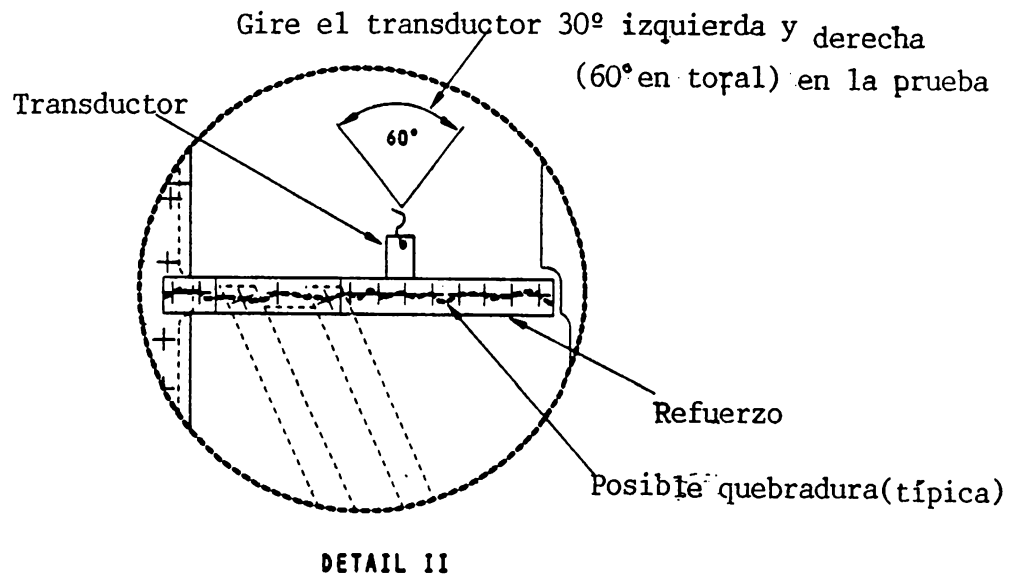
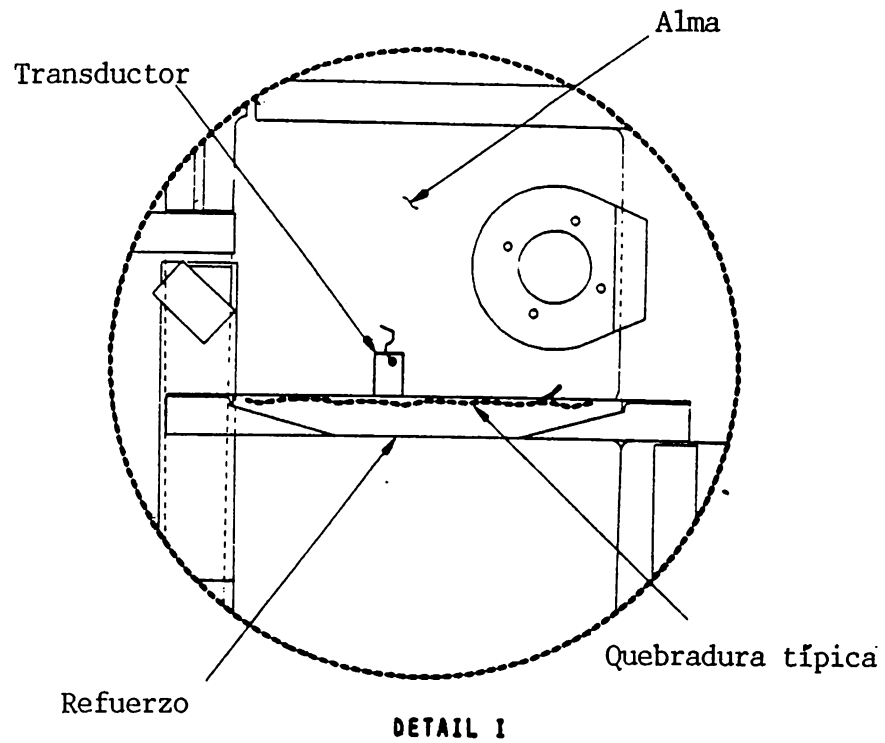


Figura 5.32 Area de inspección en el mamparo de la BSTA 178⁸⁹

⁸⁹ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 53-10-02 PAG 7, FIGURA 2. NOV 5/94.

5.3.5 INSPECCION DE ADHESION DE ULTRASONIDO EN LOS "DOBLERS" DEL FUSELAJE.⁹⁰

PROPOSITO:

Para detectar desprendimiento de los "doblers" o refuerzos del fuselaje. La estructura consiste principalmente de un espesor de 0.036 pulgadas de lámina exterior de 2024-T3.

EQUIPO:

Cualquier instrumento de adhesión capaz de detectar desprendimientos de 1 pulgada cuadrada, 1 sonda de contacto y un espécimen de prueba que contenga conocidos vacíos que se fabrique para ocuparlo como estándar de inspección.

La localización de los "doblers" es mostrada en la figura 2 que es típico de la estructura arriba del larguerillo 10.

Preparación para la inspección.

Limpie el polvo suelto y hojuelas de pintura levantada o ampollas de la superficie que se examinará. Posteriormente, localice la posición de los refuerzos con el patrón de sujetadores que se muestran en la figura 5.33

Procedimiento de inspección:

- Use el patrón de sujetadores justo arriba de las juntas verticales para localizar a los doblers,
- Coloque la sonda en la lámina de la superficie alejandola del dobler. El instrumento debe de dar una indicación de desprendimiento.
- Deslice la sonda ya sea hacia atrás o adelante del dobler. El instrumento debe de dar una indicación de adhesión tan pronto como la sonda pase a través de las áreas adheridas.

⁹⁰ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 53-30-02 PAG 1, OCT 15/89

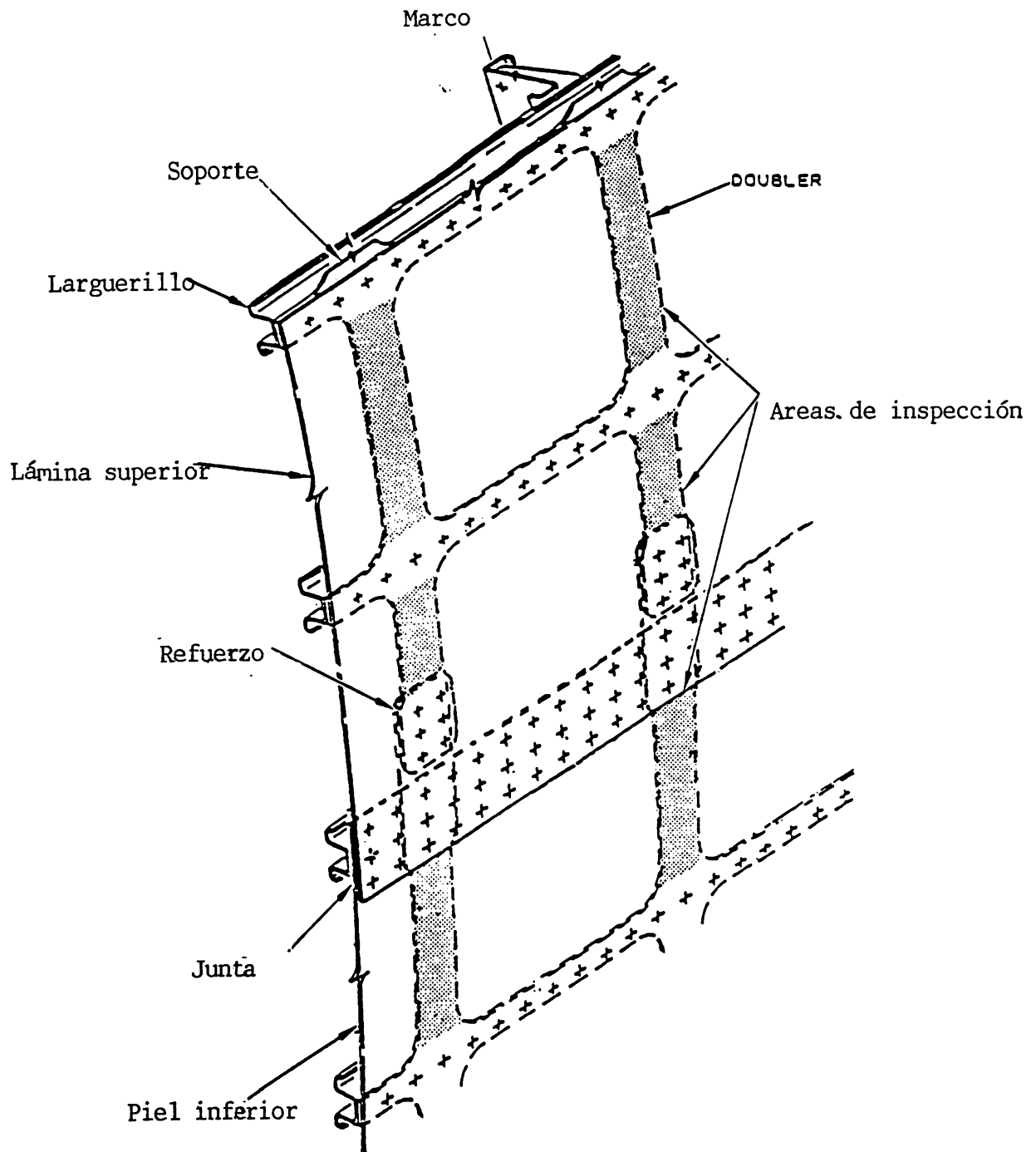


Figura 5.33: Configuración típica de los doblers del fuselaje⁹¹

⁹¹ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 53-30-02 PAG 4, FIGURA 1, OCT 15/89

5.3.6 .INSPECCION DE ULTRASONIDO DE LOS DOBLERS DE LOS CINTURONES DE LAS VENTANAS.

PROPOSITO:

Para encontrar desprendimiento de las cinchas de los doblers de las ventanas del fuselaje. La estructura tiene un espesor de 0.040 pulgadas de lámina exterior de material 2024-T3 y un dobler de 0.040 pulgadas. La inspección es del lado exterior de la piel o lámina.

EQUIPO:

- Cualquier instrumento de inspección de adhesión que pueda encontrar desprendimientos de una pulgada cuadrada o mayores.
- Sonda y
- Una referencia estándar. Si no se dispone de ella, el instrumento puede ser calibrado en un área del aeroplano que se conozca de antemano que hay adhesión y que tiene la misma piel y espesor del dobler.

Preparación para la inspección:

Hay que limpiar el polvo suelto, las hojuelas de pintura o las ampollas de la superficie que se inspeccionará. Posteriormente hay que localizar la posición de los doblers que se encuentran adheridos por el patrón de sujetadores alrededor de las ventanas como se muestra en la figura 5.34

Procedimiento de Inspección.

- Calibre el instrumento
- Coloque la sonda en la lámina o piel del fuselaje al dobler como se muestra en la figura 5.65 y posición de la sonda en 1. El instrumento debe de dar una sola señal de espesor (desprendimiento) casi igual que la respuesta de la referencia estándar.
- Mover la sonda a través del dobler como en la figura 5.65 con la sonda en la posición 2. El instrumento debe de dar una indicación de espesor doble (adhesión) casi la misma que la respuesta de la referencia estándar.
- Mover la sonda a través del dobler para inspeccionar todas las áreas como en la figura 5.34 Para evitar errores en la respuesta, no deslice la sonda sobre los sujetadores.

Resultados de la inspección.

- Todas las áreas que dan una respuesta que es casi la misma que la respuesta de desprendimiento en la calibración, muestran un desprendimiento y deben de ser investigadas a fondo.
- Visualmente asegúrese de las indicaciones de desprendimiento del interior. Logre el acceso al interior removiendo los paneles de las paredes y los aislamientos térmicos.
- Si no se encuentra una separación visual de la piel y el dobler, coloque un calibrador de 0.005 pulgadas entre la piel y el dobler en el punto no satisfactorio que muestre desprendimiento.
- Si se encuentran desprendimiento, refiérase a las publicaciones del fabricante para los demás requerimientos de inspección y de reparación.

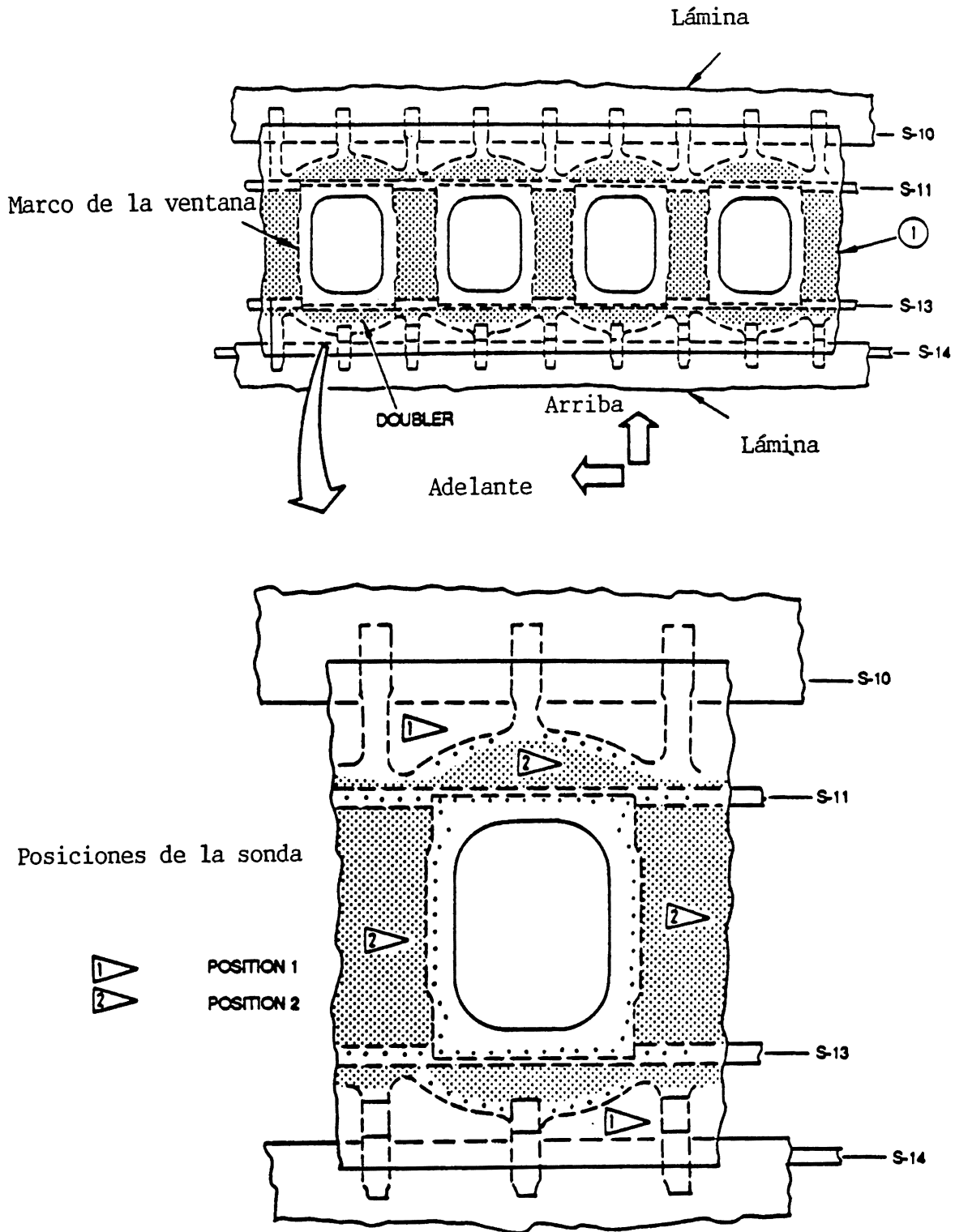


Figura 5.34: Procedimiento de Inspección con las sondas⁹²

⁹² NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 4, 53-30-03 PAG 5, FIGURA 2, OCT 15/89

5.4 CORRIENTES DE EDDIE

5.4.1 IDENTIFICACION DEL MATERIAL DE LOS CABLES DE CONTROL

PROPOSITO:

Identificar los cables de control de acero al carbono o aceros resistentes a la corrosión en una aeronave. Este procedimiento usa un instrumento con plano de impedancia de corrientes de Eddie que puede identificar el material de un cable por diferentes señales de la pantalla.

EQUIPO:

- Cualquier instrumento con plano de impedancia por corrientes de Eddie y combinación de sondas que pueden operar entre 20 kHz y 500 kHz y que cumpla con las condiciones necesarias para este método.
- Las sondas de tipo lápiz que puedan operar entre 20 kHz y 500 kHz y
- Una referencia estándar como se muestra en la figura 5.35

Preparación para la inspección.

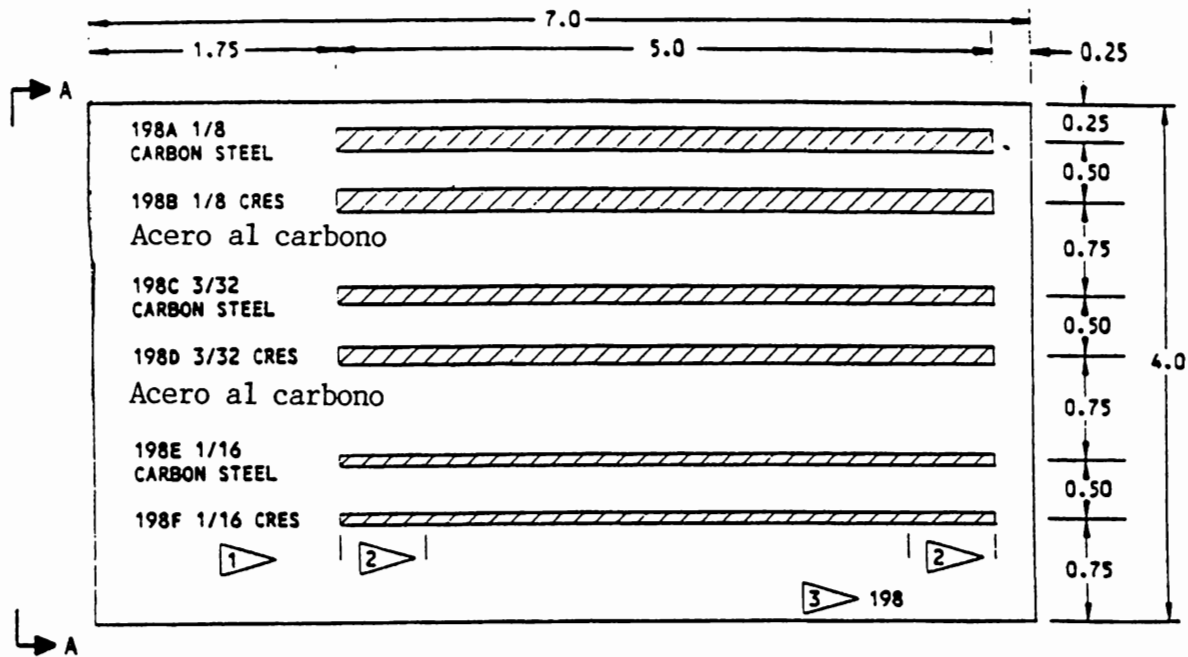
Logre primero el acceso de los cables de control que deben ser examinados. Generalmente, un cable de control de un largo de un pie será suficiente para realizar la inspección.

Hay que asegurarse que el área de inspección se encuentre limpia.

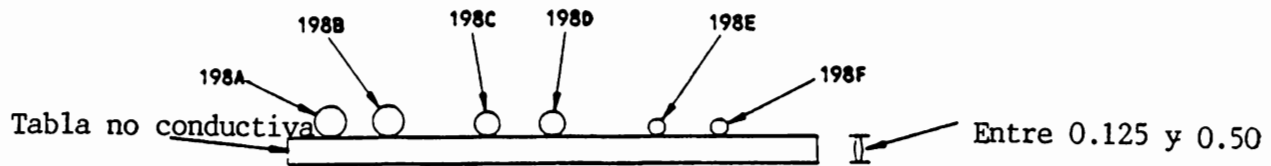
Asegúrese que el equipo para la inspección, la sonda, la referencia estándar y las áreas de inspección se encuentren a la misma temperatura ambiente.

Calibración del instrumento

- Coloque la frecuencia del instrumento entre 20 kHz y 500 kHz y si el instrumento tiene un control de selección, colóquelo en bajo o medio.
- Coloque la ganancia del instrumento.
- Balancee la sonda en el aire alejado de cualquier material conductivo.
- Coloque la bobina de la sonda directamente en la superficie del cable de referencia aplicable de acero al carbono. Asegúrese que la sonda es al menos una pulgada del fin del cable según la figura 5.36 (Cada cable a ser examinado debe ser calibrado en los cables de referencia estándar del mismo diámetro.
- Mueva la sonda varias veces (aproximadamente 10) sobre la superficie del cable de referencia estándar en la dirección de la figura 5.36
- Monitoree el movimiento de la señal y ajuste la fase de tal manera que la dirección de la señal empiece de la base de la pantalla y crezca hacia arriba como en la figura 5.37
- Ajuste la ganancia de tal manera que la señal vertical viaje con un 50% de la altura total de la pantalla cuando se cumpla con los pasos anteriores. Ver figura 5.37
- Coloque la sonda directamente en la superficie del cable de referencia que es del mismo diámetro del cable de inspección.



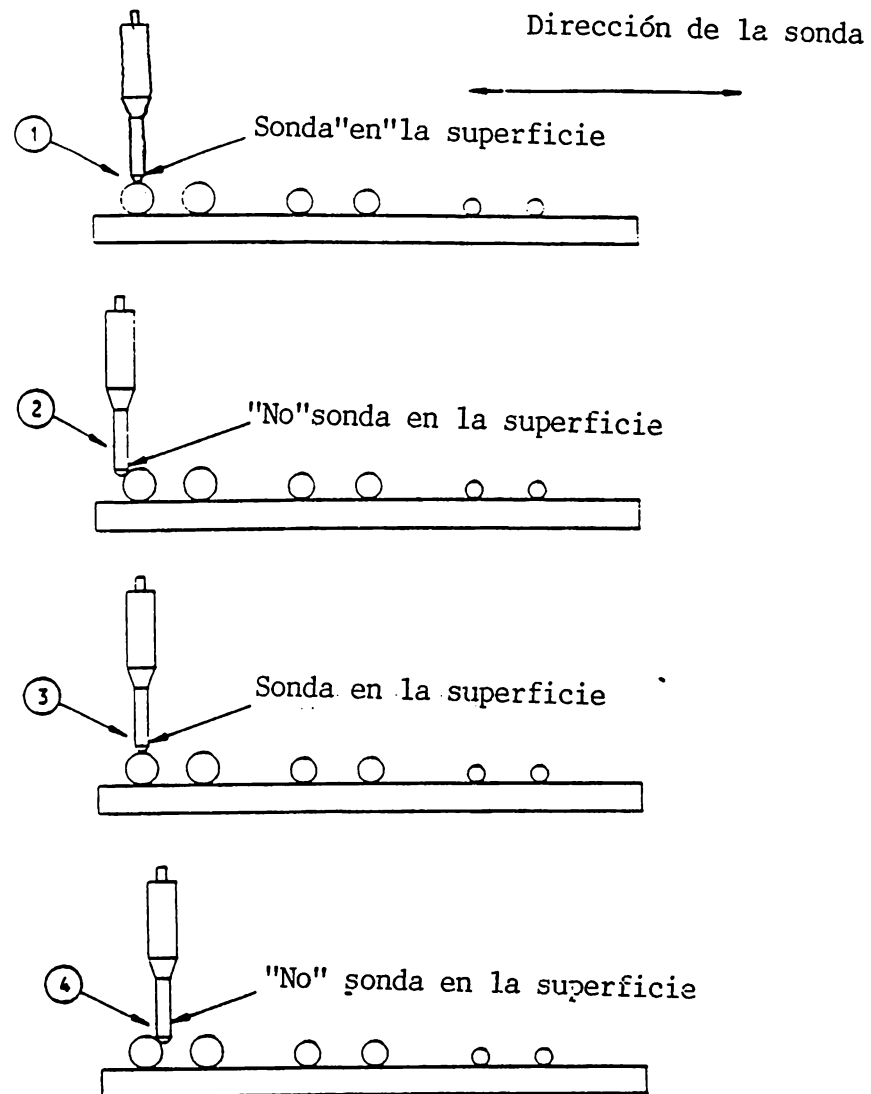
Referencia estándar mostrado con 6 diferentes cables



NOTAS:

1. Las medidas y las fracciones están en pulgadas.
2. Epóxico en los topes de los cables.
3. Referencia Estándar No. 198.

Figura 5.35 Referencia Estándar 198 ⁹³



NOTAS:

- Una examinación completa en secuencia de 4 pasos.
- Vista lateral de la referencia estándar 198.
La sonda mostrada en cable de 1/8" de acero al carbono.

Figura 5.36 Posiciones de la Sonda ⁹⁴

- Mueva la sonda varias veces sobre la superficie en la dirección mostrada en la figura 5.36
- La señal del acero al carbono resistente a la corrosión será aproximadamente 30% de la altura de la pantalla completa (figura 5.37).
- Ajuste la ganancia vertical/horizontal y controles de filtro de tal manera que la señal se muestre como en la figura 5.37. Trate de ajustar diferentes relaciones de ganancia vertical/horizontal hasta que las señales sean casi las mismas que las mostradas en la misma figura.

Procedimiento de Inspección.

- Calibre el instrumento como en el párrafo anterior.
- Coloque la sonda en un área limpia del cable a ser examinado.
- Mueva la sonda varias veces (aproximadamente 10) sobre la superficie del cable de control.
- Monitoree el movimiento de la señal en el instrumento.
- Haga los pasos anteriores al menos en 3 áreas dentro de una longitud de un pie del cable.
- Compare la señal con las señales del cable de referencia de acero al carbono y de acero al carbono resistente a la corrosión.
- Haga todos los pasos anteriores en todos los cables de control del avión.

Resultados de la Inspección.

- Todas las señales que viajen en una dirección vertical como en la señal de acero al carbono mostrado en la figura 5.37 son indicaciones de un cable de acero al carbono.
- Todas las señales que viajen en una dirección como en la señal de acero al carbono resistente a la corrosión mostrado en la figura 5.37 son una indicación del mismo tipo de cable.

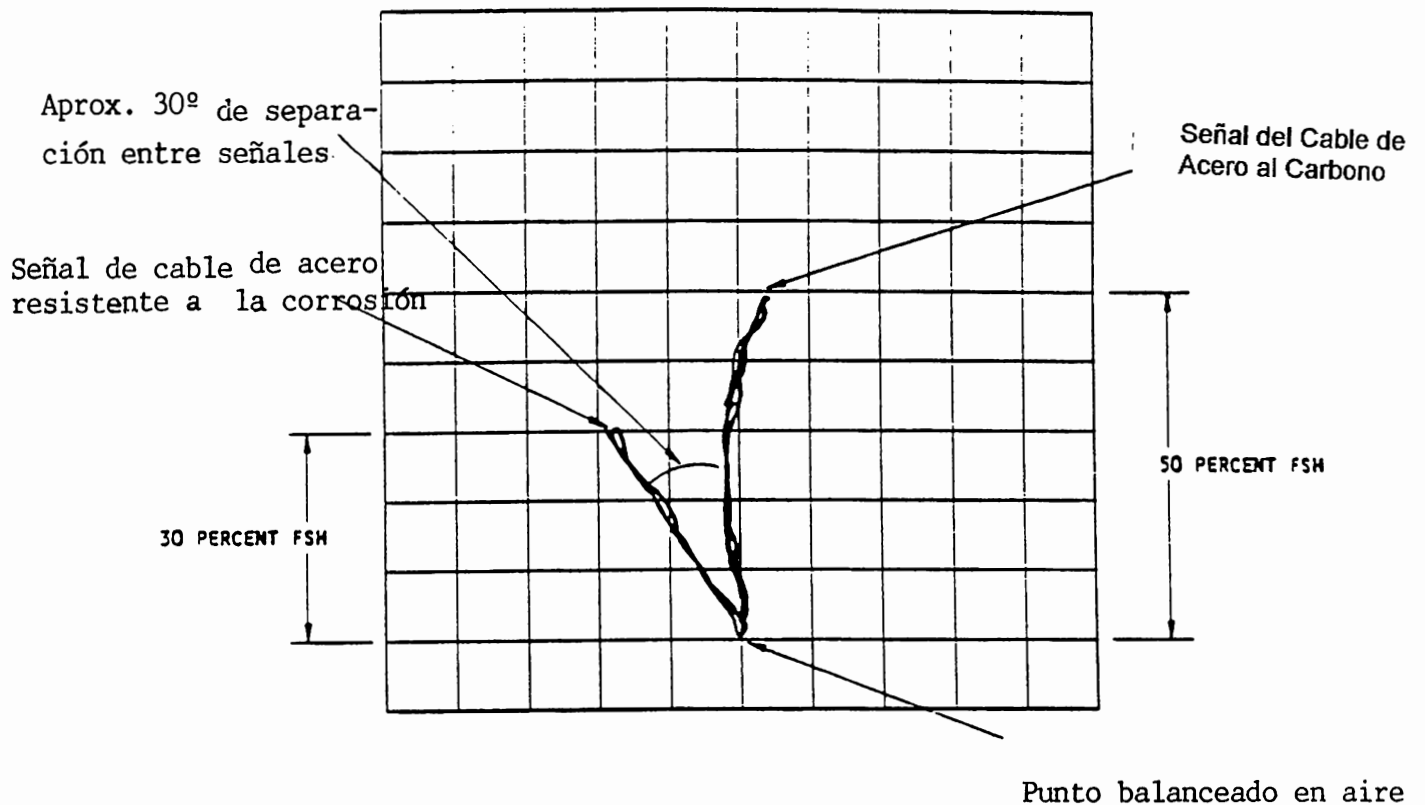


Figura 5.37 : Señal de Impedancia en cables a través de un Tubo de Rayos Catódicos (T R C)⁹⁵

⁹⁵ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 6, 20-10-01 PAG 5, FIGURA 3, ABRIL 15/91

5.4.2 REFUERZOS DEL ALMA EN EL COMPARTIMIENTO DEL TREN DE ATERRIZAJE DELANTERO EN LA BSTA 268.25

PROPOSITO:

Detectar quebraduras en el refuerzo del alma en el compartimiento del tren de aterrizaje delantero en la estación BSTA 268.25 de la línea de agua WL 160.0 a la WL 180.0 usando corrientes de alta frecuencia de Eddie.

EQUIPO

Cualquier instrumento de corriente de Eddie y una combinación de sonda que satisfaga los requerimientos de inspección. Se requerirá de una sonda protegida de tipo lápiz de ángulo recto y una referencia estándar.

Preparación para la inspección:

Remueva los paneles de las paredes y las sábanas aisladoras para ganar acceso a las áreas de inspección en ambos lados de las paredes. Ver figura 5.38
Limpie las superficies de las áreas a inspeccionar (vea la figura 5.39).

Calibración del Instrumento:

Ver la calibración que se describe en el método anterior.

Procedimiento de inspección:

Inspeccione por medio del método de inspección descrito en la figura 5.39

Resultados de la inspección:

Un rápido movimiento del medidor que ocurre cuando la sonda es movida sobre una distancia corta es una indicación potencial de quebradura y una mayor investigación es requerida para confirmarla.

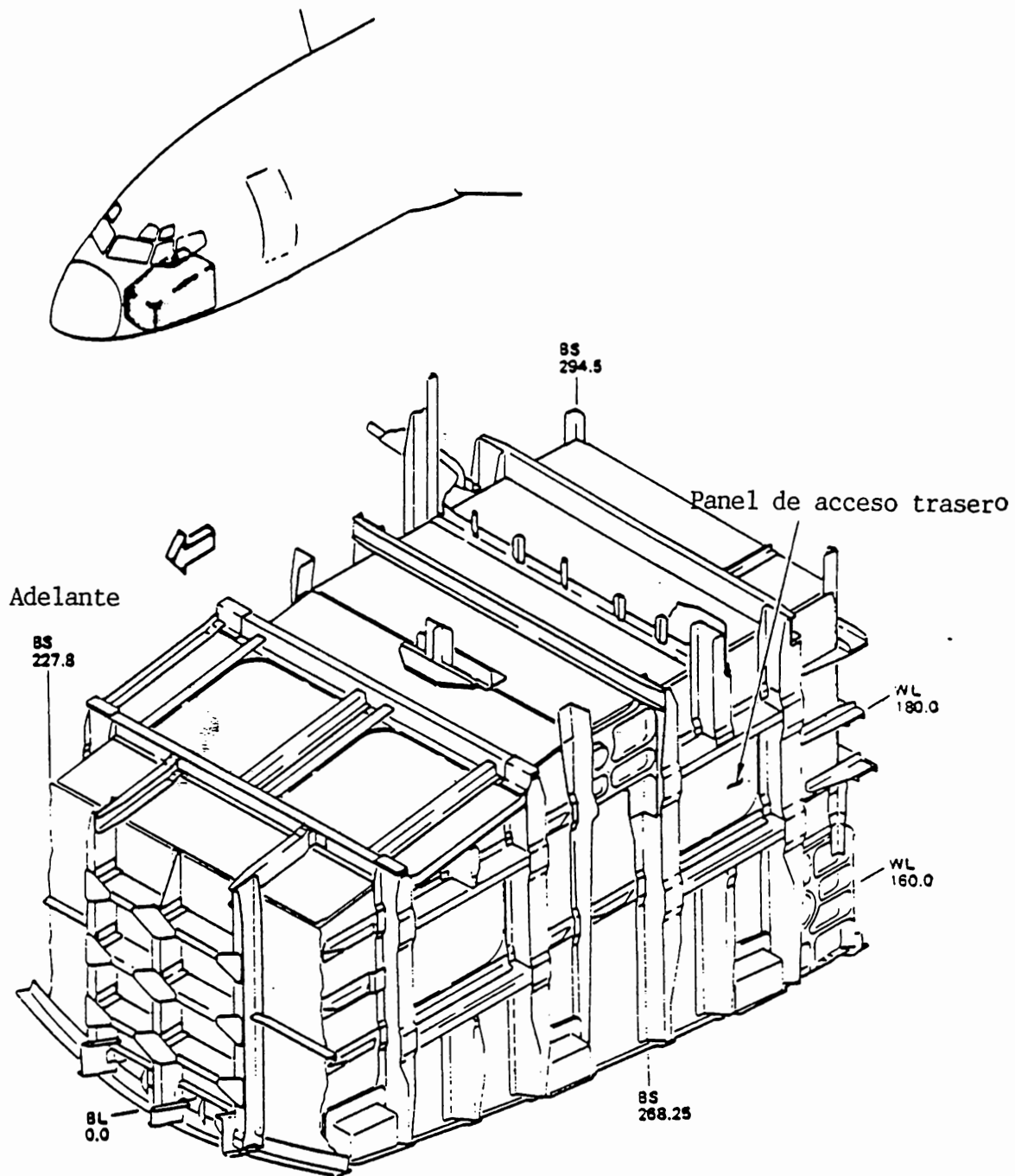
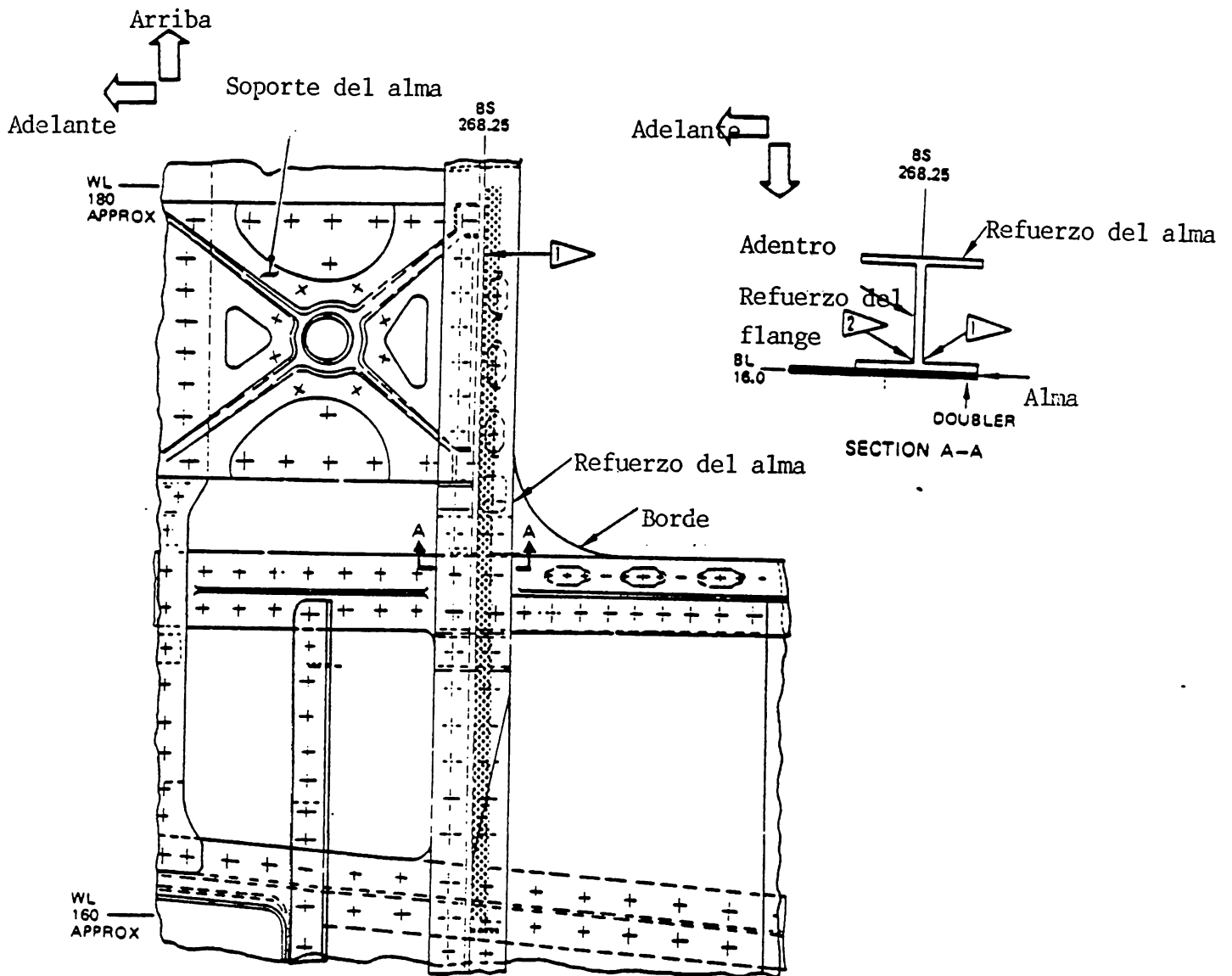


FIGURA 5.38 IDENTIFICACION DE LA ESTRUCTURA DEL COMPARTIMIENTO DEL TREN DE ATERRIZAJE DE NARIZ.⁹⁶

⁹⁶ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PART 6 53-10-34, PAG. 3, FIGURA 1. NOV 15/89



NOTAS:

- MOSTRADO EL LADO IZQUIERDO, EL LADO DERECHO ES OPUESTO.
- EL SOMBREADO INDICA EL AREA DE INSPECCION.

FLECHA 1 INDICA EL PATRON DE EXAMINACION DESDE LA WL 180 A LA WL 160.
 FLECHA 2 INDICA EL AREA NO VISIBLE.

Figura 539: REFUERZO EN LA BSTA 268.25 DEL TREN DE ATERRIZAJE ⁹⁷

5.5 INSPECCION TERMOGRAFICA

5.5.1.INSPECCION POR TEMOGRAFIA POR HIELO O AGUA EN ESTRUCTURAS "PANAL DE ABEJA".

PROPOSITO:

Use este procedimiento para hacer una inspección por hielo o agua en estructuras "panal de abeja" con una cámara infraroja de termografía.

Este procedimiento da instrucciones para una inspección en tránsito o en una base de mantenimiento. Si es en tránsito, debe ser hecho dentro de una hora después que la aeronave haya aterrizado.

Es necesario calentar la parte si el procedimiento de fuente de calor es usado en el Hangar de mantenimiento. No hay límite para el tiempo de inspección de este procedimiento si la fuente de calor es frecuentemente aplicada al área de inspección.

EQUIPO:

A. General

Use un equipo de inspección que pueda ser calibrado en la referencia estándar como se muestra en el párrafo que contiene la calibración.

B. Instrumentos

Use una cámara de termografía que despliegue una imagen en escala de grises (color no es necesario) y que tenga la característica de encontrar agua o hielo.

C. Fuente de Calor.

El fabricante recomienda que lámparas de cuarzo con 1000 watts de salida pueda ser usado como la fuente de calor externo del procedimiento.

D. Referencia Estándar.

Use una referencia estándar NDT1046. Vea la figura 5.40

Preparación para la Inspección

A. Prepare la referencia estándar como sigue:

Para hacer el procedimiento de mantenimiento en línea:

i.) llene las celdas en la referencia estándar NDT1046 con agua como se especifica en la figura 5.41

ii) Congele la referencia estándar NDT1046 hasta que el agua es solidificada.

iii) Remueva la referencia estándar desde el congelador inmediatamente antes del exámen.

Para hacer el procedimiento de fuente de calor repita el paso uno del paso anterior y deje el agua a que llegue a temperatura ambiente.

B. Prepare el avión teniendo acceso a las áreas a inspeccionarse y removiendo la pintura suelta, el polvo y la grasa desde la superficie del área de inspección si pudiera afectar la inspección.

Calibración del Instrumento:

Refiérase al manual de instrucciones del instrumento para la operación del equipo.

A. Apruebe el instrumento para usar como sigue ya que es necesario aprobar la cámara termográfica una vez para asegurarse que la cámara pueda identificar el hielo subsuperficial.

- 1) Prepare la referencia estándar como se especificó en el punto anterior.
- 2) Deje a la cámara termográfica enfriarse a su temperatura de operación.
- 3) Ponga la referencia estándar enfrente de la cámara termográfica. Asegúrese que la referencia estándar esté a la misma distancia que la distancia del área a ser inspeccionada con la cámara.
- 4) Mire a la referencia estándar con la cámara termográfica. Ajuste el foco hasta que el bordo de la referencia pueda ser vista claramente.
- 5) Ajuste la sensibilidad del instrumento y el nivel de temperatura hasta que usted pueda ver claramente el hielo en la referencia estándar. Use el rango de temperatura más bajo que le permita ver a toda la referencia estándar.
Si no puede ver el hielo en la referencia estándar, entonces los niveles de sensibilidad y de temperatura no son correctos o la cámara de termografía está alejada de la referencia estándar por lo que la calibración tiene que ser hecha nuevamente a una distancia más cercana. Si con ninguna de las anteriores soluciones se corrige el problema, entonces no se puede emplear dicha cámara para tal inspección.
- 6) Guarde un récord de como la cámara termográfica está ajustada para usarla durante la inspección del avión, así como también la distancia entre la referencia estándar y la cámara termográfica. Esto es, la máxima distancia que puede ser usada durante la inspección.

B. calibre el equipo para hacer la inspección termográfica con el avión en tránsito como sigue:

- 1) Deje la cámara termográfica enfriarse a su temperatura de operación.
- 2) Realice los primeros ajustes de calibración como se explicó anteriormente.
- 3) Haga los ajustes de sensibilidad y temperatura en la cámara termográfica.
- 4) calibre el equipo termográfico con la referencia estándar congelada o propiamente con el área de inspección en el aeroplano.
- 5) Guarde como deja ajustado los controles de la cámara termográfica.

C. calibre el equipo para la inspección termográfica con una fuente de calor como sigue:

CON LA REFERENCIA ESTÁNDAR

- 1) Calibrelo con la referencia estándar con agua a temperatura ambiente. Posteriormente aplique calor a la referencia estándar equitativamente con la lámpara de cuarzo. Cuando aplique el calor, monitoree la temperatura de la superficie de la referencia estándar con la cámara termográfica para asegurarse

que está calentada equitativamente. No hay que calentar dicha temperatura por más de 10 grados Celsius (18oF).

- 2) Inmediatamente examine la referencia estándar e identifique las diferencias de temperatura causadas por el agua.
- 3) Ajuste los controles de la cámara termográfica para obtener el mejor contraste de imagen y
- 4) Guarde un record de como la cámara está ajustada.

CON EL EQUIPO DE TERMOGRAFIA EN EL AVION

- 1) Obtenga los gráficos del área de inspección.
- 2) Apunte la cámara de tal manera que esté perpendicular a la superficie de calibración en el aeroplano.
- 3) Aplique calor con la lámpara de cuarzo. Calentarla uniformemente y no hacerlo por más de 10 grados Celsius (18oF).
- 4) Inmediatamente examine la referencia estándar e identifique las diferencias de temperatura causadas por el agua.
- 5) Ajuste los controles de la cámara termográfica para obtener el mejor contraste de imagen y
- 6) Aplique repetidamente calor si no se ve agua en la estructura. Permita que se enfríe la superficie cada vez que aplique calor.
- 7) Si no es posible identificar el agua en los pasos anteriores, repita nuevamente la calibración en la referencia estándar.
- 8) Guarde un récord de cómo la cámara termográfica está ajustada.

Procedimiento de inspección.

Use el procedimiento de "tránsito" o por "fuente de calor" como sigue:

En el primer caso, apunte la cámara termográfica de tal manera que quede perpendicular a la parte a inspeccionarse. Para áreas de inspección que son más grandes, la figura 5.42 muestra como colocar la cámara. Después monitoree áreas que estén más frías y grábelas por indicar la posible existencia de defectos. En este caso es necesario hacer un mayor análisis de estas áreas. Repita los pasos anteriores hasta cubrir toda el área de inspección.

En el segundo caso, examine el área con el procedimiento de "fuente de calor" en la base de mantenimiento al apuntar la cámara termográfica perpendicular a la parte a inspeccionarse. La figura 5.42 muestra como colocar la cámara para áreas mayores. Aplique calor equitativamente con la lámpara de cuarzo como se ha explicado anteriormente sin pasar de los 10 grados Celsius. Posteriormente examine la parte e identifique las diferencias de temperaturas causadas por el agua. Si no se detecta agua, aplique calor varias veces y monitoree por la presencia del agua. Si nuevamente no se detecta, hacer la calibración nuevamente en la referencia. Nuevamente calibrado, monitoree áreas que estén más frías y grábelas por indicar la posible existencia de defectos. En este caso es necesario hacer un mayor análisis de estas áreas. Repita los pasos anteriores hasta cubrir toda el área de inspección.

Resultados de la inspección

A. Asegúrese que toda la contaminación de la superficie ha sido removida para tener la seguridad que las áreas identificadas con defectos, en realidad lo son. Condiciones de la superficie como pintura levantada, grasa o polvo pueden causar indicaciones erróneas de defectos.

B. Compare las indicaciones de defectos con los gráficos y dibujos del área de inspección. Todos los fuertes contrastes en color que no son causados por cambios de miembros estructurales (sujetadores, refuerzos, herrajes) deben ser vistos como hielo o agua y las áreas examinadas más a profundidad.

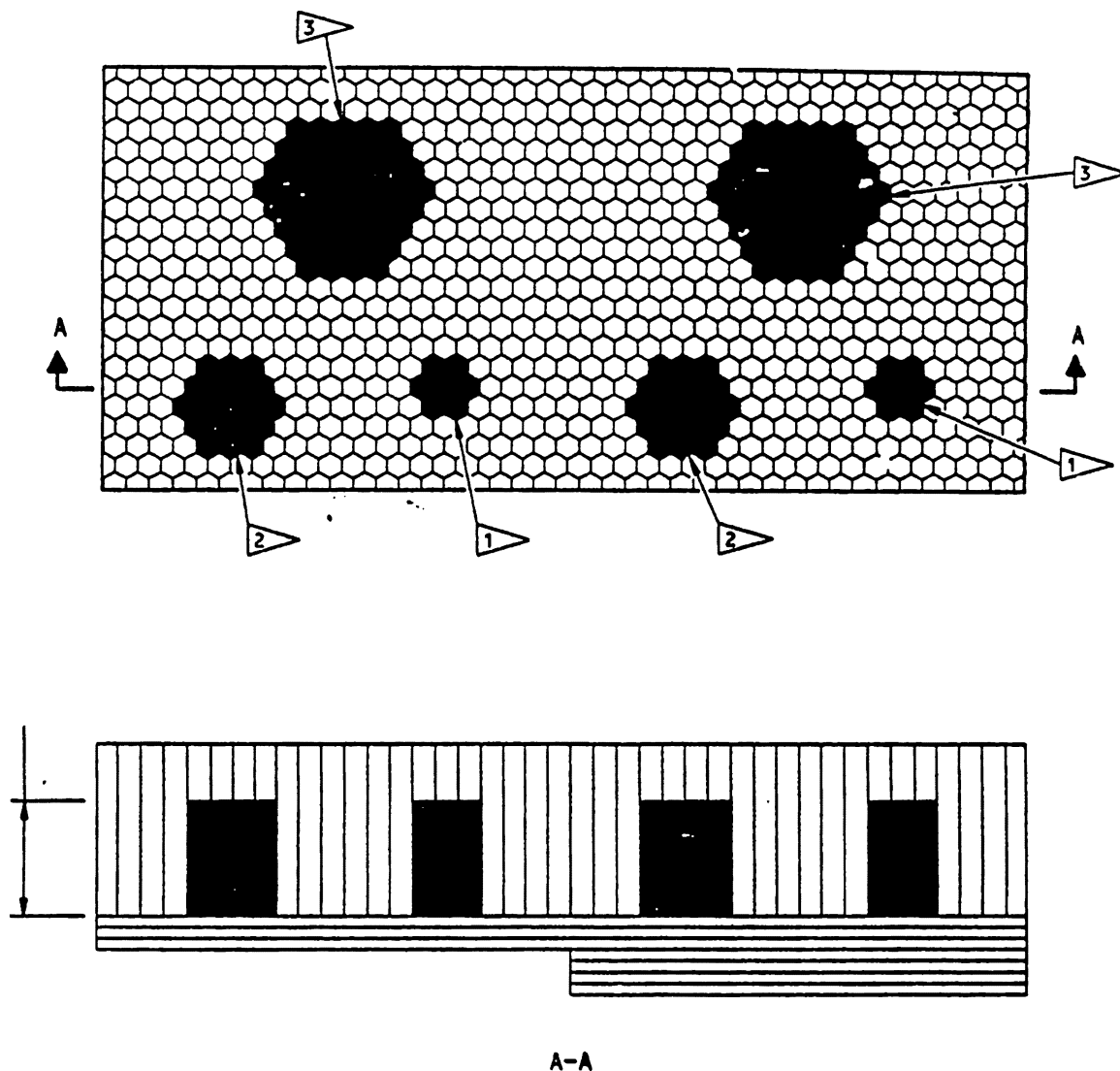


Figura 5.40y 5.41 Referencia Estándar llenada de agua para su calibración⁹⁸

⁹⁸ NONDESTRUCTIVE TEST, BOEING CO, PARTE 9, 51-00-02 PAGINA 15, FIGURA 3.

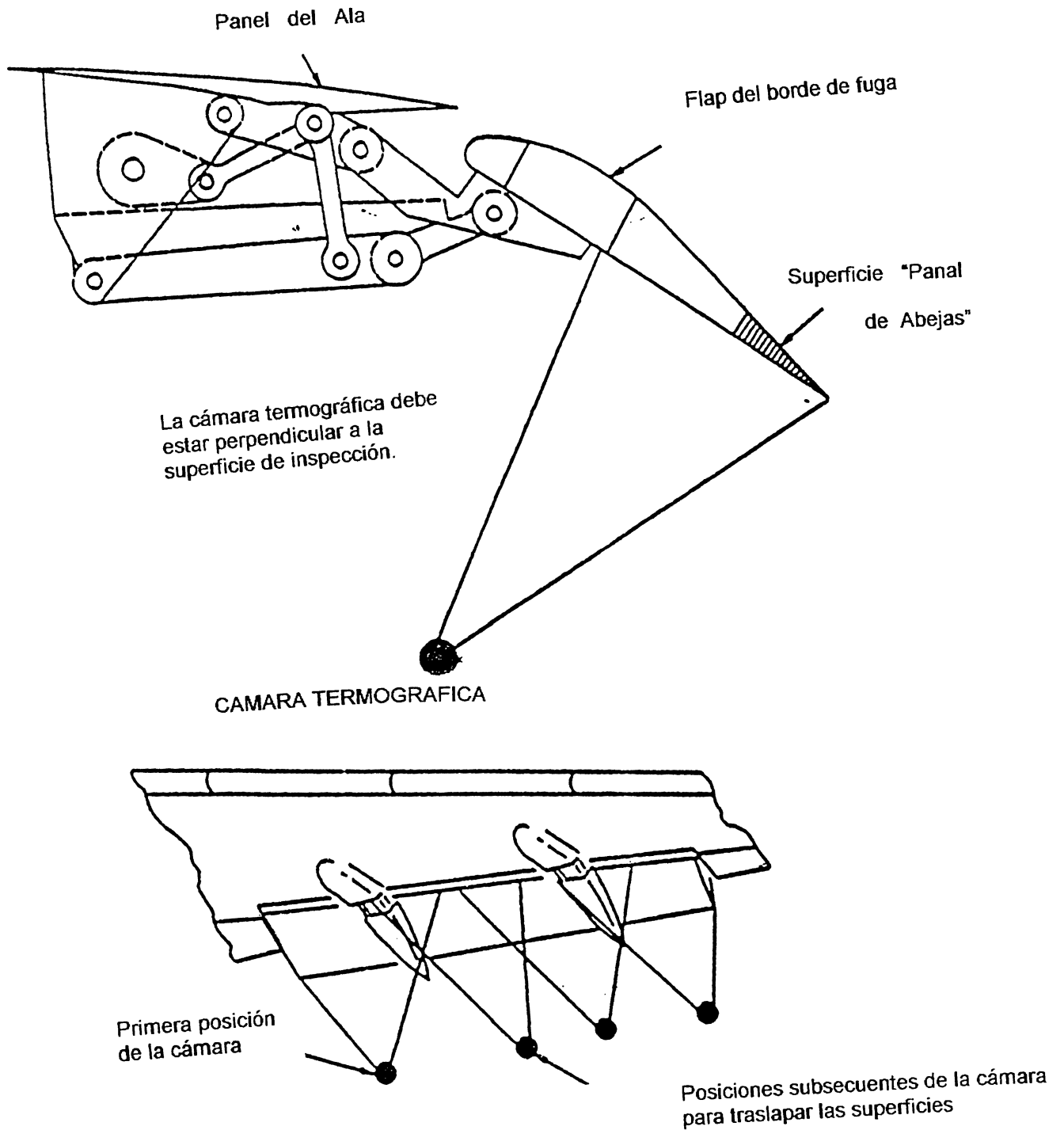


FIGURA 5.4.2 POSICION DE LA CAMARA TERMOGRAFICA

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCION

En este Capítulo final, se encuentran las conclusiones del presente trabajo por lo que se integran los objetivos que perseguíamos en el desarrollo del mismo. Inicialmente analizábamos a las PND como un ingrediente en la fórmula manufacturadora total y del mantenimiento en una industria bajo un programa de Aseguramiento de la Calidad y de como se ajustaba a cualquier estructura organizativa y financiera. Se limitaron a la vez aquellos factores críticos para la selección de la técnica de Pruebas No Destructivas (PND) más idónea ante un determinado problema que involucre su uso. Se presentó la teoría general de cada una de las técnicas más utilizadas en la industria en general y la aérea en particular, con sus ventajas y limitaciones de tal manera que el criterio de selección de las mismas se basa en el equipo, al material y al tipo de servicio del objeto a ser inspeccionado. Como corolario a dicha presentación, teniendo las bases teóricas anteriores, se presentó la aplicación de algunas Pruebas No Destructivas (PND) más desarrolladas que se emplean en la industria del mantenimiento aéreo para que el lector del presente trabajo tenga una idea de la puesta en práctica de las técnicas y su posible incorporación en cualquier industria en general.

6.2 CONCLUSIONES

Con la finalización de éste trabajo se considera que los objetivos trazados se han alcanzado y es innegable que con este material, se conocerá de una manera general la tecnología de las Pruebas No Destructivas en el país, esperando que se haga desvanecer el temor a la utilización de la misma; así mismo , investigamos exhaustivamente para entregar una herramienta bibliográfica suficiente y práctica con información especializada para los estudiantes de ingeniería mecánica para que se sirvan conocer más de ésta rama de la profesión.

Se ha aprovechado hacer una introducción de nuevos materiales utilizados en la aviación que son cada vez más complejos y que satisfacen las exigentes condiciones de servicio en la industria en general como lo son los materiales con bajo peso y alta resistencia mecánica a los esfuerzos y temperaturas.

Objetivos que se cumplieron al finalizar el presente trabajo:

- ☑ *Provee a los profesionales en el campo e interesados en general, de la suficiente información de las técnicas de PND más idóneas que busquen solucionar casos específicos.*
- ☑ *Provee a los estudiantes de la Universidad Don Bosco, en especial en el área de Ingeniería Mecánica, de un material bibliográfico que complemente la formación profesional de los mismos.*
- ☑ *Integra en un sólo documento, la mayor parte de la información sobre las PND que existe, en forma de una guía de consulta práctica de referencia rápida que trate sobre los criterios de selección de dichas técnicas ante una determinada necesidad.*
- ☑ *Da a conocer las aplicaciones de las técnicas PND más desarrolladas en la industria del mantenimiento de componentes estructurales de una aeronave de tal manera que se puedan ilustrar su vigencia y actualidad en nuestro medio.*

El trabajo presentado tiene las limitaciones que preveíamos desde el inicio del mismo y es el hecho de que es un material bibliográfico y descriptivo, por lo que examina de manera sencilla las mayores aplicaciones de la tecnología de Pruebas No Destructivas (PND). El presente no sugiere la implementación de un Programa de Aseguramiento de la Calidad, sino presenta una guía para aquellos profesionales en puestos intermedios o gerenciales que puedan considerar el uso de la tecnología de Pruebas No Destructivas en sus programas de Aseguramiento de la Calidad.

Es importante mencionar que los contextos industriales de un país desarrollado en los que se utiliza mayormente las Pruebas No Destructivas, son muy distintos a los de los países en vías de desarrollo. Por tal razón, el área de la aviación comercial en El Salvador, era de las pocas que podría ilustrar de una manera similar al lector, de los procedimientos de dicha tecnología al trabajar bajo estándares de seguridad extranjeros y con una organización parecida a la de esos países que cuentan con auditorías externas en la organización y sistemas de inspección.

El enfrentarse eficientemente a los problemas que involucren a las Pruebas No Destructivas (PND), depende en gran medida de la comprensión total de la física básica involucrada en las mismas técnicas y a la selección del método de PND más adecuado en base a una total familiarización de cada uno de ellas.

El presente trabajo, si bien es cierto que en la parte de las aplicación trata de las técnicas más comunes y más desarrolladas de las Pruebas No Destructivas (PND) en el campo del mantenimiento de componentes estructurales de aeronaves, el trabajo es una guía para utilizarla en cualquier industria que se dedique a la manufactura o mantenimiento de componentes estructurales que sean críticos.

BIBLIOGRAFIA

1. Dr. González Velásquez, Jorge Luis. "Fractura por Fatiga" : Instituto Politécnico Nacional, Dpto. Ingeniería Metalúrgica, Labs. Ing. Metalúrgica, Zacatenco, México D.F. 07300 Junio 1992.
2. Fuente: Separatas del Tema "Concentración de Esfuerzos" de la Materia *Diseño de Elementos de Máquinas III* . Escuela Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de El Salvador, Marzo 1990.
3. Wenk, Samuel A & McMaster, Robert C. "Choosing NDT, Applications, costs and benefits of Nondestructive Testing in your Quality Assurance Program", American Society for Nondestructive testing. Estados Unidos, 1987.
4. Vary, Alex "Nondestructive Evaluation Technique Guidebook", Lewis Research Center, Estados Unidos, Ohio 1987.
5. Report DDC-TAS-71-58-1 "Nondestructive Testing: Methods, Techniques and Their Applications." Defense Documentation Center, Estados Unidos, Washington D.C. Diciembre 1971.
6. Nondestructive Testing Handbook, "Specialized Nondestructive Test methods". The American Society for Nondestructive Testing, Estados Unidos, Columbus, Ohio, 1989.
7. AMCP 702-10. "Quality Assurance: Guidance to Nondestructive Testing Techniques" Army material Command, AD-728162, Estados Unidos, 1970.
8. Merhib, C. P. & S. Der Borghosian, "A Report Guide to Fatigue Testing Literature". Army Materials Research Agency (AMRA-MS 67-05) AD-652881 Estados Unidos, 1967.
9. ASTM E-268 "Standard Definition of Terms Relating to Electromagnetic Testing" American Society of Testing Materials, Estados Unidos 1974.
10. L. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods" R.E. Krieger Pub. Co, Nueva York, Estados Unidos, 1979.

11. AC43-3 & AC43-7 "Nondestructive & Ultrasonic Testing for Aircraft" Renton, WA 98059-3153 Estados Unidos, 1995.
12. Kroes, Rardon, Bent, McKinley "Aircraft Basic Science", Sixth Edition, Ohio, Estados Unidos, 1980.
13. Boeing Company Publications "Nondestructive Test Manual", Boeing Customer Service, (Publicaciones quincenales desde 1983 a 1995) Seattle, Washington, Estados Unidos.
14. Jerome Greer Chandler. "Detecting a crack before it's a crack". Aviation Maintenance Vol 15, Número 10, pág 32, Octubre 1996.
15. C. Huber & R. Zoughi, "Detecting stress and fatigue cracks" IEEE Potentials Número 43, pág. 20, Noviembre 1996.

APENDICE

GLOSARIO

GLOSARIO

ANTI-COAGULANTES: agentes que previenen la separación de la aglomeración de una fase dispersa de una emulsión, dispersión o solución coloidal.

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD : Es el establecimiento de un programa que garantice el nivel deseado de calidad de un producto desde la materia prima pasando por su fabricación hasta llegar al cliente.

CAÑERÍAS: entiéndase el término como cavidades largas encogidas que se forman en el tope de un lingote y que se puede extender en el mismo por varias distancias. Si no se remueven antes de subsecuentes operaciones del proceso, pueden formar defectos detrimentales durante estas operaciones. Si existieran, usualmente deben ser localizadas a una distancia considerable abajo de la superficie.

COSTOS DE MANUFACTURA: Todos aquellos costos relativos a la fabricación y/o manufactura directa del bien incluidos los costos indirectos de organización, administración, transporte materias primas, su transformación, publicidad, distribución hasta llegar al vendedor.

COSTOS POR CICLO DE VIDA: Son todos aquellos costos tendientes a mantener en operación las partes fabricadas o manufacturadas. Entre más se encuentre en servicio una pieza, sus costos por ciclo de vida son más bajo que una que no se le descuida el mantenimiento y deja de operar.

CONTROL DE CALIDAD: Son las acciones físicas y administrativas requeridas para asegurar el cumplimiento del programa de Aseguramiento de la Calidad. Esto incluye las pruebas físicas y químicas donde sea apropiado y la Pruebas No Destructivas (PND) en puntos adecuados del ciclo manufacturador y del mantenimiento.

CONTAMINANTE: cualquier sustancia extraña presente en la superficie de prueba los cuales afectarán adversamente los resultados de el material del liquido penetrante.

“COLD SHUT”: Una junta imperfecta entre dos flujos de metal en un molde. Es causado por la superficie de 2 corrientes del metal que se enfría muy rápidamente haciendo la fusión imposible.

CONDUCTIVIDAD: Propiedad que es el recíproco del volumen de resistividad en un material.

COMPUESTOS: Dos o más estructuras metálicas o no metálicas que son combinadas para producir nuevas propiedades en los materiales que no están presentes en ninguno de dichos elementos estando solos.

CONDICIONES SUBSUPERFICIALES: condiciones existentes en un material tales como agua atrapada en la estructura, empalmes interiores o rellenos de compuesto.

CONDUCTIVIDAD: Propiedad que es el recíproco del volumen de resistividad en un material.

CONTAMINANTE: cualquier sustancia extraña presente en la superficie de prueba los cuales afectarán adversamente los resultados de el material del liquido penetrante.

CUERDA: Estructura secundaria de forma lineal o circular que refuerza o da soporte a una estructura principal.

DEFECTO: discontinuidad o grupo de discontinuidades los cuales exceden un criterio específico de aceptación para un componente.

DEVELADOR O REVELADOR: Un material aplicado a la superficie de prueba para acelerar un contraste de indicaciones que revelen el estado de una parte o componente.

DESGRASADOR A VAPOR: la remoción de grasas, aceites y sustancias orgánicas con el uso de vapor.

DISCONTINUIDAD PRIMARIA: Es la que incluye cavidades con arrugas, orificios "soplados", inclusiones no metálicas y segregaciones que se originan en la formación primaria del metal cuando éste es formado ya sea en lingotes o colados y persisten en todas las demás operaciones de procesado.

DISCONTINUIDADES DE FABRICACIÓN: Las discontinuidades que incluyen los traslapes, rebabas, costuras, quebraduras y rajaduras que se desarrollan durante la fabricación de un metal primario a unas formas semi-terminadas por un maquinado.

DISCONTINUIDADES DE PROCESADO: Discontinuidades generalmente en forma de quebradura resultante de un proceso como el tratamiento térmico, esmerilado o maquinado. Se desarrollan durante el procesado de la parte a su forma y condición final.

DISCONTINUIDADES DE SERVICIO: son todas aquellas, usualmente en forma de quebraduras, que se desarrollan durante el tiempo de funcionamiento o servicio.

DISTANCIA GAP: En radiografía, es la distancia del generador de rayos X a la película o placa de rayos X dado en pulgadas.

DOBLERS: Estructura secundaria que acompaña a la estructura principal para reforzarla.

EFFECTO DE "LIFT OFF": El cambio en la indicación del medidor de corriente de Eddie cuando el espaciado entre la sonda de superficie y el objeto que se prueba cambia de una posición "en contacto" a otra posición por medio de los separadores no conductivos seleccionados entre la sonda de superficie y el objeto que se prueba.

ELEVADORES DE ESFUERZOS: Son todos aquellos puntos de concentración de esfuerzos donde virtualmente ocurren todas las fallas por fatiga. Comúnmente éstos incluyen ranuras, filetes, orificios, roscas, chaveteros, cuñeros, etc y son considerados como puntos de alta vulnerabilidad.

EMPALMES: defecto de pliegues o traslapes en la superficie de la parte desarrolladas durante el proceso de fabricación. Dichas superficies están presionadas haciendo un contacto muy cerrado pero no están soldadas o fusionadas.

EMULSIFICADOR: un líquido que da el exceso de penetrante en la superficie del componente que es lavable por agua.

EMULSIFICADOR HIDROFÍLICO: un emulsificador que es soluble en agua.

EMULSIFICADOR LIPOFÍLICO: un emulsificador que es soluble en aceite y que no es soluble en agua.

ESTRUCTURA PANAL DE ABEJA: Tipo de núcleo en un material que recuerda a un panal de abejas natural que produce una estructura liviana pero altamente resistente.

FATIGA EN LOS MATERIALES: La fatiga es la fractura de un material a través de un proceso de agrietamiento progresivo en el cual un cuerpo sometido a cargas fluctuantes o cíclicas desarrolla una grieta que crece paulatinamente hasta alcanzar un tamaño crítico, después del cual sobreviene la fractura en forma catastrófica.

FILTRO DE LUZ NEGRA: Un filtro que transmite radiación cercana a la radiación ultravioleta mientras absorbe otros largos de ondas.

FLAP: Estructura en el borde de fuga de las alas de un aeroplano que ayudan a dar sustentación al mismo durante el vuelo y a elevarlo.

FLUORESCENCIA: la emisión de una radiación visible por un material como resultado de la absorción de luz negra durante el tiempo de exposición a esta. Indicación lineal: indicaciones de penetrante con un largo de al menos tres a uno con respecto al ancho del defecto.

FLUORESCENCIA: la emisión de una radiación visible por un material como resultado de la absorción de luz negra durante el tiempo de exposición a esta. Indicación lineal: indicaciones de penetrante con un largo de al menos tres a uno con respecto al ancho del defecto.

GRAFITO/EPOXICO: Fibras usadas en compuestos avanzados con filamentos de carbón junto a un material plástico como matriz que es formado con calor.

GEL : sustancia acopladora como una grasa o aceite ligero compatible con la estructura de una aeronave utilizado en la inspección por ultrasonido.

“HOT TEAR”: Fractura causada por esfuerzos en colados durante la solidificación cuando todavía se encuentra caliente. Contracción del metal durante el enfriamiento.

INCISION DE REFERENCIA: Incisión en un bloque de referencia de calibración de equipos hecha a propósito con total conocimiento de sus dimensiones.

INDICACIONES ELONGADAS: aquellas indicaciones cuyos ejes largos son 3 o más veces más largo que su eje más corto.

INSTRUMENTO DE CORRIENTE DE EDDIE: un instrumento eléctrico medidor el cual responde a la corriente de Eddie inducida en metales por una sonda la cual induce estas corrientes por medio de un campo electromagnético que varía con el tiempo.

LARGUERILLOS: Componentes estructurales longitudinales principales en la estructura de un avión.

LUZ NEGRA: Radiación electromagnética en el rango cercano a la onda ultravioleta de 320 nm a 400nm.

LUZ ULTRAVIOLETA: radiación electromagnética con una banda de onda de largo entre los 200 y 400 nm. En la banda entre 400 a 320 nm es conocida como luz

negra y de la 320 a los 200 nm es conocida como fuerte luz ultra-violeta que puede ser filtrada y usada para la inspección de PND.

MAGNETIZACIÓN: el proceso por medio del cual los dipolos elementales magnéticos de un materiales se alinean en una sola dirección.

MARCOS FORMADORES O CUADERNAS: Componentes estructurales verticales principales en la estructura de un avión.

NOMEX: Marca registrada de Dupont Co. de un material tratado de papel de nylon que es hecho en un núcleo de una estructura "panal de abeja".

PENETRANTE: una solución teñida capaz de entrar en las continuidades abiertas a la superficie.

PENETRANTE ENTRAMPADO: el liquido penetrante que ha penetrado una falla o discontinuidad para dar una indicación de falla.

PENETRANTE POST EMULSIFICABLE: Un penetrante que requiere el uso de un emulsificador separado para dar un penetrante lavable en agua.

PENETRANTE LAVABLE EN AGUA: un penetrante que contiene un emulsificador integral u otro que puede ser removido con agua.

PERMEABILIDAD: La razón de la densidad de flujo (magnético) producido por una fuerza magnetizadora.

POST-LIMPIEZA: La remoción de residuos del material penetrante después de su evaluación.

POST-EMULSIFICABLE: Un penetrante que debe ser tratado con un agente emulsificador para dar uno lavable en agua.

POST-EMULSIFICADOR: Un agente emulsificante el cual es aplicado a un penetrante no lavable en el proceso post-emulsificable.

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS (PND) : Son todas aquellas técnicas de inspección que son efectuadas en la propia parte que se examina sin destruirla o dañarla determinando así si ésta se encuentra en condiciones de seguir operando. Las Pruebas No Destructivas es una rama de la ciencia de los materiales concerniente con todos los aspectos de la uniformidad, calidad y vida útil de los materiales y estructuras.

REFERENCIA ESTANDAR: Material aprobado utilizado de referencia para calibrar los equipos e instrumentos a utilizar durante ciertos tipos de inspección no destructiva.

RETENTIVIDAD: La habilidad de un material para retener el magnetismo después que una fuerza magnetizadora ha sido removida.

REVELADOR SECO: un polvo fino y de libre movimiento suministrado para dicho fin.

REVELADOR NO ACUOSO: un revelador que es disuelto o suspendido en un solvente volátil (otro que el agua) que es suministrado y que rápidamente se seca a una capa absorbadora.

REVELADOR HÚMEDO (ACUOSO) SOLUBLE: Un revelador normalmente suministrado como una concentración de polvo seco que es completamente soluble en agua y que se seca a una capa absorbadora.

REVELADOR HÚMEDO (ACUOSO) EN SUSPENSIÓN: Un revelador normalmente suministrado como un concentrado de polvo seco que es suspendible en agua y se seca en una capa absorbadora.

RUDER: Superficie de control de vuelo del estabilizador vertical en una nave colocado en la cola del avión.

SEGREGACIONES: Cuando se solidifica un lingote, la distribución de varios elementos o componentes generalmente no son uniformes a través de la masa del lingote porque ciertas segregaciones marcadas de algunos constituyentes pueden ocurrir.

SOLVENTE REMOVEDOR: un solvente volátil que es usado para remover el exceso de penetrante en la superficie.

SPRAY EN AEROSOL: la liberación de un líquido o una suspensión de finas partículas de líquido de un contenedor presurizado.

SUPERFICIE DE FONDO: Superficie del componente contra la cual una indicación es vista.

SUJETADORES: Elementos de ferretería que unen láminas o pieles tales como pernos, tornillos y remaches.

TECNICAS DE INSPECCION: Como se utiliza en el presente trabajo, se refiere a un cuerpo de procedimientos especializados, métodos e instrumentos relacionados para alcanzar el fin de cada una de las Pruebas No Destructivas.