

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE TECNOLOGIA
CARRERA DE AERONAUTICA**



PROYECTO DE GRADO

***“PRUEBA DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN UN TUBO DE
LLAMA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE UN MOTOR
DE REACCIÓN MEDIANTE LA NORMA ISO 17025”***

NIVEL LICENCIATURA

**POSTULANTE: UNIV. JAVIER ZENOBIO CALDERON GUERRA
TUTOR: DR.ING. RAMIRO PERALTA URÍA**

**LA PAZ – BOLIVIA
2013**

DEDICATORIA:

A LA MEMORIA DE MIS QUERIDOS PADRES:

TOMAS CALDERÓN YANARICO (+)

CARMEN GUERRA DE CALDERÓN (+)

AGRADECIMIENTOS:

A TODOS LOS PRESTIGIOSOS DOCENTES DE LA CARRERA DE AERONÁUTICA DE LA FACULTAD DE TECNOLOGIA, QUIENES JAMAS DEJARON DE ALENTARME Y ME BRINDARON SU APOYO, ASESORAMIENTO Y ENTUSIASMO EN TODA MI VIDA UNIVERSITARIA.

A TODOS LOS AMIGOS SINCEROS DE LA CARRERA DE AERONÁUTICA DE LA FACULTAD DE TECNOLOGIA POR SU APOYO INCONDICIONAL...

INDICE

I. RESUMEN	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
III. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
IV. OBJETIVO	2
4.1. OBJETIVO GENERAL	2
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
V. MARCO TEÓRICO	3
5.1. LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL SECTOR AERONAÚTICO	3
5.1.1. Clasificación de los END en el sector aeronáutico	3
5.1.2. Metodología de aplicación de los END	6
5.1.3. Áreas de aplicación de los END	6
5.1.4. Métodos de END en el sector aeronáutico	8
5.2. NORMAS DE END EN EL SECTOR AERONAÚTICO	10
5.2.1. Clasificación de las normas de los END	10
5.2.1.1. Norma de operación de los END	11
5.2.1.2. Capacitación, Calificación, Certificación de Personal de los END	13
5.2.1.3. Norma de competencia de laboratorio de los END	13
5.2.2. Norma Boliviana: RAB – 43	13
5.3. TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES EN AVIACION	14
5.3.1. Naturaleza de los materiales	14
5.3.1.1. Propiedades de los metales	14
5.3.1.2. Estructura metálica	14
5.3.2. Propiedades mecánicas de los materiales	16
5.3.3. Efectos de la temperatura	16
5.3.3.1. Efectos inmediatos	16
5.3.3.2. Efectos demorados	17
5.3.4. Materiales empleados en los sistemas de una aeronave	18
5.3.5. Superaleaciones empleados en la cámara de combustión	18
5.3.5.1. Propiedades mecánico - térmicas de las superaleaciones	21
5.3.6. Discontinuidades y defectos de los materiales	22
5.3.6.1. Clasificación de las discontinuidades de los materiales	23
5.4. MÉTODO DE ULTRASONIDO	23
5.4.1. Introducción.	23
5.4.2. Propagación de las ondas ultrasónicas	24
5.4.2.1. Rangos de sonido de las ondas ultrasónicas	25
5.4.2.2. Principios	25
5.4.3. Aplicaciones del método de ultrasonido	26
5.4.4. Ventajas del método de ultrasonido	26
5.4.5. Limitaciones del método de ultrasonido	27
5.4.6. Equipo básico	27
5.4.6.1 Transductores	27
5.4.6.2. Materiales piezoeléctricos	28
5.4.6.3. Tipos de palpadores	28
5.4.6.4. Acoplantes empleados,	29

5.5. MÉTODO DE RAYOS X	29
5.5.1. Introducción	29
5.5.2. Aplicaciones del método de rayos x	31
5.5.3. Ventajas del método de rayos x	31
5.5.4. Limitaciones del método rayos x	31
5.5.5. Evaluación de calidad de imagen	31
5.5.6. Tiempo de exposición de rayos x	32
VI. PROPUESTA DE PROYECTO: INSPECCIÓN VISUAL, ULTRASONIDO Y RAYOS X DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	32
6.1. TIPOS DE INSPECCIÓN	32
6.2. INSPECCION VISUAL DE LOS TUBOS DE LLAMA	35
6.2.1. Procedimiento de inspección visual directa	35
6.2.2. Procedimiento de la inspección visual indirecta o remota	38
6.2.3. Indicaciones de la inspección visual remota	40
6.2.4. Formulario de Registros y Reportes de la inspección visual remota	40
6.3. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA DE LOS TUBOS DE LLAMA	41
6.3.1. Preparación del tubo de llama para la inspección	42
6.3.1.1. Limpieza de la superficie del tubo de llama para la inspección	43
6.3.1.2. Examen visual	43
6.3.2. Ajuste y calibración del equipo de ultrasonido	43
6.3.2.1. Procedimiento de calibración con un palpador normal	44
6.3.3. Inspección de los tubos de llama	48
6.3.3.1. Equipo y materiales	48
6.3.3.2. Desarrollo de la inspección	51
6.3.3.3. Personal responsable de la inspección ultrasónica	53
6.3.4. Interpretación y evaluación de las indicaciones	53
6.3.4.1. Definiciones de tipos de indicaciones	56
6.3.4.2. Desarrollo de las indicaciones	56
6.3.4.3. Evaluación de las dimensiones de las indicaciones	57
6.3.4.4. Criterio de aceptación de indicaciones	57
6.3.5. Registro de la inspección ultrasónica	60
6.3.5.1. Desarrollo del procedimiento de la inspección por ultrasonido	60
6.3.5.2. Archivo del informe de inspección ultrasónica	61
6.3.6. Implementación de la norma de operación de ultrasonido	66
6.4. INSPECCIÓN DE LOS TUBOS DE LLAMA POR RAYOS X	66
6.4.1. Etapas del proceso radiográfico	66
6.4.1.1. Emisión de la energía de radiación en el 2º tubo de llama	66
6.4.1.2. Interacción con el material del 2º tubo de llama	67
6.4.1.3. Detección de la discontinuidad en el 2º tubo de llama	67
6.4.1.4. Procesamiento de la película radiográfica del 2º tubo de llama	68
6.4.1.5. Interpretación de la discontinuidad del 2º tubo de llama	69
6.4.2. Registro de datos de la inspección radiográfica	70
6.4.3. Implementación de la norma de operación de rayos x	73
6.5. IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO EXPERIMENTAL DE END PARA EL SECTOR AERONÁUTICO	73
6.5.1. Objetivos del laboratorio experimental de END	73
6.5.2. Personal del laboratorio experimental de END	74
6.5.3. Equipamiento del laboratorio experimental de END	75
6.5.4. Accesorios	75

6.6. ANÁLISIS DE COSTOS DEL LABORATORIO EXPERIMENTAL DE END	75
6.7. ANÁLISIS DE COSTOS DE ULTRASONIDO Y RAYOS X	76
6.7.1. Introducción	76
6.8. ANÁLISIS DE COSTOS DE ULTRASONIDO	76
6.8.1. Confección de la ficha técnica para la inspección de ultrasonido	77
6.8.1.1. Datos iniciales	77
6.8.1.2. Cálculo de costos	78
6.8.1.3. Ficha completa del método de ultrasonido	79
6.9. ANÁLISIS DE COSTOS DE RAYOS X	80
6.9.1. Confección de la ficha técnica para la inspección por rayos x	80
6.9.1.1. Datos iniciales	80
6.9.1.2. Cálculo de costos	81
6.9.1.3. Ficha completa del método de rayos x	82
VII. CONCLUSIONES	83
VIII. RECOMENDACIONES	83
IX. BIBLIOGRAFÍA	84
PAGINAS DE INTERNET	85
APENDICE	85

FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	5
Figura 2: Celdas unitarias. (Fuente: “Ciencia de Materiales”, Villegas Mario Oscar)	15
Figura 3: Efectos de la temperatura sobre los materiales. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	17
Figura 4: Partes de un motor de reacción. (Fuente: Técnicas H. S. I. www.directly industry.com)	19
Figura 5: Esquema general de ultrasonido. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	24
Figura 6: Los rayos x atraviesan un material. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	30
Figura 7: Los rayos x atraviesan un material. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	30
Figura 8: Características del motor JT8D. (Fuente Manual de Servicio JT8D)	34
Figura 9: Tubo de llama de la cámara de combustión. (Fuente Manual de Servicio JT8D)	34
Figura 10: Cámara de combustión del motor JT8D. (Fuente: Manual de Servicio JT8D)	35
Figura 11: Grietas en la pared de un tubo de llama. (Fuente: Manual Boeing 747 - 400)	37
Figura 12: Inspección visual de un tubo de llama. (Fuente: Manual de Mant. JT8D)	38
Figura 13: Boroscopio rígido. (Fuente: Manual del equipo)	39
Figura 14: Formulario de Registro y Reportes de la inspección visual. (Fuente Propia)	41
Figura 15: Diagrama de desarrollo del proceso de inspección ultrasónica. (Fuente Propia)	42
Figura 16: Bloque de calibración artificial. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	44
Figura 17: Bloque de calibración artificial. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	44
Figura 18: Líquido acoplante. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	45
Figura 19: Palpador normal. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	45
Figura 20: Procedimiento de calibración. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	45
Figura 21: El monitor muestra ondas. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	46
Figura 22: Ajuste de la pantalla del osciloscopio. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	46
Figura 23: Calibración sobre otro material. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	47
Figura 24: El osciloscopio muestra ondas secundarias. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	47
Figura 25: Equipo portátil de ultrasonido. (Fuente Propia)	49
Figura 26: Características del equipo de ultrasonido. (Fuente: Manual del equipo)	49
Figura 27: Funciones de las teclas del equipo de ultrasonido. (Fuente: Manual del equipo)	50
Figura 28: Manejo de los niveles del equipo de ultrasonido. (Fuente: Manual del equipo)	50
Figura 29: Manejo de los niveles del equipo de ultrasonido. (Fuente Manual del equipo)	51
Figura 30: Diagrama del desarrollo de la inspección ultrasónica. (Fuente: Norma Mercosur END)	52
Figura 31: En el monitor se observa la distorsión en el 2° tubo de llama. (Fuente Propia)	54
Figura 32: En el monitor se observa la distorsión en el 2° tubo de llama. (Fuente propia)	54
Figura 33: En el monitor se observa la señal de la superficie del 1° tubo de llama. (Fuente Propia)	55
Figura 34: Inspección del 1° tubo de llama sin discontinuidad. (Fuente Propia)	55
Figura 35: Inspección del 2° tubo de llama con la discontinuidad. (Fuente Propia)	56
Figura 36: Procedimiento de la indicación. (Fuente: Norma Mercosur END)	59
Figura 37: Pasos para la <i>evaluación</i> de una <i>indicación</i> . (Fuente: Norma Mercosur END)	60
Figura 38: Inspección del 2° tubo de llama con el equipo de rayos x. (Fuente Propia)	67
Figura 39: Control externo del panel de mando. (Fuente Propia)	68
Figura 40: Revelado de la película del 2° tubo de llama. (Fuente Propia).	69
Figura 41: La película radiográfica del 2° tubo de llama. (Fuente Propia)	69
Figura 42: Película del 2° tubo de llama. (Fuente Propia)	.70

TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	4
Tabla 2: Clasificación de los END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	5
Tabla 3: Descripción general de los defectos. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	5
Tabla 4: Metodología de aplicación de los END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	6
Tabla 5: Aplicación de los métodos de END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	8
Tabla 6: Resumen de métodos de END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	9
Tabla 7: Tipos de red para los metales comunes. (Fuente: “Int. Metalurgia Física”, S. H. Avner)	15
Tabla 8: Diversos tipos de discontinuidades. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	23
Tabla 9: Características de los elementos piezoeléctricos. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)	28
Tabla 10: Características del Boroscopio Rígido. (Fuente: Manual del equipo)	39
Tabla 11: Criterio de aceptación de indicaciones relevantes. (Fuente Propia)	58
Tabla 12A: Formulario A: Hoja de Registro de ultrasonido. (Fuente: Norma ASTM E 587)	62
Tabla 12B: Formulario A: Hoja de Registro de ultrasonido. (Fuente Propia)	63
Tabla 13A: Formulario B: Hoja Técnica de ultrasonido. (Fuente: Norma ASTM E587)	64
Tabla 13B: Formulario B: Hoja Técnica de ultrasonido. (Fuente Propia)	65
Tabla 14A: Formulario de Registro de la inspección radiográfica. (Fuente: Norma ASTM 1742)	71
Tabla 14B: Formulario de Registro de la inspección radiográfica. (Fuente Propia)	72
Tabla 15: Recursos humanos en la inspección de ultrasonido. (Fuente Propia)	77
Tabla 16: Equipos principales en la inspección de ultrasonido. (Fuente Propia)	78
Tabla 17: Costos de los recursos humanos en la inspección por ultrasonido. (Fuente Propia)	78
Tabla 18: Costo del equipo de ultrasonido. (Fuente Propia)	79
Tabla 19: Costo total de la inspección ultrasónica. (Fuente Propia)	79
Tabla 20: Recursos humanos en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)	80
Tabla 21: Costo de los componentes del equipo de rayos x. (Fuente Propia)	80
Tabla 22: Costo de los insumos en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)	81
Tabla 23: Costo de los recursos humanos en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)	81
Tabla 24: Costo de los equipos de rayos x empleados. (Fuente Propia)	82
Tabla 25: Costo de los insumos empleados en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)	82
Tabla 26: Costo total de la inspección por rayos x. (Fuente Propia)	82

PROYECTO DE GRADO

I. RESUMEN

El presente proyecto consiste en aplicar un sistema de inspección de ensayos no destructivos (END) en los componentes de la zona caliente de un motor de reacción empleando los métodos de Inspección Visual, Ultrasonido y Rayos X a fin de verificar las discontinuidades en servicio provocadas por las altas temperaturas y/o valores de temperatura excedidos de los valores permitidos debido a la *Fatiga Térmica (Creep Térmico, Shock Térmico)*.

Tales pruebas de END con los métodos mencionados se realizan con carácter experimental en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Física dependiente de la Facultad de Ciencias Puras de la Universidad Mayor de San Andrés.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El alto poder calorífico generado en el proceso de combustión de un motor de reacción, provocan daños en los tubos de llama de la cámara de combustión conocido como *fatiga térmica*.

Por tanto, el efecto de la *fatiga térmica*, es un problema permanente en la zona caliente de un motor a reacción y para detectarlo, se aplica la inspección en los tubos de llama de una cámara de combustión mediante los END de Inspección Visual, Ultrasonido y Rayos X.

En nuestro país, las aeronaves de transporte comercial civil y militar, en las cuales se aplican un plan de mantenimiento programado, consideran las recomendaciones de los manuales de mantenimiento de la aeronave y de las órdenes periódicas provenientes desde el fabricante de partes de dichas aeronaves tal como acontece en los Talleres de mantenimiento de aeronaves dependiente de la Fuerza Aérea Boliviana (F.A.B.) donde se realizan las Inspecciones de END en las diversos componentes de los sistemas y subsistemas de una aeronave sometida a un mantenimiento predictivo.

Tales inspecciones son supervisados por las ordenes técnicas del fabricante de partes de la aeronave y el manual de mantenimiento respectivo y finalmente los informes de las pruebas de inspección de END son enviadas al fabricante mencionado.

III. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Es fundamental la inspección de la zona caliente de un motor de reacción empleando los métodos de END para detectar las discontinuidades por servicio de los tubos de llama de una cámara de combustión como parte de un mantenimiento predictivo.

IV. OBJETIVO

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Proponer un sistema de inspección experimental y didáctico en los tubos de llama de la cámara de combustión de un motor de reacción mediante el empleo de los métodos de Inspección Visual, Ultrasonido y Rayos X considerando la norma de operación de los END y la norma ISO 17025, referente a la competencia de un laboratorio de END a fin de detectar discontinuidades de servicio.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Entre los objetivos específicos se consideran los siguientes:

- Identificar las Propiedades Mecánico – Térmicas de los tubos de llama de la cámara de combustión.
- Reemplazar el tubo de llama con una discontinuidad de servicio detectado.
- Prevenir fallas en las piezas o componentes de la cámara de combustión debido a discontinuidades en servicio.
- Reducir los costos económicos en el empleo de los métodos mencionados en las inspecciones programadas de la zona caliente (Hot Sección Inspección, H.S.I.) de un motor de reacción.

V. MARCO TEÓRICO

5.1. LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL SECTOR AERONÁUTICO

Los END se definen como pruebas físicas y químicas expresadas en métodos que aplican un principio físico para determinar la presencia de *discontinuidades en materiales en servicio de componentes de los subsistemas y sistemas de una aeronave e* investigar sus propiedades, sin perjudicar la utilidad de los mismos.

Los objetivos de los END consideran tres aspectos:

- **DETECCIÓN:** Detectar discontinuidades en los componentes de los subsistemas y sistemas de una aeronave sin destrucción de los mismos.
- **EVALUACIÓN:** Determinar la ubicación, orientación, forma, tamaño y tipo de discontinuidades
- **CALIFICACIÓN.** Establecer la calidad de un material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades y/o defectos de acuerdo a las normas de calidad y los objetivos del diseño.

5.1.1. Clasificación de los END en el sector aeronáutico

- **La clasificación de los END en función de su aplicación puede ser:**
 - **Técnicas de Inspección Visual:** Que comprende las técnicas de: Inspección Visual, Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas, Ultrasonido, Emisión Acústica, Termografía.
 - **Técnicas de Inspección Volumétrica:** Que comprende las técnicas de: Partículas Magnéticas, Corrientes de Eddy, Ultrasonido, Rayos X, Emisión Acústica, Termografía.
- **La clasificación de los END de acuerdo a la localización del defecto se muestra en la siguiente tabla:**

SUPERFICIALES	INTERIORES	GLOBALES
<ul style="list-style-type: none"> • Visual • Líquidos Penetrantes • Partículas Magnéticas • Ultrasonido • Emisión Acústica • Termo-grafía 	<ul style="list-style-type: none"> • Partículas Magnéticas • Campo Magnético • Corrientes de Eddy • Ultrasonido • Emisión Acústica • Rayos X • Tomografía computarizada • Termo-grafía 	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones Acústicas • Vibraciones • Detección de Fugas

Tabla 1: Clasificación de los END de acuerdo a la localización del defecto.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

➤ *La clasificación de los END en función de su utilidad se muestra en la siguiente figura:*

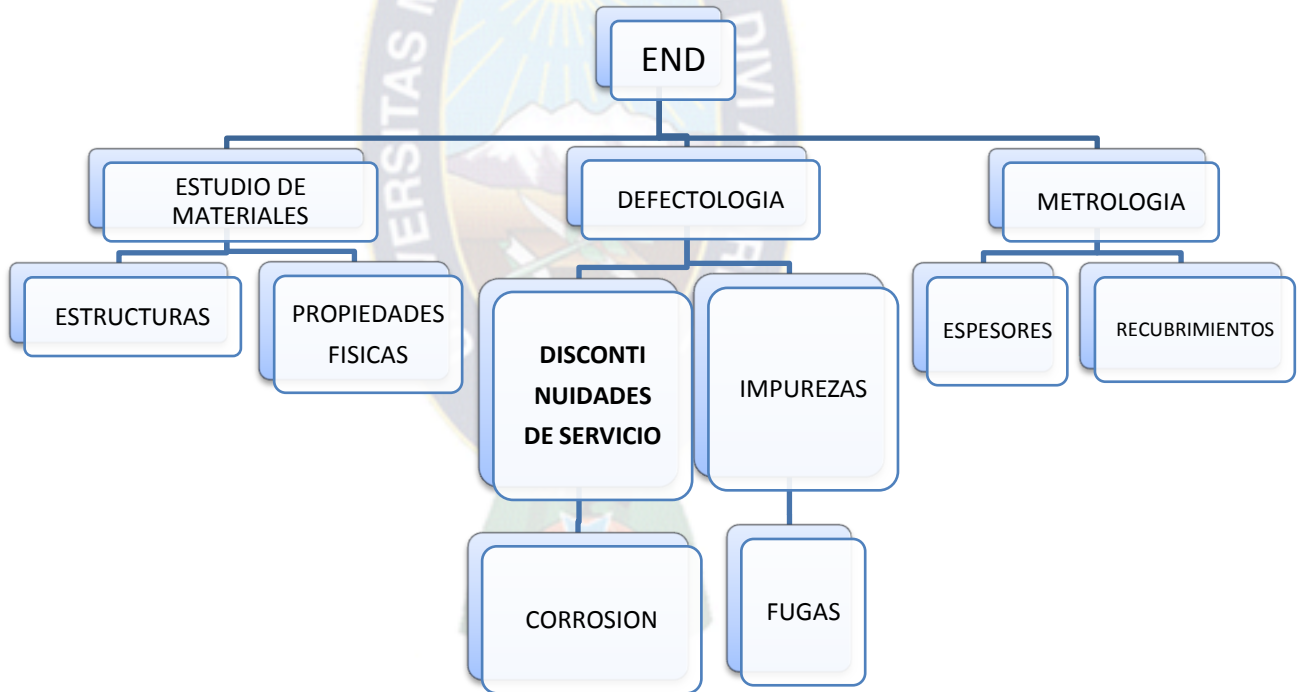


Figura 1: Clasificación de los END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END).

➤ *La clasificación de los END de acuerdo al tipo de defecto:*

METODOS DE END PARA DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	METODOS DE END PARA DEFECTOS PLANOS
<ul style="list-style-type: none"> • Visual • Por réplica de superficies • Líquidos Penetrantes • Partículas Magnéticas • Corrientes de Eddy • <i>Ultrasonido</i> • <i>Rayos X</i> • Tomografía computarizada por rayos X • Termo-grafía • Procesamiento digital de imagen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visual • Microscopía por réplica • Partículas Magnéticas • Corrientes de Eddy • <i>Ultrasonido</i> • Emisión Acústica • Termo-grafía

Tabla 2: Clasificación de los END de acuerdo al tipo de defecto.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

➤ *Descripción general de los defectos volumétricos y planos en metales, aleaciones y superaleaciones:*

DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	DEFECTOS PLANOS
<ul style="list-style-type: none"> • Porosidades • Inclusiones • Contracciones • Agujeros o vacíos • Adelgazamientos por corrosión • Picaduras por corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Discontinuidades • Grietas • Laminaciones • Falta en adherencia superficial • Discontinuidades por solidificación • <i>Grietas por tratamientos térmicos</i> • Grietas por trabajo mecánico • Grietas por fatiga • Grietas por corrosión bajo esfuerzo • Grietas en soldaduras • Falta de fusión en soldaduras • Penetración incompleta en soldaduras

Tabla 3: Descripción general de los defectos volumétricos y planos.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

En el sector aeronáutico se emplean los END en la inspección de daños debido a elementos que poseen *discontinuidades de servicio debido a la fatiga térmica, tensiones y corrosión*.

5.1.2. Metodología de aplicación de los END

Los diferentes métodos de END se emplean como complementarios unos de otros como ser por ejemplo, los métodos volumétricos de END, son capaces de detectar las discontinuidades interiores de los materiales, lo que no resulta posible con los métodos superficiales.

La tabla 4 muestra la secuencia de la metodología de aplicación de los métodos de END donde existe la aplicación de un campo de energía:

1	Aplicación de un campo de energía
2	Interacción con el material
3	Detección de las modificaciones producidas
4	Procesamiento de las modificaciones
5	Interpretación
6	Evaluación

Tabla 4: Metodología de aplicación de los métodos de END.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

5.1.3. Áreas de aplicación de los END

Se cubren 5 amplias áreas y son:

1.- Defectología: Los END se emplean para buscar *defectos* y /o *discontinuidades*, en el material que pudieran comprometer la utilidad de un componente y significaría una reducción en la vida útil del mismo.

2.- Control de la Calidad: Los END posibilitan la inspección del 100% de un componente si es requerido y/o la obtención de datos de todo el volumen de la misma con lo que favorecen a mantener un nivel de calidad uniforme en todo el programa de inspección.

3. Mantenimiento: Las revisiones de mantenimiento contribuyen a la operación eficiente e ininterrumpida de los equipos y a la seguridad en la explotación de los mismos.

4. Evaluación de Propiedades: Los END son una valiosa herramienta en el estudio de propiedades físicas, mecánicas, térmicas, estructurales, químicas y tecnológicas de los materiales.

5. Metrología: Las aplicaciones metroológicas de los END contemplan tres aspectos y son:

- **Medición de desplazamiento y/o posición:** Incluye mediciones lineales tales como la determinación de holgura o separación entre partes o elementos, así como *el tamaño, posición, profundidad y orientación de las discontinuidades* en los materiales.
- **Determinación de variaciones dimensionales:** Contempla la medición de desniveles, no uniformidad, excentricidad, contorno y variaciones de tamaño de partes u objetos enteros.
- **Mediciones de espesor:** Incluye la medición de variaciones de grosor de pared realizadas desde un solo lado, así como la medición precisa del espesor de películas, capas delgadas y revestimientos, entre otras.








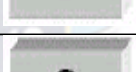



TIPO DE FALLA	MÉTODO DE INSPECCIÓN	Insp. Visual	Liq. Penetrantes	Partícula Magnética (A)	Ultrasonido		Corr. Eddy (B)	Rayos X
					Haz Recto	Haz Angular		
Rajadura Lineal en superficie		1	3	3	1	2	3	1
Grieta Superficial Defecto Volumétrico		3	3	3	3	3	3	3
Rajadura Lineal & Perpendicular cercano a la Superficie		0	0	2	1	2	3	1
Lineal & Paralelo cerca a la Superficie		0	0	0	3	3	0	0
Volumétrico cerca de la Superficie		0	0	2	3	3	3	3
Lineal sub.-superficial & Perpendicular a la Superficie		0	0	0	1	2	0	1
Lineal sub.-superficial & Paralela a la Superficie		0	0	0	3	3	0	1
Volumétrico sub.-superficial		0	0	0	3	3	0	3
Medición de Espesores de Materiales		0	0	0	3	3	3	3
Mediciones de Espesores de Materiales		0	0	0	3	3	0	3
Medición de Espesores del Revestimiento No Conductivo		0	0	0	2	2	0	1

Tabla 5: Aplicación de los métodos de END en la inspección de diversos tipos de fallas.

Nivel I = 1, Nivel II = 2, Nivel III = 3. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

5.1.4. Métodos de END en el sector aeronáutico

Los métodos de END empleados en el sector aeronáutico son: *Inspección Visual, Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas, Corrientes de Eddy, Ultrasonido y Rayos X*, que se describen de forma resumida en la siguiente tabla:

MÉTODO END	APLICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
INSPECCIÓN VISUAL	Detección de defectos superficiales	Uso simple en áreas donde otros métodos son poco prácticos	La confiabilidad del método depende de la experiencia del operador. Se requiere accesibilidad.
LÍQUIDOS PENETRANTES	Detección de grietas superficiales en piezas metálicas.	Uso simple, Precisión, Rapidez, Fácil interpretación.	Los defectos deben llegar a la superficie y ser accesible al operador. El defecto puede estar cubierto por metal o pintura. Es necesario limpiar la pieza antes y después de cada inspección.
CORRIENTES PARASITAS DE ALTA FRECUENCIA.	Detección de grietas superficiales en superficies metálicas, grietas, corrosión inter-granular y condición de tratamiento térmico.	Útil para inspeccionar perforaciones de uniones, grietas no detectables por métodos visuales o con tintas penetrantes. Rápido, sensible, portátil.	Se requiere un operador entrenado. Sensible a variaciones del material. Se requieren sensores especiales para cada aplicación y estándares de referencia.
CORRIENTES PARASITAS DE BAJA FRECUENCIA	Detección de defectos sub-superficiales en materiales metálicos. Medición de adelgazamiento y espaciado.	Útil para detectar presencia de grietas sin remover pernos o remaches o desarmar la estructura.	Se requiere un operador entrenado. Se necesitan sensores más grandes para el uso a baja frecuencia. Se requieren sensores especiales para cada aplicación y estándares de referencia.
EMISIONES ACUSTICAS	Detección de de laminación, despegues, vacíos y núcleos aplastados en materiales compuestos y del tipo panal de abeja.	Basta con inspeccionar una superficie, lectura directa, no requiere retirar la pintura o preparación especial de la superficie.	Pierde sensibilidad al aumentar el espesor. Se requiere una fuente eléctrica.
RAYOS X	Detección de fallas internas y defectos como grietas, corrosión, intrusiones y cambios de espesor. Elimina muchas veces la necesidad de desensamblar.	Tiene alta sensibilidad y deja un registro permanente.	Peligro por la radiación. Requiere personal entrenado y procesamiento de la placa. El plano de la grieta debe ser casi paralelo con el filamento de rayos X. Se requiere fuente eléctrica Se requiere equipamiento especial para posicionar el tubo de rayos X y la placa.
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	Detección de defectos superficiales o cercanos a la superficie en materiales ferro magnéticos de cualquier forma o tratamiento térmico.	Principio simple. Fácil, portátil.	Se requiere un operador entrenado. Las partes deben ser limpiadas antes de la inspección y desmagnetizadas después. El flujo magnético debe ser normal al plano del defecto.
ULTRASONIDO	Detección de defectos superficiales o subsuperficiales y fallas y medición de espesor en la mayoría de los metales.	Rápido, confiable, fácil de operar. Los resultados se conocen inmediatamente y son altamente confiables. Altamente sensible y portátil.	Se requiere un operador entrenado y una fuente eléctrica. La orientación del plano de la grieta debe ser conocida para seleccionar el modo de la onda a utilizar. Se requieren estándares de prueba para establecer la sensibilidad del instrumento.

Tabla 6: Resumen de métodos de END. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END).

5.2. NORMAS DE END EN EL SECTOR AERONÁUTICO

Las normas de END permiten estandarizar los procesos propios de la industria aeronáutica para tener ciertos parámetros de referencia en todo el mundo y esto favorece a la comunicación entre los fabricantes de partes, de motores de aeronaves, etc.

Una norma de END se define como una especificación técnica cuyas características son:

- Son elaborados por consenso de las partes interesadas como ser: el fabricante de partes de la aeronave, los centros o talleres certificados de mantenimiento de aeronaves, los organismos nacionales, regionales, internacionales, los centros de investigación y laboratorios, las asociaciones de profesionales del sector aeronáutico, etc.
- Están basados en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico.
- Son aprobados por un organismo nacional, regional o internacional de normalización reconocidos.
- Las normas de END están disponibles al público.

En el sector aeronáutico se consideran las siguientes normas:

- Las normas americanas: USA. ASME, ASTN (American Society for Non Destructive Testing).
- Las normas internacionales: ISO – CODIGO.
- Las normas europeas: AEND (Asociación Española de Ensayos No Destructivos), UNE – CODIGO.
- Las normas internacionales militares: MIL – CODIGO.

5.2.1. Clasificación de las Normas de END

Se clasifican en:

- Normas internacionales de operación de END.
- Normas internacionales de capacitación, calificación y certificación de personal de END.
- Norma internacional de competencia de laboratorios de END.

5.2.1.1. Norma de operación de los END

Los talleres o centros certificados de mantenimiento de aeronaves emplean como referencia las siguientes normas de operación:

a) Norma de operación de END: USA

- **ASTM 587:** Standard Practice for Ultrasonic angle beam examination by the contact method.
- **ASTM E1417:** Standard Practice for Liquid Penetrant Examination
- **ASTM E1444:** Standard Practice for Magnetic Particle Examination
- **ASTM E1742:** Standard Practice for Radiographic examination.

b) Norma de operación de END: ISO

- **ISO 1027:1983:** Radiographic image quality indicators for NDT - Principles and identification.
- **ISO 3059:2001:** NDT - Penetrant testing and magnetic particle testing - Viewing conditions
- **ISO 3452:1984:** NDT - Penetrant inspection - General principles
- **ISO 3452 - 2:2000:** NDT - Penetrant testing - Part 2: Testing of penetrant materials.
- **ISO 3452 - 3:1998:** NDT - Penetrant testing - Part 3: Reference test blocks.
- **ISO 3452 - 4:1998:** NDT - Penetrant testing - Part 4: Equipment.
- **ISO 5577:2000:** NDT - Ultrasonic inspection – Vocabulary.
- **ISO 9934 - 1:2001:** NDT - Magnetic particle testing - Part 1: General principles.
- **ISO 9934 - 2:2002:** NDT - Magnetic particle testing - Part 2: Detection media.
- **ISO 2710:2002:** NDT - Ultrasonic inspection - Evaluating electronic characteristics of ultrasonic test instruments (available in English only).
- **ISO 12713:1998:** NDT - Acoustic emission inspection - Primary calibration of transducers.
- **ISO 12714:1999:** NDT - Acoustic emission inspection - Secondary calibration of acoustic emission sensors (available in English only).

c) **Norma de operación de END: EUROPA: UNE**

Las normas UNE - EN son la versión oficial en español de las normas europeas, que son adoptadas tras la aprobación de un órgano específico dentro de la estructura de normalización nacional de la Asociación Española de Normalización y Acreditación (AENOR) y entre las más importantes se tienen las siguientes:

- **UNE - EN ISO 9001:2000:** Para el mantenimiento de aviones militares y motores, reparación de componentes, ensayos de homologación y control de materiales y productos aeronáuticos, así como END.
- **UNE- EN 13018:2001:** Inspección Visual.
- **UNE- EN 12084:2001:** Corrientes Inducidas o Corrientes de Eddy.
- **UNE- EN 7 - 452:** Inspección por Partículas Magnéticas.
- **EN 571 - 1:** END - Ensayo por Líquidos Penetrantes - Parte 1: Principios generales.
- **EN 583 - 1:** END - Examen por Ultrasonido - Parte 1: Principios generales.
- **EN 584 - 1:** END - Película para Radiografía Industrial - Parte 1: Clasificación de los sistemas de película para Radiografía Industrial.
- **EN 584 - 2:** END - Película para Radiografía Industrial - Parte 2: Control del proceso de las películas mediante valores de referencia.
- **EN 12223:** END - Examen por Ultrasonido - Especificaciones relativas al bloque patrón N* 1.

d) **Norma de operación de END: MIL**

- **MIL – HDBK - 728/2:** Eddy Current Testing
- **MIL – P - 85585:** Probes, Eddy Current, unshielded, single coil, absolute
- **MIL – STD - 1537B:** Electrical Conductivity test for verification of heat treatment of aluminum alloys eddy current method
- **MIL– STD - 2154:** Military standard inspection, ultrasonic, wrought metals, process

5.2.1.2. Capacitación, Calificación, Certificación de Personal de END

Las normas que regulan al personal de END en el sector aeronáutico son las siguientes:

- **IRAM - ISO 9712:** Calificación y Certificación de Personal de END.
- **ASNT, SNT – TC - 1ª:** Guía Práctica Recomendada de Personal de END.
- **ISO 20807:2004:** NDT - Qualification of personnel for limited application of NDT.
- **Norma ASNT CP - 189:** Para la Calificación y Certificación de Personal de END.
- **Norma Internacional ISO 9712:2001: END:** Calificación y Certificación de Personal.

Los tres niveles básicos de calificación de personal establecida en la Práctica Recomendada: No. SNT- TC - 1A son: Nivel: I, II, III.

5.2.1.3. Norma de competencia de laboratorio de END

Un laboratorio de END posee la habilitación de las normas ASTM de acuerdo a la guía ASNT-TC-1ª en las técnicas de: *Inspección Visual, Partículas Magnéticas, Líquidos Penetrantes, Corrientes Inducidas, Ultrasonido, y Rayos X* y son aplicables a todo tipo de aeronaves, simultáneamente se emplea la norma *ISO 17025 que es la norma para la competencia de laboratorios de END.*

5.2.2. Norma Boliviana: RAB – 43

En Bolivia existen las normas RAB (Reglamentación Aeronáutica Boliviana), de las cuales es la *RAB - 43: Reglamento sobre la Aeronavegabilidad Continua, Mantenimiento, Mantenimiento Preventivo, Reconstrucción y Alteración;* la norma que regula y/o garantiza a un centro o taller certificado de mantenimiento de aeronaves a realizar las inspecciones mediante los END en los componentes de los subsistemas y sistemas de una aeronave.

5.3. TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES EN AVIACION

5.3.1. Naturaleza de los materiales

Es importante conocer las propiedades de los materiales de los metales, aleaciones y súperaleaciones que participan en el diseño de componentes de los subsistemas y sistemas de una aeronave y los métodos que permiten establecerlas es esencial ya sea en su manufactura y en su servicio y el predecir el comportamiento de estos materiales surge del conocimiento sobre los procesos de manufactura, conformación y las discontinuidades asociadas a estos materiales en una condición de servicio.

5.3.1.1. Propiedades de los metales

Se identifican las propiedades de los metales con frecuencia, exponiéndoles a diversos esfuerzos, como ser: un metal puede endurecerse por deformación, o por exposición a un grado de calor adecuado o puede hacerse más difícil la disminución de la resistencia mecánica a elevadas temperaturas y la variación de estas propiedades radica en la estructura cristalina que configura a todos los metales, aleaciones y superaleaciones.

5.3.1.2. Estructura metálica

La unidad básica de los metales es el átomo, en un lugar de la molécula, ya que las moléculas de los metales son monoatómicas y cuando el metal se solidifica no solo cesa el movimiento aleatorio de los átomos, sino que además ellos asumen siempre una posición definida relativa a unos de otros.

Las fuerzas interatómicas son los responsables de que los átomos se enlacen entre sí, sin embargo como estas fuerzas no son iguales en todas las direcciones, los átomos se arreglan a sí mismos en ciertas configuraciones geométricas llamadas *redes espaciales*.

En cada caso, se precisa de un número definido de átomos para formar una unidad de esta estructura reticular.

Los metales se solidifican en cuatro tipos de estructura reticular distintas y los más

importantes solidifican en tres de ellas: **Cúbica Centrada en el Cuerpo (BCC)**, **Cúbica Centrada en las Caras (FCC)** y **Hexagonal Empaquetada (HCP)**.

La figura 2 muestra la representación esquemática de los tres tipos de redes considerados y que se ilustra en cada caso, la posición del centro de los átomos.

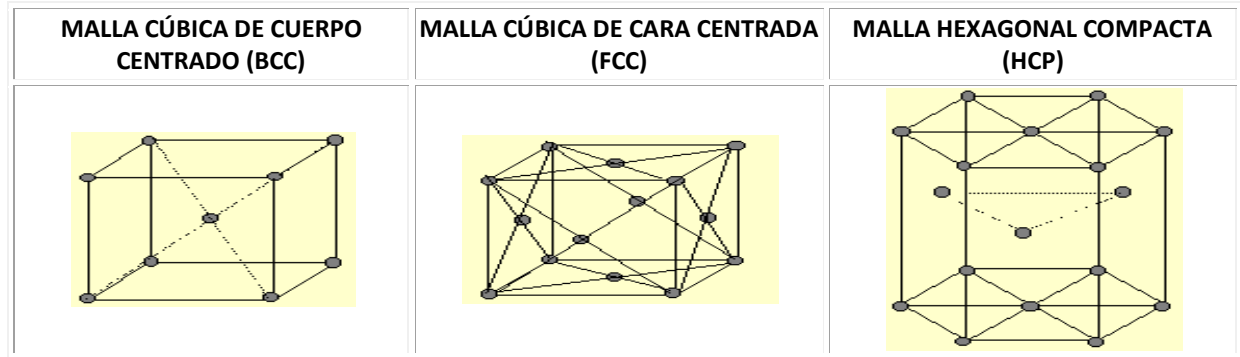


Figura 2: Celdas unitarias de las redes cristalinas de metales.

(Fuente: Ciencia de Materiales, Villegas Mario Oscar)

La siguiente tabla muestra la estructura reticular de varios metales:

ELEMENTO	ESTRUCTURA	DISTANCIA INTERATÓMICA (° A)	RELACIÓN AXIAL	T (° C)
Aluminio	CCC	2.86		
Zinc	HD	2.66	1.57	
Cobalto	HD CC	3.17 3.13	1.59	20 867
Cobre	CCC	2.55		
Cromo	CC	2.50		
Hierro	CC CCC	2.48 2.58		20 950
Molibdeno	CC	2.79		
Níquel	CCC	2.49		
Plata	CCC	2.88		
Platino	CC	2.77		
Plomo	CCC	3.50		
Titanio	HD CC	2.89 2.89	1.60	25 900
Vanadio	CC	2.63		
Wolframio	CC	2.74		

Tabla 7: Tipos de red para los metales comunes a diversas temperaturas.

(Fuente: “Introducción a la Metalurgia Física”, Sidney H. Avner)

5.3.2. Propiedades mecánicas de los materiales

- **Las Propiedades Físicas:** Permiten distinguir un material de otro como ser: **Color, Densidad, Calor Específico, Coeficiente de Expansión Térmica, Conductividad Eléctrica y Térmica, Dureza, Brillo, Resistencia**, etc.
- **Las Propiedades Mecánicas:** Son algunas de las propiedades físicas que describen la reacción del material en su uso mecánico – térmico y su comportamiento en la relación: Tensión versus Deformación.
- **Las Propiedades Estáticas:** Se determina mediante el Ensayo de Tracción, Curva: Tensión – Deformación, Módulo de Elasticidad, Límite Elástico, Resistencia, Límite de Fluencia, Plasticidad, Resistencia Máxima, Estricción, Ruptura, Ductilidad, Tenacidad, Fragilidad, Maleabilidad, Ensayo de Dureza, Ensayo de Dureza Brinnell, Ensayo de Dureza Vickers, Ensayo de Dureza Rockwell.
- **Las Propiedades Dinámicas:** Se determina mediante el ensayo de impacto, fallo por fatiga y la capacidad de deformarse permanentemente de forma apreciable sin fracturar debido a la gravedad específica alta como son los efectos de la temperatura que se analiza a continuación:

5.3.3. Efectos de la temperatura

En los materiales sometidos a temperaturas que oscilan de: -1°C a 4°C hasta 1110°C en cuanto a su conformación, se consideran varios aspectos relativos a los efectos de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de estos materiales como ser: los **efectos inmediatos y los efectos demorados**.

5.3.3.1. Efectos inmediatos

Se refiere a cambios inminentes en las propiedades del material con variaciones de temperatura y son relacionados con las propiedades de resistencia.

En la figura 3 se observa que la tensión es inversamente proporcional a la temperatura en

aceros y relativamente en aleaciones de níquel y aluminio, mientras que la elongación es directamente proporcional a la temperatura en los aceros.

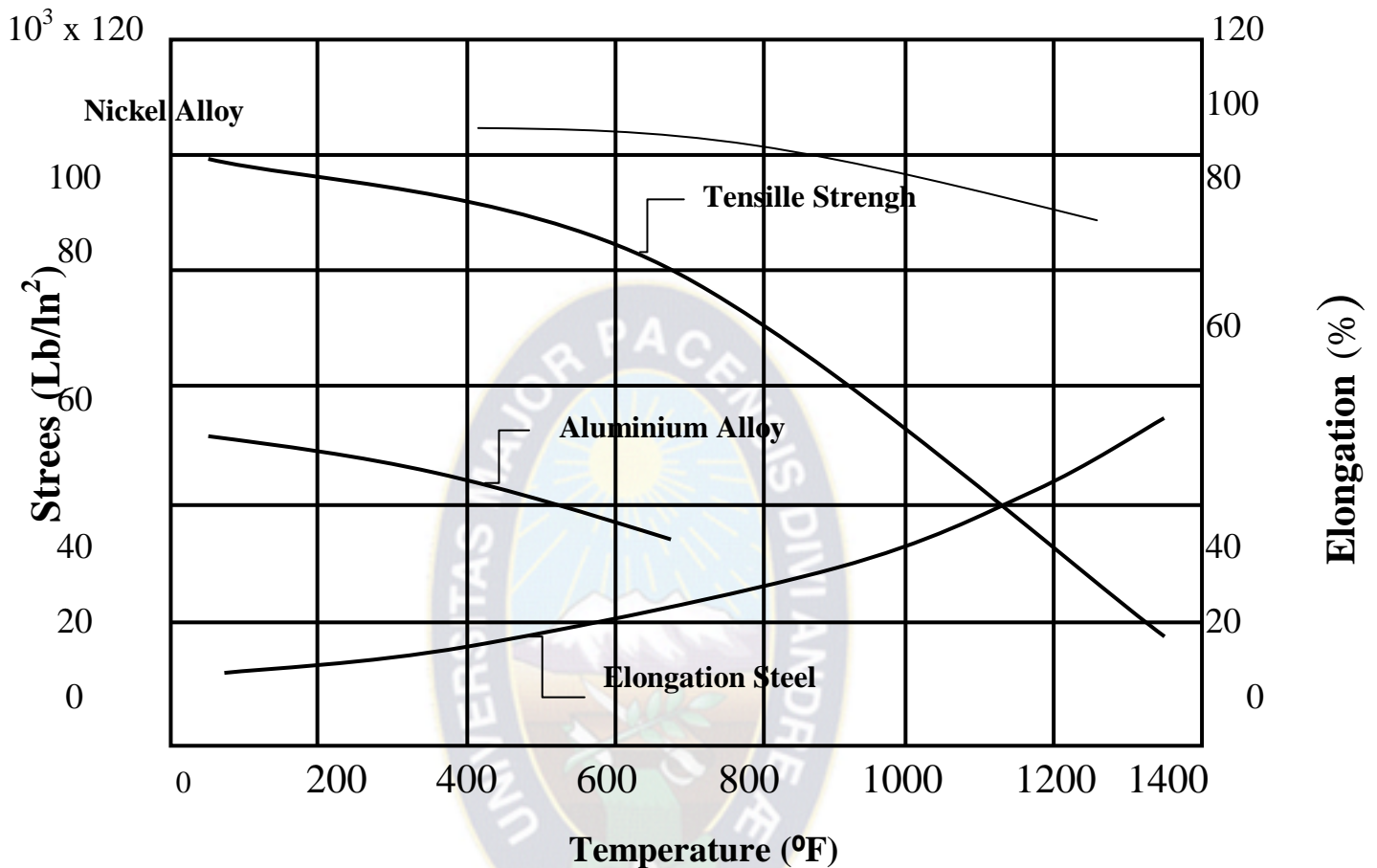


Figura 3: Efectos de la temperatura sobre las propiedades de resistencia de un acero Medio en carbono y de aleaciones de níquel y aluminio. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

5.3.3.2. Efectos demorados

El efecto demorado de la temperatura se manifiesta a través de un fenómeno conocido como arrastre y/o *Creep Térmico* y se presenta cuando un material se somete a una carga fija a elevada temperatura y se estirará de forma continua hasta que finalmente falla.

Aunque la velocidad de elongación es muy pequeña, es suficiente para ser importante en componentes que operan a elevadas temperaturas por un largo periodo de tiempo.

En general mientras mayor es la temperatura, mayor es la velocidad de *Creep Térmico* y la velocidad de *Creep Térmico* depende de la carga aplicada.

5.3.4. Materiales empleados en los sistemas de una aeronave

En la selección de los materiales empleados en el diseño de los subsistemas y sistemas de una aeronave se consideran los siguientes aspectos:

- El sistema del motor está construido fundamentalmente de componentes metálicos, como ser: el titanio, superaleaciones de níquel, cromo, cobalto, ya que se requiere resistencia a la corrosión y a altas temperaturas en los componentes de la cámara de combustión y las secciones de turbina.
- Para las partes donde es decisivo que confluyan la resistencia y la ligereza (componentes estructurales, secciones de compresor, bastidores de motor), se emplean diversas aleaciones de aluminio y titanio.
- En las partes intermedias se emplean numerosas aleaciones de acero por ejemplo en el tren de aterrizaje.
- La minimización del peso en el diseño de una aeronave es un factor decisivo para reducir los costes de los ciclos operativos (maximización de la carga de pago y minimización del consumo de combustible), por tanto, han empezado a incorporarse nuevos materiales compuestos como sustitutos ligeros de aluminio, titanio y ciertas aleaciones de acero en zonas estructurales y conductos donde no se produce la exposición a elevadas temperaturas.

5.3.5. Superaleaciones empleados en una cámara de combustión

Las propiedades de los metales como el acero sometidos a altas temperaturas, se modifican en mayor o menor medida y los métodos de caracterización clásicos como los ensayos mecánicos de *Tracción, Dureza, Choque y Fatiga* ya son insuficientes para proporcionar información para un correcto diseño de componentes de la zona caliente de un motor de reacción y esto se debe a la aparición de nuevos parámetros que sólo aparecen cuando se eleva la temperatura, como por ejemplo: *la Fluencia, los Esfuerzos Térmicos*, y la aceleración de la *Oxidación*, por ello es que se emplean las superaleaciones que permiten mantener las propiedades mencionadas aceptables bajo condiciones de trabajo sometidas cada vez a temperaturas más elevadas y poder soportar el conjunto de factores desencadenados bajo estas condiciones de trabajo.

El sistema del motor de reacción resulta la más desafiante con respecto a la mejora de las superaleaciones que la componen, en especial, la zona caliente.

Por ejemplo, en el subsistema de la cámara de combustión sujeta a tensiones, cuando el motor arranca, acelera, desacelera, y cada vez que el avión despega y aterriza sufre cambios de temperatura que van del orden de cientos, a miles de grados y la repetición de este ciclo puede conducir a un tipo de falla conocida como *Fatiga Térmica* de baja frecuencia.

Las tres principales secciones de un motor de reacción típico son las siguientes: El *Compresor, la Cámara de Combustión y la Turbina* (Ver figura 4).

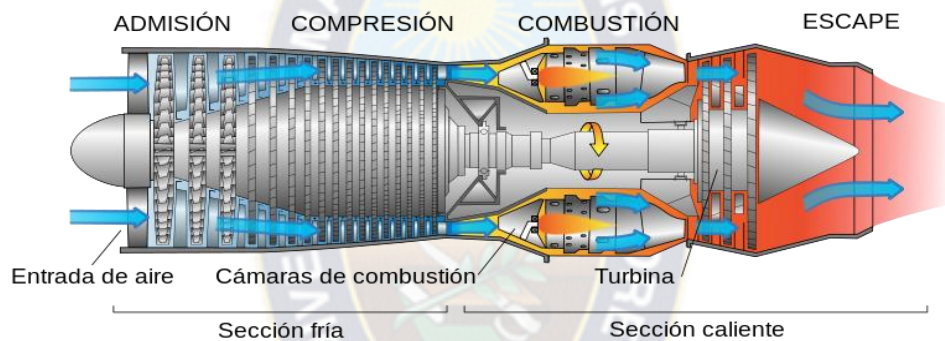


Figura 4: Partes de un motor de reacción.

(Fuente: Técnicas H.S.I., [www.directly industry.com](http://www.directlyindustry.com))

En la figura 4 se observa que el aire a alta presión proveniente del compresor se mezcla con el combustible rociado formando un conjunto que entra en ignición en la cámara de combustión.

Los gases calientes generados se expanden rápidamente y circulan a elevada velocidad a través de la turbina formada de álabes móviles y estacionarios, y se eliminan a través de la boquilla de escape.

La elevada velocidad con que los gases abandonan la parte posterior de la turbina empuja el avión hacia delante. Cuando este flujo atraviesa la turbina, la hacen girar; la parte móvil, que está conectada al eje del compresor, el cual gira, succionando más aire.

La mayoría de los componentes de la cámara de combustión, están capacitados para resistir la **Fatiga Térmica** (desgaste causado por los repetidos ciclos de expansión y contracción a elevada y a baja temperatura) como también la **Corrosión** y la distorsión a elevadas temperaturas.

Las aleaciones de los componentes de la cámara de combustión no necesitan ser particularmente resistentes, pero han de mantener sus **propiedades mecánico – térmicas** a temperaturas del orden de los 1100° C, además poseerán un micro estructura muy estable, para mantener así sus propiedades durante largos períodos de tiempo.

Las aleaciones más idóneas para satisfacer muchas de las condiciones extremas señaladas son los materiales basados en el níquel conocidos como superaleaciones.

Pero aún las superaleaciones de níquel presentan limitaciones a temperaturas muy elevadas; por tanto, en los componentes de la propia cámara de combustión, donde se alcanzan temperaturas del orden de los 1100° C, se consideran la adición de aleaciones de cobalto.

Las aleaciones de cobalto se utilizan también para fabricar los álabes del estator de las secciones de la turbina más próximas a la cámara de combustión.

Las aleaciones de cobalto no gozan de la resistencia mecánica que disfrutaban las superaleaciones de níquel, pero mantienen su resistencia a temperaturas mucho más elevadas.

Su resistencia a temperaturas elevadas se debe, principalmente, a la distribución de carburos refractarios (combinaciones de metales tales como el tungsteno y el molibdeno con el carbono), que tienden a precipitar en los límites de los granos de la aleación.

Generalmente, las aleaciones de cobalto, además de llevar metales refractarios y carburos metálicos, contienen niveles elevados de cromo, lo que aumenta la resistencia a la corrosión provocada por la presencia de los gases calientes de combustión.

Los átomos de cromo se combinan con los átomos de oxígeno y forman una capa protectora de óxido de cromo, que protege la aleación de los gases corrosivos.

Las aleaciones de cobalto son más fáciles de soldar que las superaleaciones, ya que son menos duras; además, las superaleaciones son poco forjables, y pueden romperse bajo esfuerzos térmicos.

Por todas esas razones, las aleaciones de cobalto se aplican para fabricar la compleja estructura de la cámara de combustión, donde los componentes deben ser fabricables y soldables.

Finalmente, la adición de las aleaciones de: Ni - Cr (Series: *Nimonic* y *Udimet*) y otros elementos de aleación como ser: **Fe, Mn, Si, Ti, Al** y asimismo, la aplicación en estas aleaciones de la *Tecnología de Fusión en Vacío* permiten controlar el contenido de oxígeno y nitrógeno, lo que aumenta considerablemente la cantidad y eficiencia de los elementos endurecedores más reactivos como el titanio y aluminio, logrando la obtención de superaleaciones con unas propiedades mecánicas superiores.

5.3.5.1. Propiedades mecánico - térmicas de las superaleaciones

Se define a las superaleaciones como el conjunto de aleaciones metálicas que presentan mejores *Propiedades Mecánica – Térmicas* a elevadas temperaturas y sus características especiales se puede resumir en que poseen:

- Punto de fusión elevado.
- Empaquetamiento atómico compacto.
- Existe un factor de complejidad debido a una solución sólida compleja que provoca endurecimiento en un rango amplio de temperaturas.
- Existencia de una o varias fases dispersas que mantengan su dureza a elevadas temperaturas permaneciendo insolubles en la matriz y presentando una fuerte cohesión con esta.

Asimismo entre las *Propiedades Mecánico - Térmicas* de las superaleaciones sometidos a altas temperaturas se consideran el comportamiento de tres tipos de cargas como son: las Cargas Estáticas, Cargas Cíclicas y las *Cargas de Creep Térmico*.

La carga de fluencia lenta conocido como *Creep*, es la deformación del material cuando es aplicado a un esfuerzo constante, que depende de la gradualidad con la que se le aplican las cargas así como de la estabilidad del material en términos de corrosión y en términos generales de la estabilidad químico - estructural, es decir: tamaño de grano y composición de la junta de grano.

Entre otros factores que determinan la resistencia a la fluencia de una superaleación sometido a altas temperaturas son las siguientes:

- Existe un rango de temperaturas en las que el *Creep* dependerá de la temperatura.
- Se determina la velocidad de aplicación de las cargas sean: Estáticas, Progresivas o Cíclicas.
- El *Creep Térmico* es un proceso de deformación en el que la viscosidad del material obliga a analizar los problemas termo mecánico.
- El fenómeno del *Creep Térmico* se ve altamente influenciado por la micro estructura y el tamaño de grano.
- Una micro estructura con un grano mayor retarda la activación del *Creep Térmico*, es decir, requiriéndose de temperaturas más elevadas para que se produzca.
- La optimización de las propiedades de un material, sólo se puede considerar mediante un control adecuado sobre la micro estructura.

5.3.6. Discontinuidades y defectos de los materiales

Las discontinuidades que se originan en los componentes de una cámara de combustión, durante el servicio de estas y que pueden conducir a la presencia de *grietas y fisuras*, son conocidas como *fallas debido a la fatiga térmica*.

5.3.6.1. Clasificación de las discontinuidades de los materiales

Las discontinuidades presentes en un material pueden ser clasificadas atendiendo a varios criterios como ser:

- a) **Por su morfología:** Se clasifican en esféricas o puntuales, cilíndricas y planas o laminares.
- b) **Por su situación:** Se clasifican en discontinuidades superficiales, sub- superficial e interna o volumétrica.

La siguiente tabla muestra los diversos tipos de discontinuidades:

TIPOS DE DISCONTINUIDADES					
INHERENTES		DE PROCESO			DE SERVICIO
LINGOTE	FUNDICIÓN	PRIMARIOS		SECUNDARIOS	TENSIONES FATIGA CORROSION
		FORJADOS	LAMINADOS	MAQUINADO AMOLADO TRATAMIENTOS TERMICOS SOLDADURA	
INCLUSIONES NO METALICAS INCLUSIONES GASEOSAS (POROSIDAD, SOPLADURAS) CONTRACCIONES SEGREGACIONES	SOLAPADO EN FRIO SALPICADURAS DESGARRO EN CALIENTE SEGREGACIONES RECHUPES POROSIDAD INCLUSIONES	PLIEGES LAMINACIONES ESTALLIDO FISURAS	CORDONES LAMINACIONES COSTURAS	DESGARRAMIENTOS FISURAS	FISURAS

Tabla 8: Diversos tipos de discontinuidades. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

Son las discontinuidades de servicio debido a las tensiones, fatiga térmica y corrosión que generalmente se detectan en los componentes de la cámara de combustión cuando son sometidas a inspecciones de END.

5.4. MÉTODO DE ULTRASONIDO

5.4.1. Introducción

Este método consiste en que las ondas de sonido (de alta frecuencia) son introducidas en un material y viajan a través del material disminuyéndose paulatinamente y son reflejadas a la

interface. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de cualquier tipo de discontinuidades en la superficie y sub-superficie de un material.

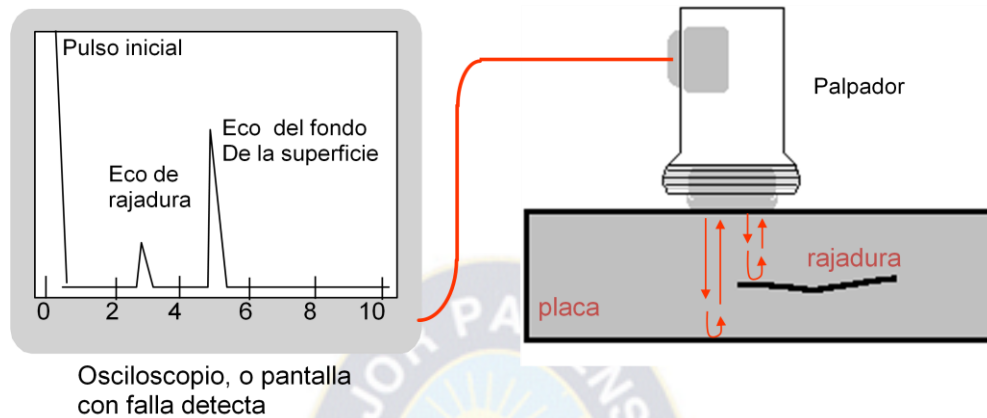


Figura 5: Esquema general del método de ultrasonido.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

El equipo de inspección ultrasónica detecta fallas monitoreando los siguientes puntos:

- La reflexión del sonido de las interfaces consistentes en los límites del material o en discontinuidades dentro del material mismo.
- El tiempo de tránsito de la onda de sonido durante la prueba dentro de la pieza es desde el punto de entrada del transductor hasta el punto de salida.
- La atenuación de las ondas de sonido en la pieza debido a la absorción y dispersión dentro de la pieza.
- Las ondas de ultrasonido son vibraciones mecánicas, las amplitudes de las vibraciones producen esfuerzos en las piezas por debajo de su límite elástico, de esta manera los materiales no producirán deformaciones plásticas.

5.4.2. Propagación de las ondas ultrasónicas

- Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una substancia.
- Las ondas de ultrasonido se comportan igual que las ondas de sonido audible, se pueden propagar a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío.

- Un haz de ultrasonido son ondas y obedecen a la ecuación general de ondas. Cada onda viaja con características diferentes las cuales dependen del medio en el que se propaguen y no de las características de la onda.
- Un haz de ultrasonido es *reflejado* en las superficies, *refractado* cuando cruza las fronteras entre dos substancias que tienen diferentes características de velocidades y *difractados* en los bordes o alrededor de los obstáculos.
- Las ondas ultrasónicas se propagan en cierta medida en cualquier material elástico y cuando las partículas atómicas o moleculares de un material elástico son desplazadas de sus posiciones de equilibrio por cualquier fuerza aplicada, aparecen esfuerzos internos que actúan para restaurar o reacomodar a sus posiciones originales.
- Debido a las fuerzas interatómicas que existen entre las partículas adyacentes del material, un desplazamiento en un punto provoca un desplazamiento en los puntos vecinos y así sucesivamente, originando entonces una propagación de ondas de esfuerzo-deformación y este desplazamiento real del material que se produce en las ondas ultrasónicas es extremadamente pequeña.
- La amplitud, el modo de vibración y velocidad de las ondas se diferencian en los sólidos, líquidos y gases debido a las grandes diferencias que hay entre las distancias de sus partículas internas. Estas diferencias influyen las fuerzas de atracción entre partículas y el comportamiento elástico de los materiales.

5.4.2.1. Rangos de sonido de las ondas ultrasónicas

- INFRASONICA SUBSONICA: (En este rango no se escucha ningún tono solo se notará presión): De 1 a 16 Hz.
- SONICA O AUDIBLE: De 16 Hz a 20 KHz.
- ULTRASONICA: 20 KHz en adelante. Las frecuencias utilizadas en los ensayos ultrasónicos se encuentran en el rango de: 0.2 a 25 MHz.

5.4.2.2. Principios

El método de ultrasonido se basa en los siguientes principios:

- La impedancia acústica es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica.
- Transmisión de energía entre partículas que propician el oscilamiento.
- El número de oscilaciones son de acuerdo al tipo de onda que se trata y se propagan en todos los medios elásticos donde exista fracciones de materia (átomos y moléculas capaces de vibrar).
- La vibración depende de la separación de las partículas.

5.4.3. Aplicaciones del método de ultrasonido

- En la detección y caracterización de todo tipo de discontinuidades.
- En la medición de espesores, extensión y grado de corrosión.
- En la determinación de características físicas de materiales.
- Para hallar la velocidad de propagación de ondas en diversos materiales.
- Para detectar el tamaño de grano en materiales.
- Para detectar la adhesión entre materiales.
- En la inspección de soldaduras.
- En la medición de espesores de pared de piezas tratadas.

5.4.4. Ventajas del método de ultrasonido

- La prueba se efectúa más rápidamente obteniendo resultados inmediatos.
- Se tiene mayor exactitud al determinar la posición de las discontinuidades internas, estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza.
- Se tiene una alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.
- Existe una alta capacidad de penetración, lo que permite localizar discontinuidades a gran profundidad de un componente.

- Existe una buena resolución que permite diferenciar dos discontinuidades próximas entre sí.
- Solo se requiere acceso por un lado de un componente a inspeccionar.
- No se requiere de condiciones especiales de seguridad.

5.4.5. Limitaciones del método de ultrasonido

- Existe baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales.
- Se requiere de personal especializado y de gran experiencia.
- Existe dificultad para inspeccionar componentes de geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular.
- Existe dificultad para detectar o evaluar discontinuidades cercanas a la superficie del material sobre la que se aplica las ondas ultrasónicas.
- Se requiere de patrones de calibración y referencia.
- Es afectado por la estructura del material. (tamaño de grano, tipo de material).
- El equipo de ultrasonido es de alto costo.
- Se requiere de agente acoplante.

5.4.6. Equipo básico

- Un generador electrónico de señales que produce pulsos eléctricos.
- Un palpador (transductor) que emite el haz de ondas ultrasónicas cuando recibe los pulsos eléctricos.
- Un acoplante que transfiere las ondas del haz ultrasónico a un componente de prueba.

5.4.6.1. Transductores

Es un dispositivo por el cual la energía eléctrica se convierte en energía mecánica (ondas sonoras) o viceversa y opera debido al efecto piezoeléctrico, el cual consiste en que ciertos cristales cuando se tensionan, se polarizan eléctricamente y generan voltaje eléctrico entre las superficies opuestas. Esto es reversible en el sentido de que al aplicar un voltaje a través de las

caras de un cristal, se produce una deformación del mismo. Este efecto microscópico se origina por las propiedades de simetría de algunos cristales.

Los transductores se componen de ciertos materiales piezoeléctricos, los cuales se describen a continuación:

5.4.6.2. Materiales piezoeléctricos

Entre los materiales piezoeléctricos más empleados están: el Cuarzo, el Sulfato de Litio y las Cerámicas Polarizadas y se emplean de acuerdo a las características del material a tratarse.

La siguiente tabla muestra las características, ventajas y desventajas de estos elementos piezoeléctricos:

ELEMENTO PIEZOELECTRICO	CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS PIEZOELECTRICOS							HABILIDAD DEL ELEMENTO EN:		
	EFICIENCIA				TOLERANCIA A ELEVADA TEMPERATURA	HABILIDAD DE AMORTIGUAMIENTO	MODOS NO DESEADOS RUIDO INHERENTE	INSPECCION POR CONTACTO		INSPECCION POR INMERSION
	TRANSMISOR	RECEPTOR	ACOPLAMIENTO					HAZ RECTO	HAZ ANGULAR	
			AL AIRE	AL METAL						
CUARZO	P	B	B	M	B	M	B	B	M	B
SULFATO DE LITIO	M	E	E	P	P	E	E	P	M	B
TITANATO DE BARIO	B	P	B	B	P	P	P	B	B	M
TITANATO ZIRCONATO DE PLOMO	E	M	M	E	E	M	P	E	E	M
METANIOBATO DE PLOMO	B	M	B	E	E	E	B	E	E	B

E = EXCELENTE, B = BUENO, M = MEDIANO, P = POBRE

Tabla 9: Características y aplicación de los elementos piezoeléctricos del transductor. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

5.4.6.3. Tipos de palpadores

Existen los *palpadores de contacto e inmersión*, que pueden emplearse de acuerdo a las características de la pieza a tratarse, a su vez los palpadores de contacto se subdividen en: *Palpadores de incidencia normal o haz recto, Palpadores de incidencia angular o haz angular, Palpadores de ondas de Superficie, Palpadores angulares de incidencia variable.*

5.4.6.4. Acoplantes empleados

- Los tipos de acoplantes que pueden emplearse son: agua, aceite, grasa, glicerina, vaselina, estos acoplantes permiten el paso de las ondas del transductor a la pieza sujeta a prueba, ya que las frecuencias que se utilizan para los metales, aleaciones y superaleaciones no se transmiten en el aire.
- Las características de los líquidos acoplantes son: **Humectabilidad, (capaz de mojar la superficie y el palpador), Viscosidad Adecuada, Baja Atenuación, (que el sonido se transmita al 100%), Bajo Costo, Removible, No Tóxico, No Corrosivo, Impedancia Acústica Adecuada.**

5.5. MÉTODO DE RAYOS X

5.5.1. Introducción

El principio básico de la inspección radiográfica, se basa en la propiedad que poseen los materiales de atenuar o absorber parte de la energía de radiación cuando son expuestos a esta.

Las variaciones de atenuación o absorción son detectadas y registradas en una película radiográfica o pantalla fluorescente obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza o componente a examinar con cualquier tipo de discontinuidad, tal como se observa en las figuras: 6 y 7 respectivamente.

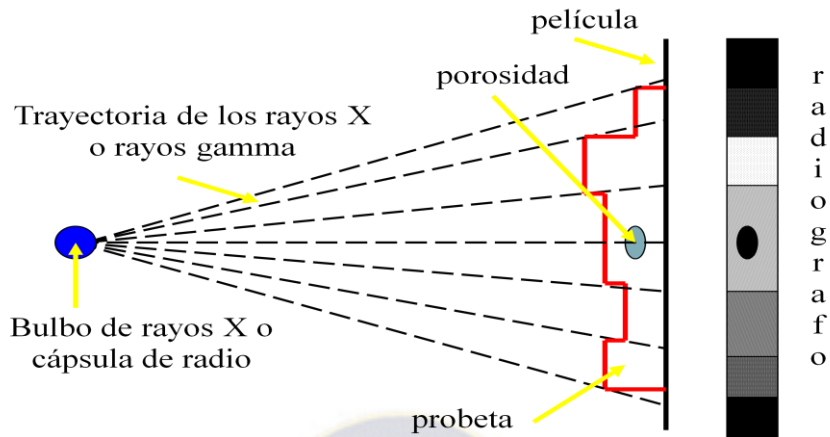


Figura 6: Los rayos X atraviesan un material de estructura no uniforme.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

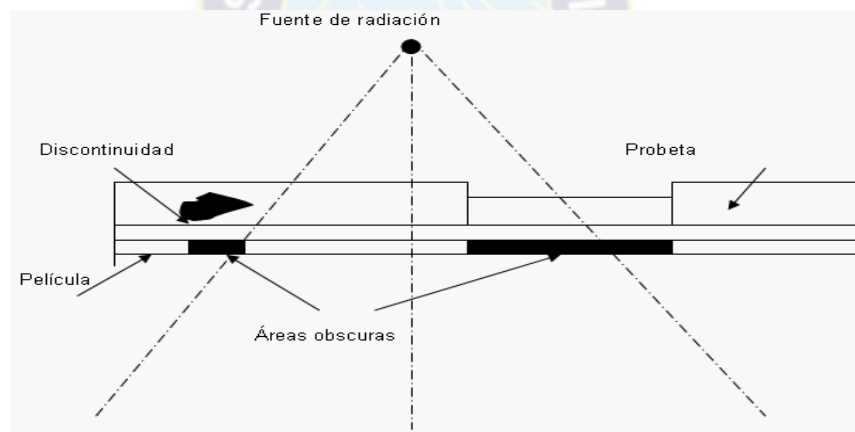


Figura 7: Los rayos X atraviesan un material de estructura no uniforme.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

La atenuación de la radiación ionizante es:

- Directamente proporcional al espesor y densidad del material.
- Inversamente proporcional a la energía del haz de radiación.

Las diferencias de atenuación producen diferencias en la ionización del bromuro de plata de la película radiográfica y esto provocara (al revelar la película) cambios de densidad radiográfica (grado de ennegrecimiento).

Un área oscura (alta densidad) en una radiografía, puede deberse a un menor espesor o a la presencia de un material de menor densidad.

Un área más clara (menor densidad) en una radiografía, puede deberse a secciones de mayor espesor o un material de mayor densidad.

5.5.2. Aplicaciones del método de rayos x

- Permite la detección, interpretación y evaluación de discontinuidades internas tales como grietas, porosidades, inclusiones metálicas o no metálicas, faltas de fusión en uniones con soldadura en los diversos componentes de los subsistemas y sistemas de una aeronave.

5.5.3. Ventajas del método de rayos x

- Puede aplicarse en metales, aleaciones, superaleaciones.
- Proporciona un registro permanente de la condición interna de un material.
- Facilidad de identificar el tipo de discontinuidad que se detecta.
- Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble.

5.5.4. Limitaciones del método rayos x

- Es difícil de aplicar en componentes de geometría compleja o zonas poco accesibles.
- Un componente a tratarse debe tener acceso en sus dos lados opuestos.
- No detecta discontinuidades de tipo laminar.
- Se debe emplear medidas de seguridad para la protección contra la radiación.

5.5.5. Evaluación de calidad de imagen

Antes de interpretar y evaluar las películas radiográficas, deben estar libres de daños mecánicos, químicos u otras manchas como ser el velado, rajaduras, manchas de agua, manchas de los químicos, rasguños, marcas dactilares, polvos, marcas de corriente estática,

indicaciones falsas debido a pantallas defectuosas, etc., que al extenderse no enmascaren o puedan ser confundidas con imágenes de discontinuidades detectadas en el área de interés.

5.5.6. Tiempo de exposición de rayos x

El tiempo de exposición para radiaciones con rayos x es de 2 minutos y se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- Cantidad de Kilo volt y la intensidad de los mili Amper para la exposición.
- Distancia focal
- Espesor
- Tipo de material
- La distancia considerada es de 70 cm. y para otra distancia se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{T}{D^2} = \frac{T_1}{D_1^2}$$

Donde:

T = Tiempo de exposición en minutos a una distancia de 70 cm.

T₁ = Tiempo de exposición en minutos con distancia diferente de 70 cm

D = Distancia de la fuente al film es de 70 cm.

D₁ = Distancia de la fuente al film diferente a 70 cm.

VI. PROPUESTA DE PROYECTO: INSPECCIÓN VISUAL, ULTRASONIDO Y RAYOS X DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

6.1. TIPOS DE INSPECCIÓN

En la inspección de la zona caliente de un motor de reacción conocido como HSI (Hot Section Inspection, por su sigla en Ingles) se aplican los métodos de END de manera secuencial en dos tubos de llama de una cámara de combustión del motor: JT8D y son los siguientes:

- *Inspección visual directa e indirecta (remota).*
- *Inspección volumétrica (ultrasonido y rayos x).*

Las características del motor: JT8D de Pratt and Whitney (ver figuras: 8, 9 y 10) son:

- **Tipo:** Turbofan.
- **Tipo de cámara de combustión:** mixto
- **Numero de tubos de llama:** 9
- **Longitud de cámara de combustión:** (120.0 pulgadas = 3048.0 mm) y (154.1 pulgadas = 3914.0 mm)
- **Diámetro de cámara de combustión:** 49.2 pulgadas = 1250.0 mm
- **Compresor:** Flujo axial de 13 etapas: De 6 etapas de compresor de Baja Presión (LPC) incluye las dos primeras del ventilador, 4 etapas del compresor, y 7 etapas del compresor de Alta Presión (HPC)
- **Turbina:** Tiene 4 etapas: 3 etapa de alta presión y 1 de baja presión.
- **Relación de compresión:** 16:1
- **Empuje aproximado:** 18000 a 21000 lb.
- **1° Tubo de llama:** No existe discontinuidad por servicio.
- **Condición de falla del 1° Tubo de llama:** No existe fisuras.
- **2° Tubo de llama:** Existe discontinuidad por servicio.
- **Condición de falla del 2° Tubo de llama:** Existe fisura.
- **Según el Manual de Servicio y Mantenimiento del motor JT8D se permiten fisuras con una longitud no mayor a 2 pulgadas en la superficie de los tubos de llama.**
- **Asimismo en la superficie de un tubo de llama se permiten abolladuras cuando no exceden 0.015 pulgadas de profundidad y la superficie que este afectada no sea mayor a 4 pulgadas².**

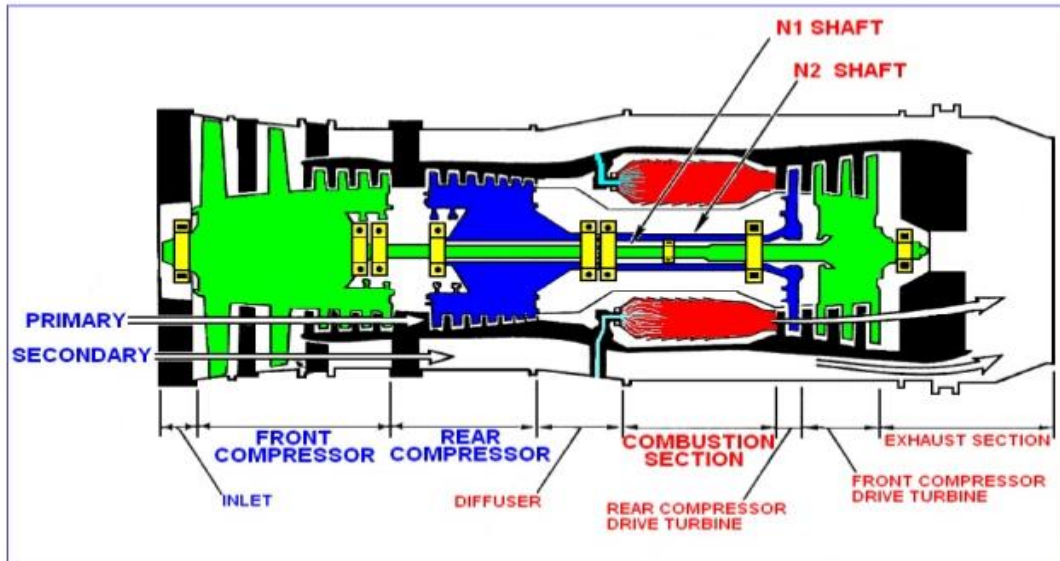


Figura 8: Características del motor JT8D. (Fuente: Manual de Servicio JT8D)

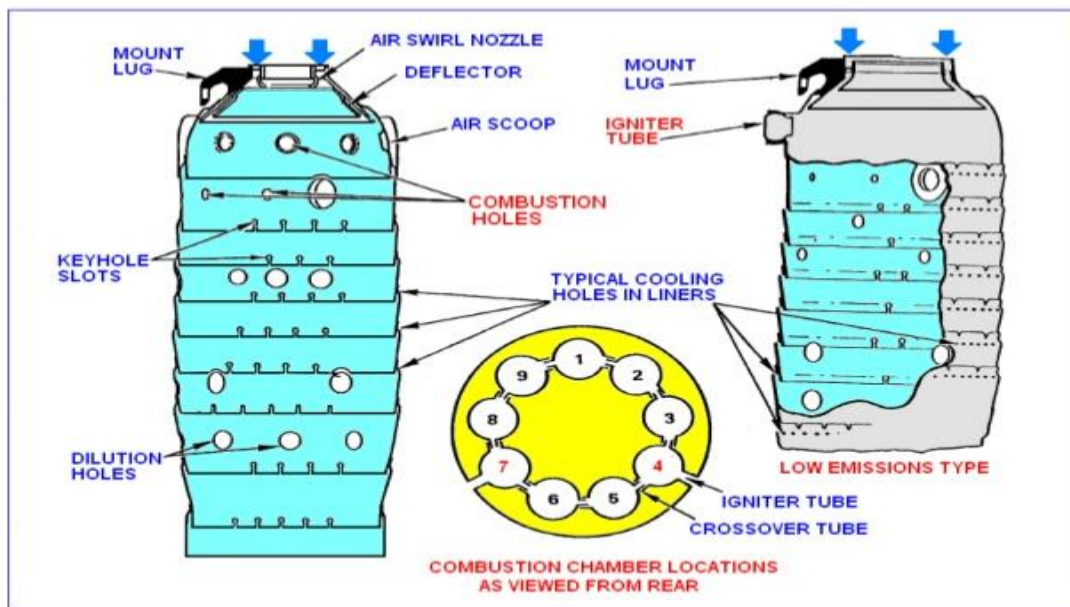


Figura 9: Tubo de llama de la cámara de combustión.
(Fuente: Manual de Servicio JT8D)

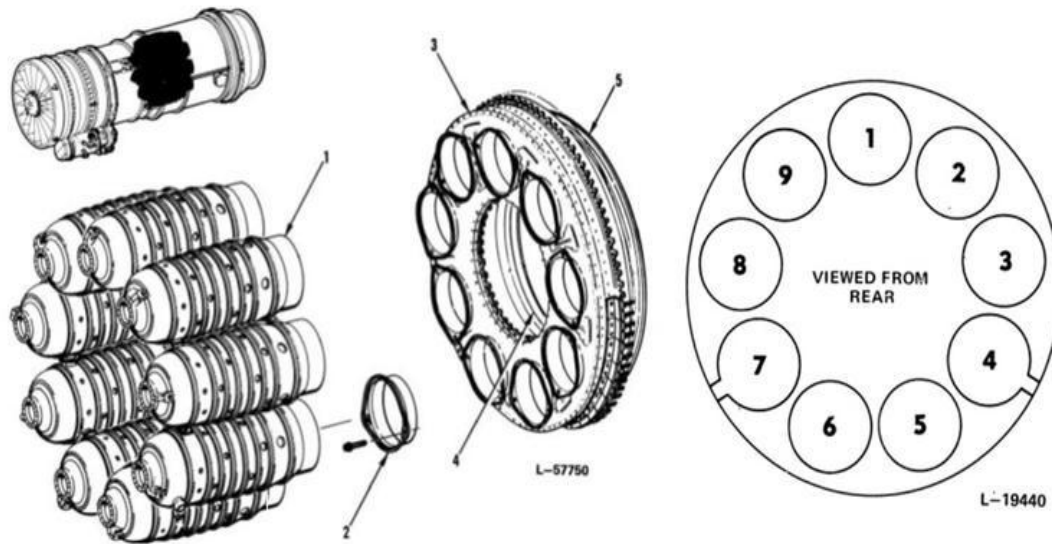


Figura 10: Cámara de combustión del motor JT8D (Fuente: Manual de Servicio JT8D).

6.2. INSPECCIÓN VISUAL DE LOS TUBOS DE LLAMA

La Inspección visual es el primer paso de los END para determinar las discontinuidades por servicio en un tubo de llama y detectar las fallas debido a la *fatiga térmica*.

A su vez la inspección visual se subdivide en :

- **Inspección visual directa**
- **Inspección visual indirecta o remota.**

6.2.1. Procedimiento de la inspección visual directa

Se consideran los siguientes pasos:

- **La inspección visual directa estará bajo la responsabilidad del inspector que posee la certificación del nivel III de la Norma Internacional ISO 9712:2001: END.**
- **La norma de operación de END a emplear es: UNE - EN 13018:2001 de inspección visual.**

- Se coloca el tubo de llama en posición horizontal sobre una mesa de trabajo.
- El equipo o accesorio a utilizar es una lámpara fluorescente portátil o fija.
- El inspector dispone de un cuadro del tubo de llama para revisar y estar familiarizado con los detalles del componente a inspeccionar.
- El inspector examina visualmente el área de interés del tubo de llama para detectar discontinuidades superficiales y las superficies adyacentes al área de interés.
- El inspector tiene conocimiento de la función de los tubos de llama y sirve de ayuda para determinar el tipo de discontinuidad a detectar.
- Se prepara el área de interés de la superficie a inspeccionar y las zonas adyacentes del tubo de llama y deben estar secas, libres de grasa, aceite, polvo, óxidos, pintura y material extraño que pueda interferir con la inspección.
- Cuando se requiere de limpieza, se puede emplear los agentes de limpieza comunes como son: detergentes, solventes orgánicos, removedores de pintura o desengrasantes siempre y cuando sean fácilmente lavables antes de iniciar la inspección.
- La inspección visual directa consiste en colocar el ojo humano a una distancia de 60 cm de la superficie del tubo de llama a inspeccionar y a un ángulo no menor de 30° de la superficie que será examinada.
- La discontinuidad que se detectara en la superficie inspeccionada del tubo de llama serán del tipo de fisuras debido a la *Fatiga Térmica*.
- Se emplea la iluminación natural o luz blanca suplementaria en la superficie a inspeccionar.
- En la inspección visual directa del 1° tubo de llama sin ningún tipo de discontinuidad externa por servicio se observa un color plomizo oscuro uniforme en toda la pieza.
- En la inspección visual del 2° tubo de llama con presencia de una discontinuidad se observa un color rojizo azulado, en especial en la superficie donde se produjo el *Shock Térmico* debido a un cambio brusco de temperaturas.

- A pesar de los diversos métodos complejos de inspección disponibles todavía es importante la ayuda de la inspección visual directa ya que se puede detectar visualmente otros defectos tales como grietas superficiales, porosidades, etc.
- La inspección visual se aplica ampliamente en todos los componentes del sistema y subsistemas de un motor de reacción como una forma simple, rápida, relevante y barata de vigilar la condición, y a menudo juega un papel importante en el mantenimiento basado en la condición aceptable.
- Las figuras: 11 y 12, muestran ejemplos de la inspección visual directa de otros tipos de tubos de llama.

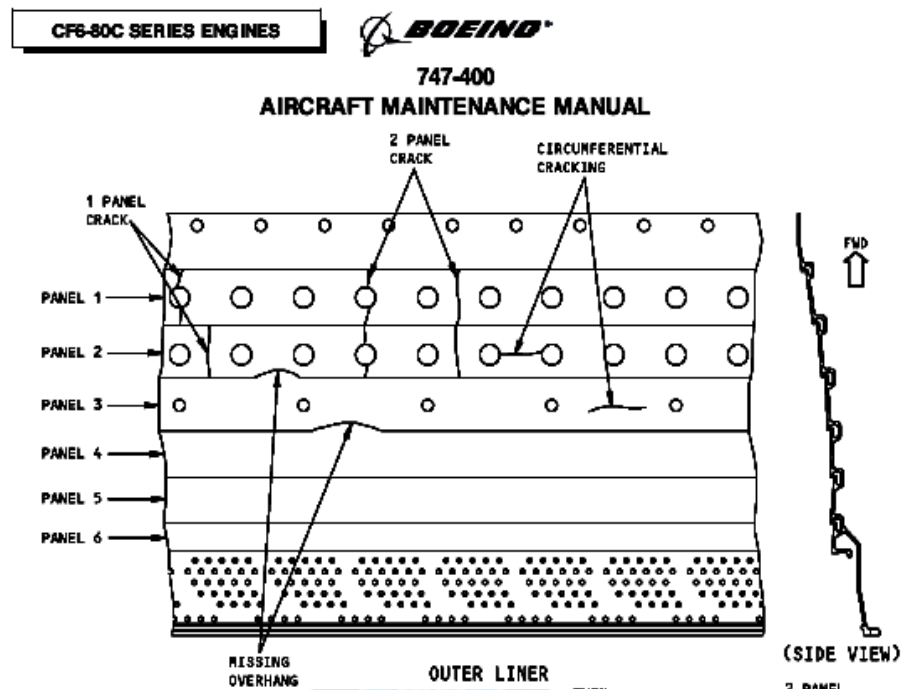


Figura 11: Grietas en la pared de un tubo de llama debido a la fatiga térmica de una Cámara de combustión del motor del Boeing 747- 400.
(Fuente: Manual de Mantenimiento Boeing 747- 400)

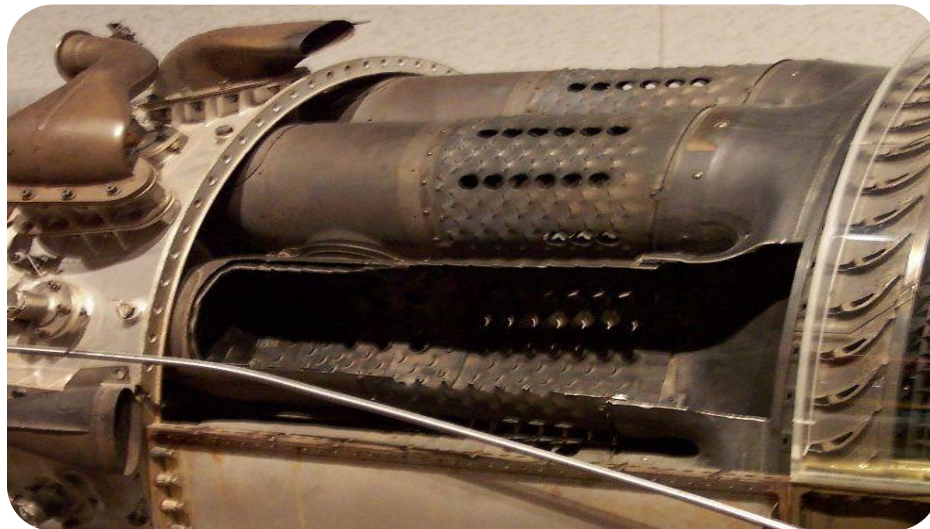


Figura 12: Inspección visual directa de un tubo de llama donde se observa las Tonalidades de colores en la superficie inspeccionada.

(Fuente: Manual de Mantenimiento de JT8D)

6.2.2. Procedimiento de la inspección visual indirecta o remota

El Procedimiento de la inspección visual remota consiste en el empleo de un instrumento auxiliar conocido como el *boroscopio* y se emplea cuando no es suficiente el procedimiento de la inspección visual directa.

En el procedimiento de la inspección visual remota se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Se aplica el instrumento llamado boroscopio en los orificios permitidos (según el Manual de Mantenimiento del motor JT8D, ATA 72 – 00 - 41, ATA 72 – 00 - 02) de la cámara de combustión para detectar irregularidades sutiles en los tubos de llama y así asegurar la integridad estructural de la cámara de combustión.**
- **El boroscopio cuenta con instrumentos propios que poseen dirección de visión variable, fija y mini - sondas de pequeño diámetro, de construcción**

completamente metálica y con un largo tubo triple de inserción que puede resistir a los entornos más difíciles.

- Se emplea el boroscopio rígido de marca Swing Prism, (ver figura 13) que puede realizar la función de dos o tres boroscopios convencionales separados, además este boroscopio incluye un prisma giratorio, escaneo rotativo y mini – rígidos.
- La dirección de visión del boroscopio rígido es ajustable desde 55° hasta 115° y examina la longitud entera de los tubos de llama inspeccionados.
- La opción de zoom integrado opcional y de alta precisión óptica aumenta la imagen entera, diferente de los zoom convencionales que estrechan solamente el campo de visión, además, el cilindro rotatorio permite una visión de 360° sin tener que mover el cuerpo del boroscopio.

CARACTERÍSTICAS DE LOS BOROSCOPIOS RÍGIDOS	APLICACIONES DE LOS BOROSCOPIOS RÍGIDOS
Dirección de visión ajustable desde 55° hasta 115°	Aviación Comercial
Escaneo rotatorio de 360°	Turbina de motor de reacción
Es de construcción metálica, o de construcción con tubo triple para mayor durabilidad.	Cámara de combustión, otros.
Emplea fibra luminosa Wraparound para un uso más eficiente de la iluminación.	
Pieza DIN estándar de 32 mm para adaptador.	

Tabla 10: Características del boroscopio rígido. (Fuente: Manual del equipo)

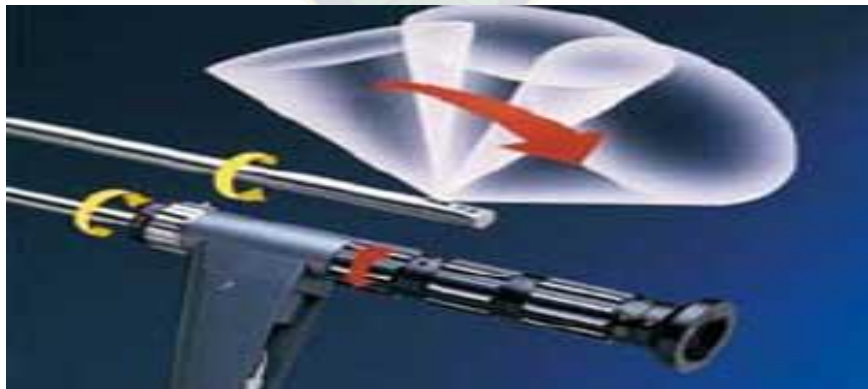


Figura 13: Boroscopio rígido. (Fuente: Manual del equipo)

6.2.3. Indicaciones de la inspección visual remota

- Se registran todas las condiciones siguientes en el Formulario de Registros y Reportes que incluye la descripción detallada del tubo de llama como ser: la localización, tamaño y extensión de la condición o falla detectada y las indicaciones de las fisuras.
- Si en la inspección se emplea un video en vez del boroscopio como medio de registro de la condición, en la imagen debe aparecer una referencia dimensional que muestre la proporción real de la condición, para lo cual puede emplearse una regla, escala, calibrador vernier, etc.

6.2.4. Formulario de Registros y Reportes de la inspección visual remota

- Los resultados de los dos tipos de inspección visual: *directa o indirecta (remota)* realizados en los dos tubos de llama, son registrados en el Formulario de Registro y Reportes por el inspector nivel III, a este Formulario se anexará la documentación, información, y el dibujo del 2º tubo de llama que permitirá el seguimiento de la zona inspeccionada. (Ver figura 14).

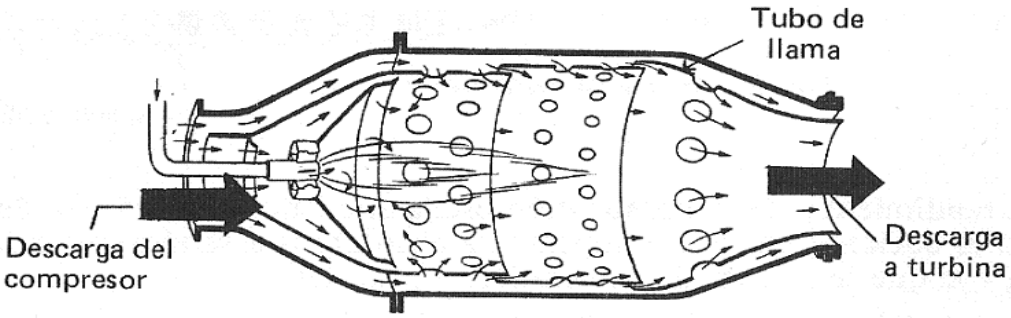
INSPECCIÓN VISUAL: FORMULARIO DE REGISTRO Y REPORTES		
		
NOMBRE DE LA PIEZA	2º tubo de llama.	<ul style="list-style-type: none"> - Defecto: Se produjo el Creep Térmico debido al cambio brusco de altas temperaturas. - Las altas temperaturas originan fallas a nivel microscópico en los límites o contornos de los granos del material. - Se emplea el: ATA 72 – 00 - 02. ATA 72 – 51 - 22
PESO DE LA PIEZA	7 kg.	
MATERIAL	Superalación: Ni - Cr	
POSICIÓN DEL DEFECTO	Centro de la superficie tubular.	
PROCESO DE DETECCIÓN	Después del servicio.	
METODO DE INSPECCIÓN APLICADO	Inspección Visual: Directa e Indirecta.	
NORMA DE OPERACIÓN	UNE - EN 13018:2001	
OPERADOR:	NIVEL III.	

Figura 14: Formulario de Registro y Reportes de la Inspección Visual Directa e Indirecta. (Fuente Propia)

6.3. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA DE LOS TUBOS DE LLAMA

El proceso de inspección por ultrasonido, consta de las siguientes etapas o fases:

- Preparación de los tubos de llama para la inspección.
- Ajuste y calibración del equipo de ultrasonido.
- Inspección de los tubos de llama.
- Interpretación y Evaluación de las Indicaciones.
- Registro de la inspección ultrasónica.



Figura 15: Diagrama de desarrollo del proceso de inspección ultrasónica.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

6.3.1. Preparación del tubo de llama para la inspección

Se realiza una secuencia de pasos para la preparación del componente que consiste en:

- *Limpieza de la superficie del tubo de llama a inspeccionar*
- *Un examen visual del tubo de llama.*

6.3.1.1. Limpieza de la superficie del tubo de llama para la inspección

- La superficie del tubo de llama a inspeccionar debe ser lo más uniforme posible, ya que por esta se desplazara el palpador y permitirá además un buen acoplamiento entre la superficie y el palpador.
- Por tanto se realiza la limpieza de la superficie comprobando que se encuentra libre de materiales extraños o cualquier sustancia que pueda dificultar el movimiento del palpador y su acoplamiento en la superficie por ello se emplea un trapo seco con un disolvente suave.

6.3.1.2. Examen visual

- Se realiza el examen visual al tubo de llama previo a la inspección ultrasónica, en si para detectar irregularidades superficiales, marcas u otros que puedan afectar a la inspección.
- En caso de detectar alguna irregularidad se tomara en cuenta como parte del registro de datos.

6.3.2. Ajuste y calibración del equipo de ultrasonido

- Se realiza el ajuste y calibración del equipo de ultrasonido empleado en la inspección de la superficie del tubo de llama con discontinuidad y constituye la única vía para mantener precisión y repetitividad en los resultados de la inspección.
- Los resultados de la calibración se representan ocasionalmente como un factor de calibración o como una serie de factores de calibración, en la forma de una curva de calibración.
- El bloque de calibración a emplear debe tener las mismas propiedades físicas, químicas y de estructura que el material a inspeccionar.
- Por medio del bloque de calibración se verifica:
 - **Que el sistema compuesto por el transductor, cable coaxial y el equipo funciona correctamente.**

- **Fijar la ganancia o la sensibilidad con la cual se detectará las discontinuidades equivalentes a un tamaño especificado o mayores.**
- En la figura 16, se observan las características del bloque de calibración:

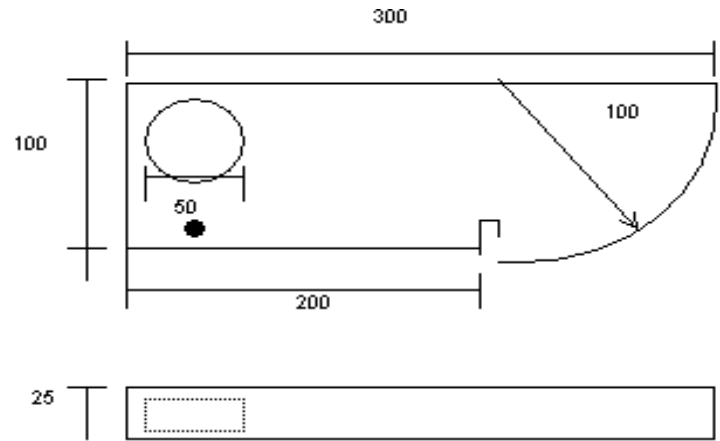


Figura 16: Bloque de calibración empleado con discontinuidad artificial.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

6.3.2.1. Procedimiento de calibración con un palpador normal

En la calibración con un palpador normal se realiza los dos siguientes procedimientos:

PRIMER PROCEDIMIENTO:

- Se calibra el osciloscopio con un BLOCK DE CALIBRACIÓN normalizado y las magnitudes de dicho block son: **Altura = 4 Pulgadas, Espesor = 1 Pulgada, Radio = 4 Pulgadas.**

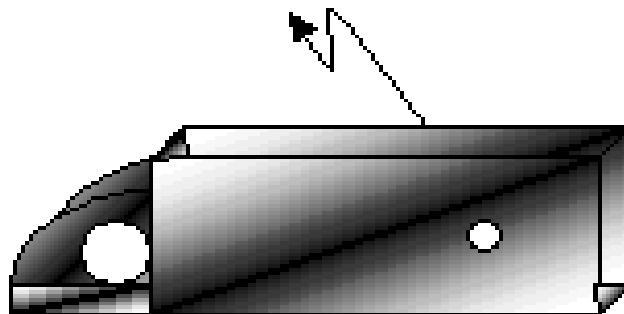


Figura 17: Bloque o block de calibración. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

- Para poder realizar la calibración se coloca un líquido acoplante (aceite) sobre la superficie del block para eliminar el aire entre el palpador y el material.

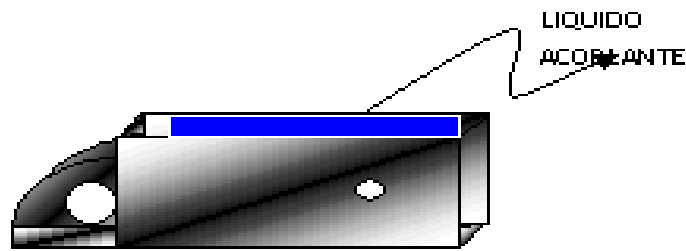
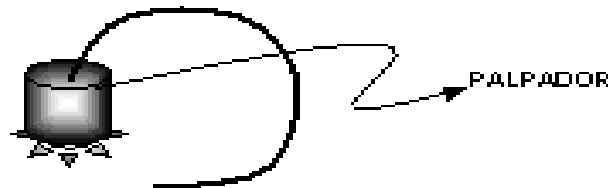


Figura 18: Líquido acoplante empleado en la superficie del bloque de calibración.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

- Posteriormente se coloca el palpador normal, el cual estaba conectado al osciloscopio, sobre el block para que se inicie la emisión de ondas ultrasónicas (>20000Hz).
- Los datos técnicos del palpador normal se muestran en la figura 19:



- 4 MH
- 24 mm de diámetro PALPADOR
- B (Bario)
- N (Normal)

Figura 19: Palpador normal que se emplea para la calibración.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

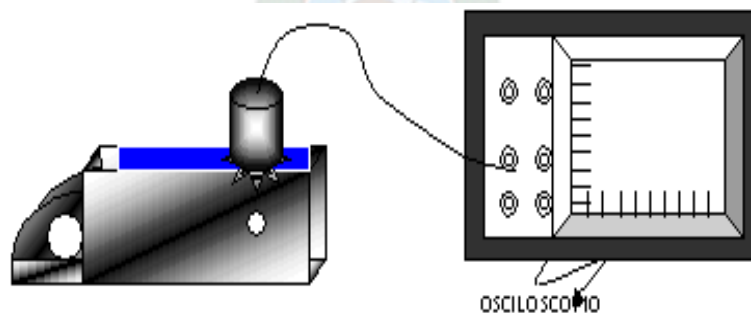


Figura 20: Procedimiento de calibración. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

- Ya en el osciloscopio se ajustan las ondas como son: una onda de entrada y dos de fondo, según las normas de calibración, como se observa en la figura 21:

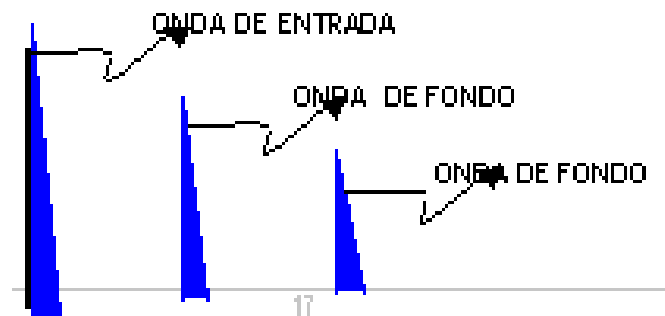


Figura 21: El monitor muestra una onda de entrada y dos de fondo.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

- Una vez ajustado la imagen en la pantalla del osciloscopio, se puede confirmar que el equipo ya está calibrado y listo para realizar las primeras pruebas a otros materiales.

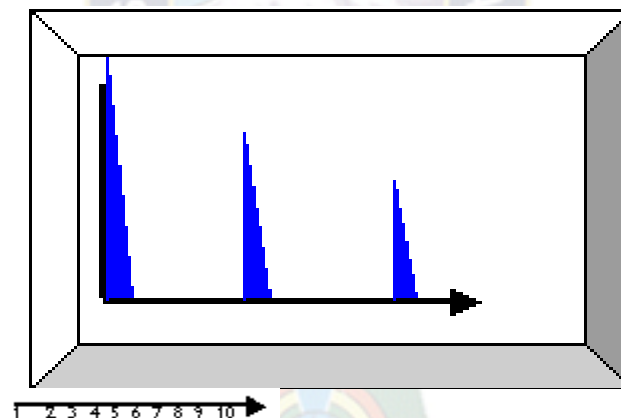


Figura 22: Ajuste de la pantalla del osciloscopio debido a la calibración.
(Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

- En la figura 22 se muestra una separación entre cada onda de 4 líneas, esto representa la altura del block patrón que es de 4 pulgadas. Esta relación indica que la magnitud de cada línea es de: 1 pulgada y es la que nos servirá de referencia para las pruebas posteriores.

SEGUNDO PROCEDIMIENTO:

- Se realiza la prueba con otro material que tiene 5 pulgadas de altura.

- Se vuelven a realizar los pasos que anteriormente se mencionaron y se ejemplificaron, es decir, se colocó líquido acoplante sobre la superficie del nuevo material para posteriormente colocar el palpador normal que está conectado al osciloscopio; tal como se muestra en la figura 23:

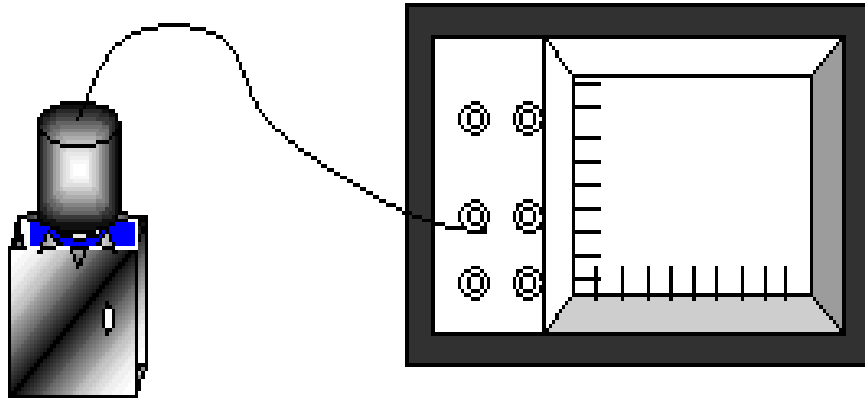


Figura 23: Calibración sobre otro material. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END)

- Para detectar ondas secundarias en el osciloscopio fue necesario deslizar el palpador normal sobre toda la superficie, ya que la aparición de ondas secundarias indica el lugar donde se encuentran las discontinuidades.
- Estas ondas secundarias son diferentes a las normalizadas para calibrar, es decir, a las anteriores: la de entrada y las dos de fondo.
- En la figura 24 se tiene la imagen que resultado de esta prueba y es la siguiente:

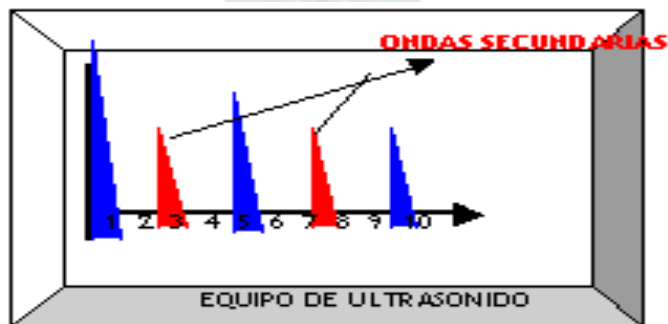


Figura 24: El osciloscopio muestra las ondas secundarias empleando un block de calibración de 5 pulgadas de altura con un palpador normal. (Fuente: Apuntes Curso Intensivo END).

- En la figura 24, las ondas secundarias muestran la distancia exacta a la que se encuentra la discontinuidad, es decir, cada onda secundaria está a dos líneas de separación respecto de las ondas normalizadas y calibradas, los que interpretados de otra manera nos muestra que la perforación se encuentra 2 pulgadas debajo de donde está el palpador normal, esto es porque en la calibración se especificó que cada línea es equivalente a 1 pulgada.
- Con la información obtenida se procede a realizar los cálculos técnicos como ser:
 - **La Longitud de onda:** (λ).
 - **$\alpha = \text{Velocidad de propagación} / \text{frecuencia} = C/f$**
 - **$C = 5900 \text{ m/s}$ para el acero “material utilizado”**
 - **$f = 4 \text{ MHz} = 4000000 \text{ Hz}$.**
 - **Cálculo de la Longitud de onda, será:**
 - **$\lambda = 5900 \text{ m/s} / 4000000 \text{ Hz} = 0.001475 \text{ m} = 1.475 \text{ mm}$.**
 - **Calculo del Defecto Mínimo:**
 - **Defecto mín. = $\lambda / 2$, Defecto mínimo = $1.475\text{mm} / 2 = 0.7375 \text{ mm}$**
 - **Cálculo del Campo Cercano (N): Es la distancia en la que la propagación de la onda no es interrumpida:**
 - **Campo Cercano:(N) = $D \times 2 / 4 (\lambda)$; D2 = Diámetro del Palpador,**
 - **Luego: $N = (24\text{mm})^2 / (4 \times 1.475\text{mm}) = 97.672 \text{ mm}$.**
- Este resultado indica que si el defecto se encuentra dentro de este límite, el valor de la magnitud que se supone se encuentra la falla es aceptable, si no, se verifica por el lado del material.

6.3.3. Inspección de los tubos de llama

- En esta parte se define y se desarrolla la secuencia de actividades necesarias para llevar a cabo la inspección ultrasónica en la superficie de los tubos de llama.

6.3.3.1. Equipos y materiales

- Se utiliza el mismo equipo de ultrasonido (aparato y palpador, incluido cable coaxial) y agente acoplante que los utilizados en el proceso previo de ajuste.

- La inspección por ultrasonido en los dos tubos de llama, se realiza en el laboratorio de materiales que cuenta con un equipo moderno de ultrasonido, como es el modelo μ Tomoscan de hasta 8 canales, para su conexión a sondas para el control no - superficial de defectos, son Sondas Phased Array UT.
- Las características del equipo se observan en las figuras: 25, 26, 27, 28, 29, respectivamente.



Figura 25: Equipo portátil de ultrasonido, modelo: U-Tomoscan.

(Fuente: Manual del equipo)

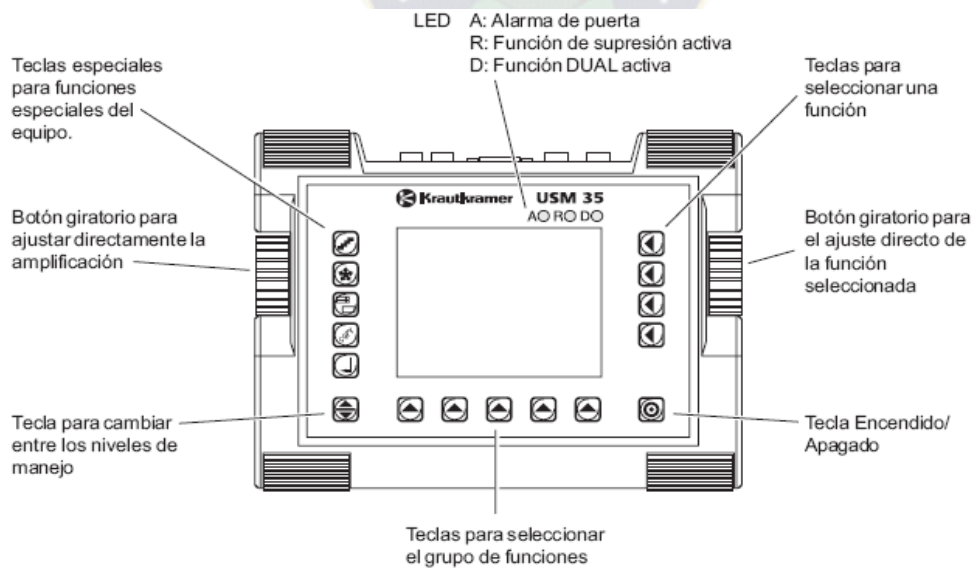


Figura 26: Características de los elementos de manejo del equipo de ultrasonido.

(Fuente: Manual del equipo).










Tecla	Función
	Conectar o desconectar el aparato
	Elegir pasos en dB para la amplificación.
	Activar o desactivar guardado de imagen (congelar)
	Presentación de eco ampliada a pantalla completa
	Transmitir o imprimir datos
	Registrar valores medidos, guardar datos
	Cambiar entre los niveles de manejo
	Seleccionar grupo de funciones
	Seleccionar/ajustar función

Figura 27: Funciones de las teclas de los elementos del equipo de ultrasonido.
(Fuente: Manual del equipo)

Primer nivel de manejo

BAS	1	EMIS	RECP	aPTA	bPTA
------------	---	------	------	------	------

Segundo nivel de manejo

CAL	2	REF	TRIG	MEM	DAT
------------	---	-----	------	-----	-----

Tercer nivel de manejo

MEDI	3	MSEL	LCD	CFG1	CFG2
-------------	---	------	-----	------	------

Figura 28: Manejo de los niveles de los elementos del equipo de ultrasonido.
(Fuente: Manual del equipo)

Primer nivel de manejo

CAMPO 250 _{mm}	AMORTIG bajo	dBFINO > 0	aLOGIC posit	bCOINCI off
VEL-C ≙ 5920%	INTENS bajo	RECHAZO 0%	aINICIO 35.00 _{mm}	bINICIO 85.00 _{mm}
RETARDO ≙ 0.00 _{mm}	DUAL off	FRECUEN 2 - 20	aANCHO 40.00 _{mm}	bANCHO 40.00 _{mm}
RET.PAL 0.000 _{μs}	MODOPRF 10	RECTIF rectcom	aUMBRAL 40%	bUMBRAL 30%
BAS	EMIS	RECP	aPTA	bPTA

Segundo nivel de manejo

S-REF1 ≙50.00 _{mm}	ECO REF off	ANGULO 0.0	NUMREG ≙ 1	INFOCON off
S-REF2 ≙100.0 _{mm}	MODOREF off	VALOR > 0.0 _{mm}	RECUPER off	PREVISU off
aINICIO ≙35.00 _{mm}	aINICIO ≙45.00 _{mm}	ESPESOR 25.0 _{mm}	MEMORIZ off	LISTA off
CAL 0		DIAMETR plano	BORRAR > off	SETTING off
CAL	REF*	TRIG	MEM	DAT

Tercer nivel de manejo

TOF pico	MEAS-P1 R-start	LLENO > off	DIALOG > Español	FECHA > 19 04 04
S-DISP sinpari	MEAS-P2 Sa	ESQUEMA 1	BAUDIOS Español	ANAMOD 0 volts
MAGNIFY off	MEAS-P3 ALTax	LUZ eco	IMPRES Epson	S.ACUST off
A-SCAN standard	MEAS-P4 R-Fin	ESCALA readngs	COPIA datalog	EVAMOD DGS
MEDI	MSEL	LCD	CFG1	CFG2

Figura 29: Manejo de los niveles de los elementos del equipo de ultrasonido.

(Fuente: Manual del equipo)

6.3.3.2. Desarrollo de la Inspección

En esta etapa se consideran los ajustes de la calibración del equipo y el contacto del palpador con la superficie de contacto.

- **Establecimiento de los parámetros del equipo de ultrasonido:** Los parámetros del equipo de ultrasonidos serán los mismos parámetros establecidos durante el ajuste previo. El valor de la ganancia deberá ser corregido con el valor obtenido de la transferencia en el ajuste previo en el caso en que éste sea distinto de cero.
- **Barrido de la pieza y/o superficie del tubo de llama:** Se aplica el agente acoplante de forma uniforme sobre la superficie del tubo de llama a inspeccionar.

- Se realizará un barrido del elemento hasta cubrir toda la superficie del tubo de llama a inspeccionar.
- Para asegurar el barrido total de la superficie a explorar cada paso del palpador deberá solapar al menos el 10% de la anchura del cristal oscilador.
- La velocidad de barrido será tal que garantice la detección de los defectos de tamaño mínimo detectable requeridos por el criterio de aceptación aplicable y en ningún caso deberá exceder de 150 mm/s.

El siguiente diagrama muestra el esquema gráfico del desarrollo de la inspección

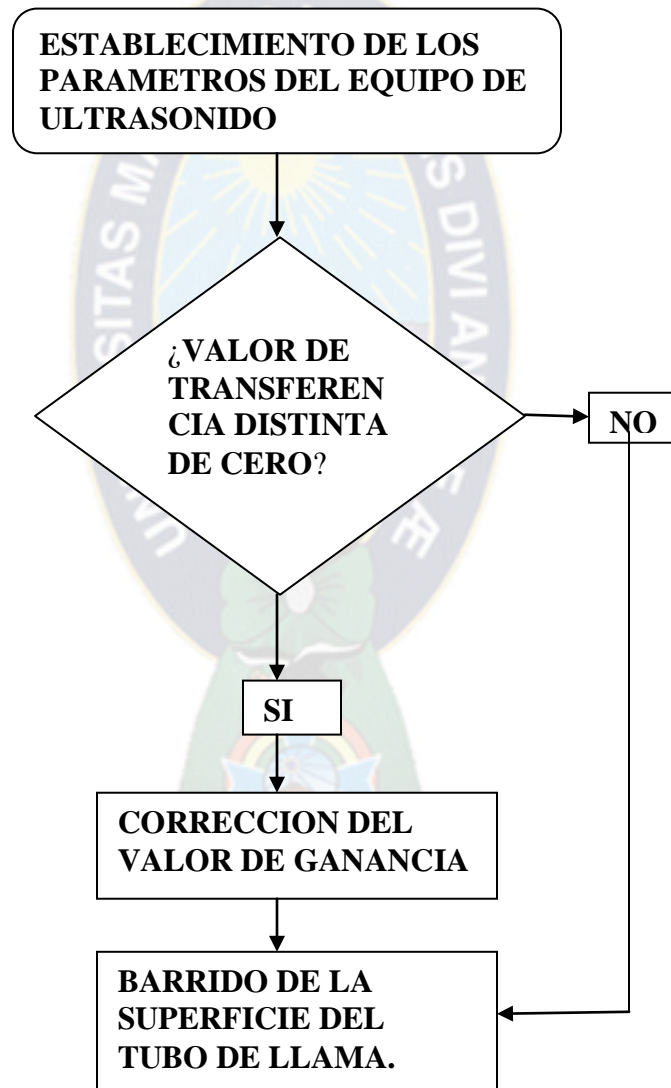


Figura 30: Diagrama del desarrollo de la inspección ultrasónica.

(Fuente: Norma de END: Mercosur)

6.3.3.3. Personal responsable de la inspección ultrasónica

Este procedimiento es realizado por el operador certificado con nivel III en ultrasonido según la norma internacional **ISO 9712: 2001: ASNT, SNT –TC- 1º** (Guía Práctica Recomendada de Personal) siendo el responsable final de su correcto cumplimiento.

6.3.4. Interpretación y evaluación de las indicaciones

- En esta fase se define la secuencia de actividades que son necesarias para llevar a cabo la *Interpretación y Evaluación de las Indicaciones* obtenidas durante el proceso de inspección de los tubos de llama.
- Conforme la onda sonora penetra en el tubo de llama sometido a prueba, parte de ella se refleja de vuelta en el cristal, donde se convierte en un impulso eléctrico, este impulso se amplía y se hace visible y es la *Indicación* o señal que aparece sobre la pantalla del osciloscopio, como se observa en las figuras: 31, 32, 33, 34, 35, respectivamente.
- La imperfección entre las superficies frontal y posterior del tubo de llama, se detecta sobre la pantalla como una tercera señal entre las dos *Indicaciones* correspondientes a las superficies frontal y posterior.
- Como las *Indicaciones* en la pantalla del osciloscopio miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso desde la superficie frontal y posterior, la distancia entre indicaciones es una medida del espesor del material. por tanto la localización de la grieta o fisura se determina con exactitud por la *indicación* que aparece sobre la pantalla.



Figura 31: En el monitor se observa la distorsión de las ondas debido a la discontinuidad en la superficie examinada del 2º tubo de llama. (Fuente Propia)



Figura 32: En el monitor se observa la distorsión de las ondas debido a la discontinuidad en la superficie del 2º tubo de llama. (Fuente Propia)



Figura 33: En el monitor se observa la señal de la superficie del 1° tubo de llama donde no existe distorsión entre los ecos reflejados. (Fuente Propia)



Figura 34: Inspección del 1° tubo de llama sin discontinuidad con un equipo de ultrasonido adicional. (Fuente Propia)



Figura 35: Inspección del 2º tubo de llama con discontinuidad con un equipo de ultrasonido adicional. (Fuente Propia)

6.3.4.1. Definiciones de tipos de indicaciones

- **Indicación identificable:** Aquélla en la que la inspección ultrasónica proporciona información suficiente para su caracterización.
- **Indicación no identificable:** Aquélla en la que la inspección por ultrasonido no proporciona información suficiente para su caracterización.

6.3.4.2. Desarrollo de las indicaciones

- **Detección de indicación:** Si durante la inspección del componente se observa una indicación, se comprobará que ésta no es debida a variaciones en la configuración geométrica o a irregularidades superficiales (indicación irrelevante).
- **Caracterización de la indicación:** En el caso de que la indicación sea relevante se comprueba que el método de ultrasonido proporciona suficiente información para su

caracterización (indicación identificable). Si no es posible su caracterización, la indicación será no identificable.

6.3.4.3. Evaluación de las dimensiones de las indicaciones

Se comprobarán las dimensiones de la indicación considerando el criterio de aceptación aplicable como se muestra en la tabla 14. La indicación será reportable en los siguientes casos:

- **Indicación identificable:** Las indicaciones identificables serán reportables cuando excedan de las dimensiones y/o distribución del correspondiente criterio de aceptación aplicable.
- **Indicación no identificable:** Las indicaciones no identificables serán reportables cuando además de exceder de las dimensiones y/o distribución del correspondiente criterio de aceptación aplicable presenten alguna de las siguientes condiciones:
 - El eco de fondo sufra una caída superior a 18 dB al compararse con las zonas similares adyacentes.
 - Aparezca un eco intermedio que sea superior en amplitud al nivel correspondiente del eco de fondo establecido durante el ajuste, después de restarle 9 dB.

6.3.4.4. Criterio de aceptación de Indicaciones

A continuación se indica el criterio de aceptación aplicable a *Indicaciones Relevantes*, y las dimensiones vienen dadas en (mm) y las áreas en (mm²):

AREA MÁXIMA DE INDICACIÓN RELEVANTE (A)	500 mm ²
LONGITUD MÁXIMA DE INDICACIÓN RELEVANTE (L)	39 mm
DISTANCIA MÍNIMA ENTRE INDICACIONES RELEVANTES (D)	*
AREA MÁXIMA DE INDICACIONES RELEVANTES CONTENIDA EN UN CÍRCULO DE 200 MM. DE DIAMETRO.	< 5 %
DIMENSIÓN MÍNIMA REGISTRABLE	(**)
<p>(*): La distancia mínima entre <i>Indicaciones Relevantes</i> dependerá de la Longitud de la <i>Indicación Relevante</i> mayor:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si $2,5 \times L < 50$ (mm), entonces $D = 50$ (mm). • Si $2,5 \times L > 50$ (mm), entonces $D = 2,5 \times L$ (mm). <p>(**): Indicaciones cuya dimensión mayor sea inferior a 6 (mm) serán consideradas como no significantes y no se requerirá que sean registrables.</p>	

Tabla 11: Criterio de aceptación de *indicaciones relevantes*. (Fuente Propia)



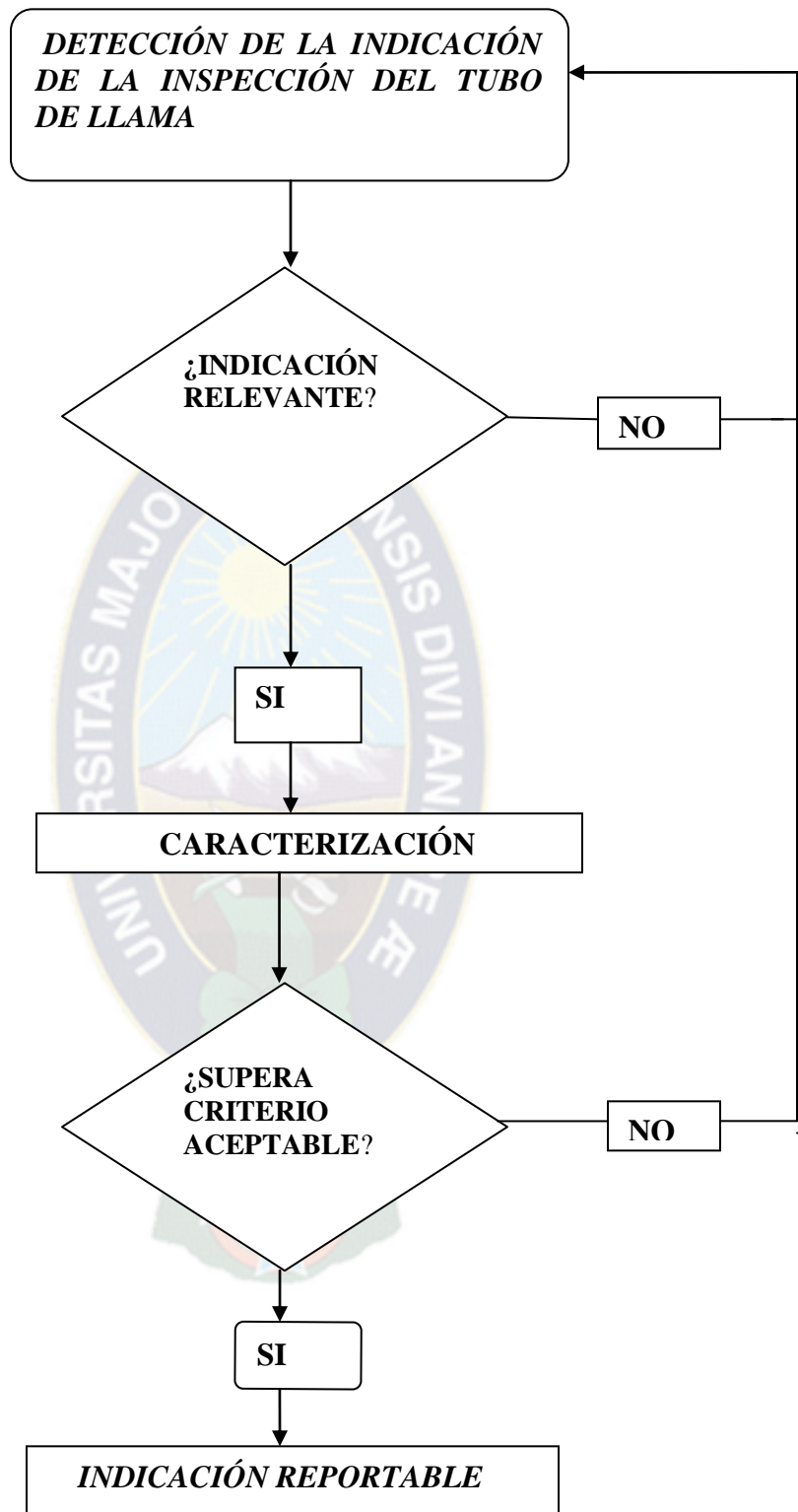


Figura 36: Procedimiento de la *indicación* en la inspección del tubo de llama.
 (Fuente: Norma de END: Mercosur)



Figura 37: Pasos para la *evaluación* de una *indicación* en la inspección ultrasónica.

(Fuente: Norma de END: Mercosur)

6.3.5. Registro de la inspección ultrasónica

En esta etapa se define y desarrolla la secuencia de actividades necesarias para llevar a cabo el registro de las indicaciones obtenidas en la inspección de los tubos de llama.

6.3.5.1. Desarrollo del procedimiento de la inspección por ultrasonido

➤ **Marcado de la pieza:**

Las *indicaciones* que tras la aplicación del correspondiente *procedimiento de interpretación y evaluación* sean consideradas reportables son marcadas sobre la superficie inspeccionada del tubo de llama.

El marcado de la superficie se realiza con un marcador indeleble para facilitar su localización.

➤ **Elaboración del informe de la inspección:**

Una vez concluida la inspección de la superficie del 2º tubo de llama, se elabora el correspondiente informe con los resultados obtenidos (ver tabla 12 y 13) y es elaborado por el operador nivel III que ha aplicado el procedimiento de inspección.

El informe deberá contener como mínimo los siguientes datos:

- Fecha de la inspección.
- Identidad del operador Nivel III que realizó la inspección.
- Identificación de la pieza (tubo de llama).
- Resultado de la inspección:
 - Se registran todas las **Indicaciones** consideradas como reportables después de evaluarlas.
 - Se recogen todos los datos obtenidos que permitan la caracterización y posicionamiento de las **Indicaciones**:
 - Datos de la señal ultrasónica obtenida (distancia y altura de eco)
 - Localización de la **Indicación** en el componente. Se realizará de las siguientes formas:
 - ✓ Sobre un croquis a escala 1:1 del componente completo.
 - ✓ Sobre un croquis general del componente acompañado de un croquis a escala 1:1 de la zona concreta en la que se encuentre la **Indicación**.

6.3.5.2. Archivo del informe de inspección ultrasónica

- Los formularios de las inspecciones se archivan en un archivo base de datos correspondiente durante un periodo mínimo de 10 años desde su elaboración.
- Estos registros se cuidarán para proporcionar evidencia del desarrollo del proceso de inspección por ultrasonido y estarán disponibles para su revisión por el cliente.
- Se emplean los Formularios A y B para el Registro de Datos en la inspección por ultrasonido que se muestran en las tablas: 12A, 12B y 13A, 13B respectivamente:

UMSA - FACULTAD DE TECNOLOGÍA CARRERA AERONÁUTICA		FORMULARIO A: DE REGISTRO DE DATOS DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO		FORMULARIO: A, Nº 1	
DATOS DEL ELEMENTO					
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA		PROYECTO/CLIENTE			
FECHA INSPECCION		TÉCNICA INSPECCIÓN			
LUGAR INSPECCIÓN		MATERIAL			
ESPESOR		PROCESO			
ESTADO SUPERFICIAL		FUNCIÓN			
EQUIPO					
MARCA DEL EQUIPO		MODELO/SERIE		----	
BLOQUE DE CALIBRACIÓN/REFERENCIA					
TIPO		MODELO			
MATERIAL		VELOCIDAD SONICA			
PALPADOR					
MODELO		TIPO		ANGULO	
FRECUENCIA		TAMAÑO		ACOPLANTE	
RECEPCIÓN					
NORMA O CODIGO DE ACEPTACIÓN					
OPERADOR:		NIVEL:		FIRMA:	
SUPERVISOR:		NIVEL:		FIRMA:	
LABORATORIO:		CLIENTE:			
FECHA:		FECHA:			
FIRMA:.....		FIRMA:.....			

Tabla 12A: Formulario A: Hoja de Registro de datos de inspección de ultrasonido.

(Fuente: Norma ASTM- E587, UNE - EN 583).

UMSA - FACULTAD DE TECNOLOGÍA CARRERA AERONÁUTICA		FORMULARIO A: DE REGISTRO DE DATOS DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO			FORMULARIO: A, Nº 1	
DATOS DEL ELEMENTO						
IDENTIFICACION DE LA PIEZA Y/O COMPONENTE		2º Tubo de llama	PROYECTO/CLIENTE		Javier Calderón	
FECHA INSPECCION		28 de Octubre de 2011.	TECNICA INSPECCION		Ultrasonido	
LUGAR INSPECCION		Laboratorio de Materiales	MATERIAL		Aleación níquel	
ESPESOR		2.5 mm	PROCESO		De servicio	
ESTADO SUPERFICIAL		Color Plomizo.	FUNCION		Cámara de Combustión	
EQUIPO						
MARCA DEL EQUIPO		U- Tomoscan	MODELO/SERIE		----	
BLOQUE DE CALIBRACION/REFERENCIA						
TIPO	Block de Calibración		MODELO	Estándar		
MATERIAL	Normalizado, Block de Calibración Artificial.		VELOCIDAD SONICA	5900 m/s		
PALPADOR						
MODELO	Normal	TIPO	De Contacto.	ANGULO	4,18º	
FRECUENCIA	Mayor a 20000 Hertz.	TAMAÑO	24.0 mm, Diámetro	ACOPLANTE	Aceite	
RECEPCION						
NORMA O CODIGO DE ACEPTACION			UNE- EN – 583, ASTM - E587, ASTM - E114.			
OPERADOR:	Ing., Orlando Limachi		NIVEL:	III	FIRMA:	
SUPERVISOR:	Ing. Orlando Limachi		NIVEL:	III	FIRMA:	
LABORATORIO: De Materiales			CLIENTE: Javier Calderón			
FECHA: 28 de octubre de 2011			FECHA: 28 de octubre de 2011			
FIRMA:.....			FIRMA:.....			

Tabla 12B: Formulario A: Hoja de Registro de datos de inspección de ultrasonido.
(Fuente Propia)

MÉTODO DE ULTRASONIDO: FORMULARIO B: CUADRO DE RESULTADOS:														
Indicaciones.	% Altura del eco máximo de la discontinuidad (D)	% Altura de la curva DAC a la misma profundidad (R)	% Altura del eco de fondo en la zona examinada (F)	% Altura del eco de fondo en una zona sana del mismo	$\Delta F = F_o - F$	D/R	$\Delta F / F_o$	Discontinuidad			Tipo de discontinuidad	Evaluación		Observaciones
								Profundidad (mm)	Superficie S anotada Max (mm) ²	Superficie S acumuladas (%)		Aceptable	Rechazable	
% Total superficies S acumuladas														
Comentarios:														

Tabla 13A: Formulario B: Hoja Técnica de resultados de la inspección por ultrasonido. (Fuente: Norma ASTM- E587)

MÉTODO DE ULTRASONIDO: FORMULARIO B: CUADRO DE RESULTADOS:														
Indicaciones.	% Altura del eco máximo de la discontinuidad (D)	% Altura de la curva DAC a la misma profundidad (R)	% Altura del eco de fondo en la zona examinada (F)	% Altura del eco de fondo en una zona sana del mismo espesor (Fo)	$\Delta F = F_o - F$	D/R	$\Delta F / F_o$	Discontinuidad			Tipo de discontinuidad	Evaluación		Observaciones
								Profundidad (mm)	Superficie S anotada Max (mm) ²	Superficie S acumuladas (%)		Aceptable	Rechazable	
1ª T NO	76.92	75.2	76.92	76.92	0	1.02	0	2	300		No existe	X		No existe la fisura, no hay Indicación en el 1º Tubo de Llama.
2ª T SI	76.92	75.2	64.10	76.92	12.9 2	1.02	0.16	2	300		Existe fisura	X		Existe la fisura, si hay Indicación en el 2º Tubo de Llama.
% Total superficies S acumuladas														
<p>Comentarios: El Operador, Nivel III, realizó la inspección de dos tubos de llama de la Cámara de Combustión del motor JT8D para fines didácticos, en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Física de la UMSA..</p> <p>1º Tubo de llama: No posee discontinuidad.</p> <p>2º Tubo de llama: Posee discontinuidad en la superficie en forma de fisura de longitud menor a 2 pulgadas y se encuentra dentro de los límites establecidos según el Manual de Servicio del motor JT8D. (ATA 72 - 51- 22, ATA 72- 00 - 41).</p>														

Tabla 13B: Formulario B: Hoja Técnica de resultados de la inspección por ultrasonido. (Fuente Propia)

6.3.6. Implementación de la norma de operación de ultrasonido

Las normas de operación de ultrasonido que se emplean son las siguientes:

- **ASTM - E587**
- **ASTM - E114**
- **UNE- EN - 583**

6.4. INSPECCIÓN DE LOS TUBOS DE LLAMA POR RAYOS X

La inspección del mediante el método de rayos x, se subdivide en dos técnicas que son:

- *Técnica de Pared Simple y Vista Simple.*
- *Técnica de Pared Doble y Vista Doble.*

En la inspección del 2º tubo de llama se emplea la Técnica de Pared Simple y Vista Simple.

6.4.1. Etapas del proceso radiográfico

Las etapas del proceso radiográfico se aplican secuencialmente de la siguiente manera:

6.4.1.1. Emisión de la energía de radiación en el 2º tubo de llama

- Se coloca una película acoplada a la superficie del 2º tubo de llama tal como se observa en la figura 38, se considera la distancia definida del emisor de radiación a la pieza tratada que es de 70 cm, posteriormente desde el control externo del panel de mando situado a 10 metros de distancia del equipo de rayos x, como se observa en la figura 39 se activa la irradiación de toda la energía del emisor de radiación hasta la pieza inspeccionada y el remanente se queda en la película y se imprime una imagen latente.



Figura 38: Inspección del 2º tubo de llama mediante el equipo de rayos x.
(Fuente Propia)

6.4.1.2. Interacción con el material del 2º tubo de llama

- La distancia del haz de energía a la película es de: $X = 70$ cm.
- Se emplea una película de densidad de: 1.8 a 2.2.
- La temperatura del revelador es de: 18 °C a 20 °C.
- El equipo de radiografía emplea 150 Kilovoltios como máxima energía de radiación.
- La corriente a emplear es de 4 Amperios.

6.4.1.3. Detección de la discontinuidad en el 2º tubo de llama

- En la superficie del 2º tubo de llama con discontinuidad de servicio existen fisuras debido a la *Fatiga Térmica*.



Figura 39: Control externo del panel de mando situado a 10 metros de distancia del Equipo de rayos x. (Fuente Propia)

6.4.1.4 Procesamiento de la película radiográfica del 2º tubo de llama

- 1) Al entrar al cuarto oscuro se encenderá la lámpara de luz ámbar, (figura 40).
- 2) Sacar la película de la porta películas y colocarla en el gancho.
- 3) **Revelado:** Sumergir la película en el revelador durante 5 minutos, con el fin de reducir los halogenuros de plata en la película.
- 4) **Lavado intermedio:** Después del revelado, la película se lavará con agua durante 1 minuto.
- 5) **Fijado:** Se introduce la película en el fijador durante 10 minutos.
- 6) **Lavado final:** La película se lavará en agua para retirar el fijador.
- 7) Finalmente se coloca la película en el negatoscopio para su posterior análisis, (figura 41).
- 8) En la película se tiene zonas de alta energía (zonas oscuras) y las zonas de baja energía (zonas claras).



Figura 40: Revelado de la película del 2º tubo de llama con discontinuidad.

(Fuente Propia)

6.4.1.5. Interpretación de la discontinuidad del 2º tubo de llama

- Las figuras 41 y 42 muestran la fisura en la superficie del 2º tubo de llama debido a la *Fatiga Térmica*.
- Sin embargo este método deja de aplicarse como método de inspección cuando se presenta el siguiente problema:” Cuando el defecto es perpendicular al haz de radiación y por tanto no se detecta el defecto”, entonces como método de complemento se utiliza el método de ultrasonido.



Figura 41: La película radiográfica del 2º tubo de llama se observa en el negatoscopio.

(Fuente Propia)

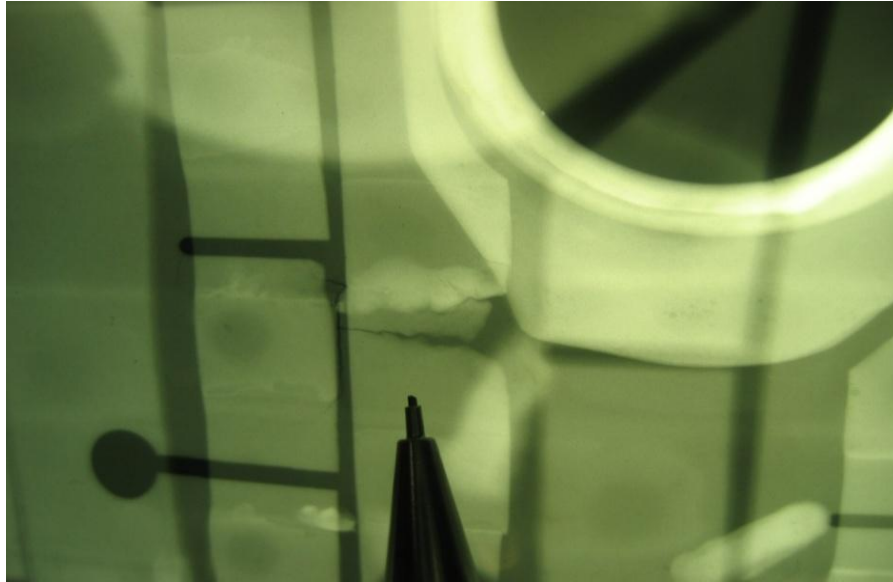


Figura 42: En la película de la superficie del 2º tubo de llama se observa la fisura debida a la *Fatiga Térmica*. (Fuente Propia)

6.4.2. Registro de datos de la inspección radiográfica

Los datos de la inspección de la superficie del 2º tubo de llama con discontinuidad se registran en el Formulario de Registro de Resultados que se muestra en las tablas: 14A, 15B, respectivamente:

FORMULARIO: REGISTRO DE RESULTADOS DE INSPECCIÓN POR EL MÉTODO DE RAYOS X

LABORATORIO RADIOGRÁFICO: DIRECCIÓN..... TELEFONO:.....

CLIENTE: REPÓRTE, No.....: FECHA:

PIEZA / LOCALIZACION:

DATOS DE LA PIEZA: DATOS TÉCNICOS:.....

PENETRAMETRO N°:

PANTALLAS:

ESPESOR DEL METAL BASE:

TIPO DE MATERIAL:..... TIPO DE PELÍCULA:

PROCEDIMIENTO RT:.....

TAMAÑO DE PELICULA: SIMPLE:..... MULTIPLE:

KV.:/ INTENSIDAD DE LA FUENTE: TIPO DE FUENTE:

TAMAÑO DE FOCO:..... FFD: PENUMBRA:

PROCESADO: MANUAL: AUTOMATICO:.....

ESQUEMA DE TIROS:

(MOSTRAR LOCALIZACION DE LA FUENTE /TUBO, DIRECCION DE LA RADIACION, POSICION Y LOCALIZACION DE LAS PARTES, LA PELICULA, EL PENETRAMETRO Y SIMBOLOS DE PLOMO):

DATOS DE LA INTERPRETACION:

OBSERVACION: PELICULA SIMPLE:..... SOBREPUESTAS:

PIEZA N°	COLOCADA N°	RX N°	DISCONT. CÓDIGO	ACEPTAR		DENSIDAD	NIVEL DE CALIDAD	INDICACIONES FALSAS	NOTAS
				SI	NO				

REVISADO POR

NOMBRE

NIVEL

FECHA

CLIENTE O

REPRESENTANTE:.....

NOMBRE.

NIVEL

FECHA

Tabla 14A: Formulario de Registro de Resultados de la inspección radiográfica.

(Fuente: ASTM 1742)

FORMULARIO: REGISTRO DE RESULTADOS DE INSPECCIÓN POR EL MÉTODO DE RAYOS X

LABORATORIO RADIOGRÁFICO: Laboratorio de Materiales de Física
 DIRECCIÓN: Campus Universitario de la UMSA.....TELEFONO:.....

CLIENTE: Javier CalderónREPÓRTE, No: 2.....FECHA: 28 de Octubre de 2011.

PIEZA / LOCALIZACION: 2º Tubo de Llama perteneciente a la Cámara de Combustión: Can - Anular.

DATOS DE LA PIEZA: DATOS TÉCNICOS: Pieza Tubular, Longitud = 3048.0 – 3914.0 mm,
 Diámetro = 1280.0 mm.

PENETRAMETRO: N°: DIN 54.109 BZ, OBSERVABLE HASTA HILO N° 12:6 ISO 12.

PANTALLAS: De Plomo de 0.1mm de espesor

ESPEJOR DEL METAL BASE: 2 mm

TIPO DE MATERIAL: Superaleación de Níquel..... TIPO DE PELÍCULA: D7, AGFA.

PROCEDIMIENTO RT: Pared Simple y Vista Simple.....TAMAÑO DE PELICULA: 10 x 30

SIMPLE: SI..... MULTIPLE:

KV.: / INTENSIDAD DE LA FUENTE: 150 Kilovoltios.

TIPO DE FUENTE: Generador de Alta Tensión, TAMAÑO DE FOCO: 2.2 x 2.2 mm

FFD: 100 cm.....PENUMBRA: Ug = 0.005 mm. PROCESADO MANUAL: SI.....AUTOMATICO: NO.

ESQUEMA DE TIROS:

(MOSTRAR LOCALIZACION DE LA FUENTE /TUBO, DIRECCION DE LA RADIACION, POSICION Y LOCALIZACION DE LAS PARTES, LA PELICULA, EL PENETRAMETRO Y SIMBOLOS DE PLOMO):
 LA DISTANCIA FOCO – PIEZA = 70 cm. NORMA: ASTM E 1742, EN 584 - 1, EN 584 - 2

DATOS DE LA INTERPRETACION:

OBSERVACION: PELICULA SIMPLE: Fisura en la superficie del 2º Tubo de Llama..... SOBREPUESTAS: NO.

PIEZA N°	COLOCADA N°	RX N°	DISCONT. CÓDIGO	ACEPTAR		DENSIDAD	NIVEL DE CALIDAD	INDICACIONES FALSAS	NOTAS
				SI	NO				
1ºT	1º	1	01	SI		2.2	95%	X	No existe fisura Si existe fisura.
2ºT	2º	2	02	SI		2.2	95%	----	

REVISADO POR: Orlando Limachi.....III.....28 de Octubre de 2011.
 NOMBRE NIVEL FECHA

CLIENTE O REPRESENTANTE: Javier Calderón.....28 de Octubre de 2011.
 NOMBRE. NIVEL FECHA

Tabla 14B: Formulario de Registro de Resultados de la inspección radiográfica.

(Fuente Propia)

6.4.3. Implementación de la norma de operación de rayos x

Las normas de operación por rayos x son las siguientes:

- **ASTM E1742:** Standard Practice for Radiographic examination
- **EN 584 - 1:** END - Película para radiografía industrial - Parte 1: Clasificación de los sistemas de película para radiografía industrial.
- **EN 584 - 2:** END - Película para radiografía industrial - Parte 2: Control del proceso de las películas mediante valores de referencia.

En el ANEXO II, se complementa la norma de calibración de los equipos de rayos x.

6.5. IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO EXPERIMENTAL DE END PARA EL SECTOR AERONÁUTICO

6.5.1. Objetivos del laboratorio experimental de END

El laboratorio de END para el sector aeronáutico debe cumplir los siguientes objetivos:

- Asistir técnicamente a las empresas del sector aeronáutico para garantizar el control de calidad de aquellos componentes de los subsistemas y sistemas de la aeronave y asegurar que no poseen fallas que puedan comprometer su respuesta en servicio.
- Emplear la norma ISO 17025 de certificación al laboratorio de inspección de END.
- Realizar los ensayos de END, mediante la aplicación de los siguientes métodos:
 - **Inspección mediante Líquidos Penetrantes:** El campo de aplicación es la detección, evaluación de fisuras superficiales en componentes como: cuadernas, larguerillos, paneles de recubrimiento, remaches, agujeros, refuerzos, montantes, herrajes de fijación, reversores de empuje, palas y cubos de hélice, llantas, pernos de unión, álabes y discos de turbina, cámaras de combustión, etc.

- **Inspección mediante Partículas Magnetizables:** El campo de aplicación es la detección, evaluación de fisuras superficiales y sub-superficiales, en componentes como montantes, herrajes de fijación, cubos de hélices, pernos de unión, válvulas, fundición pesada, soldaduras.
- **Inspección mediante Corrientes Inducidas:** El campo de aplicación es la detección, evaluación, de fisuras superficiales y sub-superficiales, corrosión, espesores de recubrimientos, conductividad eléctrica y clasificación de materiales en componentes metálicos como cuadernas, larguerillos, paneles de recubrimiento, remaches, agujeros, refuerzos, montantes, herrajes de fijación, reversores de empuje, palas, cubos de hélice, etc.
- **Inspección mediante Ultrasonido:** El campo de aplicación es la detección, evaluación de fisuras internas también externas en componentes metálicos como paneles de recubrimiento, refuerzos, montantes, herrajes de fijación, pernos de unión, reversores de empuje, palas y cubos de hélices, trenes de aterrizaje, componentes de HSI de motores de reacción.
- **Inspección mediante Radiografía Industrial:** El campo de aplicación es la detección y evaluación de fisuras superficiales e internas en componentes metálicos o de material compuesto como cuadernas, larguerillos, paneles de recubrimiento, remaches, agujeros, palas de hélices, alerones, componentes de cámaras de combustión, trenes de aterrizaje, etc.

6.5.2. Personal del laboratorio experimental de END

Se consideran las normas de personal calificado en todos los métodos de END y con una amplia experiencia en el sector aeronáutico:

- **IRAM - ISO 9712:** Calificación y Certificación de Personal de END.
- **ASNT, SNT – TC - 1ª:** Guía Práctica Recomendada de Personal de END
- **ISO 20807:2004:** NDT - Qualification of personnel for limited application of NDT.
- **Norma ASNT CP - 189:** Para la Calificación y Certificación de Personal de END.
- **Norma Internacional ISO 9712:2001: END:** Calificación y Certificación de Personal.

6.5.3. Equipamiento del laboratorio experimental de END

El laboratorio experimental debe contar con el siguiente equipamiento propio:

- Equipo de Ultrasonido U- Tomoscan
- Equipo de Partículas Magnéticas portátil
- Equipo de Líquidos Penetrantes fluorescente
- Equipo de Radiografía Industrial, Rayos x
- Equipo de Corrientes Inducidas.
- Boroscopios de fibra óptica y rígida.

6.5.4. Accesorios

- Medidor de intensidad de campo
- Juego de pesas
- Diversos palpadores para ultrasonido y corrientes parásitas
- Probeta de conductividad
- Patrones de calibración.

6.6. ANÁLISIS DE COSTOS DEL LABORATORIO EXPERIMENTAL DE END

La rentabilidad económica es la pretensión de un laboratorio de END, debido a la prestación de servicios de inspección aeronáutica por aplicación de uno o más métodos de END y por tanto depende del uso eficiente de los recursos humanos, materiales, económicos, que se emplean en función de los objetivos propuestos.

En el programa del laboratorio de END se consideran los siguientes 6 costos: ***Costos fijos, Costos variables, Costos directos, Costos indirectos, Costo real, Precio.***

La fijación de los precios del servicio de inspección de END, responde a dos factores como ser:

- ***Mercado y competencia:*** Se rige al precio del mercado.
- ***Selección de los objetivos del laboratorio de END.***

6.7. ANÁLISIS DE COSTOS DE ULTRASONIDO Y RAYOS X

6.7.1. Introducción

Los principales costos a considerar en las inspecciones de ultrasonido y rayos x son:

- a) El costo del salario del inspector con nivel III.
- b) Los costos de los materiales.
- c) Los costos de operación.
- d) Los costos fijos.

La importancia relativa de cada uno de estos costos varía según el método de END a emplear.

Asimismo existen otras variables que afectan al costo como ser:

- a) Cantidad de piezas inspeccionadas.
- b) Movimiento de las piezas hasta o desde el equipo de inspección.
- c) Manejo de las piezas durante la inspección.
- d) Automatización de la inspección.
- e) Sensibilidad del ensayo exigida por el cliente.
- f) Tolerancia permitida en la interpretación de la información.
- g) Porcentaje de piezas defectuosas encontradas.
- h) Complejidad del equipo requerido.
- i) Tiempo intrínseco para ejecutar la inspección.

En el laboratorio de END, el análisis y la evaluación de los costos permiten deducir en forma práctica el costo total de los métodos empleados.

6.8. ANÁLISIS DE COSTOS DE ULTRASONIDO

En el método de ultrasonido, se emplea la técnica de pulso - eco y se tienen tres tipos de ensayos claramente definidos:

- 1) *Ensayo ejecutado solamente para detectar discontinuidades planas:*

(Laminaciones, fisuras, grietas, porosidades). En este caso, el costo básico involucra al operador (nivel variable según exigencia del cliente), el tipo de palpadores, bloques

calibración y acoplantes a utilizar, el mantenimiento y reparación del equipo y la amortización del generador de ultrasonido.

- 2) ***Ensayo ejecutado solamente por la medición de espesores:*** El costo básico involucra al operador, el tipo del palpador, bloques de calibración y acoplante a utilizar, mantenimiento y reparación del equipo, la amortización del equipo de medición de espesores.
- 3) ***Ensayo ejecutado para evaluar el tamaño (la profundidad) de las discontinuidades detectadas:*** A lo establecido como costo básico anteriormente, se debe añadir; el costo de la construcción de bloques de referencia, los cuales son específicos para cada caso.

6.8.1. Confección de la ficha técnica para el servicio de inspección de ultrasonido

6.8.1.1. Datos iniciales

a) Recursos humanos empleados para el ensayo de ultrasonido:

Nº DE PERSONAS REQUERIDAS	DESCRIPCION DEL PUESTO	CARGO	TIEMPO DE TRABAJO.
1	Jefe de Campo	Operador Nivel II – III	8 horas
1	Auxiliar	Operador Nivel I - II	8 horas.

Tabla 15: Recursos humanos empleados en la inspección de ultrasonido. (Fuente Propia)

b) Equipos principales empleados en el ensayo de ultrasonido:

CANTIDAD REQUERIDA	DESCRIPCION	PRECIO EN SUS.	TIEMPO DE EXPLOTACION EN MINUTOS
1	Un generador electrónico de señal.	18000	15
1	Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas.	100	15
1	Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido al componente.	50	15
1	Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) del componente al transductor.	50	15

Tabla 16: Equipos principales empleados en la inspección de ultrasonido.

(Fuente Propia)

6.8.1.2. Cálculo de costos

a) Recursos Humanos empleados en el ensayo de ultrasonido:

PUESTO DE TRABAJO	TIEMPO TRABAJADO EN HORAS	SALARIO BASICO EN SUS	TOTAL
Jefe de Campo	8	550	550
Auxiliar	8	300	300

Tabla 17: Costos de los Recursos humanos en la inspección por ultrasonido.

(Fuente Propia)

b) Equipos principales empleados en el ensayo de ultrasonido:

EQUIPO	PRECIO EN SUS	TIEMPO DE EXPLOTACION EN MINUTOS	DEPRECIACION EN SUS
Un generador electrónico de señal.	18000	15	0.10
Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas.	50	15	0.10
Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido al componente.	50	15	0.10
Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) del Componente al transductor.	50	15	0.10
		Total	0.40

Tabla 18: Costo del equipo de ultrasonido empleado en la inspección. (Fuente Propia)

6.8.1.3. Ficha completa del método de ultrasonido

	CONCEPTO	COSTO EN SUS
1	Materia prima (insumos)	10
2	Gasto salarial	850.0
3	Gastos directos	--
4	Total gastos directos	--
5	Gastos indirectos (información)	--
6	Total gastos indirectos	--
7	Total gastos	860.0
8	Precio del servicio	300

Tabla 19: Costo total de la inspección ultrasónica. (Fuente Propia)

6.9. ANÁLISIS DE COSTOS DE RAYOS X

Los costos por el empleo de este método se consideran en las siguientes fichas técnicas:

6.9.1. Confección de la ficha técnica para el servicio de inspección de rayos x

6.9.1.1. Datos iniciales

a) Recursos humanos empleados en el ensayo de rayos x:

NºDE REQUERIDAS	PERSONAS	DESCRIPCION DEL PUESTO	CARGO	TIEMPO DE TRABAJO.
1		Jefe de Campo	Operador Nivel II-III	8 horas
1		Auxiliar	Operador Nivel I-II	8 horas

Tabla 20: Recursos humanos empleados en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)

b) Equipos principales empleados en el ensayo de rayos x:

CANTIDAD REQUERIDA	DESCRIPCIÓN	PRECIO EN SUS.	TIEMPO DE EXPLOTACIÓN EN MINUTOS
1	Máquina de Rayos X (200KVp)	24000	10
1	Radiómetro	1500	15
1	Negatoscopio	350	15
1	Densitómetro de transmisión	700	2

Tabla 21: Costo de los componentes del equipo de rayos x. (Fuente Propia)

c) Costos por insumos empleados en el ensayo de rayos x:

CANTIDAD	TIPO DE PELÍCULAS	COSTO, PRECIO DEL ENSAYO EN SUS/ UNIDAD	COSTO POR ENSAYO
1 rollo	Structurix D7 AGFA, Gevaert Rollo de 0.07 x 90 m Formato estrecho Codigo del producto: PBRPAC En cada exposición se emplea una tira de 48 cm de largo. Cantidad de unidades en un rollo: 187.5 unidades.	2.75	
1	Revelador/kit G-128, AGFA, Geveart (5 lt-cone para 25 lt-sol)	31.12	0.04 SUS/ UNIDAD
1	Fijador/kit, G-328, AGFA, Geveart (5lt-cone para 25 lt-sol)	20.59	0,027 SUS/ UNIDAD

Tabla 22: Costo de los insumos empleados en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)

6.9.1.2. Cálculo de costos

a) Recursos humanos empleados en el ensayo de rayos x:

PUESTO DE TRABAJO	TIEMPO TRABAJADO EN HORAS	SALARIO BASICO EN SUS	TOTAL
Jefe de Campo	8	550	550
Auxiliar	8	300	300

Tabla 23: Costo de los recursos humanos empleados en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)

b) Equipos principales empleados en el ensayo de rayos x:

EQUIPO	PRECIO EN SUS	TIEMPO EXPLOTACIÓN MINUTOS	DE EN	DEPRECIACIÓN EN SUS
Máquina de Rayos X (200 KVp)	24000	10.0		0.17
Radiómetro	1500	15.0		0.008
Negatoscopio	350	15.0		0.002
Densitómetro	700	2.0		0.001
		Total		0.181

Tabla 24: Costo de los equipos de rayos x empleados en la inspección. (Fuente Propia)

c) Insumos empleados en el ensayo de rayos x:

DESCRIPCIÓN	PRECIO EN SUS	CANTIDAD USADA/ENSAYO	COSTO/ENSAYO EN SUS
Película Structurix D7,PBRPAC, (0.007x90 m)	514.25	0.48 m	2.75
Revelador G-128 de AGFA Gevaert	31.12 (lit 5 lt-cone)	32 ml (solución)	0.04
Fijador G-328 de AGFA Gevaert	20.59 (kit-lt-cone)	32 ml (solución)	0.027
		Total	2.82

Tabla 25: Costo de los insumos empleados en la inspección por rayos x. (Fuente Propia)

6.9.1.3. Ficha completa del método de rayos X

	CONCEPTO	COSTO EN SUS
1	Materia prima (insumos)	2.82
2	Gasto salarial	850.0
3	Gastos directos	--
4	Total gastos directos	--
5	Gastos indirectos (información)	--
6	Total gastos indirectos	--
7	Total gastos	852.82
8	Precio del servicio	300

Tabla 26: Costo total de la inspección por rayos x. (Fuente Propia)

VII. CONCLUSIONES

- Los END se utilizan para la detección y evaluación de discontinuidades y defectos en los componentes de los subsistemas y sistemas de una aeronave; y así, resultan indispensables para determinar el nivel de calidad alcanzado en dichos componentes.
- La aplicación de los END son de fundamental importancia en la inspección de los componentes en servicio y necesarios para prevenir accidentes, además de detectar los fallos que se presentan, con una alta confiabilidad, y con las técnicas empleadas se evitan desechar los componentes de la zona caliente de un motor de reacción de manera errónea.
- El programa de inspecciones de END en los tubos de llama, fue realizado con carácter experimental en el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Física dependiente de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés e incentiva el implementar un laboratorio de END en la Carrera de Aeronáutica de la Facultad de Tecnología de la U.M.S.A., a fin de realizar las inspecciones de END en el sector aeronáutico, desde luego considerando la coordinación entre la empresa fabricante de partes de una aeronave, los manuales de mantenimiento, las normas internacionales de operación de END, la norma boliviana: RAB – 43, y todos los organismos pertinentes a los END.

VIII. RECOMENDACIONES

- Es menester considerar que la aplicación de las técnicas convencionales de END en las inspecciones aeronáuticas, tienen limitaciones que pueden ser superadas, mediante la utilización de métodos alternativos.
- Una de las limitaciones de los END en el sector aeronáutico, en la actualidad, es la incapacidad para realizar las mediciones “*en situ*” y este es un factor limitante para buena parte de las técnicas de END ya que se trata de técnicas difíciles de aplicar fuera de un laboratorio pero al mismo tiempo las inspecciones: “*in situ*” es una necesidad primordial en las inspecciones aeronáuticas.

- Por tanto la necesidad de mejorar las técnicas de END, especialmente en cuanto a su capacidad para realizar análisis de integridad “*in situ*” permitirá mejorar el servicio de las inspecciones aeronáuticas en el futuro.

IX. BIBLIOGRAFÍA

PROYECTOS DE TITULACIÓN, TESIS:

1.- CASTILLO RUBIO M. “Elaboración de Procedimientos tipo para ensayos no destructivos en mantenimiento aeronáutico”, Tesis, Quito, Escuela Politécnica Nacional, 1987.

LIBROS, ARTÍCULOS, POLICOPIADOS:

- 1.- CUESTA ALVAREZ.- “Motores de Reacción “, Edición 1980, 6ta Edición, Editorial Paraninfo, Madrid - España.
- 2.- SYDNEY H. AVNER “Introducción a la Metalurgia Física”, Edición 1985, 2da edición, Editorial Mac-Graw – Hill. México.
- 3.- VILLEGAS MARIO OSCAR, “Ciencia de Materiales”, edición 1997, Editorial UMSA, la Paz- Bolivia.
- 4.- APUNTES, “Curso Intensivo de Radiografía Industrial, Nivel III”, Carrera de Física, Facultad de Ciencias Puras, UMSA, Abril 2001.
- 5.- APUNTES, “Curso Intensivo de Ultrasonido, Nivel III”, Carrera de Física Facultad de Ciencias Puras, UMSA, Abril 2001.
- 6.- OÑATE ESTEBAN, “Tecnología de materiales en aviación “, edición 1987, Editorial Paraninfo, Madrid- España.
7. – ASMT, Handbook Volumen: 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control
8. - AWS D1.1/D1.1M:2002.- Structural Welding Code Steel.
- 9.- Apuntes para el Laboratorio de Pruebas No Destructivas”.
UPIICSA-IPN, Academia de Laboratorio de Control de Calidad, México D.F, 2002.
- 10.- Manual de Servicio del motor JT8D. De Pratt and Whitney. 2000.

- 11.- NORMA RAB - 43: “**Reglamento sobre la Aeronavegabilidad Continua, Mantenimiento, Mantenimiento Preventivo, Reconstrucción y Alteración**”. D.G.A.C. Bolivia.
- 12.- NORMA DE END: MERCOSUR.
- 13.- NORMA DE END: UNE - EN 13018:2001. Inspección Visual.
- 14.- NORMA DE END: ASTM – E587, Ultrasonido
- 15.- NORMA DE END: ASTM E114, Ultrasonido
- 16.- NORMA DE END: UNE – EN – 583, Ultrasonido
- 17.- NORMA DE END: ASTM E1742, Rayos X.
- 18.- NORMA DE END: EN 584 – 1, Rayos X.
- 19.- NORMA DE END: EN 584 – 2, Rayos X.
- 20.- NORMA ISO 17025: PARA LA COMPETENCIA DE LABORATORIOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DE CALIBRACION.

PAGINAS DE INTERNET

- 1.- ivan escalona@hotmail.com
- 2 - www.ndt-ed.org (Non Destructive Testing)
3. - www.asnt.org (American Society for Non Destructive Testing)
- 4.- www.aend.org (Asociación Española de Ensayos No Destructivos)
- 5.- TÉCNICAS HSI, WWW. Directly Industry.com.
6. - [http://es .wikipedia.org/wiki/](http://es.wikipedia.org/wiki/)
- 7.- www.tecnooficio.com
- 8.- www.prevend.com

ANEXO I

CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE RADIOGRAFÍA

Se consideran los siguientes aspectos en la calibración de los equipos de Rayos X:

- Se deberá controlar cualquier cambio significativo en las características focales.
- La sensibilidad de una radiografía debe establecerse por medio de Indicadores de Calidad de Imagen (IQI) (o penetrámetros) adecuados al material y espesor.
- Puede ser preciso tener los certificados de conformidad del fabricante de estos IQIs.
- Se deberán controlar las condiciones de los IQI y los que estén dañados deberán ser retirados del uso.
- El tipo y localización del IQI deberá estar estrictamente de acuerdo con los requisitos de la norma o código.
- Los equipos de procesamiento de las películas radiográficas deberían mantenerse de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes.
- Se debería establecer un control regular del equipo utilizando películas pre-expuestas para asegurar la correcta operación del equipo y para verificar que se cumplen los requisitos de los sistemas de clasificación de películas.
- Se comprobará la densidad de las radiografías utilizando densitómetros.
- La precisión requerida determina si es necesario un lector analógico o digital.
- Los densitómetros se calibrarán en intervalos especificados contra una lámina de densidad de referencia.
- Los densitómetros portátiles se pondrán a cero cada vez que sean utilizados según el nivel de iluminación de fondo en el cual vayan a ser utilizados.
- Entre las calibraciones se llevarán a cabo verificaciones regulares del correcto funcionamiento del densitómetro.
- Las láminas de densidad de referencia serán identificadas individualmente y serán trazables mediante el correspondiente certificado a un patrón de medida nacional y dispondrán de un certificado del fabricante que (salvo que se especifique otra cosa) debe tener menos de 5 años de antigüedad.
- Las láminas de densidad utilizadas durante el trabajo tendrán comprobada la densidad de cada escalón, utilizando un densitómetro calibrado y certificado, registrando el

valor directamente en la película o en una etiqueta fijada permanentemente a la película.

- La fecha de la primera calibración debería registrarse en la lámina.
- Se desecharán y destruirán todas las láminas de densidad de trabajo que tengan más de tres años de antigüedad, o que hayan sido sometidas a un uso indebido.
- Las láminas de densidad de película están sujetas a decoloración y deterioro, por lo que deberán ser cuidadosamente mantenidas y almacenadas.
- Se deberá comprobar periódicamente en los negatoscopios su intensidad y uniformidad de iluminación.



ANEXO II

NORMA DE OPERACIÓN DE ULTRASONIDO

Este Proyecto de Norma es de MERCOSUR y tiene su origen en la norma:

UNE-EN 583-1:1999: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. EXAMEN POR ULTRASONIDOS.

Parte 1: Principios generales.

ÍNDICE

1. Objeto y campo de aplicación
2. Referencias normativas
3. Calificación y certificación del personal
4. Información necesaria previa al ensayo
5. Principios del ensayo por ultrasonidos
6. Equipo
7. Ajustes
8. Preparación para el ensayo
9. Ensayo
10. Caracterización de las imperfecciones
11. Procedimiento del ensayo
12. Informe de ensayo

Parte 1: Principios generales

1. Objeto y campo de aplicación

Esta Norma define los principios generales requeridos para el ensayo por (ultrasonidos de componentes permeables a los ultrasonidos).

Las condiciones específicas de aplicación y uso del ensayo por ultrasonidos, que dependen del tipo de producto examinado, se describen en documentos, tales como:

- Normas del producto;
- Especificaciones;
- Códigos;
- Documentos contractuales;

- Procedimientos escritos.

Salvo que se especifique lo contrario en los documentos de referencia, los requisitos mínimos de esta Norma son aplicables.

Esta Norma no define:

- El alcance de los ensayos y de los planes de control
- Los criterios de aceptación.

2. Referencias normativas

Las normas siguientes contienen disposiciones que, al ser citadas en este texto, constituyen requisitos de esta Norma MERCOSUR.

3. Calificación y certificación del personal

El ensayo debe efectuarse por personal calificado según la ISO 9712.

El organismo de certificación de personal debe estar acreditado según la ISO/IEC 17024.

Las condiciones de calificación y certificación deben especificarse en las normas de productos y/o en otros documentos aplicables.

4. Información necesaria previa al ensayo

Antes del ensayo y cuando sea aplicable, se debe disponer de la siguiente información:

- Propósito del ensayo;
- Requisitos de calificación y certificación del personal;
- Condiciones ambientales y estado del objeto a ensayar,
- Requisito de un procedimiento de ensayo escrito calificado;
- Cualquier requisito especial necesario para la preparación de la superficie;
- Volumen a ensayar;
- Sensibilidad del ensayo y método de ajuste de ésta;
- Requisitos relativos a las condiciones de evaluación y al nivel de registro;
- Criterios de aceptación;
- Alcance del ensayo incluyendo el plan de escaneado;
- Requisitos para un informe escrito del ensayo.

5. Principios del ensayo por ultrasonidos

5.1. Generalidades

Un examen por ultrasonidos se basa en la propagación de ondas ultrasónicas en la pieza a ensayar y al seguimiento de la señal transmitida (llamada técnica por transmisión), o de la señal reflejada o difractada por cualquier superficie o discontinuidad (llamada técnica de examen por reflexión).

Ambas técnicas pueden emplear un único palpador que actúe como emisor y receptor, o un palpador doble, o palpadores emisores y receptores separados.

De la misma manera, estas dos técnicas pueden implicar una reflexión intermedia procedente de una o más superficies del objeto ensayado.

El ensayo puede realizarse manualmente o con la ayuda de equipos semiautomáticos o totalmente automáticos, y un barrido con o sin contacto o por inmersión, u otros métodos de acoplamiento adaptados a un problema específico.

5.2. Modo de vibración, y sentido de propagación del sonido

Las ondas más comúnmente utilizadas son las longitudinales y las transversales, que se pueden propagar perpendicular u oblicuamente en relación con la superficie de ensayo. En caso de aplicaciones especiales, también pueden utilizarse otros tipos de ondas, como por ejemplo ondas guiadas, superficiales y de creep.

La elección del tipo de onda y de su sentido de propagación dependerá de los propósitos del examen. Se debería tener en cuenta la naturaleza especular de la reflexión que proviene de reflectores planos. Con excepción de las ondas de Lamb, en un ensayo por reflexión con un palpador emisor-receptor, la dirección de propagación debería ser tan perpendicular al plano del reflector como fuera posible

5.3. Técnica de transmisión

Esta técnica se basa en la medición de la atenuación de la señal después del paso de una onda ultrasónica a través de la pieza ensayada.

La señal utilizada para la medición puede ser;

- Un eco de fondo, o bien;
- Cualquier otra señal transmitida directamente, o después de la reflexión intermedia sobre las paredes del objeto.

La norma EN 583-3 contiene una descripción más detallada de esta técnica.

5.4. Técnica de reflexión (técnica impulso seco)

Esta técnica utiliza la señal reflejada o difractada procedente de cualquier interface de interés en el interior del objeto ensayado. Esta señal se caracteriza por su amplitud y su posición sobre la base de tiempo, estando ésta última en función de la distancia entre el reflector y el palpador. El emplazamiento del reflector se determina por el conocimiento de esta distancia, de la dirección de propagación de la onda y de la posición del palpador.

Se recomienda medir la amplitud de la señal por comparación con uno de los siguientes elementos:

- Una curva de corrección amplitud-distancia (DAC) o una serie de curvas DAC obtenidas a partir de reflectores artificiales (generatrices de agujeros, agujeros de fondo plano, entallas, etc.) situadas en uno o más bloques de referencia;
- Un diagrama de reflector equivalente (sistema DGS);
- Ecos de entallas apropiadas o;
- Ecos de reflectores planos de grandes dimensiones, perpendiculares al eje del haz (por ejemplo: eco de fondo).

Estas técnicas se describen en el proyecto de norma EN 583-2.

Pueden emplearse otras técnicas para obtener información complementaria sobre la forma y tamaño de los reflectores. Estas técnicas se basan, por ejemplo, en las variaciones de la amplitud de la señal con el desplazamiento del palpador, la medida del recorrido del sonido o un análisis de frecuencia.

6. Equipo

6.1. Equipo de ensayo por ultrasonidos

El equipo de ensayo por ultrasonidos debe satisfacer los requisitos de la EN 12668-1.

6.2. Palpadores

El palpador debe responder a los requisitos del proyecto de norma EN 12668-2.

6.2.1. Selección del palpador

La elección del palpador depende de los propósitos del ensayo y de los requisitos de la norma o de la especificación de referencia. Depende de:

- Del espesor, de la forma y del estado de la superficie del material;
- Del tipo y del estado metalúrgico del material a ensayar;
- Del tipo, de la posición y de la orientación de las imperfecciones a identificar.

Los parámetros de los palpadores enumerados en los apartados 6.2.2, 6.2.3 y 6.2.4 deben tomarse en función de las características de la pieza a ensayar definidas anteriormente.

6.2.2. Frecuencia y dimensiones de los transductores

La frecuencia y las dimensiones del transductor determinan la forma del haz (campo próximo y divergencia del haz). La selección efectuada debe garantizar que las características del haz sean óptimas para el examen mediante un compromiso entre:

- La longitud de campo próximo que debe permanecer, si es posible, inferior al espesor de la pieza examinada;

NOTA - Es posible detectar las imperfecciones en el campo próximo, aunque su caracterización es menos precisa y menos reproducible.

- El ancho del haz que debe ser suficientemente pequeña en la zona de ensayo más alejada del palpador, para mantener un nivel de detección adecuado;
- La divergencia del haz, que debe ser suficientemente grande como para permitir detectar inspecciones planas cuya orientación no sea favorable.

A parte de las consideraciones aquí descritas, la elección de la frecuencia debe tener en cuenta la atenuación del sonido en el material y la reflectividad de las imperfecciones. Cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será el poder de resolución, pero las ondas sonoras estarán más atenuadas (o las señales parásitas debidas a la estructura aumentarán).

La elección de la frecuencia representa, así, un compromiso entre estos dos factores.

La mayor parte de los exámenes se efectúan a frecuencias comprendidas entre 1 MHz y 10 MHz.

6.2.3. Zona muerta

La elección del palpador debe igualmente tener en cuenta la zona muerta en función del volumen a ensayar.

6.2.4. Amortiguación

La elección de un palpador debe igualmente tener en cuenta la amortiguación que influye en el poder de resolución así como el espectro de las frecuencias.

6.2.5. Palpadores focalizados

Los palpadores focalizados se utilizan principalmente para la detección de pequeños defectos y para el dimensionamiento de los reflectores.

Sus campos sonoros deberían generalmente describirse por la zona focal y por diámetro focal.

En comparación con los palpadores no focalizados con emisor-receptor, tienen la ventaja de un poder de resolución lateral mejorada y una mayor relación señal ruido.

Su sensibilidad tiene que verificarse con ayuda de reflectores de referencia.

6.3. Medios de acoplamiento

Pueden utilizarse diferentes medios de acoplamiento, pero el tipo utilizado debe ser compatible con los materiales a ensayar, por ejemplo:

- Agua, conteniendo eventualmente un agente por ejemplo (humectante, anticongelante, inhibidor de corrosión);
- Pasta de contacto;
- Aceite;
- Grasa;
- Gel de celulosa a base de agua, etc.

Las características del medio de acoplamiento deben permanecer constantes durante la verificación, las operaciones de calibrado y el ensayo.

El medio de acoplamiento debe ser adecuado al rango de temperatura en el que se utilizará.

Si esta constancia no puede garantizarse entre el calibrado y el ensayo, se puede realizar una corrección de transferencia.

La EN 583-2 describe un método de determinación de la corrección necesaria.

Después de que el examen se haya efectuado, se debe eliminar el medio de acoplamiento si su presencia puede afectar a operaciones subsiguientes, a la inspección o a la utilización de la pieza.

6.4. Bloques de calibración

Los bloques de calibración utilizados se definen en la EN 12223 y EN 27963.

La estabilidad del calibrado puede verificarse utilizando los bloques mencionados.

6.5. Bloques de referencia

Cuando se comparen la amplitud de los ecos de la pieza con los ecos de un bloque de referencia, se deben observar ciertos requisitos relativos al material, al estado de la superficie, a la geometría y a la temperatura de la pieza.

El bloque de referencia debe, si es posible, estar hecho de un material con propiedades acústicas situadas dentro de los límites especificados en relación con las del material a ensayar, y debe tener un estado de superficie comparable al de la pieza a ensayar.

Si estas características no son las mismas, se debe realizar una corrección de transferencia. La EN 583-2 describe un método para determinar la corrección necesaria. Se debe tener en cuenta las condiciones geométricas del bloque de referencia y de la pieza a examinar. Para más detalles, ver la EN 583-2.

La geometría del bloque de referencia, sus medidas, y la posición de todos los reflectores deberían estar generalmente indicadas caso a caso en las normas y códigos específicos.

La posición y el número de reflectores deberían estar generalmente en relación con el barrido de la totalidad de la zona a ensayar.

Los reflectores más comúnmente utilizados son:

- Reflectores planos de grandes medidas en relación con la anchura del haz, perpendiculares al eje acústico (ejemplo: fondo de la pieza);
- Agujeros de fondo plano;
- Generatrices de agujeros;
- Ranuras o entallas de diversas secciones.

Cuando se utilicen bloques de referencia para un ensayo por inmersión, debe tenerse en cuenta el efecto del agua o se deben taponar los extremos de los agujeros.

Las consecuencias de diferencias de temperatura entre la pieza a ensayar, los palpadores y los bloques de referencia deben tomarse en consideración y compararse con los requisitos de precisión del examen. Durante el ensayo, si es necesario, los bloques de referencia deben mantenerse en la franja de temperatura especificada.

6.6. Bloques específicos

En ciertos casos, pueden emplearse bloques específicos, por ejemplo conteniendo defectos naturales identificados, para finalizar el método de examen y verificar la estabilidad de la sensibilidad.

7. Ajustes

7.1. Ajustes generales

En ausencia de instrucciones definidas en las normas o especificaciones detalladas, es esencial verificar que:

- La supresión no debe utilizarse a no ser que así se especifique en los documentos de referencia;
- El amplificador se utiliza en la banda de frecuencia adecuada;

- El filtrado esté regulado para dar un poder de resolución óptimo;
- La adaptación de impedancia del sistema de examen esté ajustado, si es necesario, de manera que se obtenga una altura de eco máxima preservando el poder de resolución;
- La energía del impulso sea tan débil como sea posible teniendo en cuenta la reserva de amplificación.

Estos reglajes deben conservarse durante todo el examen.

Los ajustes deben efectuarse al inicio de cada secuencia del examen y después, deben verificarse periódicamente durante intervalos de tiempo establecidos así como cada vez que se modifique un parámetro del sistema o cuando el operador sospeche que haya alguna desviación (ver EN 12668-3).

Se deben establecer un máximo de la deriva de la amplitud y de la base de tiempo. En caso de que se sobrepase estos máximos, se requieren nuevos ajustes o las acciones correctivas acordadas.

7.2. Ajuste de la base de tiempo

Cada franja de la base de tiempo debe seleccionarse para cubrir la zona de examen definida en la norma, procedimiento o especificación detallada.

La calibración de la base de tiempo y el retardo deben efectuarse con la ayuda de un bloque de calibración o mediante cálculos. Éstos deben verificarse mediante control por ultrasonidos de la ubicación de los reflectores en la pieza de referencia.

7.3. Amplificación

Los ajustes de amplificación y de energía, impulso deben efectuarse a partir de los ecos de los reflectores artificiales o de la superficie opuesta de la pieza de referencia o de la pieza ensayada. Éstos deben permitir:

- Detectar todas las imperfecciones en las que la señal exceda el nivel de registro u otras señales de interés definida en los documentos de referencia;
- Evaluar todas las indicaciones de imperfecciones o de otras señales de interés por uno de los métodos descritos en la norma correspondiente o por cualquier otro método descrito en las especificaciones particulares asociadas al producto a ensayar.

Los ajustes de amplificación pueden ser diferentes durante el ensayo para detección y durante la evaluación.

Para la detección de las imperfecciones por examen manual, el reglaje debe ser tal que todas las señales que sobrepasen el nivel de evaluación, hasta el máximo de la franja bajo examen, aparezcan a una altura mínima del 20 % de la altura total de la pantalla, o como esté especificado en los documentos de referencia.

La EN 583-2 describe los métodos de ajuste de la sensibilidad.

7.4. Frecuencia de recurrencia

Cuando se puede ajustar, la frecuencia de recurrencia debería ser suficientemente elevada como para asegurar un brillo de pantalla apropiado y detectar todas las señales pertinentes pero estando siempre suficientemente baja como para evitar la producción de ecos fantasmas en trayectos acústicos largos, particularmente con materiales de baja atenuación.

8. Preparación para el ensayo

8.1. Preparación de la superficie

Todas las superficies a ensayar deben estar exentas de suciedad, calamina, proyecciones de soldadura, etc. Deben ser suficientemente uniformes y lisas como para mantener un acoplamiento acústico satisfactorio.

Además, se deben eliminar antes del ensayo en todas las características de la superficie de la pieza que puedan aumentar los errores de interpretación. Ver la EN 583-2.

8.2. Identificación y puntos de referencia

Cuando la información de las discontinuidades y otras indicaciones locales sea un requisito en el(los) documento(s) de referencia, cada pieza a examinar debe identificarse individualmente y se debe emplear un método convenido de referencia para localizar claramente cualquier discontinuidad a informar. Este método puede estar basado en la determinación de referencias permanentes o en la utilización de características geométricas apropiadas.

8.3. Aplicación de las correcciones de transferencia

Durante la evaluación de las señales con la ayuda de bloques de referencia, éstos deben presentar una atenuación de las ondas ultrasónicas y de las pérdidas en superficie equivalentes a las de la pieza a controlar.

En el caso contrario, debe aplicarse una corrección de transferencia para compensar la diferencia entre las pérdidas en superficie y la atenuación del material.

La EN 583-2 propone métodos simples para ciertas piezas de forma compleja, piezas recubiertas, piezas en acero austenítico, etc., puede ser difícil, o incluso imposible, elaborar un

método adecuado de verificación de la equivalencia. En este caso, se debe implementar un procedimiento específico.

En el examen de productos específicos de espesor relativamente débil o en los que la atenuación sea despreciable, se puede omitir la corrección de transferencia.

9. Ensayo

9.1. Extensión del ensayo

El barrido debe realizarse de conformidad con los requisitos del o de los documentos de referencia. Estos requisitos deben incluir la zona a barrer, la dirección del barrido, y eventualmente pueden incluir el tipo, dimensión, frecuencia y ángulo del haz o de los palpadores a utilizar.

9.2. Recubrimiento y velocidad de barrido

9.2.1. Recubrimiento

Para un examen al 100 %, el intervalo entre dos líneas de barrido sucesivas no debe ser mayor que el ancho del haz a - 6 dB, en toda la profundidad del volumen ensayado.

9.2.2. Velocidad de barrido

La elección de la velocidad de barrido debe tener en cuenta la frecuencia de recurrencia y la capacidad del operador, o del instrumento para / reconocer o registrar una señal.

En ensayo semi - automático, la velocidad de barrido máxima (V_{max}) es determinada por el paso de un bloque de referencia por debajo del palpador, o se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{MAX} = \frac{d \times f_{rep}}{n} \text{ (mm/s)}$$

Siendo:

d = ancho mínima del haz a - 6 dB en milímetros aplicable al ensayo;

f_{rep} = frecuencia de recurrencia (en Hz);

n = número de señales consecutivas de una indicación antes del disparo de la alarma.

9.3. Niveles de evaluación y de registro

Los niveles de evaluación y de registro se definen en las normas correspondientes. Cuando éstos no estén definidos, se deben consignar los valores utilizados durante el ensayo en el informe de ensayo.

9.3.1. Técnica de reflexión (técnica impulso-eco)

Si la amplitud de un eco sobrepasa el nivel de evaluación, la señal debe evaluarse con relación a los criterios de aceptación.

9.3.2. Técnica de transmisión

Si la amplitud de la señal transmitida es menor que el nivel de evaluación, la señal debe evaluarse con relación a los criterios de aceptación.

10. Caracterización de las imperfecciones

10.1. Técnica de reflexión (impulso - eco)

Las imperfecciones se caracterizarán, como mínimo, por:

- Su localización en el objeto (coordenadas x, y,z);
- Su reflectividad determinada al medir la amplitud máxima del eco mediante uno de los métodos descritos en la EN 583-2.

Se pueden igualmente determinar otras características como:

- La orientación;
- La dimensión determinada por el método con - 6 dB, u otras técnicas de desplazamiento del palpador;
- El carácter plano o no plano.

10.2. Técnica de transmisión

Las imperfecciones se caracterizan, como mínimo por:

- Su localización en el objeto (coordenadas x, y);
- La reducción máxima de la señal transmitida.

Se pueden igualmente determinar otras características como la extensión de la zona de las señales reducidas.

11. Procedimiento del ensayo

Se debe establecer un procedimiento de ensayo para todo ensayo por ultrasonidos. Además de los requisitos indicados en esta norma general, se deben incluir, en lo posible, al menos los siguientes detalles:

- Objetivo y alcance,
- Descripción de los productos a ensayar
- Tipos de materiales;
- Documentos de referencia;

- Calificación y certificación del personal de ensayo;
- Estado de la pieza a ensayar;
- Detalles dimensionales;
- Zonas a ensayar;
- Preparación de las superficies a barrer;
- Medio de acoplamiento;
- Descripción del equipo de ensayo
- Aparato, tipo, fabricante y modelo;
- Palpador, tipo, fabricante y modelo (medidas, ángulo, frecuencia y rango de espesores de utilización, rango de temperatura);
- Sistema de adquisición de datos computarizados incluyendo el programa de la computadora (software) y versión del programa, cuando sea aplicable;
- Descripción del sistema de barrido (manual o mecánico), cuando sea aplicable;
- Método y periodicidad de calibración de ajuste del equipo;
- Técnica a ser utilizada (ejemplo: método de contacto directo, técnica de pulso -eco);
- Condiciones ambientales;
- Calibrado y ajustes;
- Plan de barrido;
- Descripción y secuencia de las operaciones de examen;
- Niveles de evaluación y registro;
- Caracterización de las imperfecciones;
- Control de contaminantes;
- Sistemática de identificación y rastreabilidad de los resultados;
- Limpieza final;
- Requisitos de seguridad y medio ambiente;
- Criterios de aceptación;
- Informe del ensayo;
- Una norma de producto o una norma que describa una técnica específica, puede servir de procedimiento de examen si es autosuficiente con respecto al ensayo. Si los documentos de referencia requieren un procedimiento de ensayo en escrito, éste debe incluir como mínimo la información anterior.

12. Informe de ensayo

El informe de ensayo debe contener como mínimo la siguiente información:

- a) Identificación del solicitante y empresa que realiza el ensayo;
- b) Identificación numérica;
- c) Identificación de la pieza ensayada, tipo, grado, diámetro y espesor;
- d) Número y revisión del procedimiento;
- e) Identificación, incluyendo número de serie, de los aparatos, palpadores y cables utilizados;
- f) Identificación del registro de calibración del aparato;
- g) Sistema de adquisición de datos computarizados, incluyendo el programa de la computadora (software) y versión del programa, cuando sea aplicable;
- h) Equipamiento de barrido, cuando se utilice;
- i) Condición superficial;
- j) Acoplante utilizado;
- k) Superficie por donde fue realizado el ensayo;
- l) Identificación del bloque de referencia utilizado;
- m) Registro de resultados
 - Nivel de respuesta;
 - Localización de la discontinuidad;
 - Identificación y medidas de la discontinuidad;
 - Palpador utilizado en la detección de la discontinuidad;
 - Superficie de detección.
- n) Normas, incluyendo edición/revisión, y/o valores de referencia para la interpretación de resultados;
- o) Resultado indicando aceptación, rechazo o recomendación de ensayo complementario;
- p) Fecha de ensayo;
- q) Identificación, firma y nivel de la persona responsable.

ANEXO III

SIMBOLOGIA DE LOS METODOS DE END.

METODO DE INSPECCION	SIMBOLO
RAYOSX	
ULTRASONIDOS	
CORRIENTES INDUCIDAS	
LIQUIDOS PENETRANTES	
RESONANCIA MAGNETICA	
PARTICULAS MAGNETICAS	
INSPECCION VISUAL	
TERMOGRAFIA	



ANEXO IV

CUADRO DE VELOCIDAD ACUSTICA DE METALES

MATERIALES		DENSIDAD (ρ) kg/m ³ x 10 ³	VELOCIDAD ACUSTICA m/s x 10 ³ (C)	IMPEDANCIA (Z) kg/m ² .s x 10 ⁶
M E T A L E S	Aceros al C y poco aleados	7,85	5,82	45,7
	Inoxidables austeníticos	8,03	5,66	45,5
	Inoxidables martensíticos	7,67	7,39	56,7
	Aluminio (L-3051)	2,71	6,32	17,1
	Al-Cu (L-3120)	2,78	6,25	17,4
	Al-Cu (L-3140)	2,78	6,19	17,2
	Berilio	1,82	12,8	23,3
	Bronce (Cu-Sn)	7,4÷8,9	4,40÷4,89	32,5÷44,5
	Cadmiado	8,6	2,78	24
	Cobre	8,9	4,70	42
	Inconel	8,25	7,82	64,5
	Latón (Cu-Zn)	8,5÷8,6	3,83	33
	Magnesio	1,74	5,77	10,1
	Monel	8,83	6,02	53,1
	Niquel	8,9	5,63	50
	Plomo	11,4	2,16	24,6
	Titanio	4,51	6,0	27
N O M E T A L E S	Caucho vulcanizado	1,1÷1,6	2,3	2,5÷3,7
	Corcho	0,24	0,5	0,12
	Cristales piezoeléctricos			
	- Cloruro potásico	1,988	4,38	8,7
	- Cuarzo	2,65	5,76	15,3
	- Fluorita	3,18	7,18	23
	- Sulfato de litio	2,06	4,72	11,2
	Hielo	0,9	3,98	3,6
	Nylon	1,0÷1,2	1,8÷2,2	1,8÷2,7
	Poliestireno	1,05	2,67	2,8
	Metacrilato	1,18	2,67÷2,73	3,2
Resinas epoxy	1,15÷1,30	2,5÷2,8	2,8÷3,7	
Resina fenólica	1,4	2,59	3,6	
Teflón	2,2	1,35	3,0	

ANEXO V

CUADRO DE NORMAS DE END EN PROCESOS DE SOLDADURA.

	PROCESO	Soldeo por fusión (excluidos procesos ISO 4063 - 5)				SOLDEO FUERTE
	ENSAYO	NORMA	DESCRIPCION	NIVELES DE ACEPTACION	OTROS	
END	INSPECCION VISUAL	UNE - EN ISO 17637:2011	Soldaduras por fusión	UNE – EN ISO 5817:2009 (Aceros, Níqueles y Titanios) UNE - EN ISO 10042:2006 (Aluminios)	UNE - CEN/TR 15135:200 6IN (Diseño y END de soldaduras) UNE - EN ISO 17635:201 (Reglas generales)	UNE - EN 12799: 2001 /A1: 2004
	LIQUIDOS PENETRANTES	UNE – EN 571 - 1: 1997 (PNE – pr EN ISO 3452 - 1: 2011)	Principios generales	UNE - EN ISO 23277:2010	UNE - EN 473:2009 (PNE - pr EN 011) (Cualificación y certificación del personal)	
	PARTICULAS MAGNETICAS	UNE – EN ISO 17638:2010	Uniones soldadas	UNE - EN ISO 23278:201 0		
	ULTRASONIDO	UNE – EN ISO 17640:2011	Técnicas, niveles de ensayo y evaluación	UNE - EN ISO 11666:201 1		
		UNE – EN 583 - 1: 1999 /A1: 2004	Principios generales	UNE - EN 15617:2010		
		UNE – EN 583-2: 2001	Ajuste sensibilidad y base de tiempos	UNE - EN 12517-1:2006 (Aceros, Níqueles y Titanios)		
		UNE - EN 583 - 3: 1997	Técnica de transmisión	UNE - EN 12517-2:2010 (Aluminios)		
		UNE – EN 583 - 4: 2003/A1: 2004	Examen discontinuidades perpendiculares a la superficie			
		UNE – EN 583-5: 2001 /A1:2004	Caracterización dimensionamiento de discontinuidades			
	UNE – EN 583 - 6: 2010	Técnica por difracción de tiempo de vuelo (T o FD)				
RAYOS X	UNE - EN 1435: 1998/1 M:2002/A2 :2006 (PNE - pr EN ISO 17636 - 1:2010) (PNE - pr EN ISO 17636 - 2:2010)	Uniones soldadas (Técnica de rayos X y gamma con película) (Técnica de rayos X y gamma con detectores digitales)				
CORRIENTES DE FOUCAULT	UNE - EN 1711: 2000 / A1: 2004	Examen mediante análisis del plano complejo				
DIMENSIONES LONGITUDINALES Y ANGULARES		Tolerancias macroscópicas y microscópico	UNE - EN ISO 13920: 1997			

ANEXO VI

FRECUENCIAS EMPLEADAS EN LA INSPECCION POR ULTRASONIDO EN DIVERSOS MATERIALES.

FRECUENCIAS EMPLEADAS	INSPECCION DE UN TIPO DE MATERIAL POR CONTACTO
FRECUENCIA (MHZ)	APLICACIÓN
0.025 - 0.01	Hormigón, partes de Madera, rocas y otros materiales de estructura basta.
0.2 – 1	Productos moldeados, fundición gris, nodular y materiales de estructura relativamente basta tal como el cobre y el acero inoxidable
0.4 – 6	Productos moldeados : acero, aluminio , latones y otros materiales con tamaño de grano fino
0.2 - 2.25	Materiales plásticos y similares tales como combustibles sólidos de motores cohetes y pólvoras.
1 – 6	Productos metálicos laminados: chapa, plancha, barra, palanquilla
2.25 – 10	Productos estirados y extruidos: barra, tubo y perfiles (materiales ferrosos y no ferrosos)
1-10	Productos forjados: materiales ferrosos y no ferrosos
2.25 – 10	Vidrios y cerámica
71- 2.25	Soldaduras: materiales ferrosos y no ferrosos
1- 10	Inspección de mantenimiento especialmente para grietas por fatiga