

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

**“DETECCIÓN DE FALLAS SUPERFICIALES E INTERNAS EN
TUBERÍAS DE ALTA PRESIÓN PARA MOTORES
ESTACIONARIOS POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO”.**

AUTORES:

PAÚL FERNANDO MOSQUERA ÁVILA

MARCELO FRANCISCO SÁNCHEZ ESPINOZA

DIRECTOR:

ING. CRISTIAN GARCÍA GARCÍA

CUENCA, FEBRERO 2015

CERTIFICACIÓN

Ing. Cristian García M. Sc., profesor de la Universidad Politécnica Salesiana, de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz.

Certifica:

Que la tesis titulada, “DETECCIÓN DE FALLAS SUPERFICIALES E INTERNAS EN TUBERÍAS DE ALTA PRESIÓN PARA MOTORES ESTACIONARIOS POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO”, realizada íntegramente por los señores Paúl Fernando Mosquera Ávila y Marcelo Francisco Sánchez Espinoza, para la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz, ha sido revisada, corregida y aprobada.

Cuenca 21 de febrero de 2015

Ing. Cristian García M. Sc.
DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los autores declaramos que los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de nuestra exclusiva responsabilidad y autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma con fines académicos.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cuenca, 21 de febrero de 2015



Sr. Paúl Fernando Mosquera Ávila
CI. 0102707841



Sr. Marcelo Francisco Sánchez Espinoza
CI. 0704966290

AGRADECIMIENTO

A Dios, por bendecir mi hogar y por concederme sabiduría, paciencia y sacrificio para alcanzar las metas que me he planteado.

A mi esposa, por su comprensión e irrestricto apoyo en todas las actividades universitarias y en nuestro hogar, sin lo cual no hubiese logrado culminar mis estudios.

A mis padres, por haberme guiado para seguir esta carrera y por el apoyo recibido en el transcurso de todos estos años.

Al Ing. Cristian García, ya que con su importante guía nos ha permitido culminar éxito nuestra tesis.

Paúl Fernando Mosquera Ávila

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi fuente de inspiración, a mi familia por el apoyo, motivación y confianza que han puesto en mí.

A mi compañero Paúl Fernando Mosquera Ávila por el esfuerzo y dedicación que hemos puesto en el desarrollo de este tema de investigación.

A nuestro director de tesis Ing. Cristian García por la guía y correcciones vertidas para el desarrollo de un mejor trabajo de tesis.

Marcelo Francisco Sánchez Espinoza

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y espero que con sus bendiciones pueda seguir alcanzando logros a nivel personal, familiar y profesional.

Este trabajo se lo dedico a mi esposa Magali porque su apoyo ha sido fundamental para vencer los obstáculos que se han presentado en todos estos años de estudio.

Con todo mi amor dedico este trabajo a mis hijas Ana Paula y Fernanda Valentina, ya que ellas han sido la fuerza que en mis momentos de debilidad han sabido impulsarme hacia adelante.

Dedico este trabajo a mis padres, porque ha sido su aspiración que yo culmine esta carrera y consiga el título de Ingeniero Mecánico Automotriz.

Paúl Fernando Mosquera Ávila

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermana por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda esta carrera universitaria, por estar conmigo siempre apoyándome en los buenos y malos momentos de mi vida, por el sacrificio y cariño que me brindaron en mi formación académica.

Marcelo Francisco Sánchez Espinoza

ÍNDICE

CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PARA DETECCIÓN DE FALLAS.	1
1.1 Introducción	1
1.2 Tipos de ensayos no destructivos	1
1.2.1 Inspección visual.....	1
1.2.2 Inspección por partículas magnéticas	2
1.2.2.1 Principios básicos	3
1.2.3 Inspección por líquidos penetrantes	5
1.2.3.1 Materiales	5
1.2.3.2 Medidas de inspección.....	6
1.2.4 Radiografía industrial	6
1.2.4.1 Requisitos y secuencia de la inspección por radiografía.....	7
1.2.4.2 Aplicaciones	9
1.2.5 Termografía	9
1.2.5.1 Funcionamiento de una cámara termográfica	10
1.2.5.2 Procedimientos de obtención	11
1.2.5.3 Proceso de inspección.....	11
1.2.5.4 Interpretación.....	12
1.2.6 Ultrasonido industrial	12
1.3 Inspección por ultrasonido	13
1.3.1 Equipo básico.....	14
1.3.2 Características generales de las ondas ultrasónicas.....	15
1.3.3 Propagación de las ondas	16
1.3.4 Propiedades de las ondas ultrasónicas	16
1.3.4.1 Ondas longitudinales ultrasónicas	17
1.3.4.2 Ondas transversales ultrasónicas	18
1.3.4.3 Ondas superficiales.....	18
1.3.5 Propiedades acústicas de algunos metales	19
1.3.6 Impedancia acústica	20
1.3.7 Coeficientes de transmisión y reflexión.....	20
1.3.8 Refracción.....	21
1.3.9 Conversión de modo	22
1.3.10 Ángulos críticos	23
1.3.11 Atenuación	24
1.4 Métodos de inspección por ultrasonido	25
1.4.1 Métodos básicos de inspección	25
1.4.2 Método eco-pulsado.....	25
1.4.3 Método de transmisión.....	26

1.4.4 Método de frecuencia modulada	26
1.4.5 Análisis espectral	26
1.4.6 Conducción de sonido	27
1.5 Transductores ultrasónicos	27
1.5.1 Transductores sencillos	28
1.5.2 Transductores duales	28
1.5.3 Transductores de haz angular	29
1.5.4 Transductores de inmersión	29
1.5.5 Transductor de arreglo de fases	30
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE PRUEBA PARA TUBERÍAS UTILIZADAS EN MOTORES ESTACIONARIOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.	31
2.1 Equipos de ultrasonido	31
2.1.1 Medidores de espesores	31
2.1.2 Detectores de fallas	34
2.2 Equipo de ultrasonido EPOCH XT	34
2.2.1 Inspección con haz recto	36
2.2.1.1 Calibración con haz recto del equipo EPOCH XT	37
2.2.2 Detección de discontinuidades	41
2.2.2.1 Variables de la pieza inspeccionada	42
2.2.2.1.1 Condición superficial	42
2.2.2.1.2 Geometría de la pieza	43
2.2.2.1.3 Superficies curvas	43
2.2.2.1.4 Estructura interna de la pieza	44
2.2.2.2 Variables de la discontinuidad	44
2.2.2.2.1 Tamaño de la discontinuidad	44
2.2.2.2.2 Orientación de la discontinuidad	45
2.2.2.2.3 Dispersión del haz producido por la discontinuidad	45
2.2.2.2.4 Resistencia acústica	46
2.2.3 Inspección con haz angular	46
2.2.3.1 Ubicación de las discontinuidades con haz angular	48
2.2.3.2 Calibración con haz angular del equipo EPOCH XT	50
2.2.3.2.1 Localizar índice de haz punto	52
2.2.3.2.2 Verificar el ángulo de refracción	53
2.2.3.2.3 Calibración de distancia	54
2.2.3.2.4 Sensibilidad para la calibración	56
CAPÍTULO III. PRUEBAS EN PROBETAS CON DIFERENTES ESTADOS DEL MATERIAL POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO BAJO LAS NORMAS API RP 574 – 2009 Y ASME B31.3 – 2012.	57

3.1 Análisis de la norma ASME BPVC V 2010 para ensayos no destructivos	57
3.2 Generalidades	57
3.3 Calificación del personal	58
3.4 Unidades empleadas	61
3.5 Método de examen por ultrasonido para materiales	61
3.5.1 Equipo.....	61
3.5.2 Unidades de búsqueda.....	61
3.5.3 Acoplante.....	61
3.5.4 Bloque de calibración	62
3.5.4.1 Requisitos	62
3.5.4.2 Bloques de calibración para productos tubulares.....	63
3.5.4.3 Calibración	64
3.5.5 Práctica estándar para la medición de espesor por el método de contacto pulso-eco ultrasónico manual	65
3.5.5.1 Alcance	65
3.5.5.2 Resumen de la práctica	65
3.5.5.3 Aparato	68
3.5.5.3.1 Detectores con lecturas de la pantalla A-scan pantalla de tiempo / información de amplitud	68
3.5.5.3.2 Detectores de fallas con display numérico	68
3.5.5.3.3 Instrumentos de lectura de espesores	68
3.5.5.4 Unidades de búsqueda	69
3.5.5.5 Bloques de normalización	69
3.5.5.6 Normalización de los aparatos.....	69
3.5.5.6.1 Caso I - Contacto directo, un elemento de la unidad de búsqueda	69
3.5.5.6.2 Caso II - Unidad de búsqueda de un elemento de línea de retraso	70
3.5.5.6.3 Caso III - Unidades de búsqueda dual.....	71
3.5.5.6.4 Caso IV - Secciones gruesas	71
3.5.6 Práctica estándar para pruebas ultrasónicas en tuberías metálicas.....	73
3.5.6.1 Alcance	73
3.5.6.2 Resumen de la práctica	73
3.5.7 Condición superficial	75
3.5.8 Instrumento	75
3.5.9 Estándares de referencia	75
3.5.10 Normalización de los aparatos	77
3.5.10.1 Normalización estática	77
3.5.10.2 Normalización dinámica.....	77
3.5.11 Procedimiento	78
3.5.12 Interpretación de los resultados.....	78
3.5.13 Limpieza post examen	79

3.5.14 Evaluación	79
3.6 Técnicas de inspección	79
3.6.1 Técnicas de contacto	79
3.6.1.1 Diagnóstico de las indicaciones	80
3.6.1.2 Ecos no relevantes	81
3.6.2 Inspección básica por inmersión	84
3.6.2.1 Tanques	84
3.6.2.2 Puentes y manipuladores	85
3.6.2.3 Formación de ecos	86
3.6.3 Técnicas especiales de inspección	87
3.6.3.1 La técnica delta	87
3.6.3.2 Método tandeo	88
3.7 Indicaciones	88
3.8 Inspección de Tuberías	90
3.8.1 Detección de laminaciones	90
3.8.2 Detección de grietas	90
3.9 Inspección de tuberías según la normativa de Petroecuador	94
3.9.1 Requisitos de barrido	94
3.9.2 Indicaciones registrables	94
3.9.3 Condiciones de la superficie	95
3.9.4 Corrosión general	95
3.9.5 Corrosión localizada	96
3.10 Desarrollo del examen	97
3.10.1 Selección de las tuberías	97
3.10.2 Limpieza de las tuberías	99
3.10.3 Inspección visual	99
3.10.4 Calibración del equipo para ensayo por haz recto	100
3.10.5 Examen de tubería de prueba	100
3.10.6 Trazado de trayectoria para el ensayo	101
3.10.7 Medición de espesores	101
3.10.8 Calibración del equipo para ensayo por haz angular	104
3.10.9 Examen de tubería de prueba	105
3.10.10 Examen por haz angular	106
3.10.11 Limpieza post examen	107
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	108
4.1 Métodos de evaluación	108
4.1.1 Procedimientos de inspección	109
4.1.2 Reporte de resultados	110
4.1.3 Criterios de aprobación	111

4.2 Evaluación de las indicaciones	111
4.3 Registro y protocolización de los resultados de inspección.....	112
4.4 Evaluación mediante comparación	113
4.4.1 Método de comparación directa.....	114
4.4.2 Método de patrones de referencia	114
4.4.3 Método de curvas de referencia	116
4.4.4 Método de comparación indirecta	117
4.5 Inspección en revisiones de mantenimiento	117
4.5.1 Inspección en instalaciones de la empresa ELECAUSTRO S.A	118
4.5.2 Descripción de las instalaciones	118
4.6 Análisis de resultados.....	120
4.6.1 Análisis de resultados en tubería de agua	120
4.6.2 Análisis de resultados en tubería de vapor	126
4.7 Criterios de aceptación y rechazo	130
4.7.1 Cálculos	131
4.7.1.1 Cálculo del espesor para tubería de agua.....	131
4.7.1.2 Cálculo del espesor para tubería de vapor	132
4.7.2 Análisis de los resultados obtenidos	133
4.8 Metodología para revisión de tuberías en la central Termoeléctrica “El Descanso”	138
4.8.1 Revisión de tuberías.....	140
CONCLUSIONES.....	142
RECOMENDACIONES.....	144
BIBLIOGRAFÍA.....	145
ANEXOS	148

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1.1 DETECCIÓN DE FISURA MEDIANTE TÉCNICA DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	2
FIGURA 1.2 ENSAYO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS CON PUNTOS DE CONTACTO	3
FIGURA 1.3 LÍNEAS DE FUERZA MAGNÉTICA	4
FIGURA 1.4 FUGA DE CAMPO MAGNÉTICO	4
FIGURA 1.5 TINTES PENETRANTES	6
FIGURA 1.6 DETECCIÓN DE FISURA MEDIANTE TINTE PENETRANTE	6
FIGURA 1.7 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL.....	7
FIGURA 1.8 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	10
FIGURA 1.9 CÁMARA TERMOGRÁFICA	11
FIGURA 1.10 TERMOGRAFÍA DE UN MOTOR ELÉCTRICO	12
FIGURA 1.11 INSPECCIÓN TÍPICA POR ULTRASONIDO	13
FIGURA 1.12 ESCALA DE FRECUENCIAS	15
FIGURA 1.13 DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS LONGITUDINALES	17
FIGURA 1.14 AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO DE PARTÍCULA VERSUS VIAJE DE ONDA	17
FIGURA 1.15 ESQUEMA DE ONDAS TRANSVERSALES (DE CORTE). LA LONGITUD DE ONDA λ ES LA DISTANCIA CORRESPONDIENTE A UN CICLO COMPLETO.....	18
FIGURA 1.16 INCIDENCIA NORMAL Y ANGULAR	21
FIGURA 1.17 REFRACCIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS EN UN MATERIAL DE PRUEBA	22
FIGURA 1.18 CONVERSIÓN DE MODO DE LAS ONDAS ACÚSTICAS EN UN MATERIAL DE PRUEBA	22
FIGURA 1.19 PRIMER ÁNGULO CRÍTICO.....	23
FIGURA 1.20 SEGUNDO ÁNGULO CRÍTICO	23
FIGURA 1.21 ESQUEMA Y PARTES DE UN TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDO	27
FIGURA 1.22 TRANSDUCTORES SENCILLOS.....	28
FIGURA 1.23 TRANSDUCTORES DUALES	28
FIGURA 1.24 TRANSDUCTORES DE HAZ ANGULAR	29
FIGURA 1.25 TRANSDUCTORES DE INMERSIÓN.....	29
FIGURA 1.26 TRANSDUCTORES DE ARREGLO DE FASES.....	30

CAPÍTULO II

FIGURA 2.1 MEDIDOR DE ESPESORES.....	32
FIGURA 2.2 MÉTODO DE MEDICIÓN DUAL-MULTI	32
FIGURA 2.3 BARRIDO A-SCAN	33
FIGURA 2.4 BARRIDO B-SCAN.....	33

FIGURA 2.5 DETECTOR DE FALLAS CON PANTALLA LCD.....	34
FIGURA 2.6 EQUIPO ULTRASÓNICO EPOCH XT	35
FIGURA 2.7 PANTALLA CON BARRIDO A-SCAN	37
FIGURA 2.8 DETECCIÓN DE UNA DISCONTINUIDAD CON HAZ RECTO.....	37
FIGURA 2.9 RETARDO DEL PALPADOR.....	38
FIGURA 2.10 MATERIALES PARA CALIBRACIÓN CON HAZ RECTO.....	38
FIGURA 2.11 BLOQUE DE CALIBRACIÓN EN ESCALERA PARA HAZ RECTO	39
FIGURA 2.12 CALIBRACIÓN EN ESPESOR MENOR CON HAZ RECTO.....	40
FIGURA 2.13 CALIBRACIÓN EN ESPESOR MAYOR CON HAZ RECTO	41
FIGURA 2.14 DETECCIÓN DE UNA DISCONTINUIDAD CON HAZ RECTO.....	42
FIGURA 2.15 RELACIÓN SEÑAL – RUIDO.....	44
FIGURA 2.16 TAMAÑO DE LA DISCONTINUIDAD.....	45
FIGURA 2.17 ORIENTACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD	45
FIGURA 2.18 PROPAGACIÓN DEL HAZ DE ONDAS DE CORTE.....	46
FIGURA 2.19 INCIDENCIA DEL HAZ DE ONDAS DE CORTE EN EL BORDE DE UN MATERIAL	47
FIGURA 2.20 DISTANCIA DE SALTO (SD) Y DE MEDIO SALTO (SD/2).....	47
FIGURA 2.21 DISTANCIA DE MEDIO SALTO.....	48
FIGURA 2.22 DETECCIÓN DE UNA DISCONTINUIDAD CON HAZ ANGULAR.....	49
FIGURA 2.23 DETECCIÓN DE DISCONTINUIDAD EN SEGUNDA PIERNA	50
FIGURA 2.24 ÍNDICE DE HAZ PUNTO.....	52
FIGURA 2.25 SEÑAL ÍNDICE DEL HAZ PUNTO.....	53
FIGURA 2.26 ÁNGULO DE REFRACCIÓN	53
FIGURA 2.27 SEÑAL DEL ÁNGULO DE REFRACCIÓN	54
FIGURA 2.28 CALIBRACIÓN DE DISTANCIA	54
FIGURA 2.29 SEÑAL DE CALIBRACIÓN DISTANCIA 4”.....	55
FIGURA 2.30 SEÑAL DE CALIBRACIÓN DISTANCIA DE 9”	55
FIGURA 2.31 SENSIBILIDAD DE CALIBRACIÓN	56
FIGURA 2.32 SEÑAL SENSIBILIDAD DE CALIBRACIÓN	56

CAPÍTULO III

FIGURA 3.1 BLOQUE DE CALIBRACIÓN PARA MEDICIÓN DE ESPESORES POR HAZ RECTO.....	63
FIGURA 3.2 BLOQUE DE CALIBRACIÓN PARA EXÁMENES CON HAZ ANGULAR	63
FIGURA 3.3 BLOQUE DE CALIBRACIÓN PARA TUBERÍAS	64
FIGURA 3.4 EL CAMINO DEL SONIDO AUMENTA PROPORCIONALMENTE CON LA DISMINUCIÓN DE ESPESOR.....	71
FIGURA 3.5 PROPAGACIÓN CIRCUNFERENCIAL DEL SONIDO EN LA PARED DE UNA TUBERÍA.....	74
FIGURA 3.6 PROPAGACIÓN AXIAL DEL SONIDO EN LA PARED DE UNA TUBERÍA.....	74

FIGURA 3.7 FORMAS COMUNES DE LAS MUESCAS	76
FIGURA 3.8 TÉCNICA DE CONTACTO DIRECTO	80
FIGURA 3.9 PRIMER ECO DE REFERENCIA	80
FIGURA 3.10 ECOS NO RELEVANTES	81
FIGURA 3.11 ECO DE CONTACTO Y DE PARED OPUESTA	82
FIGURA 3.12 SUPUESTA UBICACIÓN DE UNA FALLA EN PROFUNDIDAD X	83
FIGURA 3.13 RECORRIDO DEL SONIDO Y ECOS LATERALES EN UNA BARRA	83
FIGURA 3.14 ECOS ADICIONALES EN PIEZAS CILÍNDRICAS	84
FIGURA 3.15 SECUENCIA NORMAL DE ECOS EN LA TÉCNICA DE INMERSIÓN	87
FIGURA 3.16 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA TÉCNICA DELTA	87
FIGURA 3.17 TÉCNICA PITCH AND CATCH	88
FIGURA 3.18 BARRIDO EN FORMA CIRCUNFERENCIAL	91
FIGURA 3.19 INSPECCIÓN CON ZAPATA	91
FIGURA 3.20 VALORES DE SD Y DA	93
FIGURA 3.21 TABLA DE VALORES FP Y FS	93
FIGURA 3.22 TRAZADO DE ZONAS PARA LA INSPECCIÓN	96
FIGURA 3.23 TUBERÍA PARA AGUA DE ENFRIAMIENTO	98
FIGURA 3.24 TUBERÍA PARA AGUA DE ENFRIAMIENTO	98
FIGURA 3.25 TUBERÍA PARA VAPOR	99
FIGURA 3. 26 IRREGULARIDADES EN LA SUPERFICIE	99
FIGURA 3.27 MEDICIÓN DE ESPESORES EN TUBERÍA DE PRUEBA	100
FIGURA 3.28 LECTURA DE ESPESOR EN TUBERÍA DE PRUEBA	100
FIGURA 3.29 TRAZADO DE TRAYECTORIA PARA REALIZAR EL EXAMEN	101
FIGURA 3.30 MEDICIÓN DE ESPESOR	101
FIGURA 3. 31 MÁXIMO ESPESOR OBTENIDO EN LA TUBERÍA	102
FIGURA 3.32 MEDICIÓN DE ESPESOR	102
FIGURA 3.33 MÍNIMO ESPESOR OBTENIDO EN LA TUBERÍA	103
FIGURA 3. 34 MEDICIÓN DE ESPESOR CON CALIBRADOR	103
FIGURA 3.35 ESPESOR ≈ 1.8	103
FIGURA 3.36 MEDICIÓN DE ESPESOR	104
FIGURA 3.37 ESPESOR OBTENIDO	104
FIGURA 3.38 ZAPATA DE 45°	105
FIGURA 3.39 EXAMEN POR HAZ ANGULAR EN TUBERÍA DE PRUEBA	105
FIGURA 3.40 LECTURA DE IMPERFECCIÓN EN TUBERÍA DE PRUEBA	106
FIGURA 3. 41 EXAMEN POR HAZ ANGULAR EN TUBERÍA DE PRUEBA	106
FIGURA 3.42 LECTURA DE IMPERFECCIÓN EN TUBERÍA DE PRUEBA	107
FIGURA 3.43 UBICACIÓN DE IMPERFECCIÓN EN LA TUBERÍA DE PRUEBA	107

CAPÍTULO IV

FIGURA 4.1 FORMATO DE REPORTE DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO	113
--	-----

FIGURA 4.2	COMPARACIÓN DIRECTA EN LA INSPECCIÓN DE SOLDADURAS.....	114
FIGURA 4.3	UBICACIÓN DE RANURAS TÍPICAS PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS SOLDADAS.....	115
FIGURA 4.4	REFLECTORES COMUNES DE REFERENCIA	116
FIGURA 4.5	DIAGRAMA AVG NORMALIZADO O UNIVERSAL.....	117
FIGURA 4.6	CENTRAL TERMOELÉCTRICA “EL DESCANSO”	118
FIGURA 4.7	ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LA TUBERÍA DE AGUA EN LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA	119
FIGURA 4.8	UBICACIÓN DE LA TUBERÍA DE VAPOR EN LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA	120
FIGURA 4.9	TUBERÍAS DE AGUA PARA REFRIGERACIÓN DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE LOS MOTORES ESTACIONARIOS.....	121
FIGURA 4.10	ESTADO DE LA TUBERÍA DE AGUA SELECCIONADA	121
FIGURA 4.11	TRAZADO DE LAS SECCIONES DE LA TUBERÍA DE AGUA A INSPECCIONAR.....	122
FIGURA 4.12	ESPESOR MÍNIMO DE LA SECCIÓN 1, DE LA TUBERÍA DE AGUA.....	123
FIGURA 4.13	DETECCIÓN DE DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL EN LA TUBERÍA DE AGUA	123
FIGURA 4.14	VALOR DE LA DISTANCIA DE LA DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA DE AGUA.....	124
FIGURA 4.15	RALLADURA SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA DE AGUA.....	124
FIGURA 4.16	DETECCIÓN DE DISCONTINUIDAD INTERNA EN LA TUBERÍA DE AGUA	125
FIGURA 4.17	VALOR DE LA DISTANCIA DE LA DISCONTINUIDAD INTERNA EN LA TUBERÍA DE AGUA.....	125
FIGURA 4.18	ZONA DE LA DISCONTINUIDAD INTERNA POR DESPRENDIMIENTO DE MATERIAL	126
FIGURA 4.19	ESTADO SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA DE VAPOR.....	126
FIGURA 4.20	ESTADO INTERNO DE LA TUBERÍA DE VAPOR	127
FIGURA 4.21	DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LA TUBERÍA DE VAPOR.....	127
FIGURA 4.22	VALOR DEL ESPESOR DE LA TUBERÍA DE VAPOR	128
FIGURA 4.23	DETERMINACIÓN DE DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL EN LA TUBERÍA DE VAPOR	128
FIGURA 4.24	VALOR DE LA DISTANCIA DE LA DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL EN LA TUBERÍA DE VAPOR.....	129
FIGURA 4.25	DIAGNOSTICO SIN IMPERFECCIONES EN TUBERÍA	129
FIGURA 4.26	CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN DE MOTOR.....	131
FIGURA 4.27	PRESIÓN DEL SISTEMA DE VAPOR	131
FIGURA 4.28	SUPERFICIE INTERNA DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AGUA	133
FIGURA 4.29	SUPERFICIE EXTERNA DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE VAPOR	134
FIGURA 4.30	SUPERFICIE EXTERNA DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE VAPOR	135

FIGURA 4.31 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO	136
FIGURA 4.32 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CALDERO	137

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

TABLA 1.1 PROPIEDADES ACÚSTICAS DE ALGUNOS METALES Y NO METALES.....	19
---	-----------

CAPÍTULO III

TABLA 3.1 IMPERFECCIÓN VS TIPO DE MÉTODO DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO.....	59
---	-----------

TABLA 3.2 VELOCIDAD DEL SONIDO A TRAVÉS DE ALGUNOS MATERIALES	67
--	-----------

TABLA 3.3 DISTANCIA ANGULAR A TRAVÉS DE DIFERENTES ÁNGULOS DE ZAPATAS	92
--	-----------

CAPÍTULO IV

TABLA 4.1 VALORES DE ESPESORES OBTENIDOS EN TUBERÍA DE AGUA. [22]	122
--	------------

TABLA 4.2 ESCALA DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS MATERIALES METÁLICOS	139
--	------------

RESUMEN

En toda actividad industrial existe la tendencia al mejoramiento de las técnicas tanto de diseño, constructivas y de mantenimiento. Los procesos de mantenimiento se han desarrollado con el transcurrir del tiempo para generar técnicas con el fin de prevenir posibles daños o mal funcionamiento de equipos.

Es así que surgen los ensayos no destructivos que, como su nombre lo indica, son procedimientos de comprobación del estado en el que se encuentran los elementos en estudio, pero sin producir ningún efecto desfavorable sobre ellos durante el examen, además en muchos casos no es necesario el desmontaje de los elementos para su análisis significando por ello ahorro de tiempo y dinero.

Existe una variedad de técnicas no destructivas, sin embargo la utilización de alguna de ellas dependerá sobre todo del tipo de defecto que se desee encontrar (porosidades, laminaciones, grietas, etc.) y del elemento que se necesite examinar.

En el presente trabajo se ha estudiado la técnica de ultrasonido industrial para su posterior utilización en el análisis de tuberías de conducción de agua y vapor de una central termoeléctrica.

Para el análisis de la técnica de ultrasonido industrial se han estudiado tanto el catálogo del equipo empleado (EPOCH XT), así como la norma que regula todos los ensayos no destructivos (norma ASME BPVC V-2010). En la norma se establecen los requerimientos para la ejecución del examen, como son el equipo (tipo y calibración del mismo), el personal que ejecutará el examen, la preparación del material a examinar, el medio acoplante, así como también los procedimientos para calibración del equipo y examen de los materiales. Un aspecto muy importante a tomar en cuenta para el procedimiento de análisis es la interpretación de las lecturas obtenidas en el examen (gráficas), para lo cual es necesario tener experiencia en el desarrollo de estas prácticas.

Una vez realizados los ensayos, se deben realizar los correspondientes análisis para determinar si el material estudiado debe o no continuar operando, por lo tanto es

indispensable el uso de criterios de aceptación o rechazo, los cuales deben ser determinados por las partes interesadas antes de la ejecución del examen. A la finalización del presente trabajo se ha empleado la norma ASME B31.3-2010 (norma para diseño de tuberías) para establecer el criterio de aceptación o rechazo.

Todo este procedimiento debe ser complementado en el contexto del entorno donde han venido trabajando las tuberías y con los datos obtenidos del ensayo se ha llegado a determinar la continuidad de la tubería para vapor y el retiro de la tubería para agua.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PARA DETECCIÓN DE FALLAS.

1.1 Introducción

En los diferentes procesos productivos encontramos siempre la tendencia hacia un mejoramiento continuo en procesos de elaboración, almacenamiento, control de calidad, entre otros, y como medios para alcanzar estos fines se tienen nuevas tecnologías, y se aplican técnicas más apropiadas. En éste ámbito, las pruebas mecánicas fueron creadas con la finalidad de conocer el estado de los materiales, sin embargo, las pruebas destructivas utilizadas tradicionalmente, tienen el inconveniente de que terminan con la vida útil de los elementos sujetos a prueba, fue entonces que surgieron los ensayos no destructivos, con los cuales se puede determinar el estado de los materiales sin dañarlos.

Los ensayos no destructivos son una parte muy importante del control de calidad y representan un complemento de otros métodos establecidos en tareas de mantenimiento en determinada planta. Esta técnica puede ser aplicada en un muestreo para una investigación individual o se puede utilizar para inspeccionar todo el material en un sistema de control de calidad.

Dada su versatilidad, estos ensayos pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones industriales, entre las principales se tienen la comprobación de fisuras internas en elementos de máquinas, comprobación de espesores en tuberías, irregularidades en uniones por soldadura y desgaste en recipientes o tanques de almacenamiento.

1.2 Tipos de ensayos no destructivos

1.2.1 Inspección visual

La inspección visual es un ensayo que permite la apreciación rápida del estado superficial en el que se encuentran las piezas, o incluso permite tener una noción

sobre si el objeto de estudio ha sido sometido a altas temperaturas o corrosión con el simple uso del ojo humano.

Por otro lado, no garantiza que el objeto de ensayo esté en buen o mal estado, puede considerarse a este método como un paso preliminar al empleo de un proceso más especializado (tintes penetrantes, ultrasonido, termografía, etc.) que brinde al encargado de la inspección las suficientes pruebas para asegurar el estado del elemento de estudio.

En la inspección visual se puede utilizar algunos elementos que permitan que el grado de apreciación sea mejor, tal es el caso del uso de lupas, anteojos, e incluso para la observación de sectores de difícil acceso, por ejemplo en la inspección de tuberías, se recomienda la utilización de boroscopios, espejos o videocámaras.

1.2.2 Inspección por partículas magnéticas

El ensayo por partículas magnéticas se aplica solamente para inspección de materiales con propiedades ferromagnéticas, ya que se utiliza fundamentalmente el flujo magnético dentro de la pieza, para la detección de discontinuidades.

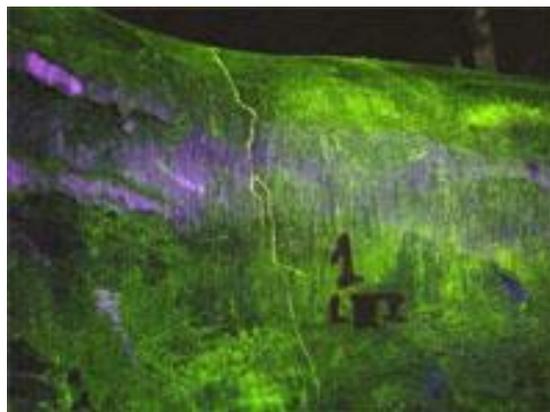


Figura 1.1 Detección de fisura mediante técnica de partículas magnéticas. [1]

Mediante esta inspección se puede lograr la detección de defectos superficiales y subsuperficiales (hasta 3 mm debajo de la superficie del material) por lo tanto es muy importante la preparación de la superficie a examinar.

La aplicación del ensayo de partículas magnéticas consiste básicamente en magnetizar la pieza a inspeccionar, aplicar las partículas magnéticas (polvo fino de limaduras de hierro) y evaluar las indicaciones producidas por la agrupación de las partículas en ciertos puntos. Este proceso varía según los materiales que se usen, los defectos a buscar y las condiciones físicas del objeto de inspección. Para la magnetización se puede utilizar un banco estacionario, un yugo electromagnético, electrodos, o un equipo portátil de bobina flexible entre otros. Se utilizan los diferentes tipos de corrientes (alterna, directa, semi-rectificada, etc.), según las necesidades de cada inspección. El uso de imanes permanentes ha ido desapareciendo, ya que en éstos no es posible controlar la fuerza del campo y son muy difíciles de manipular¹.

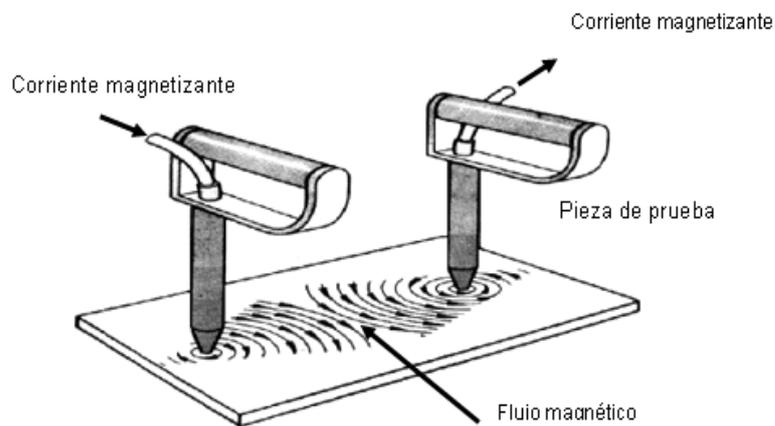


Figura 1.2 Ensayo de partículas magnéticas con puntos de contacto. [2]

Para realizar la inspección por partículas magnéticas existen varios tipos de materiales que se pueden seleccionar según la sensibilidad deseada, las condiciones ambientales y los defectos que se quieren encontrar.

1.2.2.1 Principios básicos

Un imán permanente se compone por dos polos, Norte y Sur, los cuales determinan la dirección de las líneas de flujo magnético que viajan a través de él y por el espacio que lo rodea, siendo cada vez más débiles con la distancia.

¹ <http://www.isotec.com.co/portal2/index.php?id=55>

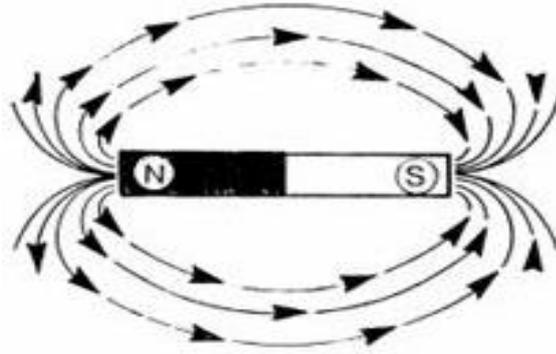


Figura 1.3 Líneas de fuerza magnética. [3]

Una vez magnetizado el objeto de estudio, éste se comporta como un imán, es decir, se crean en él dos polos magnéticos. Estos determinan la dirección de las líneas de flujo magnético, las cuales viajan de Norte a Sur. Teniendo la pieza magnetizada (magnetización residual), y/o bajo la presencia constante del campo magnético externo (magnetización continua), se aplica el polvo de limadura de hierro seco, o suspendido en un líquido (agua o algún destilado del petróleo). Donde se encuentre una perturbación o una fuga en las líneas de flujo magnético, las pequeñas partículas de hierro se acumularán, formando la indicación visible o fluorescente, dependiendo del material usado¹.



Figura 1.4 Fuga de campo magnético. [1]

Al igual que en la mayoría de los ensayos no destructivos, en la inspección con partículas magnéticas intervienen muchas variables (corriente eléctrica, dirección del campo, tipo de materiales usados, etc.), las cuales deben ser correctamente manejadas por el inspector para obtener los mejores resultados. Por esta razón las normas MIL, ASTM, API, AWS y ASME entre muchas otras, y los manuales de

mantenimiento, exigen la calificación y certificación del personal que realiza este tipo de pruebas, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados y así contribuir a la calidad del producto. Entre las regulaciones más conocidas de certificación de personal se encuentran: NAS-410, ISO 9712, SNT- TC-1A, ANSI/ASNT CP-189 y EN-473¹.

1.2.3 Inspección por líquidos penetrantes

Mediante la inspección con tintes penetrantes, pueden detectarse discontinuidades como grietas que entran en la superficie. Un tinte líquido es atraído por acción capilar hacia una grieta delgada, que de otra manera resultaría invisible. Hay cuatro etapas en este proceso. La superficie primero se limpia completamente; se rocía sobre ella un tinte líquido y se le deja actuar durante un periodo de tiempo durante el cual el tinte es atraído hacia cualquier discontinuidad superficial. La tinta excedente entonces se limpia retirándola de la superficie del metal. Finalmente, sobre ésta se rocía una solución reveladora, la cual reacciona con cualquier tinte que haya quedado y lo extrae de las grietas. Entonces la pintura ya puede ser observada, debido a los cambios de color del revelador o porque se vuelve fluorescente bajo luz ultravioleta.

1.2.3.1 Materiales

Los penetrantes se clasifican por niveles de sensibilidad. Penetrantes visibles son típicamente de color rojo, y representan la sensibilidad más baja. Penetrantes fluorescentes contienen dos o más colorantes que presentan fluorescencia cuando es excitado por la radiación ultravioleta. La inspección penetrante fluorescente se realiza en un ambiente oscuro, y los tintes excitados emiten luz de color verde-amarillo brillante que contrasta fuertemente contra el fondo oscuro, este material es más sensible a los defectos.

Siempre hay que asegurarse de que los productos químicos de ensayo son compatibles con la muestra, de manera que el examen no causa manchas o degradación permanente. Esta técnica puede ser muy portable, ya que, en su forma más simple, la inspección sólo requiere tres latas de aerosol (Figura 1.5), paños sin pelusa, y la luz visible adecuada.



Figura 1.5 Tintes penetrantes. [4]

1.2.3.2 Medidas de inspección

La inspección de la superficie de prueba debe llevarse a cabo después de 10 a 30 minutos del tiempo de desarrollo, este retardo de tiempo permite que se produzca la acción secante.

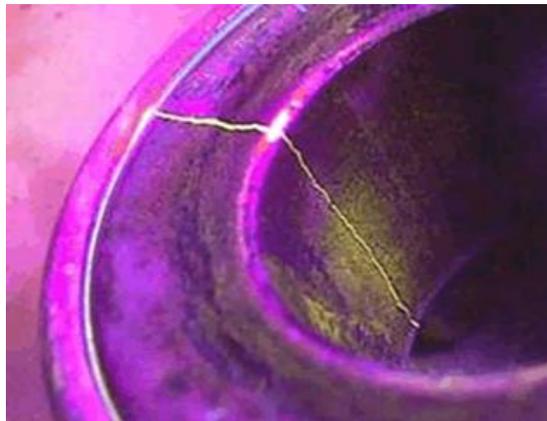


Figura 1.6 Detección de fisura mediante tinte penetrante. [5]

1.2.4 Radiografía industrial

La inspección por radiografía industrial, se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física de un material.

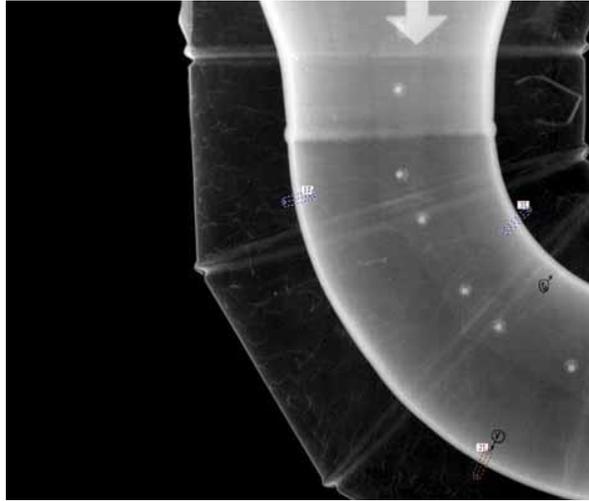


Figura 1.7 Radiografía Industrial. [6]

Al aplicar este método, normalmente se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, debido a que se emplea radiación de alta energía que es capaz de penetrar materiales sólidos, debido a que el propósito principal de este tipo de inspección es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades presentes en dicho material. Por lo anterior, esta prueba es utilizada para detectar discontinuidades internas en una amplia variedad de materiales.

La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión en una placa o papel fotosensible, que posteriormente se somete a un proceso de revelado para obtener la imagen del área inspeccionada; o bien, por medio de una pantalla fluorescente o un tubo de video, para después analizar su imagen en una pantalla de televisión o grabarla en una cinta de video.

1.2.4.1 Requisitos y secuencia de la inspección por radiografía

Inicialmente, deben conocerse algunas características del material que se va a examinar, como son: tipo del metal, su configuración, el espesor de la pared a ser radiografiada, etc. Todo ello con el fin de seleccionar el radioisótopo o el voltaje más adecuados.

Una vez establecida la fuente de radiación, se deben calcular las distancias entre ésta,

el objeto y la película, para así poder obtener la nitidez deseada. Igualmente, se selecciona la película con ciertas características que permitan una exposición en un tiempo razonable y una calidad de imagen óptima. Esta se coloca dentro de una porta-película que sirve como protección para evitar que la luz dañe la emulsión fotográfica, y además contiene las pantallas intensificadoras que sirven para reducir el tiempo de exposición, mejorando con esto la calidad de la imagen. Este último proceso se efectúa en el laboratorio.

Una vez realizado lo anterior, se procede a poner en práctica las medidas de seguridad radiológica en la zona en la que se va a efectuar la radiografía con el fin de evitar una sobredosis al personal que pueda estar laborando cerca de la zona de inspección.

A continuación, se hace el arreglo para colocar la fuente a la distancia calculada con respecto al objeto y se coloca la película radiográfica del otro lado de éste para registrar la radiación que logre atravesar al material sujeto a inspección.

Esta radiación provoca la impresión de la película radiográfica, que corresponde al negativo de una fotografía. Entre mayor sea la cantidad de radiación que incida sobre la película, más se ennegrecerá ésta. Al realizar la inspección, los indicadores de calidad de imagen se eligen normalmente de manera que el espesor de éstos represente aproximadamente el 2% del espesor de la parte a inspeccionar y, siempre que sea humanamente posible, se colocarán del lado de la fuente de radiación.

La exposición se realiza, bien sea sacando la cápsula que contiene al radioisótopo o encendiendo al aparato de rayos X; esto se lleva a cabo durante el tiempo previamente calculado para realizar la exposición. Una vez terminada la exposición, se recupera la cápsula o se apaga el instrumento de rayos X y la película se lleva a revelar.

Si se comprueba que la imagen es satisfactoria, entonces se interpreta para conocer qué tipo de indicaciones están presentes; las cuales posteriormente serán evaluadas para conocer su nivel de severidad y su posible efecto en el material que se inspecciona.

1.2.4.2 Aplicaciones

En primer lugar, están las aplicaciones en las que se emplea la energía radiante y su efecto sobre la materia, como es el caso de las aplicaciones físicas (efectos de fluorescencia), médicas (destrucción de ciertas células) y biológicas (mutaciones o aplicaciones de esterilización biológica).

En segundo lugar, deben mencionarse las aplicaciones en las cuales se emplean los efectos físicos, como son la difracción (determinación de estructuras cristalográficas), fluorescencia (determinación de composición química) y la ionización (detección de la radiación), etc.

En tercer lugar, se tienen las aplicaciones en las que se mide la atenuación de la radiación, como es el caso de la medición de espesores en procesos de alta temperatura; la medición de niveles de fluidos; la determinación de densidades en procesos de producción continua y la radiografía industrial.

Finalmente, resta aclarar que la corta longitud de onda de la radiación que emplea la radiografía le permite penetrar materiales sólidos, que absorben o reflejan la luz visible; lo que da lugar al uso de esta técnica en el control de calidad de productos soldados, fundiciones, forjas, etc.; para la detección de defectos internos microscópicos tales como grietas, socavados, penetración incompleta en la raíz, falta de fusión, etc.

1.2.5 Termografía

La Termografía infrarroja es la técnica de producir una imagen visible a partir de radiación infrarroja invisible para el ojo humano, emitida por objetos de acuerdo a su temperatura superficial, además es una técnica que permite visualizar las temperaturas sin ningún contacto con el elemento que se está analizando. La física permite convertir las mediciones de la radiación infrarroja, en medición de temperatura, esto se logra midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas.

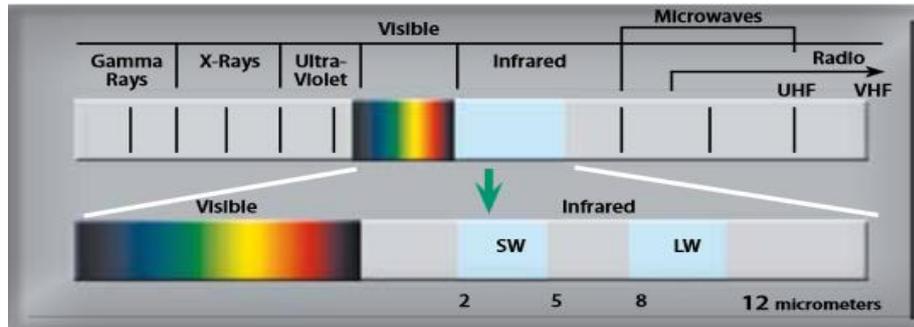


Figura 1.8 Espectro electromagnético. [7]

Esta señal eléctrica es la señal de entrada que la cámara termográfica necesita para generar una imagen de un espectro de colores, en el que cada uno de los colores, según una escala determinada, significa una temperatura distinta, de manera que la temperatura medida más elevada aparece en color blanco.

1.2.5.1 Funcionamiento de una cámara termográfica

El funcionamiento de una cámara termográfica como la que se muestra en la figura 1.9, es el siguiente: la energía infrarroja (A) que proviene de un objeto se hace converger, por medio de la óptica (B) sobre un detector de infrarrojo (C). El detector envía la información al conjunto sensor electrónico (D) para que se procese una imagen, el conjunto electrónico utiliza los datos que provienen del detector para crear una imagen (E) que puede verse en el visor o en un monitor de vídeo o pantalla cualquiera. La termografía infrarroja transforma una imagen infrarroja en radiométrica, lo que permite leer los valores de temperatura a partir de la imagen. Para hacerlo la cámara infrarroja cuenta con algoritmos complejos².

² http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820402/T820402_ES.pdf

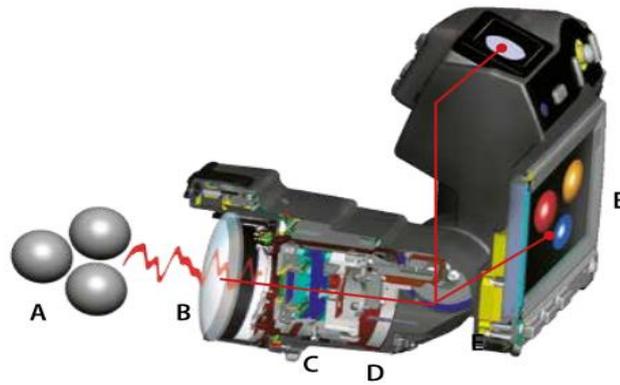


Figura 1.9 Cámara termográfica. [7]

1.2.5.2 Procedimientos de obtención

Existen varias técnicas para detectar discontinuidades utilizando termografía infrarroja. La diferencia entre los métodos se basa, principalmente, en cómo la energía calorífica se transfiere al componente en cuestión. Estos métodos se pueden clasificar en termografía pasiva y activa o vibrotermografía. La elección de un determinado método depende de varios factores, incluyendo las características térmicas del cuerpo que se está inspeccionando; del tipo, tamaño y orientación del defecto a localizar; de la forma en la que el calor se induce en el cuerpo; de la sensibilidad y resolución espacial de las imágenes infrarrojas; y de las restricciones presupuestarias.

1.2.5.3 Proceso de inspección

En el proceso de inspección termográfica es posible definir, en general, las siguientes etapas:

- Planificación de la inspección en los períodos en los que las condiciones son más desfavorables (alta carga, máxima velocidad de giro, etc.).
- Evaluación y clasificación de los calentamientos detectados.
- Emisión de informes, con identificación de las fallas y el grado de urgencia para su reparación.

- Seguimiento de la reparación.
- Revisión termográfica para evaluar la efectividad del mantenimiento correctivo realizado.

1.2.5.4 Interpretación

Como primera aproximación, pueden tomarse como referencia las siguientes variaciones sobre la temperatura habitual, a fin de determinar un programa de reparación (obviamente se deben considerar el tipo de elemento que se está analizando, en el caso de la Figura 1.10 se muestra un motor eléctrico):

- **Hasta 20°C.** Indica problemas, pero la reparación no es urgente. Se puede efectuar en paradas programadas.
- **20°C a 40°C.** Indica que la reparación requerida es urgente dentro de los 30 días.
- **40°C y más.** Indica una condición de emergencia. La reparación, se debe realizar de inmediato.

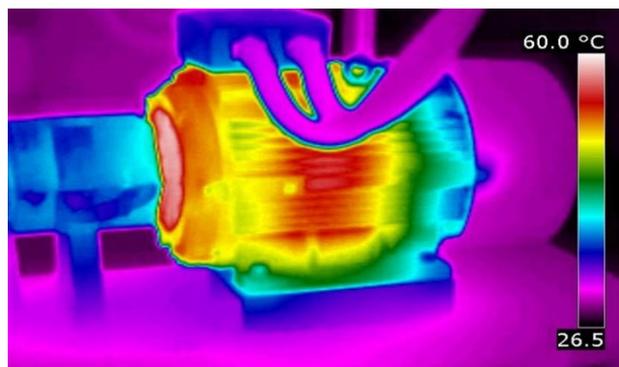


Figura 1.10 Termografía de un motor eléctrico. [8]

1.2.6 Ultrasonido industrial

En la inspección por ultrasonido se utiliza la energía del sonido de alta frecuencia para detectar discontinuidades internas en los materiales y hacer mediciones de

espesor del material. También puede ser utilizada para la evaluación de discontinuidades, mediciones dimensionales, clasificación de materiales y más³.

La inspección por ultrasonido industrial (UT) se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material.

1.3 Inspección por ultrasonido

La inspección por ultrasonido, es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y sub-superficie. En sólidos, las ondas acústicas pueden propagarse en cuatro formas principales de acuerdo a la forma en que oscilan las partículas: ondas longitudinales, ondas transversales, ondas superficiales y, en materiales delgados como ondas laminares.

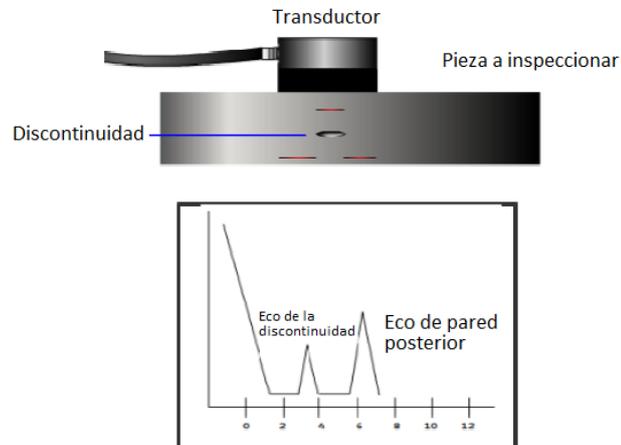


Figura 1.11 Inspección típica por ultrasonido. [9]

Las ondas de sonido 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 fallas y discontinuidades.

³ La inspección y evaluación no destructiva por el método de ultrasonido, en materiales y componentes, para el mantenimiento y la sustentabilidad de la infraestructura industrial. Gerardo Patricio López Lina

Grietas, laminaciones, poros, socavados y otras discontinuidades que producen interfaces reflectivas pueden ser detectadas fácilmente, inclusiones y otras partículas extrañas pueden ser también detectadas causando baja reflexión.

La mayoría de las inspecciones ultrasónicas son realizadas en frecuencias entre 0.1 y 25 MHz. 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.

Su principal aplicación es la detección de discontinuidades y defectos internos, aunque también es utilizado para detectar defectos superficiales, para definir características de la superficie tales como: medida de corrosión y espesor. Y con frecuencias menores sirve para determinar el tamaño de grano, estructura, y constantes elásticas.

1.3.1 Equipo básico

La mayoría de los equipos de inspección por ultrasonido incluyen el siguiente equipo básico:

- Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas.
- Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas.
- Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) de la pieza al transductor.

- Un transductor para aceptar y convertir las ondas de ultrasonido de salida de la pieza de trabajo en ráfagas de voltaje. En la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor.
- Un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte ya sea impresa o en pantalla.
- Un reloj electrónico o un cronómetro para controlar la operación de varios componentes del sistema.

1.3.2 Características generales de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una sustancia. Se pueden propagar a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío.

El sonido y el ultrasonido, son ondas acústicas de la misma naturaleza, lo único que las diferencia es el número de oscilaciones o vibraciones que sufren las partículas del medio durante su propagación.

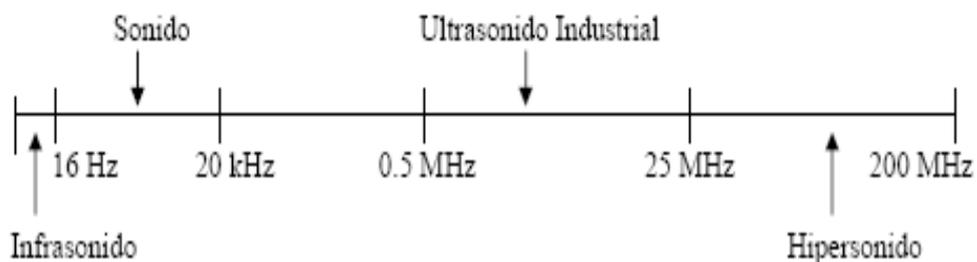


Figura 1.12 Escala de frecuencias. [9]

En varios aspectos, un haz de ultrasonido es similar a un haz de luz, ambos 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. Como un haz de luz, un haz de ultrasonido es reflejado de las superficies, refractado cuando cruza las fronteras entre dos sustancias que tienen diferentes características de velocidades y difractados en los bordes o alrededor de los obstáculos.

1.3.3 Propagación de las ondas

Las ondas ultrasónicas se propagan en cierta medida en cualquier material elástico; cuando las partículas atómicas o moleculares de un material elástico son desplazadas de sus posiciones de equilibrio por cualquier fuerza aplicada.

La amplitud, 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. La relación de velocidad con frecuencia y longitud de onda está dada por:

$$V = f \cdot \lambda$$

Dónde V es la velocidad (en metros por segundo), f es la frecuencia (en Hertz) y λ es la longitud de onda (en metros por ciclo).

1.3.4 Propiedades de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas pueden desplazarse por el medio en forma de ondas longitudinales (las partículas vibran en la dirección de propagación de la onda), transversales (las partículas vibran perpendicularmente) o de superficie (los movimientos de las partículas forman elipses en un plano paralelo a la dirección de propagación y perpendicular a la superficie).

1.3.4.1 Ondas longitudinales ultrasónicas

Algunas veces llamadas ondas de compresión, son el tipo de ondas ultrasónicas mayormente utilizadas en la inspección de materiales. Estas ondas (Figura 1.13) viajan a través de los materiales como series alternadas de compresión y succión en las cuales las partículas transmiten las vibraciones de regreso y en la dirección de viaje de las ondas.

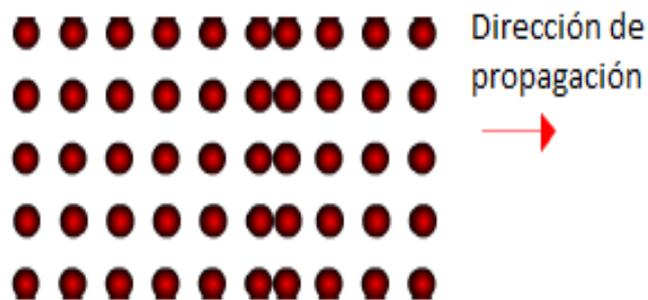


Figura 1.13 Dirección de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales. [9]

Una gráfica de la amplitud del desplazamiento de partícula versus el viaje de onda en conjunto con la onda de succión a través de una cresta de compresión se muestra en la figura 1.14.

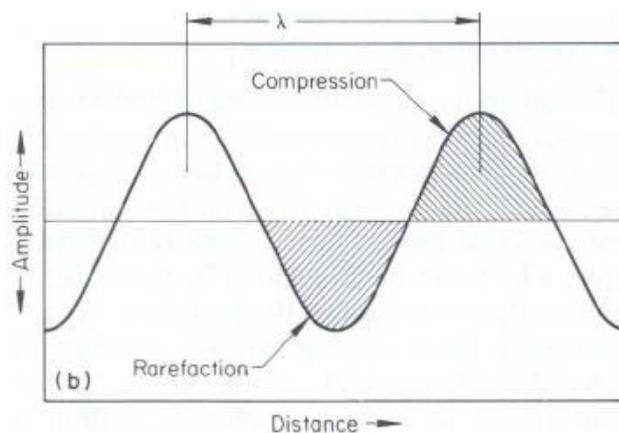


Figura 1.14 Amplitud del desplazamiento de partícula versus viaje de onda. [10]

La velocidad de una onda longitudinal ultrasónica es de 6000 m/s en aceros, 1500 m/s en agua y 330 m/s en aire.

1.3.4.2 Ondas transversales ultrasónicas

Las ondas transversales son también utilizadas ampliamente en la inspección ultrasónica de los materiales. Podemos visualizar las ondas transversales en términos de vibraciones como una cuerda que se agita rítmicamente, en la que cada partícula en lugar de vibración paralela a la dirección del oleaje como a la onda longitudinal, vibra hacia arriba y hacia abajo en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

Una onda transversal se ilustra esquemáticamente en la siguiente figura, donde se muestra la oscilación de la partícula, el frente de onda, dirección del viaje de la onda y longitud de onda correspondiente a un ciclo.

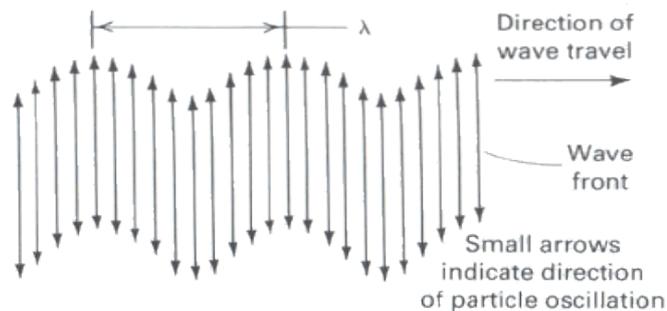


Figura 1.15 Esquema de ondas transversales (de corte). La longitud de onda λ es la distancia correspondiente a un ciclo completo. [10]

A diferencia de las ondas longitudinales, las ondas transversales no pueden ser soportadas por una colisión elástica de las partículas o moléculas adyacentes.

1.3.4.3 Ondas superficiales

Son otro tipo de ondas ultrasónicas utilizadas en la inspección de materiales. Estas ondas viajan a través de la superficie plana o curva de materiales sólidos. Para la propagación de ondas de este tipo, las ondas deben de viajar a través de una interface limitada. Tienen una velocidad aproximada de 90% de la velocidad de las ondas transversales en el mismo material.

1.3.5 Propiedades acústicas de algunos metales

Las propiedades acústicas de algunos metales se listan en la tabla 1.1, las propiedades acústicas de los metales y aleaciones están influenciadas por variaciones en la estructura y condiciones metalúrgicas.

Material	Density (ρ), g/cm ³	Sonic velocities, 10 ⁵ cm/s			Acoustic impedance (Z_1), 10 ⁶ g/cm ² · s(d)
		V_l (a)	V_t (b)	V_s (c)	
Ferrous metals					
Carbon steel, annealed	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
Alloy steel					
Annealed	7.86	5.95	3.26	3.0	4.68
Hardened	7.8	5.90	3.23	...	4.6
Cast iron	6.95–7.35	3.5–5.6	2.2–3.2	...	2.5–4.0
52100 steel					
Annealed	7.83	5.99	3.27	...	4.69
Hardened	7.8	5.89	3.20	...	4.6
D6 tool steel					
Annealed	7.7	6.14	3.31	...	4.7
Hardened	7.7	6.01	3.22	...	4.6
Stainless steels					
Type 302	7.9	5.66	3.12	3.12	4.47
Type 304L	7.9	5.64	3.07	...	4.46
Type 347	7.91	5.74	3.10	2.8	4.54
Type 410	7.67	5.39	2.99	2.16	4.13
Type 430	7.7	6.01	3.36	...	4.63

Tabla 1.1 Propiedades acústicas de algunos metales y no metales. [10]

El sonido viaja a diversas velocidades en diversos materiales. Esto es porque la masa de los átomos y las constantes los módulos de elasticidad son diferentes para cada material. La masa de las partículas se relaciona con la densidad del material, y la constante del resorte se relaciona con las constantes elásticas de un material. La relación general entre la velocidad del sonido en un sólido, su densidad y las constantes elásticas está dada por la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$$

Donde V es la velocidad del sonido, C es la constante elástica y ρ es la densidad del material. Esta ecuación puede tomar un número diferente de formas, dependiendo del tipo de onda (longitudinal o de corte) y qué constantes elásticas se está usando.

1.3.6 Impedancia acústica

La impedancia acústica es la resistencia que opone un material a la propagación del sonido y está definida como el producto de su densidad ρ y la velocidad acústica V .

$$Z = \rho \cdot V$$

La impedancia acústica es importante en:

- La determinación de la transmisión y la reflexión acústicas en el límite de dos materiales que tiene diversas impedancias acústicas.
- El diseño de transductores ultrasónicos.
- La determinación de la absorción del sonido en un medio.

1.3.7 Coeficientes de transmisión y reflexión

Las ondas ultrasónicas se reflejan en los límites donde hay una diferencia en las impedancias acústicas de los materiales en cada lado del límite. A estos límites se les llama interfaces acústicas. Esta diferencia en las impedancias acústicas se conoce comúnmente como la unión mal hecha entre materiales. Cuanto mayor es el mal acoplamiento de los materiales, mayor es el porcentaje de energía que será reflejado en la interfaz o el límite entre un medio y otro. Cuando se conocen las impedancias acústicas de los materiales en ambos lados del límite, la fracción de la intensidad de la onda incidente que se refleja se puede calcular con la siguiente fórmula, el valor obtenido se conoce como el coeficiente de reflexión.

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2$$

Comúnmente se tiene dos situaciones que se relacionan con la reflexión:

- Cuando la onda que incide es perpendicular a la interface acústica (incidencia normal), la reflexión se presentará hacia la fuente generadora, en la misma dirección pero con el sentido opuesto.
- Cuando la onda incidente es oblicua a la interface acústica (incidencia angular), la onda se refleja con un ángulo igual al de incidencia.

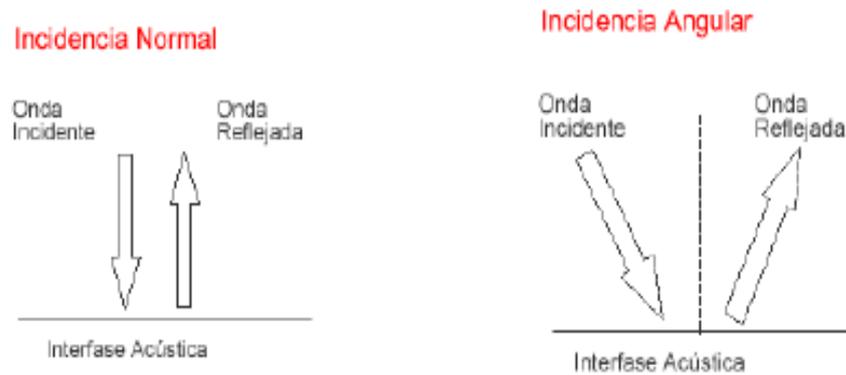


Figura 1.16 Incidencia Normal y Angular. [9]

De la cantidad total de energía incidente, una parte es reflejada y otra parte es transmitida al segundo medio. Existe una relación entre la intensidad de la onda que es transmitida al segundo medio y el total de energía incidente. Esta relación se conoce como el coeficiente de transmisión.

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

1.3.8 Refracción

Cuando una onda ultrasónica pasa a través de una interfaz entre dos materiales a un ángulo oblicuo, y los materiales tienen diversos índices de refracción, se producen ondas reflejadas y ondas refractadas. La refracción ocurre en una interfaz debido a las diferentes velocidades de las ondas acústicas dentro de los dos materiales. La velocidad del sonido en cada material es determinada por las características físicas para ese material. Cuando la onda encuentra la interfaz entre estos dos materiales, la

porción de la onda en el segundo material se está moviendo más rápidamente que la porción de onda en el primer material. Se puede ver que esta característica hace que la onda se doble.

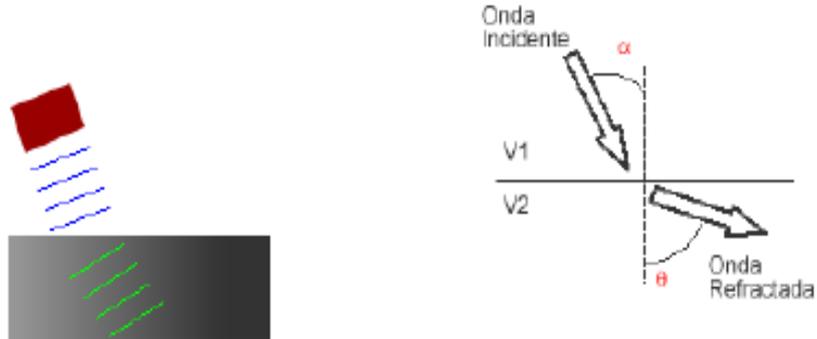


Figura 1.17 Refracción de ondas acústicas en un material de prueba. [9]

1.3.9 Conversión de modo

La conversión de modo ocurre cuando una onda encuentra una interfaz entre los materiales de diversas impedancias acústicas y el ángulo incidente no es normal a la interfaz.

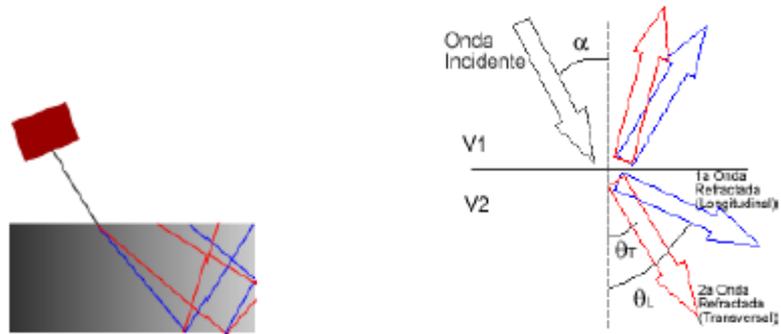


Figura 1.18 Conversión de modo de ondas acústicas en un material de prueba. [9]

Cuando una onda longitudinal se refleja dentro del material, la onda de corte se refleja a un ángulo más pequeño que la onda longitudinal reflejada. Esto es también debido al hecho de que la velocidad de corte es menor que la velocidad longitudinal dentro de un material dado.

1.3.10 Ángulos críticos

Cuando una onda longitudinal se mueve desde un material con una velocidad de propagación más lenta a uno con una velocidad de propagación más rápida, hay un ángulo incidente que hace que el ángulo de refracción para la onda longitudinal sea de 90° . Este se conoce como el primer ángulo crítico. En el ángulo de incidencia crítico, mucha de la energía acústica está bajo la forma de onda de compresión no homogénea, que viaja a lo largo de la interfaz y decae en forma exponencial con la profundidad de la interfaz. Esta onda se conoce a veces como “onda de deslizamiento”. Eligiendo un primer ángulo crítico específico, se pueden eliminar las ondas longitudinales refractadas, que pueden provocar señales fantasmas en el equipo.

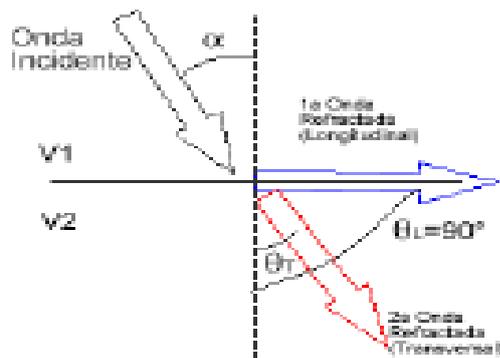


Figura 1.19 Primer ángulo crítico. [9]

Al ángulo de incidencia α necesario para refractar una onda de corte θ_T a 90° se le conoce como segundo ángulo crítico.

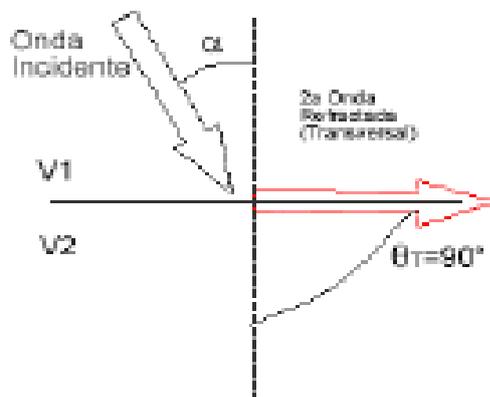


Figura 1.20 Segundo ángulo crítico. [9]

La mayoría de las inspecciones con haz angular se realizan entre el primero y segundo ángulo crítico, por lo que se propagan en el material solamente ondas de corte.

1.3.11 Atenuación

Cuando el sonido viaja a través de un medio, su intensidad disminuye con la distancia. En materiales ideales, la presión del sonido es reducida solamente por la propagación de la onda. Los materiales reales, sin embargo, producen un efecto que debilita el sonido mientras se encuentra más lejos. Este debilitamiento posterior resulta de la dispersión y de la absorción. El efecto combinado de la dispersión y de la absorción se llama atenuación. La atenuación ultrasónica es el índice de decaimiento de la onda que se propaga a través del material.

El cambio de la amplitud de una onda plana que decae se puede expresar como:

$$A = A_0 e^{-\alpha z}$$

En esta expresión A_0 es la amplitud de la onda propagada en algún medio, A es la amplitud reducida después de que la onda ha viajado una distancia z desde su localización inicial.

La cantidad α es el coeficiente de atenuación del viaje de la onda en la dirección z , las dimensiones de α son neperiano/longitud, donde un neperiano es una cantidad sin dimensiones. El término e es la constante de Napier que es aproximadamente igual a 2.71828.

Las unidades del valor de la atenuación en neperiano/longitud se pueden convertir a decibeles/longitud dividiéndose por 0.1151. Los decibeles son una unidad más común al relacionar las amplitudes de dos señales.

La atenuación se puede determinar evaluando las múltiples reflexiones de pared posterior consideradas en un típico barrido A. El número de decibeles ente dos señales adyacentes se mide, y este valor se divide por el intervalo de tiempo entre

ellas. Este cálculo produce un coeficiente de atenuación en decibeles por unidad de tiempo U_t . Este valor se puede convertir a neperiano/longitud con la ecuación siguiente:

$$\alpha = \frac{0.1151}{v} U_t$$

1.4 Métodos de inspección por ultrasonido

1.4.1 Métodos básicos de inspección

Los dos métodos más importantes para la inspección por ultrasonido son el método de transmisión y el método eco-pulsado. La principal diferencia entre estos dos métodos es que el método de transmisión involucra solo la medición de la atenuación de la señal, mientras que el método eco-pulsado puede ser utilizado para medir el tiempo de tránsito y la atenuación o disminución de la señal.

1.4.2 Método eco-pulsado

Este método es utilizado para detectar la localización de la falla y para medir espesores.

La profundidad de la falla está determinada por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. La profundidad de la falla también se puede determinar por el tiempo relativo de tránsito entre el eco producido por una falla y el eco de la superficie de respaldo.

Las dimensiones de las fallas se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interface, con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga fallas.

1.4.3 Método de transmisión

El método de transmisión el cual incluye tanto reflexión como transmisión, involucra solo la medición de la atenuación o disminución de señal. Este método también se utiliza para la detección de fallas.

Los ecos de las fallas no son necesarios para su detección. El hecho de que la amplitud de la reflexión de una pieza de trabajo es menor que la de una pieza idéntica libre de fallas, implica que la pieza tiene una o más fallas. La técnica para detectar la presencia de fallas por la atenuación de sonido es utilizada en los métodos de transmisión así como en los métodos eco-pulsados.

1.4.4 Método de frecuencia modulada

En el método FM los pulsos ultrasónicos son transmitidos en paquetes de ondas en los cuales su frecuencia varía linealmente con el tiempo. El método de frecuencia modulada es un método no tan común que tiene una baja relación ruido-senal y por lo tanto una buena opción en ahorro de energía.

La variación en la frecuencia es repetitiva en los paquetes de ondas sucesivos, de tal manera que si se grafica frecuencia contra tiempo se obtendrá un patrón de diente de sierra en la curva graficada. Existe un tiempo de demora entre paquetes sucesivos, los ecos que retornan se muestran o visualizan en una unidad de salida.

1.4.5 Análisis espectral

Este método puede ser utilizado en los métodos de transmisión o eco-pulsado, involucra la determinación de un espectro de frecuencia de una onda ultrasónica después de que se ha propagado a través de la pieza. Los análisis espectrales pueden ser utilizados para medir especímenes de espesores delgados.

1.4.6 Conducción de sonido

Es utilizado en la detección de fallas por el monitoreo de la intensidad de formas de ondas arbitrarias en un punto determinado de la pieza a inspeccionar. Estas ondas transmiten energía ultrasónica las cuales son alimentadas a la pieza en algún otro punto sin la existencia de un patrón de haz bien definido entre los dos puntos.

1.5 Transductores ultrasónicos

Un transductor es un dispositivo que puede convertir una forma de energía en otra, en el caso de un transductor de ultrasonido convierte energía eléctrica en mecánica en forma de onda y viceversa, es por esta razón que la mayoría de los transductores de ultrasonido pueden utilizarse para la aplicación de pulso eco.

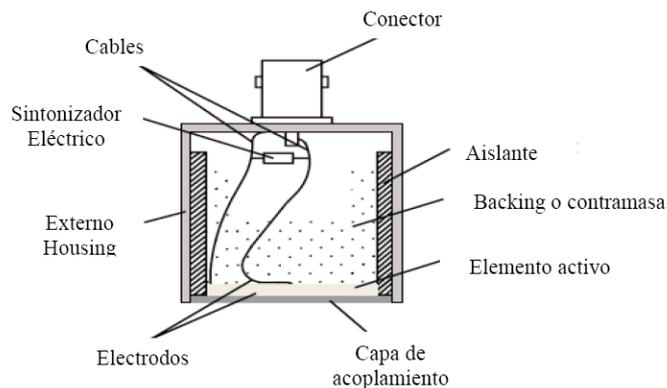


Figura 1.21 Esquema y partes de un Transductor de Ultrasonido. [11]

El elemento activo o elemento piezoeléctrico es el encargado de realizar la conversión electromecánica, el cual está conectado eléctricamente al exterior a través de contactos soldados en los electrodos que cubren al elemento piezoeléctrico. Junto a dicho elemento, se encuentran otros elementos no activos que determinan las características temporales de emisión y/o recepción.

La placa piezoeléctrica vibra emitiendo energía mecánica en ambos sentidos. Las aplicaciones prácticas, solo utilizan la emisión en una sola de las caras. La capa de acoplamiento por su parte tiene dos funciones, proteger el elemento activo y asegurar una mayor transferencia de energía, esto último se logra fabricándola de un material

con una impedancia acústica intermedia entre el elemento activo y el material sobre el cual se espera utilizar el transductor.

1.5.1 Transductores sencillos

Estos transductores son usados para medir y detectar defectos sobre placas, barras, forjas, bastidores y protuberancias, durante las pruebas son aplicados directamente en superficies planas de material de prueba.



Figura 1.22 Transductores sencillos. [12]

1.5.2 Transductores duales

Estos transductores miden el espesor y descubren defectos y corrosión en materiales delgados.



Figura 1.23 Transductores duales. [12]

1.5.3 Transductores de haz angular

Los transductores de haz angular permiten al haz de ultrasonido ser introducido en el material de prueba en un ángulo determinado. Su uso más común es la inspección de soldaduras.



Figura 1.24 Transductores de haz angular. [12]

1.5.4 Transductores de inmersión

Su uso ocurre en tanques de inmersión llenados de agua, donde el objeto de prueba es colocado sobre una tornamesa, para que el objeto sea movido en una velocidad constante por delante de la sonda.



Figura 1.25 Transductores de inmersión. [12]

1.5.5 Transductor de arreglo de fases

Contienen en su chasis, arreglos de múltiples cristales para facilitar la inspección de distintas áreas de material, desde una sola posición del transductor.



Figura 1.26 Transductores de arreglo de fases. [9]

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE PRUEBA PARA TUBERÍAS UTILIZADAS EN MOTORES ESTACIONARIOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.

2.1 Equipos de ultrasonido

En general, todos los equipos de ultrasonido cumplen con la función de generar y recibir señales eléctricas, las mismas que son interpretadas en base a distintos accesorios que proporcionan tipos diversos de modelamiento.

La mayoría de los equipos ultrasónicos, son elementos que funcionan mediante la técnica pulso-eco con presentación tipo “A-scan”, los cuales incluyen una gran variedad de configuraciones. En el funcionamiento de un equipo de ultrasonido se incluye la determinación de la amplitud y tiempo de aparición de la señal ultrasónica; como accesorios que pueden encontrarse se puede mencionar a la curva DAC electrónica, monitor, compuertas, medición de espesores y cálculos matemáticos de distancias en forma digital.

Los instrumentos ultrasónicos son equipos de comparación contra un estándar de referencia, por lo cual, se debe calibrar antes de ser utilizado para cualquier ensayo, entonces podemos decir que la calibración es el proceso de ajustar el instrumento utilizando un estándar de referencia.

2.1.1 Medidores de espesores

Estos instrumentos son fabricados específicamente para determinar el espesor de un material y verificar si existe algún desgaste debido a diversos factores como la corrosión la cual se genera por ejemplo en las tuberías destinadas al transporte de fluidos y vapor de agua.

Dentro de la variedad de medidores de espesores que existen, se pueden encontrar modelos simples que solamente proporcionan valores numéricos del espesor; sin embargo aun siendo el modelo más simple cuentan con funciones para modificar la

velocidad de propagación del material, así como el retardo del palpador, para poder ejecutar una calibración para la medición del espesor.



Figura 2.1 Medidor de espesores. [13]

Otras prestaciones con funciones extras que pueden tener los equipos medidores de espesores, incluyen la utilización para aplicaciones específicas como puede ser la medición o discriminación de algún recubrimiento de pintura u otro tipo de material aislante de la temperatura. En ocasiones estas funciones son realizadas con la adaptación de transductores especiales, fabricados en configuraciones particulares para su aplicación, en este caso la discriminación de recubrimientos se lleva a cabo por medio de una función llamada Dual-Multi. En este método un pulso ultrasónico se transmite desde el transductor (elemento activo) del palpador al material inspeccionado, sin embargo, en este método, una parte de la energía del pulso ultrasónico se refleja en la interface entre el recubrimiento (capa de pintura) y el material inspeccionado. En el resto de la energía del pulso transmitido continua su viaje a través del material inspeccionado y regresa como eco de pared posterior.

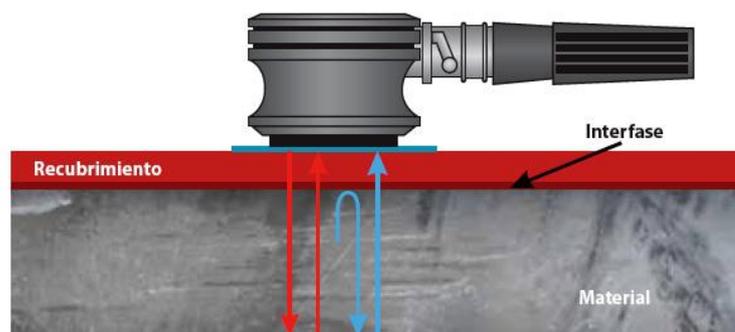


Figura 2.2 Método de Medición Dual-Multi. [14]

La medición mínima del espesor del recubrimiento representa una variable importante en la medición, debido a la capacidad y rango del equipo de inspección.

Además, también existen otros equipos con prestaciones más avanzadas de inspección como son el barrido A-scan y B-scan. Las presentaciones del equipo en base al barrido representa una ventaja importante para el inspector, ya que conociendo el comportamiento del sonido en el material, se puede determinar si el eco considerado en la pantalla por las compuertas es realmente la pared posterior o alguna discontinuidad encontrada, esto en base al barrido A-scan.

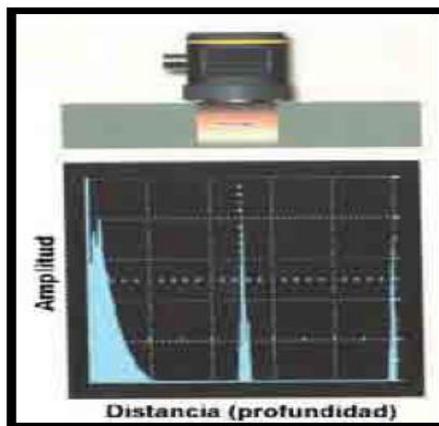


Figura 2.3 Barrido A-scan. [15]

El barrido B-scan es considerado como un corte transversal de la pieza inspeccionada, el cual muestra cómo se presenta físicamente el deterioro o cambio de sección de la pared posterior.

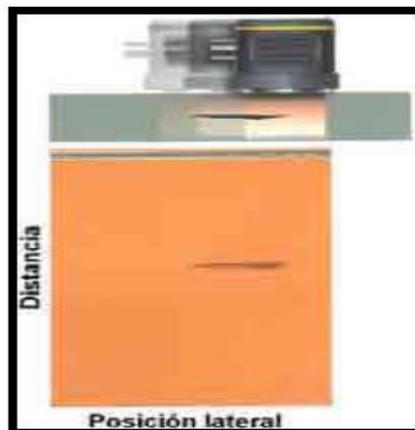


Figura 2.4 Barrido B-scan. [15]

2.1.2 Detectores de fallas

El objetivo principal de una prueba no destructiva es la detección de discontinuidades en un material. El avance tecnológico en los sistemas computacionales ha permitido que se fabriquen equipos cada vez más pequeños y livianos con propiedades transfectivas que proporcionan la misma definición ya sea en presencia o ausencia de luz y con pantallas de visualización de ecos de cristal líquido (LCD).

Ahora existen equipos más avanzados que cuentan con la posibilidad de poder almacenar datos y calibraciones, incluso de poder calibrar el equipo de manera automática o pueden evaluar discontinuidades con la ayuda de algunos accesorios como son las curvas de corrección Distancia-Amplitud (DAC).



Figura 2.5 Detector de fallas con pantalla LCD. [16]

2.2 Equipo de ultrasonido EPOCH XT

Al disponer la Universidad de este equipo para ultrasonido industrial, basamos la investigación en el manejo e interpretación de este modelo de equipo el cual se detalla a continuación.

El equipo EPOCH XT es el primero de una nueva generación de detectores de fallas por ultrasonido de la marca Canadiense Olympus NDT, lanzado en agosto del año

2006; ha sido diseñado para soportar los diferentes ambientes hostiles que son comunes en el campo NDT con un diseño resistente.



Figura 2.6 Equipo ultrasónico EPOCH XT. [17]

El EPOCH XT es un detector de defectos por ultrasonidos portátil de tecnología muy avanzada, que cuenta con numerosas funciones estándares de medición, incluyendo un emisor de ondas cuadradas ajustable, filtros digitales de banda estrecha y de banda ancha seleccionables, una gama de ganancias de 0 a 110 dB, las funciones de memoria y de mantenimiento de picos y una frecuencia de repetición de impulsos (PRF) ajustable.

El diseño del detector de defectos por ultrasonidos EPOCH XT ofrece una gran flexibilidad de inspección en condiciones rigurosas. Asimismo, es compacto, está dotado de herramientas eficaces de detección y medición de defectos, cuenta con una pantalla brillante LCD en colores, funciona con diferentes tipos de baterías y posee una gran capacidad de tratamiento de datos y numerosas herramientas software. Por si fuera poco, su caja sellada responde a las exigencias de la norma IP67.

Este modelo integra numerosas herramientas estándares de medición, como el emisor de ondas cuadradas ajustable, los filtros digitales de banda estrecha y de banda ancha seleccionables, la ganancia de 0 dB a 110 dB, la memoria de picos y el mantenimiento de picos, la frecuencia de repetición de impulsos (PRF) ajustable, la resolución de medición de 0,01 mm (0,001 pulg.) y las dos puertas con alarmas programables. Asimismo, cuenta con varias herramientas software estándares y

opcionales para aplicaciones específicas, como las curvas dinámicas DAC/TVG, las curvas DGS/AVG integrados, los parámetros para inspecciones conforme a las normas AWS D1.1 y D1.5, la corrección de superficies curvas y el programa GageView Pro.

2.2.1 Inspección con haz recto

La técnica de inspección más utilizada para este tipo de inspección es la denominada Pulso-Eco. Para realizar las inspecciones se requiere de un transductor de un cristal o dos cristales, las que servirán tanto para la detección de fallas o medición de espesores respectivamente.

El Pulso-Eco expresa cuando el transductor emite una onda ultrasónica a través del material, y cuando la onda encuentra a su paso una interface acústica o alguna discontinuidad, ésta regresa a la fuente emisora.

Los equipos de Ultrasonido emiten y receptan señales eléctricas a través del transductor, las cuales son graficadas en la pantalla en una presentación llamada barrido A-scan. Este tipo de barrido está compuesto por un sistema de dos ejes, el eje vertical y el eje horizontal.

El eje vertical representa la cantidad de energía que la onda va perdiendo mientras recorre el espesor de la pieza de prueba, esta escala esta seccionada por cinco o diez divisiones, en la cual su altura o tope máximo representa el 100 % de energía. Esta altura puede ser regulada con un control de amplitud o ganancia de la señal. El control de la ganancia se modifica en unidades de decibeles (dB), la cual representa la principal unidad de medida utilizada para el nivel de potencia o nivel de intensidad del sonido.

Por otro lado el eje horizontal esta seccionado en cinco o diez divisiones, divididas a su vez en cinco subdivisiones cada una. Este eje representa el tiempo que tarda la señal ultrasónica en recorrer el material, desde su emisión hasta el momento en que se encuentra una interface acústica para regresar nuevamente a la fuente emisora.



Figura 2.7 Pantalla con barrido A-scan. [18]

Durante las inspecciones que se realizan con los equipos de ultrasonido, siempre existe una señal ubicada en el extremo izquierdo de la pantalla, esta señal es conocida como pulso inicial y representa un obstáculo para la detección de discontinuidades próximas a la superficie. Así mismo en la parte extrema derecha de la pantalla, también existe una señal la cual es conocida como señal de pared posterior, la misma que indica la superficie posterior de la pieza que se inspecciona.

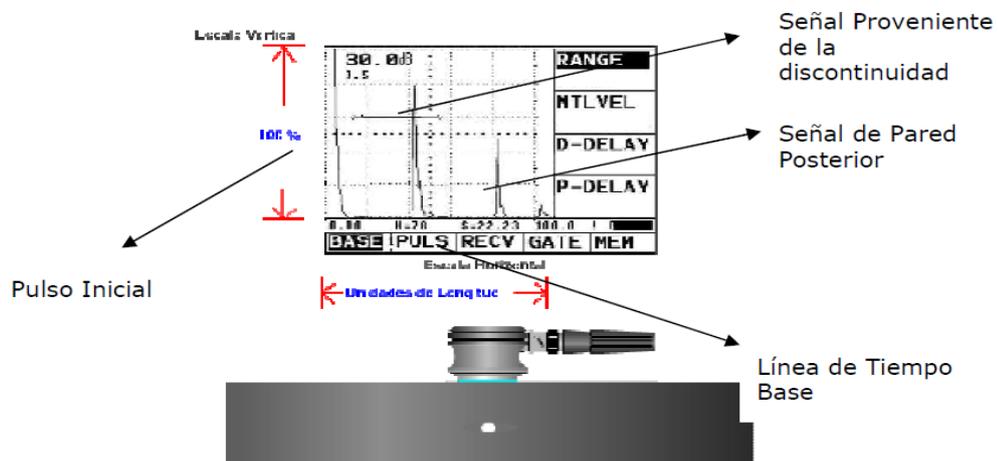


Figura 2.8 Detección de una discontinuidad con haz recto. [9]

2.2.1.1 Calibración con haz recto del equipo EPOCH XT

Antes de realizar cualquier inspección con el equipo de ultrasonido es necesario calibrarlo para obtener las lecturas de distancia de manera exacta. Existen dos parámetros importantes que se ajustan para calibrar el equipo en haz recto, el primero

es la velocidad de propagación de la onda ultrasónica que penetra en el material; este ajuste es relevante para cada tipo de material debido a que es una propiedad que poseen estos, lo cual obliga al inspector a realizar una calibración por cada tipo de material que se inspeccione. El segundo es el retardo del probador, que es la distancia a partir de la cual se considera el cero en la lectura de longitud. Esta distancia la toma el equipo inicialmente desde la superficie inferior del elemento activo y no desde la superficie de contacto entre el transductor y la pieza.



Figura 2.9 Retardo del palpador. [9]

Para la calibración con haz recto del equipo EPOCH XT se utilizan cuatro materiales que son fundamentales dentro de la calibración, los cuales se describen a continuación:

1. TRANSDUCTOR A109S-SM.
2. BLOQUE DE PRUEBA 2214E.
3. ACOPLANTE B-2.
4. CABLE BCM-74-6.



Figura 2.10 Materiales para calibración con haz recto. [18]

Para la calibración del equipo con haz recto es necesario contar con un bloque de calibración con diferentes espesores conocidos, y es necesario que sea fabricado con el mismo material del elemento al cual se ha de inspeccionar.

Si se desea inspeccionar un elemento de diferente material, es indispensable calibrar el equipo con un material de la misma condición como lo dicho anteriormente y sobre espesores conocidos del mismo elemento.

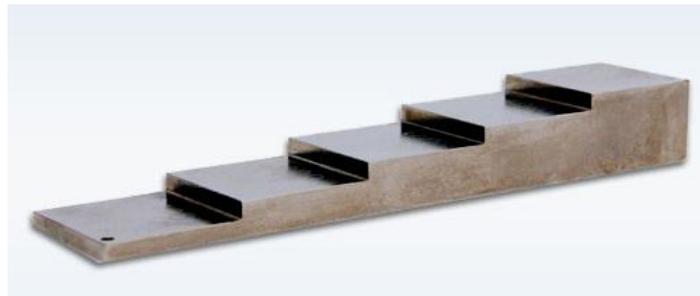


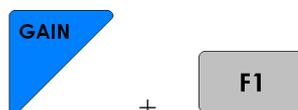
Figura 2.11 Bloque de calibración en escalera para haz recto. [19]

Se debe de generar dos señales a diferentes distancias, con ayuda de los distintos espesores de bloque, para configurar el equipo. Esto indica que los resultados más confiables se obtendrán en piezas con el espesor comprendido entre este rango.

Es decir, el equipo ultrasónico se puede calibrar en un rango de 0,100 in a 0,500 in de espesor, entre este rango se puede garantizar que encontraremos una discontinuidad en una pieza de manera confiable. Se debe tomar en cuenta las características del transductor, debido a que cada transductor tiene un rango o alcance de inspección, afectado por variables como la frecuencia y el diámetro.

Antes de calibrar el equipo en el bloque escalonado es necesario realizar los siguientes parámetros de configuración:

- Se ajusta la ganancia de 10 dB, pulsando las siguientes teclas:



- Se ajusta la velocidad de propagación de 0,2320 in/us pulsando:



- Se ajusta la frecuencia del transductor de 5 MHz pulsando:



- Se ajusta el valor del filtro el cual es de 1,5 – 8,5 MHz, pulsando:



- Se ajusta el alcance o rango es cual es de 1 pulgada, pulsando:



Para la calibración manual, colocar el transductor en el espesor menor de 0,200 in para generar la primera señal, en esta primera señal el equipo proporcionará el valor del espesor, para lograrlo es importante que la compuerta (la línea horizontal que se muestra en la pantalla) toque la señal obtenida como se muestra en la siguiente figura.

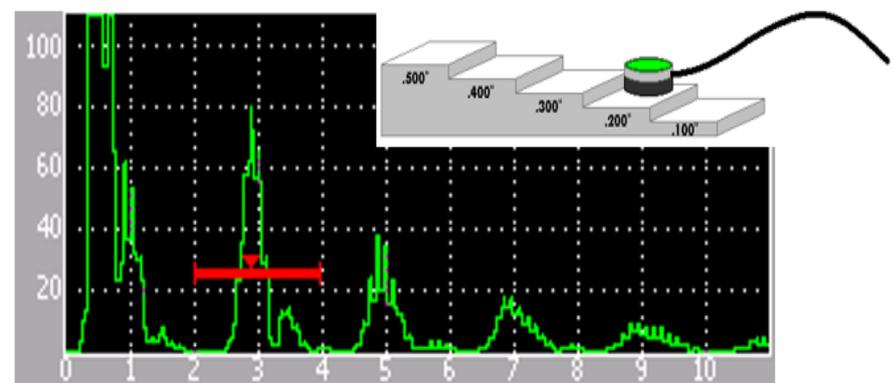


Figura 2.12 Calibración en espesor menor con haz recto. [18]

A continuación se presiona las siguientes teclas:



Ahora el siguiente paso es colocar el transductor al espesor mayor de 0,500 in del bloque de calibración, se mueve la compuerta hasta que toque en el eco generado como lo muestra la siguiente figura.

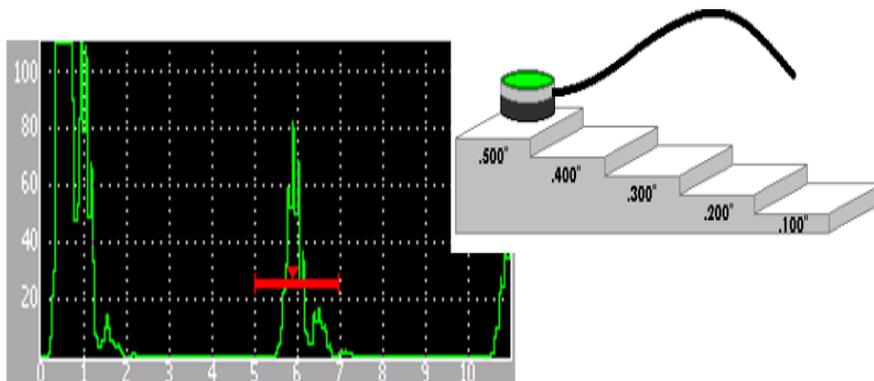


Figura 2.13 Calibración en espesor mayor con haz recto. [18]

Al mover la compuerta en el eco generado, el paso final es presionar las siguientes teclas:



Con esto se garantiza que el equipo se ha calibrado de manera manual, con base en verificar los dos espesores de calibración en las lecturas de pantalla. Este procedimiento se debe realizar las veces que sea necesario, principalmente antes de realizar un diagnóstico en cualquier pieza a inspeccionar para garantizar que los datos sean exactos.

2.2.2 Detección de discontinuidades

Una vez que se ha realizado la calibración en distancia del equipo, se puede proceder a inspeccionar una pieza. Para el ejemplo anterior el equipo se calibró en un rango de

0,100 in a 0,500 in, lo que nos garantiza encontrar o medir discontinuidades en este rango. La siguiente figura muestra la detección de una discontinuidad en una pieza. Se puede observar que la discontinuidad impide el paso de la onda ultrasónica hasta la pared posterior, es por esto que en el equipo se genera un eco producido por la discontinuidad.



Figura 2.14 Detección de una discontinuidad con haz recto. [9]

Si se desea conocer el tamaño exacto de una discontinuidad, se puede recurrir a otros ajustes de comparación con reflectores conocidos.

La detección de una discontinuidad se realiza en base a dos parámetros: el primero es el tiempo que tarda en regresar el eco, llamado “tiempo de vuelo” y que conociendo la velocidad del sonido en el material de prueba, permite calcular la distancia a la cual se encuentra la discontinuidad que reflejó la onda. El segundo parámetro es la energía con la que regresa la onda, esta se mide en decibeles, la misma que en un equipo representa la altura de la señal, lo que se refiere a la amplitud.

2.2.2.1 Variables de la pieza inspeccionada

2.2.2.1.1 Condición superficial

Para que pueda generarse buenos resultados en la inspección por ultrasonido es indispensable que la superficie de la pieza a inspeccionar esté libre de parámetros como la excesiva rugosidad superficial, superficie con pintura mal adherida, oxido o corrosión; que puedan alterar los resultados debido a que se produzca dispersión del

ultrasonido o por que exista un mal acoplamiento del transductor, todo lo mencionado anteriormente puede causar los siguientes defectos en la transmisión de la señal:

- Un haz ultrasónico muy ancho debido a la dispersión desde la superficie.
- Pérdida de amplitud de indicaciones de discontinuidades.
- Pérdida del poder de resolución debido al incremento en la longitud del campo muerto.

Para minimizar todos estos defectos es necesario que la superficie del material a inspeccionar este completamente libre de pintura, oxido y corrosión para que el transductor pueda deslizarse con facilidad y evitando que el mismo se desgaste para no modificar la lectura en la pantalla del equipo.

2.2.2.1.2 Geometría de la pieza

Cuando la superficie posterior de un material no es paralela a la superficie frontal, o cuando la divergencia del haz ultrasónico alcanza una superficie lateral de la pieza, se puede producir dispersión y conversión del haz, por lo cual se puede alterar las indicaciones sobre la pantalla del equipo que pueden generar confusión.

En las piezas con superficies paralelas es importante monitorear la reflexión de pared posterior para asegurar y evaluar que la onda ultrasónica pase adecuadamente a través del material.

2.2.2.1.3 Superficies curvas

Cuando la superficie de la pieza en donde se va a acoplar el transductor posee curvatura, se pueden presentar problemas debido a la energía de la onda ultrasónica que regresa al transductor, por ejemplo, si una superficie es cóncava la onda podría ser focalizada, y si la superficie es convexa la onda podría ser dispersada en forma de haz ancho. Para el caso de superficies curvas como por ejemplo en las tuberías se puede emplear el método de usar zapatas con superficies curvas para que exista un mejor acoplamiento.

2.2.2.1.4 Estructura interna de la pieza

Se puede producir dispersión de la onda ultrasónica cuando la estructura interna de la pieza posea discontinuidades inherentes o bordes de grano, debido a que estos parámetros reducen la energía disponible del haz para la detección de discontinuidades, modificando la amplitud de las señales y además producen señales en la pantalla del instrumento conocidas como “ruido” o “pasto”, causando interferencia (relación señal - ruido). Este problema es mayor cuando se incrementa la frecuencia del equipo y es más notable en materiales con estructura de grano grande.

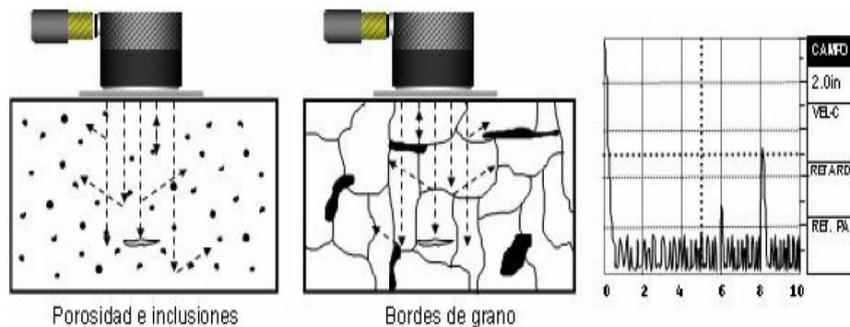


Figura 2.15 Relación Señal – Ruido. [9]

2.2.2.2 Variables de la discontinuidad

2.2.2.2.1 Tamaño de la discontinuidad

Para que una discontinuidad pueda ser detectada, en teoría, debe tener un tamaño igual o mayor a la longitud media de onda.

En el caso cuando existe discontinuidades perpendiculares a la dirección de la onda ultrasónica, se produce que la reflexión de la onda producida por la discontinuidad y la amplitud de la señal que muestra en la pantalla, se incrementa cada vez que la área de la discontinuidad es mayor; como se muestra en la figura 2.16.

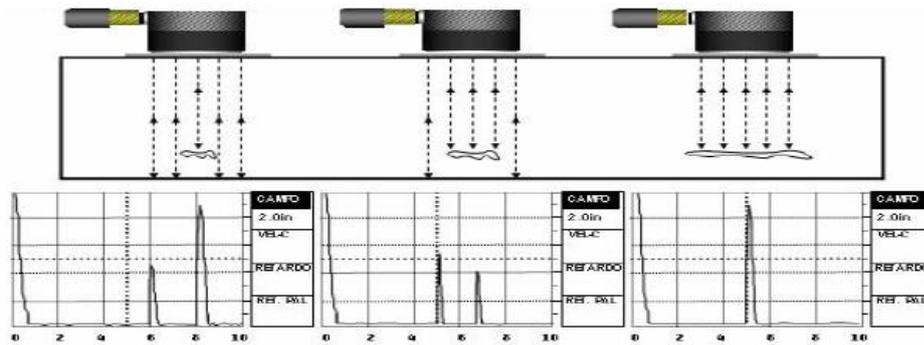


Figura 2.16 Tamaño de la discontinuidad. [9]

2.2.2.2.2 Orientación de la discontinuidad

La mejor orientación para que una discontinuidad sea detectada, es que esta se encuentre perpendicular a la dirección con la que viaja la onda ultrasónica. Para ayudar a identificar la presencia de discontinuidades que no son perpendiculares a la dirección de la onda y si la geometría lo permite se puede monitorear la reflexión de la pared posterior. Una reducción en la reflexión de pared posterior acompañada por una o varias indicaciones de baja amplitud pueden indicar la presencia de una o varias discontinuidades con diferentes orientaciones. La figura 2.17 muestra el efecto de la orientación de una discontinuidad.

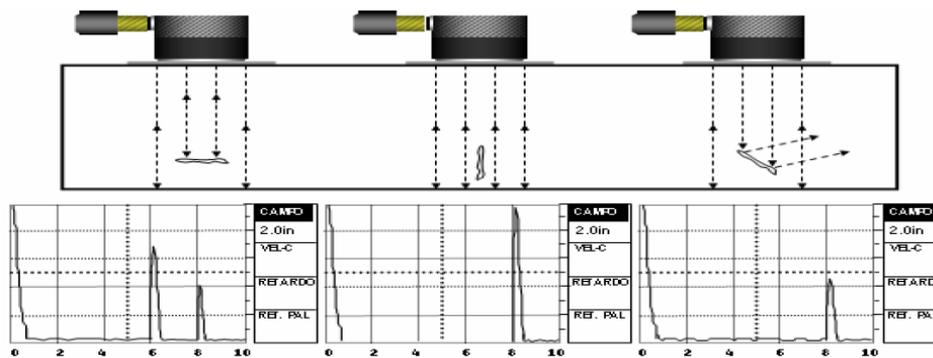


Figura 2.17 Orientación de la discontinuidad. [9]

2.2.2.2.3 Dispersión del haz producido por la discontinuidad

La energía de una onda ultrasónica puede ser dispersada por una discontinuidad, esta dispersión puede incrementarse debido a:

- El incremento en la rugosidad superficial de la discontinuidad.
- La reducción en el tamaño de la discontinuidad.
- La reducción en la frecuencia utilizada en la inspección.

2.2.2.2.4 Resistencia acústica

La reflexión de la energía ultrasónica es mayor si la diferencia en valores de impedancias es mayor y la reflexión de la energía ultrasónica es menor si la diferencia en valores de impedancias es menor, debido a lo anterior, se considera que lo mejor es que una discontinuidad contenga aire.

2.2.3 Inspección con haz angular

En la inspección con haz angular se acopla al transductor del equipo un tipo de zapata que puede tener varios ángulos de inclinación comprendidos en los siguientes valores 30°, 45° y 70°. A través de este tipo de zapatas el haz ultrasónico penetra en el material convirtiendo a las ondas en un haz de ondas de corte. Este haz se propaga en forma de “zigzag” a través del material como lo muestra la siguiente figura.

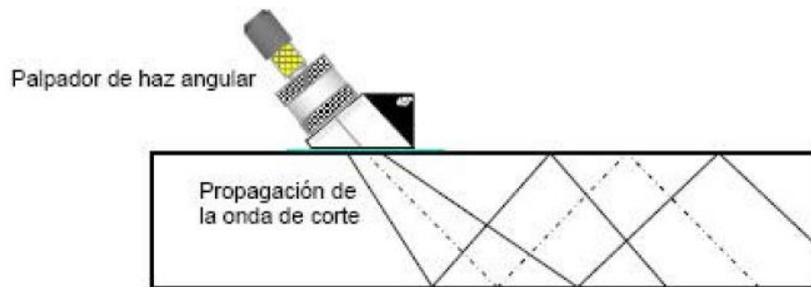


Figura 2.18 Propagación del haz de ondas de corte. [9]

Si durante su camino el haz de ondas de corte no encuentra ninguna discontinuidad, continuará su propagación a través del material y no aparecerá ninguna indicación en la pantalla del equipo. Si el haz de ondas de corte incide sobre el borde o superficie del material, este genera un eco en la pantalla del equipo que en base al rango determina la distancia en la que se encuentra el borde. Además la reflexión del haz se producirá bien cuando este incida en la esquina inferior o bien cuando incida en la esquina superior.

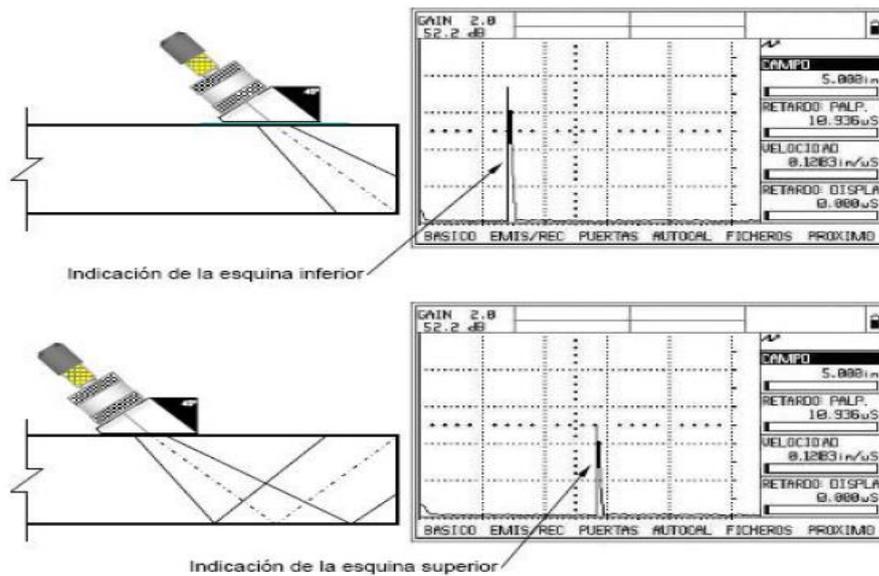


Figura 2.19 Incidencia del haz de ondas de corte en el borde de un material. [9]

La reflexión en la esquina inferior del borde se produce a una distancia que identificaremos como $SD/2$ entre el punto de salida del haz del palpador y el borde de la placa, y la reflexión en la esquina superior se produce a una distancia SD , como se muestra en la figura.

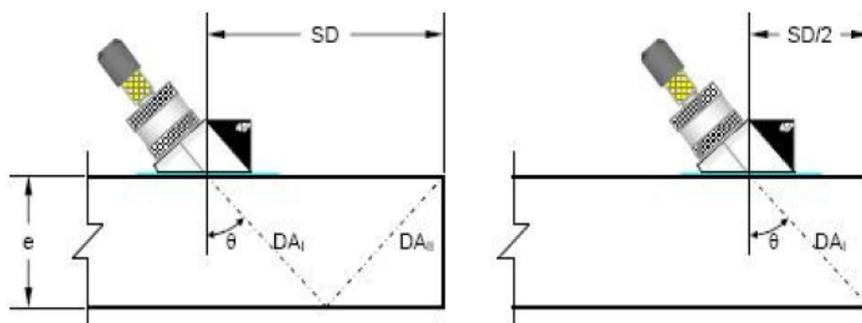


Figura 2.20 Distancia de salto (SD) y de medio salto ($SD/2$). [9]

Como se puede observar en el lado izquierdo de la figura por la forma en “V” del recorrido del haz ultrasónico hasta completar la SD , se le da el nombre de “Trayectoria en V”. La distancia recorrida por el haz ultrasónico hasta la superficie inferior de la placa (DA_I) se conoce como la “Primera Pierna” de la trayectoria en “V”, y la distancia desde la superficie inferior hasta la superior (DA_{II}) es la segunda pierna, y así sucesivamente. Con base ahora en la figura 2.21, se puede deducir que el haz barre toda la sección transversal de la placa al desplazar el palpador entre las

distancias SD y SD/2. A la distancia SD se le denomina “Distancia de Salto”, o distancia brinco (por su nombre en inglés: Skip Distance) y a SD/2, “Distancia de Medio Salto”. Conociendo el ángulo de refracción del haz ultrasónico (θ), marcado en el palpador, y el espesor se pueden calcular las distancias SD y SD/2.

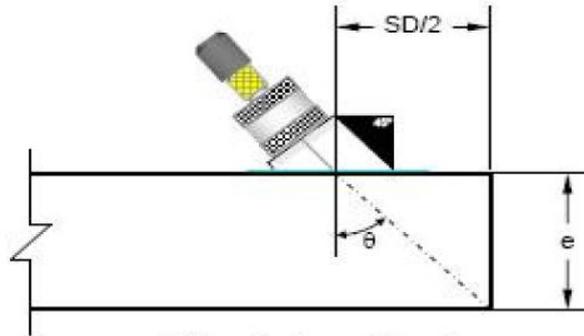


Figura 2.21 Distancia de medio salto. [9]

En efecto, de la figura anterior se deduce que:

$$tg \theta = \frac{\frac{SD}{2}}{e}$$

Despejando: $\frac{SD}{2} = e \cdot tg \theta \rightarrow SD = e \cdot 2 tg \theta$

Los palpadores angulares cuentan para su ángulo de refracción, con el factor de $2 tg \theta$ por lo cual, el conocer la distancia de salto y de medio salto, es cuestión de saber únicamente cual es el espesor de la placa.

2.2.3.1 Ubicación de las discontinuidades con haz angular

Supongamos que al verificar una placa con un palpador angular se detecta una discontinuidad, ésta discontinuidad producirá una indicación en la pantalla del equipo en forma de eco, como se muestra en la figura 2.22. En este caso se observa que el eco inicial no aparece, debido a que queda alojado dentro de la zapata. Si el equipo ultrasónico ha sido calibrado correctamente en recorrido del haz podemos conocer, al leer directamente en la pantalla, la distancia angular (DA) a la que se encuentra la discontinuidad.

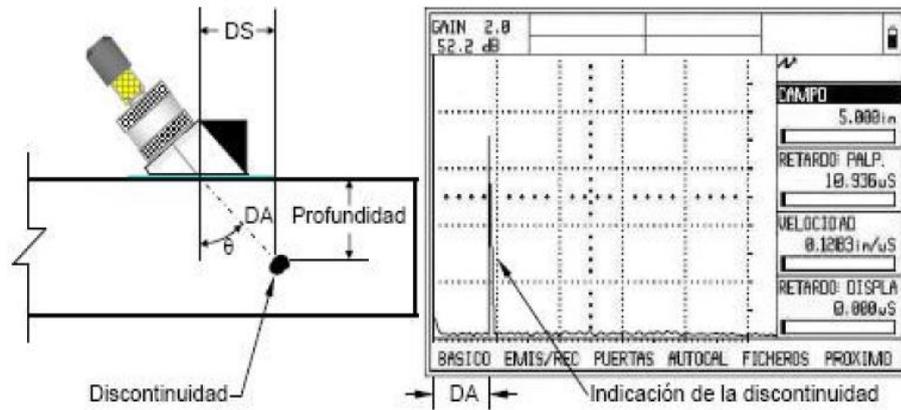


Figura 2.22 Detección de una discontinuidad con haz angular. [9]

Recorriendo a las expresiones trigonométricas sencillas tendremos que:

$$\text{Sen } \theta = \frac{DS}{DA} \quad \text{y} \quad \text{Cos } \theta = \frac{\text{Profundidad}}{DA}$$

Por lo tanto:

$$DS = DA \cdot \text{Sen } \theta \quad \text{y} \quad \text{Profundidad} = DA \cdot \text{Cos } \theta$$

Donde:

DS = Distancia superficial.

DA = Distancia angular.

θ = Ángulo de refracción.

Como el ángulo θ es conocido, puesto que es el ángulo de entrada del haz, acudiendo a las expresiones anteriores podremos determinar la distancia superficial a la cual se encuentra la discontinuidad, medida sobre la superficie de la placa, así como la profundidad.

Consideremos ahora que la discontinuidad se localiza después de una reflexión del haz en la superficie inferior de la placa, como se ve a continuación; observando en la pantalla del equipo se aprecia que la distancia angular a la que aparece la discontinuidad es lógicamente mayor.

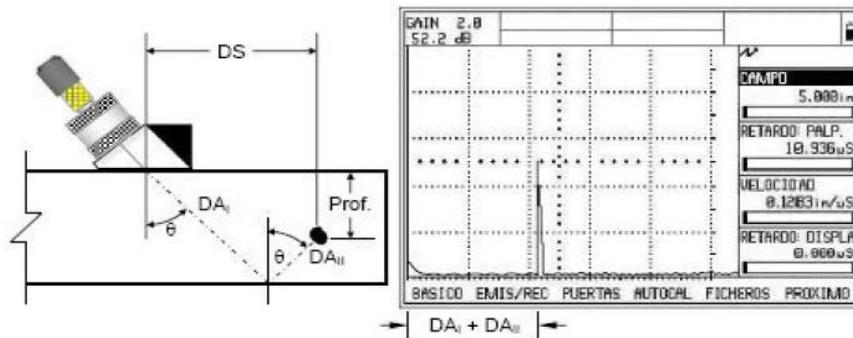


Figura 2.23 Detección de discontinuidad en segunda pierna. [9]

Considerando las expresiones anteriores, tenemos:

$$DS = DA \cdot \text{Sen } \theta \quad (\text{La misma que para la primera pierna})$$

$$\text{Profundidad} = 2e (DA_I + DA_{II}) \cdot \text{Cos } \theta$$

Por lo tanto:

$$\text{Profundidad} = 2e - (DAT \cdot \text{Cos } \theta)$$

Donde:

DS = Distancia superficial.

DA = Distancia angular (DAT).

DAT = Distancia angular total ($DA_I + DA_{II}$).

θ = Ángulo de refracción.

2.2.3.2 Calibración con haz angular del equipo EPOCH XT

Antes de realizar cualquier inspección en un material es necesaria la calibración del equipo ultrasónico. Es necesario recordar que para calibrar un instrumento ultrasónico, se necesitan al menos dos ecos de referencia. El procedimiento de calibración es el mismo que el empleado con haz recto; se ajustan los dos ecos de referencia con el retardo del palpador y la velocidad.

Para la calibración con haz angular del equipo EPOCH XT se utilizan cuatro materiales que son fundamentales dentro de la calibración los cuales se describen a continuación:

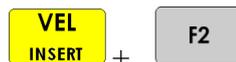
1. TRANSDUCTOR A431S-SM + CUÑA ABWS-6-45
2. BLOQUE DE PRUEBA TB7541-1.
3. ACOPLANTE B-2.
4. CABLE BCB-74-6

Antes de calibrar el equipo en el bloque IIW Tipo I es necesario realizar los siguientes parámetros de configuración:

- Se ajusta la ganancia de 50 dB presionando las siguientes teclas:



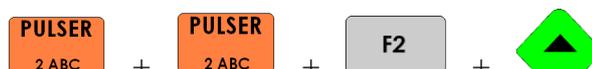
- Se ajusta la velocidad de propagación del haz ultrasónico de 0,1280 in/us presionando las siguientes teclas:



- Se ajusta el ángulo de refracción del haz ultrasónico de 45 grados, el mismo que es el valor de la zapata, el cual se realiza pulsando las siguientes teclas:



- Se ajusta la frecuencia del transductor el cual es de 2,25 MHz, pero a través del equipo no se puede introducir este valor exacto lo cual se ajusta a 2,27 MHz, pulsando las siguientes teclas:



- Se ajusta el rango de 10 pulgadas, pulsando:



- Se ajusta el valor del filtro el cual es de 0,5 – 4 MHz, pulsando:



Son necesarios cuatro pasos para la calibración con haz angular, los mismos que son:

1. Localizar el punto índice del haz (BIP) de la sonda.
2. Verificar el ángulo de refracción.
3. Calibrar la distancia (Uso de la función Auto-Cal).
4. Calibración de sensibilidad.

2.2.3.2.1 Localizar índice de haz punto

Esto consiste en alinear la cuña en la marca cero del “Bloque IIW tipo I”

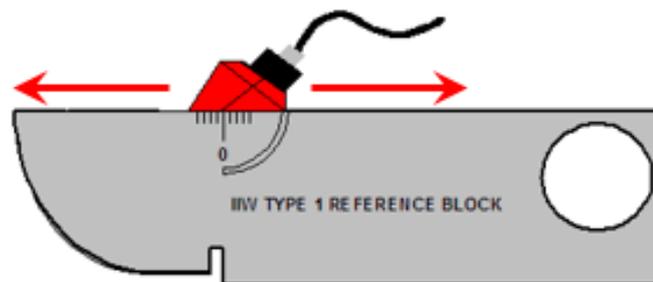


Figura 2.24 Índice de haz punto. [18]

Ahora proceder a mover el transductor hacia adelante y hacia atrás hasta que la amplitud del eco se vea en forma de pico, como lo muestra la siguiente imagen.

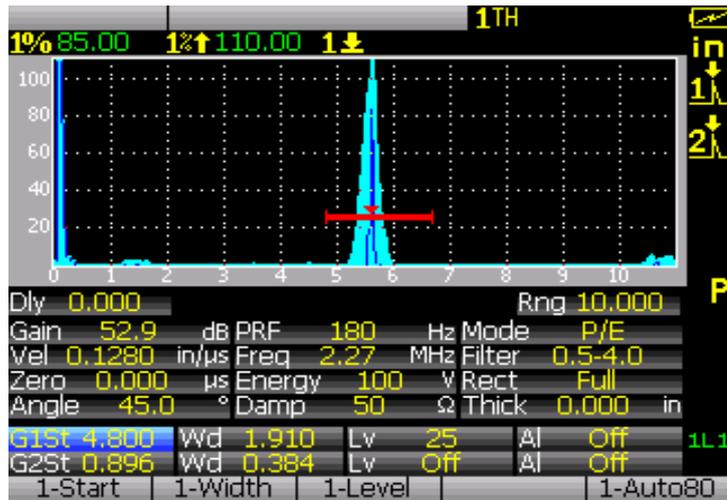


Figura 2.25 Señal índice del haz punto. [18]

Después que la señal a tocado techo, se marca en la cuña directamente sobre la marca cero del “Bloque IIW tipo I”, este es el índice de haz punto.

2.2.3.2.2 Verificar el ángulo de refracción

Se coloca el transductor sobre la marca del ángulo apropiado en el “Bloque IIW tipo I”, que en este caso se trata de los cuarenta y cinco grados ubicadas en el lado inferior del bloque de calibración.

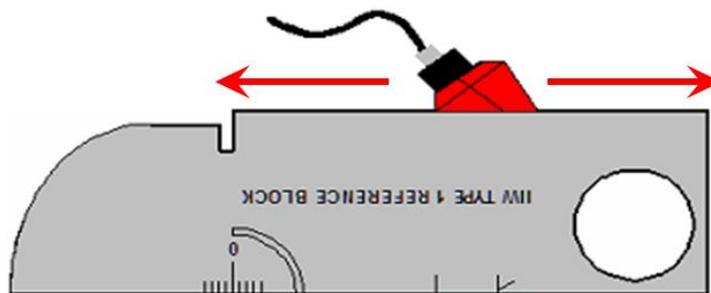


Figura 2.26 Ángulo de refracción. [18]

Ahora mover el transductor hacia adelante y hacia atrás para formar el eco “pico de arriba” del gran agujero circular del bloque, como se muestra en la figura 2.27.

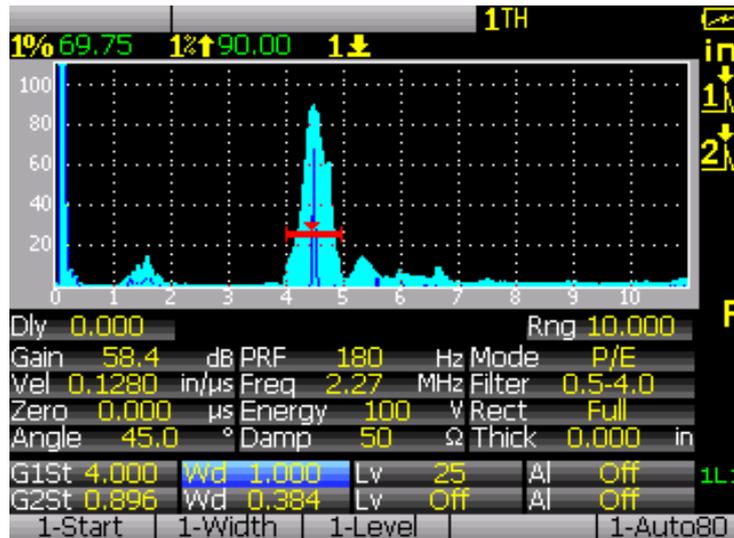


Figura 2.27 Señal del ángulo de refracción. [18]

Una vez que se alcanzó la señal, mantener inmóvil al transductor para verificar la marca índice Viga Point en la cuña que es igual a los grados llamados fuera en el bloque IIW. Este es el ángulo refractado para el transductor y la cuña.

2.2.3.2.3 Calibración de distancia

Para la calibración a distancia se debe acoplar el transductor al bloque de calibración IIW para que el índice del haz este directamente sobre la marca de cero grados.

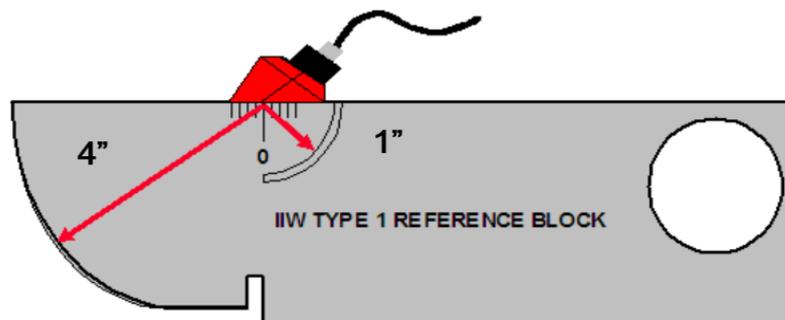


Figura 2.28 Calibración de distancia. [18]

Se ajusta la ganancia de manera que se vean dos formas de onda de cuatro y nueve pulgadas. Al ajustar bien la ganancia movemos la compuerta hasta que esta toque el eco formado por la distancia de cuatro pulgadas como muestra la siguiente imagen.

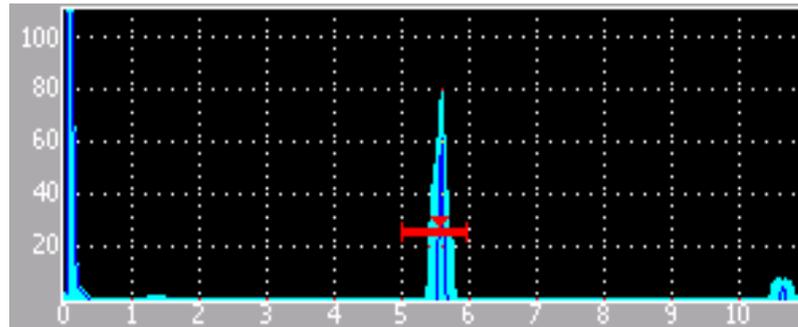


Figura 2.29 Señal de calibración distancia 4". [18]

Ahora se presionan las siguientes teclas para calibrar dicha distancia.



A continuación movemos la compuerta al eco de la distancia de nueve pulgadas.

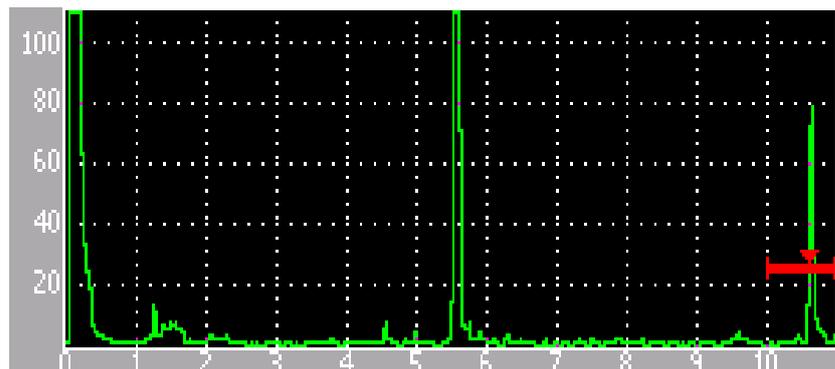


Figura 2.30 Señal de calibración distancia de 9". [18]

Por ultimo presionamos las siguientes teclas.



Con estas instrucciones se ha procedido a calibrar las dos distancias refractadas en los ecos de la pantalla, para así poder determinar la distancia exacta a la que se encuentra una discontinuidad en cualquier material.

2.2.3.2.4 Sensibilidad para la calibración

En la parte inferior del bloque IIW existe un agujero de 0,060 pulgadas, como se muestra en la figura 2.31.

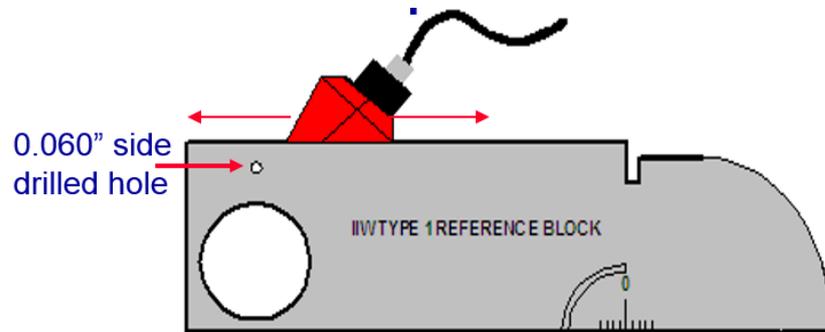


Figura 2.31 Sensibilidad de calibración. [18]

Ahora movemos la compuerta hasta toparse con el eco de referencia del agujero de 0,060 pulgadas.

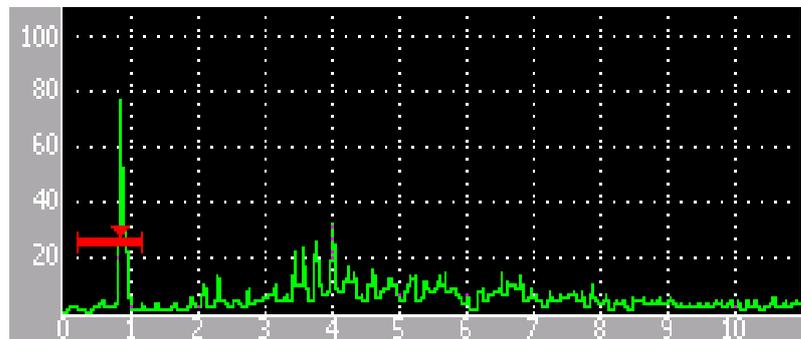


Figura 2.32 Señal sensibilidad de calibración. [18]

Al final se presionan las siguientes teclas para así ajustar la ganancia de referencia.



CAPÍTULO III. PRUEBAS EN PROBETAS CON DIFERENTES ESTADOS DEL MATERIAL POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO BAJO LAS NORMAS API RP 574 – 2009 Y ASME B31.3 – 2012.

3.1 Análisis de la norma ASME BPVC V 2010 para ensayos no destructivos

En la norma ASME V se describen todos los tipos de ensayo no destructivos que son utilizados para detección de irregularidades, por lo tanto los ensayos para el presente trabajo se basan en ella. A continuación se realiza un análisis sobre los aspectos más relevantes de esta norma. En particular la sección que es de nuestro interés: los ensayos no destructivos por el método de ultrasonido para tuberías.

3.2 Generalidades

Los métodos de examen no destructivos incluidos en esta norma son aplicables a la mayoría de las configuraciones geométricas y materiales encontrados en la fabricación en condiciones normales. Sin embargo, configuraciones y materiales pueden requerir métodos y técnicas modificadas, en cuyo caso el fabricante deberá elaborar procedimientos especiales que son equivalentes o superiores a los métodos y técnicas que se describen en esta sección, y que son capaces de producir resultados de los exámenes interpretables bajo condiciones especiales.

La tabla 3.1 indica los métodos de ensayo que son aplicables de acuerdo a la imperfección que se desea comprobar. Esta tabla debe considerarse como guía general y no como base para fijar o prohibir un tipo particular de método para una aplicación específica. Por ejemplo, el material y la forma del producto son factores que podrían dar lugar a diferencias con el grado de eficacia implícita en la tabla.

Las imperfecciones provocadas por servicio, la accesibilidad y otras condiciones en el lugar de examen son también factores importantes que deben ser considerados en la selección de un método particular. El usuario que utilice esta norma debe tener en

cuenta todas las condiciones aplicables al seleccionar los métodos de END⁴ para una aplicación específica.

3.3 Calificación del personal

Las personas que lleven a cabo los ensayos no destructivos deberán ser calificados de conformidad con documentos como SNT-TC-1A, Calificación y certificación del personal en pruebas no destructivas o ANSI / ASNTCP-189, Normas ASNT de calificación y certificación de personal para pruebas no destructivas.

Cuando no sea requerida una calificación del personal, bastará una demostración de la competencia de las personas para la ejecución del ensayo de acuerdo a los procedimientos establecidos por los fabricantes. (Artículo 1 T-120 literal g) [20].

⁴ END: Ensayos no destructivos

IMPERFECCION VS TIPO DE MÉTODO NDE (ENSAYO NO DESTRUCTIVO)

	Superficial		Sub-superficial		Volumétrico [Nota (3)]				UTT
	[Nota (1)]		[Nota (2)]		RT	UTA	UTS	AE	
	VT	PT	MT	ET					
Imperfecciones inducidas por el servicio									
Desgaste abrasivo (localizado)	●	◐	◐	...	●	◐	◐	...	◐
Desgaste del deflector (Intercambiadores de calor)	●	◐
Grietas de la corrosión asistida por fatiga	○	◐	●	...	○	●	...	●	...
Corrosión - grietas	●	○
- generales/uniformes	○	◐	...	◐	...	●
- picaduras	●	●	○	...	●	○	○	◐	○
- selectivo	●	●	○	○
Fluencia (primaria) [Nota (4)]
Erosión	●	●	○	◐	...	◐
Grietas de fatiga	○	●	●	◐	◐	●	...	●	...
Desgaste (intercambiador de calor)	◐	◐	◐
Grietas por calentamiento	...	◐	◐	...	◐	○	...	◐	...
Grietas inducidas por hidrógeno	...	◐	◐	...	○	◐	...	◐	...
Grietas por corrosión de tensión intergranular	○
Grietas por corrosión de tensión (transgranular)	○	◐	●	○	◐	◐	...	◐	...
Imperfecciones de la soldadura									
A través de quemaduras	●	●	◐	○
Grietas	○	●	●	◐	◐	●	○	●	...
Reforzamiento excesivo o inadaecuado	●	●	◐	○	...	○
Inclusiones (escoria/tungsteno)	◐	◐	●	◐	○	○	...
Fusión incompleta	◐	...	◐	◐	◐	●	◐	◐	...
Penetración incompleta	◐	●	●	◐	●	●	◐	◐	...
Desalineamiento	●	●	◐
Superposición	◐	●	●	○	...	○
Porosidad	●	●	○	...	●	◐	○	○	...
Concavidad de raíz	●	●	◐	○	○	○
Debilitamiento	●	◐	◐	○	●	◐	○	○	...
Imperfecciones de forma del producto									
Estallidos (forja)	○	●	●	◐	◐	◐	◐	●	...
Cierre frío (fundición)	○	●	●	○	●	◐	◐	○	...
Grietas (todas las formas de producto)	○	●	●	◐	◐	◐	○	●	...
Rasgones en caliente (fundición)	○	●	●	◐	◐	◐	○	○	...
Inclusiones (todas las forma de producto)	◐	◐	●	◐	○	○	...
Laminación (plato, tubo)	○	◐	◐	○	●	○	●
Faldas (forja)	○	●	●	○	◐	...	○	○	...
Porosidad (fundición)	●	●	○	...	●	○	○	○	...
Costuras (barras, tubería)	○	●	●	◐	○	◐	◐	○	...

Tabla 3.1 Imperfección vs Tipo de método de ensayo no destructivo. [20]

Denominaciones:

AE - emisión acústica.

UTA - haz angular ultrasónico.

ET – ensayo electromagnético (Eddy Current).

UTS - haz recto ultrasónico.

MT - partículas magnéticas.

UTT - medición de espesor ultrasónica.

PT - líquidos penetrantes.

VT – examinación visual.

RT – radiografía.

● - Todos o la mayoría de técnicas estándar detectarán esta imperfección bajo todas o la mayoría de condiciones.

◐ - Una o más técnicas estándar (s) detectará esta imperfección bajo ciertas condiciones.

○ - Se requieren técnicas y condiciones especiales y / o calificación de personal para detectar esta imperfección.

NOTA: La Tabla 3.1 enumera las imperfecciones y los métodos de END que son capaces de detectarlos. Hay que tener en cuenta que esta tabla es de carácter muy general. Hay muchos factores que influyen en la capacidad de detección de imperfecciones. Este cuadro supone que sólo personal calificado están realizando exámenes no destructivos y existen buenas condiciones para permitir el examen (buen acceso, condiciones de la superficie, la limpieza, etc.).

NOTAS:

(1) Los métodos capaces de detectar imperfecciones que están abiertas sólo a la superficie.

(2) Los métodos capaces de detectar imperfecciones que son ya sea abierto a la superficie o ligeramente bajo la superficie.

(3) Métodos capaces de detectar imperfecciones que pueden estar situados en cualquier lugar dentro del volumen examinado.

(4) Los varios métodos END son capaces de detectar terciaria (tercera etapa) fluencia y algunos, en particular utilizando técnicas especiales, son capaces de detectar

(segunda etapa) fluencia secundaria. Hay varias descripciones / definiciones para las etapas de la fluencia y una descripción particular / definición no será aplicable a todos los materiales y formas de producto.

3.4 Unidades empleadas

Las unidades americanas o unidades del Sistema Internacional se pueden utilizar para la conformidad de las estipulaciones de esta norma, pero deben ser empleadas para todas las fases del ensayo. Puesto que los valores de los dos sistemas no son equivalentes exactos, cada sistema deberá ser utilizado en forma independiente sin mezclar unidades.

3.5 Método de examen por ultrasonido para materiales

3.5.1 Equipo

El equipo utilizado para estos ensayos es un instrumento ultrasónico del tipo pulso-eco. Este instrumento será capaz de operar a frecuencias en un rango de al menos 1 a 5 MHz, y debe estar equipado con un control de ganancia escalonada en unidades de 2.0 dB o menos.

3.5.2 Unidades de búsqueda

La frecuencia nominal será de 1 a 5 MHz a menos que la estructura del material u otras variables requieran del uso de otras frecuencias para alcanzar una mejor resolución. También se pueden emplear unidades de búsqueda con zapatas de contacto contorneadas para alcanzar un óptimo acoplamiento ultrasónico.

3.5.3 Acoplante

El acoplante, incluidos los aditivos no será perjudicial para el material que está siendo examinado, por ejemplo los acoplantes utilizados en aleaciones a base de níquel no contendrán más de 250 ppm de azufre, y acoplantes utilizados en el acero inoxidable austenítico o titanio no contendrán más de 250 ppm de halogenuros

(cloruros, además de los fluoruros). El líquido acoplante deberá humedecer la superficie del material para proporcionar eficiencia de acoplamiento. Para evitar que las señales sean espurias o pérdida de sensibilidad, o ambos, se debe tener cuidado para evitar la presencia de burbujas de aire en el medio de acoplamiento. El mismo medio de acoplamiento que se utilizará durante el examen se utiliza para la calibración.

Para las unidades de búsqueda basados en piezoeléctricos (técnicas sin contacto no requieren acoplante), se utilizarán medios de acoplamiento tales como agua, aceite o glicerina, capaces de conducir vibraciones ultrasónicas entre la unidad de búsqueda y la tubería o tubo que está siendo examinado. Inhibidores de la herrumbre, suavizantes, y agentes humectantes pueden ser añadidos al acoplante.

En el método de contacto, algunos acoplantes resultan en una mejor transmisión de ultrasonidos cuando el tubo se reviste previamente varias horas antes del examen.

3.5.4 Bloque de calibración

3.5.4.1 Requisitos

El material del que está fabricado el bloque de calibración así como el tratamiento térmico, deben ser los mismos que en el producto que se va a examinar. El acabado superficial debe ser similar al acabado de la superficie del material que se ha de examinar.

En la figura 3.1 se presenta un típico bloque de calibración de cuatro pasos, empleado para la medición de espesores cuando se emplea el examen con haz recto.

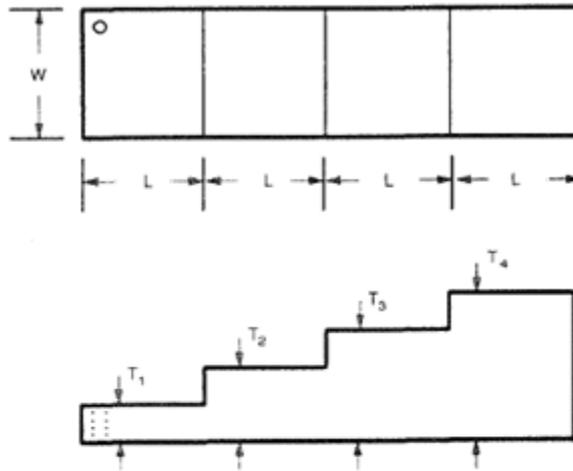


TABLE OF DIMENSIONS

Legend	U.S. Customary Block, in.		Metric Block 4A, mm		Metric Block 4B, mm	
	Dimension	Tolerance	Dimension	Tolerance	Dimension	Tolerance
T ₁	0.250	0.001	6.25	0.02	5.00	0.02
T ₂	0.500	0.001	12.50	0.02	10.00	0.02
T ₃	0.750	0.001	18.75	0.02	15.00	0.02
T ₄	1.000	0.001	25.00	0.02	20.00	0.02
L	0.75	0.02	20.0	0.5	20.0	0.5
W	0.75	0.05	20.0	1.0	20.0	1.0

Figura 3.1 Bloque de calibración para medición de espesores por haz recto. [20]

La figura 3.2 muestra un bloque de calibración de haz angular.

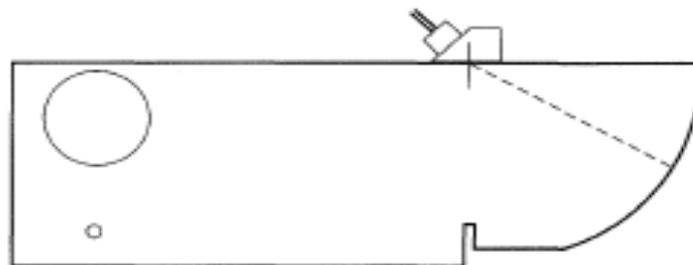


Figura 3.2 Bloque de calibración para exámenes con haz angular. [20]

3.5.4.2 Bloques de calibración para productos tubulares

Para los exámenes de producto tubular, la calibración de los reflectores será longitudinal (axial) y tendrá una longitud no superior a 1 pulg. (25,4 mm), una anchura no superior a 1/16 pulg. (1,5 mm), y una profundidad no superior a 0.0004 pulg. (0,10 mm) o un 5% del espesor de pared nominal, el que sea mayor.

El bloque de calibración deberá ser lo suficientemente largo como para simular el manejo del elemento que se va a examinar a través del examen. Los bloques de calibración serán del mismo grosor $\pm 25\%$ que el elemento a ser examinado.

Para los exámenes en los materiales donde el diámetro de la superficie de examen es mayor que 20 pulg. (500 mm) puede ser utilizado un bloque de esencialmente la misma curvatura, o alternativamente un bloque de calibración básica plana.

Para los exámenes en materiales donde el diámetro de la superficie de examen sea igual o inferior a 20 pulg. (500 mm), se utilizará un bloque curvo. Excepto cuando se indique lo contrario en este artículo, un solo bloque de calibración básico curvado puede ser utilizado para los exámenes en el rango de curvatura 0,9 - 1,5 veces el diámetro del bloque de calibración básico. Por ejemplo, 8 pulg. (200 mm) de diámetro de bloques se pueden usar para calibrar para los exámenes en las superficies en el rango de curvatura de 7,2 pulg. a 12 pulg. (180 mm a 300 mm) de diámetro. El rango de curvatura de 0,94 pulg. a 20 pulg. (24 mm a 500 mm) de diámetro requiere 6 bloques curvos.

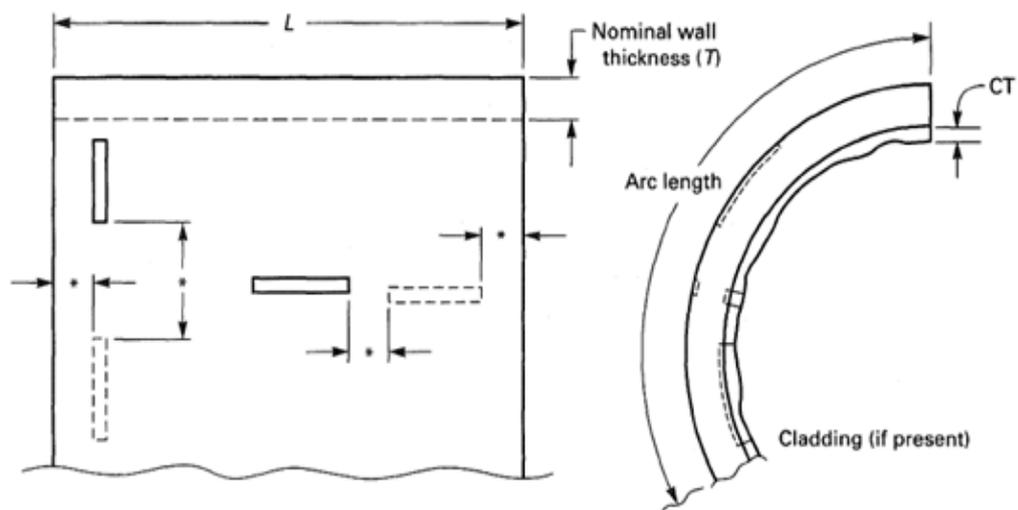


Figura 3.3 Bloque de calibración para tuberías. [20]

3.5.4.3 Calibración

Las calibraciones incluirán el sistema ultrasónico completo y deberán realizarse antes de utilizar el sistema en el rango de espesor bajo examen.

Las calibraciones se llevarán a cabo desde la superficie (revestido o sin revestimiento; convexa o cóncava) correspondiente a la superficie del material a partir del cual se llevará a cabo el examen. Las mismas zapatas de contacto empleadas durante el examen, serán usadas para la calibración.

Para la examinación de contacto, el diferencial de temperatura entre las superficies de bloque y examen de calibración será 25° f (14 ° C). Para la examinación por inmersión, la temperatura del acoplante para la calibración será 25° f (14° C) de la temperatura del acoplante para el examen.

Cuando se cambia cualquier parte del sistema de examinación, deberá realizarse una verificación de la calibración en el bloque de calibración, para verificar que los puntos del rango de distancia y los ajustes de sensibilidad cumplen los requisitos preestablecidos.

Nota: para el presente examen se realizará la calibración tal como ha sido establecido por el fabricante del equipo (Capítulo II).

3.5.5 Práctica estándar para la medición de espesor por el método de contacto pulso-eco ultrasónico manual

3.5.5.1 Alcance

Esta práctica proporciona las pautas para medir el espesor de los materiales que utilizan el método de contacto pulso-eco a temperaturas que no excedan 200°F (93°C). Se puede aplicar esta práctica a cualquier material en el que las ondas ultrasónicas se propagan a una velocidad constante a lo largo de la parte, y de la cual se pueden obtener reflexiones.

3.5.5.2 Resumen de la práctica

Cuando se mide el espesor por el método ultrasónico de pulso-eco, es un producto de la velocidad del sonido en el material y la mitad del tiempo de tránsito (ida y vuelta) a través del material.

$$T = \frac{Vt}{2}$$

Donde:

T = espesor.

V = velocidad.

t = tiempo de tránsito.

El instrumento ultrasónico de pulso-eco mide el tiempo de tránsito del impulso ultrasónico a través de la parte. La velocidad de propagación del sonido en el material que está siendo examinado es una función de las propiedades físicas del material. Se supone por lo general que sea una constante para una clase dada de materiales. Su valor aproximado se puede observar en la tabla 3.2 o se puede determinar empíricamente.

Se requieren uno o más bloques de referencia que tengan velocidad conocida, o del mismo material que hay que examinar, y que tienen grosores medidos con precisión y en el rango de espesores a medir. En general, es deseable que los espesores sean "números redondos" en lugar de valores impares diversos. Un bloque debe tener un valor de espesor cerca del máximo de la gama de interés y el otro bloque cerca del espesor mínimo (figura 3.1).

El elemento de visualización (pantalla A-scan, medidor o indicador digital) del instrumento debe ajustarse a los valores actuales de espesor adecuado en función del rango que se utiliza.

Mediciones de espesor por ultrasonidos se utilizan ampliamente en formas básicas y productos de muchos materiales, en las piezas de mecanizado de precisión, y para determinar adelgazamiento de la pared en diferentes elementos causado por la corrosión y la erosión.

Material	km/seg	pulg/ms
Aire	0.33	0.013
Aluminio (2024-T4)	6.38	0.251
Berilio	12.88	0.507
Carburo de boro	10.92	0.430
Bronce	4.39	0.173
Cadmio	2.77	0.109
Cobre	4.65	0.183
Vidrio (Placa)	5.77	0.227
Glicerina	1.93	0.076
Oro	3.25	0.128
Inconel	5.82	0.229
Hierro	5.89	0.232
Hierro, fundido	4.55	0.179
Plomo	2.16	0.085
Magnesio	5.84	0.230
Mercurio	1.45	0.057
Molibdeno	6.25	0.246
Monel	5.36	0.211
Aceite de motor (SAE 30)	1.75	0.069
Neopreno	1.60	0.063
Níquel	5.64	0.222
Nilón	2.69	0.106
Platino	3.69	0.156
Plexiglass	2.69	0.106
Poliestireno	2.34	0.092
Poliuretano	1.78	0.070
PVC	2.39	0.094
Cuarzo	5.74	0.226
Plata	3.61	0.142
Acero (4340)	5.84	0.230
Acero (303 Inoxidable)	5.66	0.223
Teflón	1.52	0.060
Estaño	3.33	0.131
Titanio	6.10	0.240
Tungsteno	5.18	0.204
Uranio	3.38	0.133
Agua	1.47	0.058
Zinc	4.32	0.170

Tabla 3.2 Velocidad del sonido a través de algunos materiales. [21]

3.5.5.3 Aparato

Los instrumentos de medida de grosor están divididos en tres grupos: detectores con una lectura-scan display, detectores con una pantalla A-scan, y la lectura de espesor directa.

3.5.5.3.1 Detectores con lecturas de la pantalla A-scan pantalla de tiempo / información de amplitud

El espesor se determina mediante la lectura de la distancia entre el pulso inicial corregida de cero y el primer eco devuelto (reflexión posterior), o entre múltiples ecos de reflexión posterior, en una línea de base estandarizada de la pantalla A-scan. La línea de base de la pantalla A-scan se debe ajustar a los incrementos de espesor deseado.

3.5.5.3.2 Detectores de fallas con display numérico

Son instrumentos de detección de fallas por pulso ultrasónico con una combinación de pantalla A-scan y trazado de circuito adicional que proporciona información de espesor digital. El espesor del material puede ser medido electrónicamente y presentado en una lectura digital. La pantalla A-scan ofrece una comprobación de la validez de la medición electrónica por revelar variables de medición, tales como discontinuidades internas o variaciones de eco-fuerza, que podrían resultar en lecturas inexactas.

3.5.5.3.3 Instrumentos de lectura de espesores

Los instrumentos de lectura de espesores son las versiones modificadas del instrumento de pulso-eco. El tiempo transcurrido entre el pulso inicial y el primer eco o entre múltiples ecos es convertido en una lectura digital. Los instrumentos son diseñados para la medida y dirigen la lectura numérica de las gamas específicas de grosor y materiales.

3.5.5.4 Unidades de búsqueda

La mayoría de las unidades de búsqueda de tipo pulso-eco (haz de contacto directo, de línea de retardo y de elemento doble) son aplicables si se utilizan instrumentos para detectar los defectos. Si un instrumento de lectura de grosor tiene la capacidad de leer secciones delgadas, entonces se usa generalmente una unidad de búsqueda de alta frecuencia. Unidades de búsqueda de alta frecuencia (10 MHz o más alto) generalmente se requieren para el grosor menor de aproximadamente 0.6 mm (0,025 pulgadas). Las medidas de materiales en altas temperaturas requieren unidades de búsqueda especialmente diseñadas para la aplicación.

3.5.5.5 Bloques de normalización

Bloques de varios pasos que pueden ser útiles para estos procedimientos de normalización se describieron en la sección 3.5.4 (figuras 3.1, 3.2, 3.3).

3.5.5.6 Normalización de los aparatos

3.5.5.6.1 Caso I - Contacto directo, un elemento de la unidad de búsqueda

La pantalla de inicio se sincroniza con el impulso inicial. Todos los elementos de la pantalla son lineales. El espesor total se muestra en la pantalla de captura.

Se debe colocar la unidad de búsqueda sobre un bloque de normalización de espesor conocido con acoplante adecuado y ajustar los controles del instrumento (normalización de materiales, alcance, de barrido, o velocidad) hasta que la pantalla presente la lectura de espesor adecuado.

Las lecturas deben entonces ser revisadas y ajustadas en los bloques de normalización con espesor de menor valor para mejorar la precisión global del sistema.

3.5.5.6.2 Caso II - Unidad de búsqueda de un elemento de línea de retraso

Cuando se utiliza esta unidad de búsqueda, es necesario que el equipo sea capaz de corregir por el tiempo durante el cual el sonido pasa a través de la línea de retardo de modo que el final de la temporización puede hacerse coincidir con un espesor cero. Esto requiere un llamado control de la "tardanza" en el instrumento o la detección electrónica automática del grosor cero.

En la mayoría de los instrumentos, si el circuito de estandarizar el material previamente fue ajustado para una determinada velocidad de material, el control de retardo debe ajustarse hasta obtener una lectura correcta de espesor en el instrumento. Sin embargo, el instrumento debe estar completamente estandarizado con la unidad de búsqueda de línea de retardo, se recomienda usar al menos dos bloques de normalización. Uno debe tener un espesor de cerca del máximo de la gama a medir y el otro bloque de cerca del espesor mínimo.

Se debe colocar la unidad de búsqueda secuencial en uno y luego el otro bloque, y obtener ambas lecturas. La diferencia entre estas dos lecturas se debe calcular. Si la diferencia de espesor de lectura es menor que la diferencia de espesor real, colocar la unidad de búsqueda sobre la muestra más gruesa, y ajustar el control de estandarizar para ampliar la gama de espesores. Si la diferencia de espesor de lectura es mayor que la diferencia de espesor real, colocar la unidad de búsqueda sobre la muestra más gruesa, y ajustar el control de estandarizar para disminuir el rango de espesor. Se recomienda generalmente una cierta cantidad de más de corrección. Colocar de nuevo la unidad de búsqueda secuencialmente en ambos bloques y verificar las diferencias de lectura haciendo correcciones apropiadas adicionales. Cuando el diferencial de grosor de lectura iguala el diferencial de grosor actual, la variedad de grosor material correctamente se ajusta. Un único ajuste del retardo debe permitir entonces las lecturas correctas en el extremo alto y bajo de la gama de espesores.

Una técnica alternativa para las unidades de búsqueda de línea de retardo es una variación de la descrita en el párrafo anterior. Una serie de ajustes secuenciales se realizan, mediante el control de "retraso" para proporcionar lecturas correctas en el bloque de normalización más delgado y el control de "rango" para corregir las

lecturas en el bloque más grueso. Cuando ambas lecturas son "correctas" el instrumento está bien ajustado.

3.5.5.6.3 Caso III - Unidades de búsqueda dual

El método descrito en el Caso II también es adecuado para los equipos que utilizan unidades de búsqueda duales en los rangos más gruesas, por encima de 3 mm (0.125 pulg.). Sin embargo, por debajo de esos valores hay un error inherente debido a la trayectoria en "V" de los viajes de haz de sonido. El tiempo de tránsito ya no es linealmente proporcional al espesor, y la condición se deteriora hacia el espesor bajo de la gama. La variación también se muestra esquemáticamente en la figura 3.4.

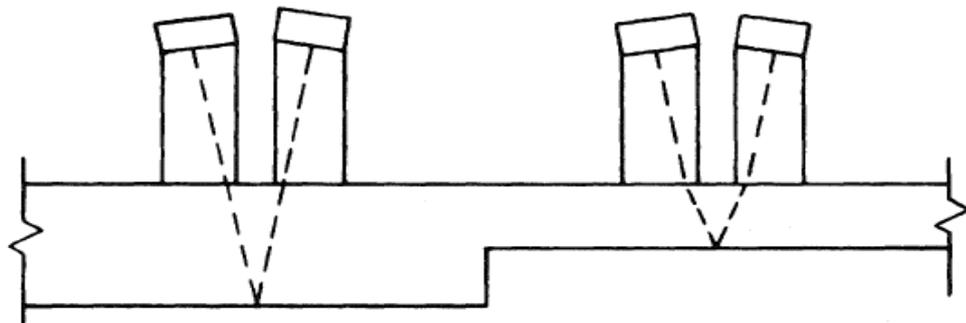


Figura 3.4 El camino del sonido aumenta proporcionalmente con la disminución de espesor. [20]

3.5.5.6.4 Caso IV - Secciones gruesas

Este procedimiento es útil para casos donde se requiere un alto grado de precisión para secciones gruesas. Se utilizan la unidad de búsqueda de contacto directo y la sincronización de pulso inicial.

La estandarización básica del barrido se hará como se describe en el Caso 1. El bloque de normalización elegido debe tener un espesor que permita estandarizar la distancia de barrido completo a la precisión adecuada, es decir, unos 10 mm (0,4 pulg.) o 25 mm (1,0 pulg.) de la escala completa.

Después de la estandarización básica, el barrido se debe retrasar. Por ejemplo, si se espera que el grosor de la parte nominal sea de 50 a 60 mm (2,0 a 2,4 pulg.), y el bloque de estandarización básico es 10 mm (0,4 pulg.), y el grosor incremental mostrado también será de 50 a 60 mm (2,0 a 2,4 pulg.), se deberá realizar lo siguiente: ajustar el control de la tardanza de modo que el quinto eco trasero del bloque de estandarización básico, equivalente a 50 mm (2,0 pulg.), se alinea con la referencia "0" en la pantalla A-scan. El sexto eco trasero debería ocurrir entonces en el borde correcto del barrido estandarizado.

La lectura obtenida en la muestra desconocida se debe agregar al valor retrasado fuera de la pantalla. Por ejemplo, si la lectura es 4 mm (0,16 pulg.) el espesor total será de 54 mm (2,16 pulg.).

Se pueden emplear unidades duales de búsqueda con eficacia en condiciones de superficie rugosa. En este caso, sólo el primer eco devuelto, como del inferior de un hoyo, es usado en la medida.

Los materiales de alta temperatura, de hasta aproximadamente 540°C (1000°F), pueden medirse con instrumentos especialmente diseñados con una compensación de alta temperatura, conjuntos de unidades de búsqueda y acopladores. Se requiere la normalización de las lecturas de espesor aparente de temperaturas elevadas.

La lectura de espesor aparente obtenida de paredes de acero con temperaturas elevadas es alta (demasiado grueso) por un factor de aproximadamente un 1% por 55° C (100° F). Por lo tanto, si el instrumento se estandarizó en una pieza de material similar a 20° C (68° F), y si la lectura se obtuvo con una temperatura superficial de 460° C (860° F), la lectura aparente debe reducirse en un 8%. Esta corrección es un promedio para muchos tipos de acero. Otras correcciones tendrían que ser determinados empíricamente para otros materiales.

3.5.6 Práctica estándar para pruebas ultrasónicas en tuberías metálicas⁵

3.5.6.1 Alcance

Esta práctica cubre un procedimiento para detectar discontinuidades en tuberías de metal durante un examen volumétrico, utilizando métodos ultrasónicos. Las técnicas específicas que se incluyen en este procedimiento son de pulso-reflexión (contacto y sin contacto), y de haz angular para las técnicas de inmersión.

Esta práctica está diseñada para uso con productos tubulares con diámetros exteriores de aproximadamente ½ pulg. (12,7mm) o superiores, sin embargo estos procedimientos han sido exitosos con tamaños más pequeños.

Con el uso de estos procedimientos se garantiza que las formas de haz y ángulos de haz apropiados se utilicen para proporcionar una completa cobertura del volumen de las tuberías.

El propósito de esta práctica es diseñar un procedimiento para detectar y localizar discontinuidades significativas, tales como pozos, huecos, inclusiones, grietas, hendiduras, etc., mediante el método de pulso-reflexión de ultrasonidos. Esta práctica no establece criterios de aceptación, éstos serán especificados por las partes.

3.5.6.2 Resumen de la práctica

Se utilizará un haz angular mediante el contacto superficial, el no contacto, o el método de inmersión. La figura 3.5 ilustra el ángulo de entrada del rayo ultrasónico característico en la pared de una tubería en la dirección circunferencial para descubrir discontinuidades longitudinales que usan una sola unidad de búsqueda.

⁵ Artículo 23. SE-213 Norma ASME BPVC V (2010)

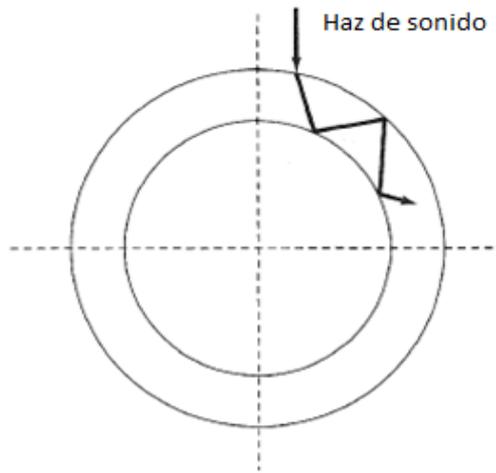


Figura 3.5 Propagación circunferencial del sonido en la pared de una tubería. [20]

La figura 3.6 ilustra el ángulo de la entrada del rayo de ultrasonido característico en la pared de una tubería en la dirección axial para buscar discontinuidades transversales que usan una sola unidad de búsqueda.



Figura 3. 6 Propagación axial del sonido en la pared de una tubería. [20]

A fin de garantizar la detección de discontinuidades que no aportan una respuesta favorable de un lado, la exploración se realiza en ambas direcciones circunferenciales de discontinuidades longitudinales, y cuando una exploración axial se especifica por la o las partes, la exploración se realiza en ambas direcciones axiales para discontinuidades transversales.

Para el examen eficiente de grandes cantidades de material, pueden ser utilizadas múltiples unidades de búsqueda y los instrumentos pueden ser utilizados simultáneamente para realizar la exploración en las direcciones necesarias. Varias

unidades de búsqueda se pueden emplear para realizar un escaneo "entrelazado" en cada dirección necesaria para que las tasas de examen sean más altas.

3.5.7 Condición superficial

Todas las superficies deberán estar limpias y libres de escoria, suciedad, grasa, pintura u otro material extraño que pudiera interferir con la interpretación de los resultados del examen. Los métodos utilizados para la limpieza y la preparación de las superficies para el examen ultrasónico no deben ser perjudiciales para el metal base o el acabado superficial. Una excesiva rugosidad de la superficie o rasguños sobre la misma, pueden producir señales que interfieren con el examen.

3.5.8 Instrumento

Los instrumentos deben ser del tipo pulso-eco indicados en párrafos anteriores. Un canal independiente (o canales) de instrumentación será empleado para monitorear individualmente las respuestas longitudinales y, cuando sea necesario, unidades de búsqueda orientadas transversales. La tasa de repetición de impulsos del instrumento será capaz de ser ajustada a un valor suficientemente alto para garantizar la detección de la imperfección en la velocidad de exploración empleado.

Para tubos pequeños, deben utilizarse mecanismos de apoyo en la estación de examen para prevenir cualquier movimiento transversal del haz con respecto a la unidad de búsqueda durante la exploración.

3.5.9 Estándares de referencia

Un patrón de referencia de una longitud conveniente se preparará a partir de una longitud de tubería o tubo del mismo diámetro nominal, espesor de pared, material, acabado superficial y propiedades acústicas como el material a ser examinado.

La tubería de referencia debe estar libre de discontinuidades u otras condiciones que producen indicaciones que pueden interferir con la detección de las muescas de referencia.

Las dimensiones de primera clase, que son la longitud, la profundidad y la anchura (y para muescas en V, el ángulo incluido) deben ser decididas por la o las partes. La figura 3.7 ilustra las configuraciones de muesca comunes y las dimensiones a medir (En la figura 3.7 (a), (b), y (d), las esquinas agudas son para facilidad de ilustración. Se reconoce que en la práctica de mecanizado normal, se generará un radio). Las amplitudes de las reflexiones de V, cuadrada, y muescas en forma de U de dimensiones comparables pueden variar ampliamente dependiendo del ángulo, la frecuencia y el modo de vibración del haz de sonido.

La profundidad de la muesca será un promedio medido desde la superficie de la tubería circular a la penetración máxima y mínima de la muesca. Las mediciones pueden ser hechas por un medio óptico, replicante, u otras técnicas acordadas. A menos que se especifique lo contrario por la o las partes, la profundidad de la muesca será de $\pm 0,0005$ pulg. (0,013 mm) del valor especificado para muescas 0,005 pulg. (0,13 mm) o menos de profundidad, y dentro de + 10, el 15% del valor especificado para muescas más de 0.005 pulgadas de profundidad.

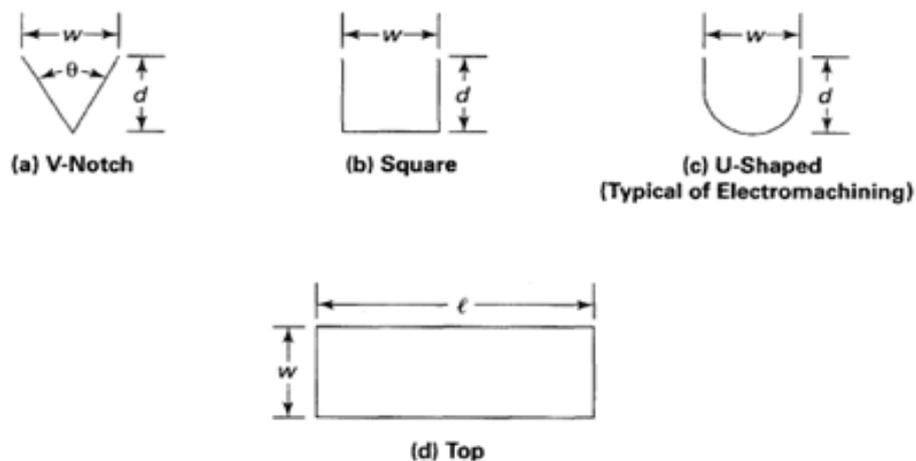


Figura 3.7 Formas comunes de las muescas. [20]

Cuando las tolerancias de la muesca son especificadas por la o las partes, las tolerancias a menudo pueden incluir sólo valores negativos con la desviación positiva cero permitida de modo que la sensibilidad nunca se reduzca debajo de un valor mínimo especificado. El uso de muescas más pequeñas es permisible, todo dependerá del acuerdo al que lleguen las partes.

La anchura de las muescas será tan pequeña como práctica, pero no debe exceder de dos veces la profundidad.

3.5.10 Normalización de los aparatos

3.5.10.1 Normalización estática

Usando el estándar de referencia especificado, se ajusta el equipo para producir las indicaciones claramente identificables de las muescas superficies internas y externas.

La respuesta de las muescas de las superficies interiores y exteriores debe ser tan igual como sea posible. Utilizar la menor de las dos respuestas para establecer el nivel de rechazo. En diámetro grande o tubo de la pared pesado, si la amplitud de la muesca superficial interior y externa no se puede hacer igual debido a la distancia del camino del material y dentro de la curvatura del diámetro, un nivel de rechazo separado se puede establecer para las muescas superficiales interiores y externas.

3.5.10.2 Normalización dinámica

Estandarizar el equipo en las condiciones dinámicas que simulan el examen de producción. La tubería a ser examinada y el ensamble de la unidad de búsqueda tendrán un giro que traduce el movimiento el uno en relación con el otro tal que un camino de exploración helicoidal será descrito sobre la superficie externa. Mantener la velocidad de rotación y traducción constante dentro de \pm el 10 %.

El paso de la hélice de alimentación deberá ser lo suficientemente pequeño para asegurar la cobertura de al menos el 100% en la distancia examen y la sensibilidad establecida durante la estandarización. La cobertura se basará en el tamaño máximo efectivo de la unidad de búsqueda, la densidad de impulsos para cada canal de instrumento y la hélice.

Toda alteración en el metal, rebabas, etc., junto a las muescas de referencia deberá ser removida.

3.5.11 Procedimiento

- a. Examinar la tubería con el ultrasonido transmitido en ambas direcciones circunferenciales para discontinuidades longitudinales y, cuando se especifica, en ambas direcciones axiales para discontinuidades transversales, en condiciones idénticas usadas para la calibración del equipo. Las condiciones idénticas incluyen todos los ajustes del instrumento, movimientos mecánicos, búsqueda de posición de la unidad y la alineación con respecto a la tubería o tubo, acoplante líquido, y cualesquiera otros factores que afectan el desempeño del examen.
- b. Estandarizar nuevamente el equipo cualquier momento que este no logre producir las amplitudes de señal.
- c. No realizar ningún ajuste de equipo, durante el examen, a no ser que el procedimiento de estandarización completo sea realizado después de cualquier ajuste.
- d. El examen se aplicará a 100% de la tubería o tubo a menos que se especifique lo contrario.

3.5.12 Interpretación de los resultados

Todas las indicaciones que son igual o mayor que el nivel de rechazo establecido durante la normalización, y tomando en cuenta indicadores de referencia descritos, se considerará como representación de defectos y pueden ser causal de rechazo de la tubería. Como alternativa, la parte o las partes pueden especificar criterios de aceptación específica.

Si después de un examen más detenido de la tubería o tubo, no se detectan indicios rechazables, el material será considerado como haber aprobado el examen ultrasónico.

3.5.13 Limpieza post examen

Cuando la limpieza post-examen sea requerida por el procedimiento, debe llevarse a cabo tan pronto como sea posible después de la evaluación y la documentación mediante un proceso que no afecta negativamente a la parte.

3.5.14 Evaluación

Para los exámenes utilizando calibraciones de DAC, cualquier imperfección con una indicación de amplitud de más del 20% del DAC, será investigado en la medida en que pueda ser evaluado en términos de los criterios de aceptación preestablecidos.

3.6 Técnicas de inspección

En los equipos de Ultrasonido se produce un impulso rectangular corto que excita un cristal en un palpador, esto genera una tensión eléctrica de alto voltaje, en la cual las vibraciones que se producen, convierten las señales eléctricas en señales mecánicas.

Las oscilaciones producidas por el cristal se propagan en el material en forma de ondas sonoras que son de frecuencia muy alta (Megahercios) y no son perceptibles por el oído humano. Las ondas acústicas son reflejadas a lo largo del material hasta una superficie límite y captadas nuevamente por el palpador, en base a la cual se reflejan en la pantalla del equipo en forma de eco. Si se ajusta bien el eco en la pantalla podemos detectar los defectos de una pieza o determinar su espesor.

La inspección ultrasónica de los materiales puede realizarse por varias técnicas. En la aplicación práctica del ensayo por ultrasonido existen dos técnicas básicas: de contacto y de inmersión.

3.6.1 Técnicas de contacto

En la técnica de contacto el palpador se coloca directamente sobre la pieza a inspeccionar utilizando un medio de acople para transmitir el sonido a través de la pieza de inspección.



Figura 3.8 Técnica de contacto directo. [22]

Esta técnica es una de las más utilizadas y la información a analizar en una inspección por esta técnica es la posición del transductor, la amplitud del eco recibido, el recorrido de las ondas en el material y la forma del pulso.

En esta técnica pueden ser utilizadas ondas longitudinales, transversales o de superficie.

3.6.1.1 Diagnóstico de las indicaciones

El primer diagnóstico a realizar es comprobar si el primer eco de referencia (figura 3.9) en la pantalla es un eco real o de una discontinuidad, si es un eco geométrico o un eco de interferencia.



Figura 3.9 Primer eco de referencia. [22]

A pesar de que hay especificaciones que requieren una evaluación del eco para determinar la clase de falla que lo genera, se considera que es muy inseguro dar un dictamen sobre un tipo de falla basándose únicamente en su comportamiento acústico.

Es necesario mencionar que existen algunas fallas que tienden a generar un eco característico y peculiar, pero al momento de diagnosticar se requiere mucha experiencia y conocimientos muy fundamentados tanto del material así como la dinámica del eco. Por esta razón el diagnóstico determinado por un operador es algo muy personal en base a su propia experiencia que algunas veces no concuerda con el dictamen dado por otro. Un diagnóstico no es un criterio de aceptación o rechazo, pero puede dar una ayuda para tomar medidas preventivas en los procesos de fabricación de los materiales.

3.6.1.2 Ecos no relevantes

Si el acople entre el transductor y la pieza es muy grueso se generan ciertos ecos de interferencia (ecos de acople, figura 3.10) que disminuyen o desaparecen cuando la película de acoplante se hace más delgada. Las zapatas pegadas a un transductor para su protección también generan ecos no relevantes al momento de hacer el ensayo.



Figura 3.10 Ecos no relevantes. [22]

Cuando se utilizan transductores emisor-receptor, siempre se obtiene dos ecos al hacer contacto con una superficie, donde el primero es el eco de contacto y el segundo es el de pared opuesta (figura 3.11).



Figura 3.11 Eco de contacto y de pared opuesta. [22]

Al inspeccionar una pieza alargada y delgada con un transductor normal se obtiene, además de los ecos de la superficie opuesta, una serie de ecos, estos son causados por el efecto de la pared lateral. Las ondas longitudinales en relación a las paredes tienen un ángulo de incidencia de noventa grados. Esta incidencia causa que parte de la energía sonora se convierta en ondas transversales. El ángulo bajo el cual las ondas transversales se propagan depende de la velocidad sonora en el material de ensayo.

Las ondas transversales al chocar con la pared opuesta, se reflejan y otra parte se transforma en ondas longitudinales; lo mismo sucede en cada punto de incidencia y así sucesivamente.

Las ondas convertidas en longitudinales retornan al cristal del transductor, pero su distancia (debido al gran número de reflexiones internas y recorrido en zigzag) es mucho mayor que la de los ecos longitudinales de recorrido recto. A estos ecos de interferencia se les conoce como ecos laterales y aparecen siempre que ocurra una propagación longitudinal paralela a las paredes.

Al inspeccionar piezas cilíndricas de diámetros variables como por ejemplo flechas o rodillos, se debe prever la localización de los ecos laterales, pues podrían ser interpretados como fallas en una posición más profunda. Si al chequear este tipo de piezas aparecen incitaciones sistemáticas y con igual amplitud, se deben calcular las posiciones de los ecos laterales para confirmar si el eco es de una falla real o no.

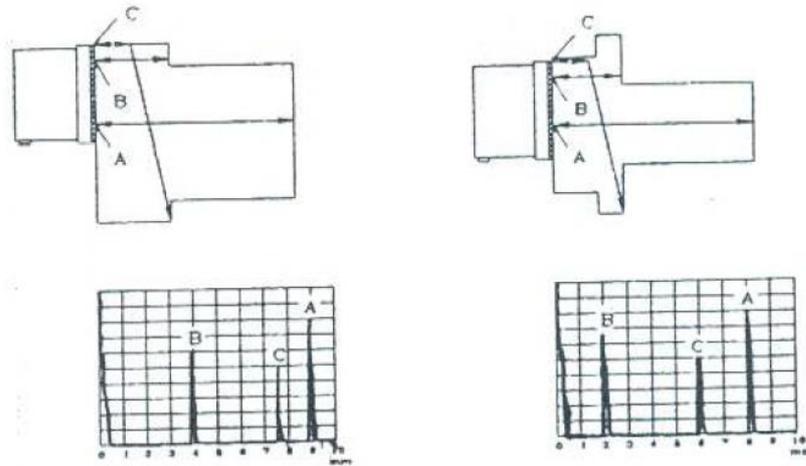


Figura 3.12 Supuesta ubicación de una falla en profundidad X. [23]

Para este caso la posición de los ecos laterales se puede calcular de la siguiente formula:

$$\Delta S = 0,76 n \cdot d$$

Donde:

n Es el número correspondiente al eco lateral (1, 2, 3, ... n).

d Es el diámetro de la barra.

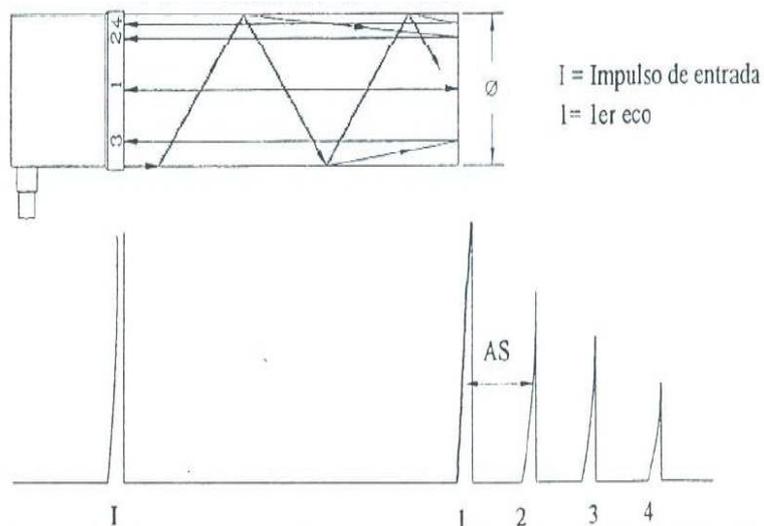


Figura 3.13 Recorrido del sonido y ecos laterales en una barra. [23]

Al utilizar transductores planos para la inspección en piezas cilíndricas, ocurre que debido al acoplamiento inadecuado y a los ángulos diferentes a la normal, se generan los denominados ecos adicionales, uno causado por reflexión de la onda y el segundo debido a la transformación de la onda. La posición de los ecos adicionales en el acero se obtiene mediante las siguientes dos fórmulas:

$$S_1 = 1,30 (d)$$

$$S_2 = 1,68 (d)$$

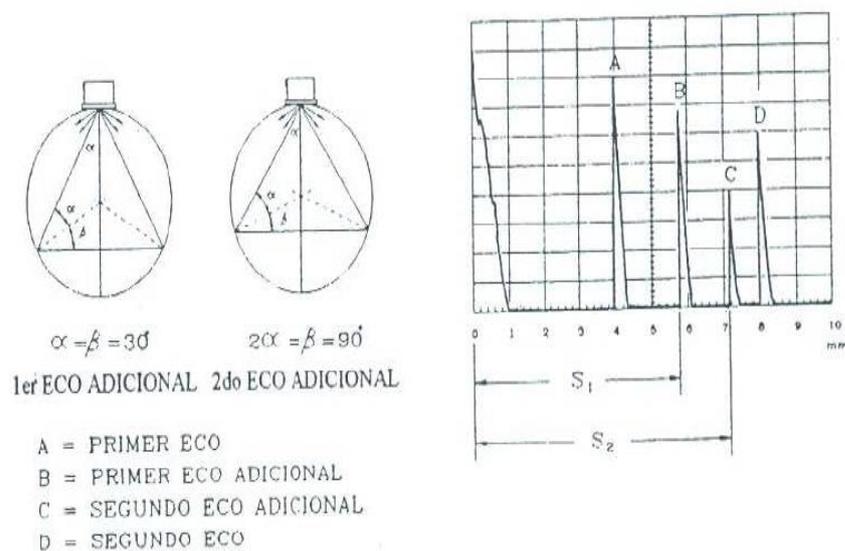


Figura 3.14 Ecos adicionales en piezas cilíndricas. [23]

3.6.2 Inspección básica por inmersión

Las instalaciones para inspección por inmersión cubren un margen amplio de modelos desde las instalaciones para operar manualmente a instalaciones semiautomáticas y automáticas. En esta técnica de inspección es indispensable el uso de tanques, puentes y manipuladores.

3.6.2.1 Tanques

Los tanques utilizados en ultrasonido por inmersión deben ser los suficientemente amplios para sumergir las piezas a inspeccionar.

El agua que se utiliza debe contener un aditivo que libere las tensiones superficiales y facilite el humedecimiento completo de la superficie de inspección garantizando así un acople uniforme.

3.6.2.2 Puentes y manipuladores

Los puentes sirven para realizar el desplazamiento a lo largo del tanque, para ello el puente se desplaza sobre rieles por medio de motores sincronizados, mientras que los manipuladores están acoplados sobre el puente y se desplazan transversalmente sobre el mismo. Casi todas estas instalaciones son hoy en día completamente automáticas, aunque todavía existen algunas manuales.

En la técnica de inmersión, la pieza a ensayar se encuentra completamente sumergida en un tanque con agua, con ello se mantiene la ventaja de mantener un acople siempre constante. También el palpador a prueba de agua está parcialmente sumergido; ya que no existe un contacto directo con la superficie de ensayo, en base al cual no se presenta desgaste del transductor.

Un requisito indispensable para garantizar la reproducción de los resultados es que el agua este limpia y sin burbujas de aire. El haz del sonido dirigido hacia la pieza es a través del agua. Los transductores usados son transductores normales y de acuerdo con su orientación en el manipulador se puede generar en la pieza ondas longitudinales o transversales. En las instalaciones automáticas se utilizan transductores focalizados para encontrar defectos muy cerca de la superficie o muy pequeños.

La distancia recorrida preliminar (distancia entre la cara del transductor y la superficie de inspección) es un factor muy importante y debe ser ajustada de tal manera que las reflexiones sobre la superficie de entrada no interfieran con la evaluación de la inspección, es decir la distancia de recorrido preliminar se determina de tal manera que el tiempo necesario para enviar el sonido a través del agua sea mucho mayor que el lapso que necesita el sonido para atravesar la pieza de inspección. Esto se logra gracias a las diferentes velocidades de propagación del sonido en los dos medios.

La relación entre la trayectoria recorrida en el acoplante y el espesor del objeto de prueba para la técnica de inmersión está dada por:

$$da = \frac{Va}{Vp} (N)(dp)$$

Donde:

Da = trayectoria recorrida en el acoplante (mm).

Va = Velocidad acústica del acoplante (m/seg).

Vp = Velocidad acústica de la pieza en inspección (m/seg).

Dp = Espesor de la pieza en inspección (mm).

N = Numero deseado de reflexiones repetitivas en la pieza de inspección.

En agua la velocidad de propagación es aproximadamente un cuarto de la del acero ($V_{agua}=1480$ m/s; $V_{acero}= 5940$ m/s) y en consecuencia un recorrido de 100 mm, en agua aparece en la pantalla como un recorrido de 400 mm de acero.

3.6.2.3 Formación de ecos

La superficie superior de ensayo forma un límite de dos medios diferentes (acertó/agua), la cual refleja el primer eco que aparece en la pantalla. Este eco ajusta en la posición cero de la pantalla. Como se vio anteriormente, escogiendo una distancia adecuada de recorrido preliminar, se pueden evitar los ecos molestos del límite agua/acero.

Como segundo eco se debe calibrar el de pared apuesta hasta obtener el espesor de la pieza de ensayo; cualquier otro eco que aparezca entre estos dos provendrá de alguna discontinuidad.

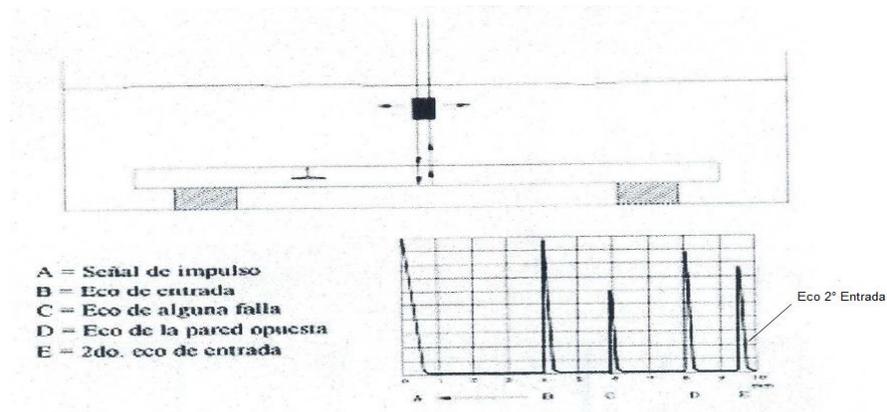


Figura 3.15 Secuencia normal de ecos en la técnica de inmersión. [23]

3.6.3 Técnicas especiales de inspección

Existe una variante de las técnicas de inspección tradicionales, las cuales son aplicables en casos especiales. Dentro de estas técnicas se puede mencionar únicamente la delta y el método tandeo.

3.6.3.1 La técnica delta

En esta técnica son necesarios dos palpadores, un emisor y un receptor. La disposición de estos palpadores suele ser tal que el emisor se cuadra en un ángulo predeterminado respecto a la superficie del material sujeto a inspección y el palpador receptor sea perpendicular a dicha superficie.

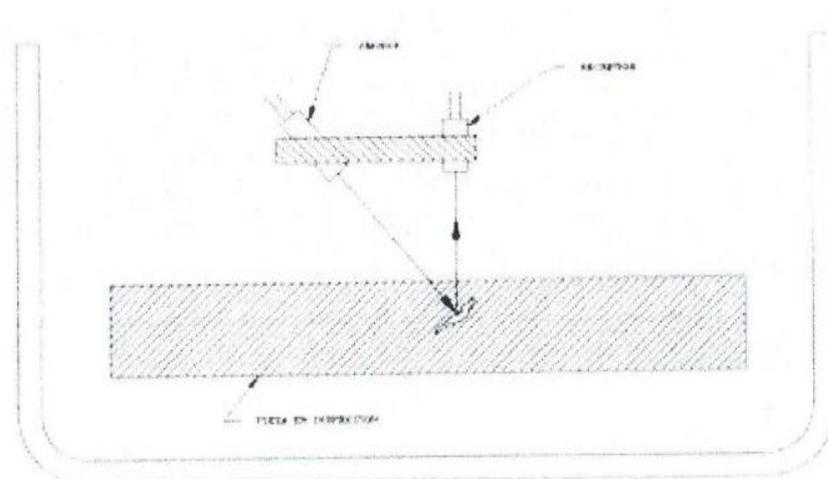


Figura 3.16 Representación esquemática de la técnica delta. [23]

Esta técnica se basa en el uso de la dispersión de las ondas en una discontinuidad, que consiste de una discontinuidad longitudinal y otra transversal.

Durante el barrido, los palpadores deben ser desplazados conjuntamente exigiendo simple una separación constante entre uno y otro de acuerdo a un programa, el barrido generalmente se hace por inmersión aunque existen unidades delta de inmersión local.

3.6.3.2 Método tandeo

Este método es conocido también como “pitch and catch” y es el método más usado comúnmente en la inspección de uniones soldadas en recipientes de pared gruesa, específicamente en recipientes a presión para reactores nucleares.

En este método se emplean dos palpadores los cuales están colocados del mismo lado del material, el tiempo entre pulsos corresponde a un haz de sonido transversal que viaja del transmisor al reflector y finalmente es captado por el receptor.

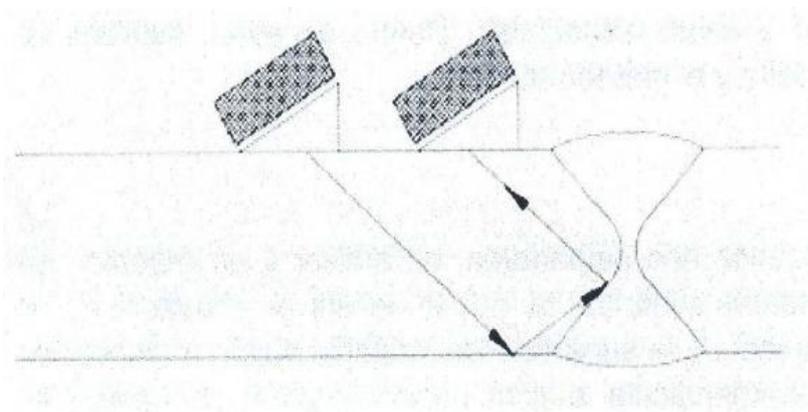


Figura 3.17 Técnica pitch and catch. [23]

3.7 Indicaciones

El termino indicación, relacionado con las pruebas no destructivas, se refiere a la respuesta que se obtiene al aplicar algún método de inspección de ensayos no destructivos.

No todas las indicaciones son causadas por discontinuidades, existen tres tipos generales de indicaciones que son:

- Indicación falsa.
- Indicación no relevante.
- Indicación verdadera.

Existen diferencias específicas entre los tres tipos de indicaciones, y el técnico a inspeccionar debe ser capaz de:

- Interpretar una indicación específicamente y determinar cuál es la causa.
- Utilizar el método de inspección apropiado.
- Determinar en qué tipo está clasificada una indicación.
- Seguir procedimientos escritos.
- Requiere experiencia y habilidad para evaluar una indicación apropiadamente.

La indicación falsa es producida u obtenida por una mala aplicación del método de inspección o una limpieza inadecuada de la pieza a inspeccionar, la indicación no relevante es producida por la configuración geométrica de la pieza y la indicación verdadera es aquella que proviene de una discontinuidad.

Para poder determinar si una indicación es verdadera, se requiere de un conocimiento previo al proceso empleado para la fabricación del artículo, el conocimiento de su funcionamiento y los esfuerzos a los que estado sometido. Una indicación verdadera puede o no ser aceptable, dependiendo de los requerimientos de la especificación del producto.

Es posible que una discontinuidad aceptable pueda incrementarse en tamaño a causa de los esfuerzos a que se somete una pieza durante su servicio. Las indicaciones de discontinuidades superficiales aparecen como imágenes agudas, bien definidas y claras. Las indicaciones de discontinuidades sub-superficiales aparecen como imágenes menos definidas, anchas, irregulares y difusas.

3.8 Inspección de Tuberías

En la inspección ultrasónica de tuberías es necesario analizar cada una de las posibles discontinuidades en las que se puedan involucrar las tuberías dependiendo del tipo de trabajo o sistema a las que estén destinadas a realizar, partiendo de los siguientes criterios como la detección de laminaciones, grietas, corrosión y medición de espesores.

3.8.1 Detección de laminaciones

Cuando se inspecciona un tubo para detectar laminaciones, puede emplearse el mismo método que se utiliza para la inspección de placas, por ejemplo una prueba por puntos por el método de contacto con transductores de haz recto. La frecuencia que debe ser seleccionada depende del espesor de pared. La posibilidad de llevar a cabo la inspección de tubería está limitada, debido a la curvatura de la pieza, a diámetros que exceden 80 mm (3,150 pulgadas) y espesores mayores de 6 mm (0,236 pulgadas).

En general, la tubería con espesor de pared delgada puede ser inspeccionada cuando no hay contacto entre el transductor y la superficie, por ejemplo cuando se utiliza el método de inmersión. En cualquier caso el haz ultrasónico debe ser ajustado exactamente en dirección radial. La superficie del diámetro interior sirve como reflector de referencia ya que proporciona un eco claro cuando el haz es reflejado por él y no existe laminación.

3.8.2 Detección de grietas

Cuando el espesor de pared excede 20 mm (0,787 pulgadas), las grietas transversales pueden ser detectadas utilizando un transductor de haz recto colocado en el extremo del tubo. Si este método no puede ser aplicado como en el caso de la inspección de cilindros de gas, debe llevarse a cabo un barrido en dirección longitudinal con transductor de haz angular. Por ejemplo utilizando zapatas de 70° y 80° que sirven para detectar grietas localizadas en el diámetro interior cuando el espesor de pared es menor a 30 mm (1,181 pulgadas). En tubería con espesor de pared que excede 60

mm (2,362 pulgadas) pueden ser usadas zapatas de 45°. Maquinar la superficie de contacto de la zapata es una ventaja cuando el diámetro de la tubería es menor de 200 mm (7,874 pulgadas).

En tubería con espesor de pared grueso, las grietas longitudinales que pueden ocurrir durante el proceso de fabricación o que pueden desarrollarse durante su operación y como resultado de esfuerzos de corrosión, son detectadas realizando el barrido en forma circunferencial como se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.18 Barrido en forma circunferencial. [23]

Recordemos que las zapatas para transductores de haz angular tienen líneas marcadas en ambos costados, las cuales indican el punto de entrada de la línea central del haz ultrasónico en la materia. Cuando estos transductores son usados en la inspección de placas, por ejemplo en la inspección de juntas soldadas, el haz ultrasónico viaja hacia y entre las superficies del material.

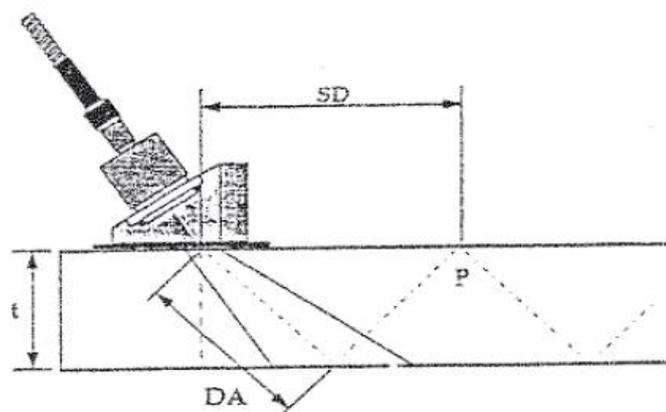


Figura 3.19 Inspección con zapata. [23]

Sabemos que la distancia desde el punto índice de emisión hasta el punto “P” (distancia de salto), se obtiene multiplicando el espesor de la placa por el factor de la zapata. En el caso de una zapata de 60° el factor es de 3,5; por lo que si hablamos de una placa con un espesor de 30 mm (1,181 pulgadas) la distancia al punto “P” será de $30 \times 3,5 = 105$ mm.

La distancia de salto es calculada utilizando el valor del espesor y del ángulo de la zapata como sigue:

$$DS = 2t \cdot \tan \theta$$

Además la distancia de recorrido del haz (distancia angular) “DA” también es de interés y se determina de la forma siguiente:

$$DA = t(1/\cos \theta)$$

La siguiente tabla proporciona los valores para este factor y diferentes ángulos:

θ	35°	45°	60°	70°	80°
$1/\cos \theta$	1.22	1.44	2.00	2.92	5.75

Tabla 3.3 Distancia angular a través de diferentes ángulos de zapatas. [23]

Como se observa en la figura siguiente los valores de “SD” y “DA” obtenidos para materiales planos utilizando las ecuaciones anteriores deben ser corregidos para materiales curvos, como en el caso de tubería.

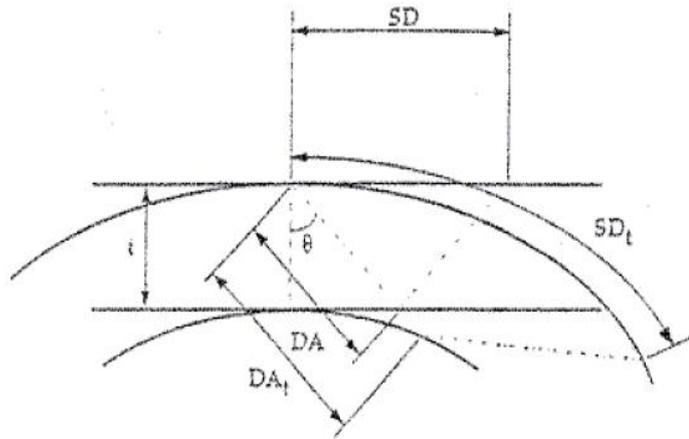


Figura 3.20 Valores de SD y DA . [23]

Los factores “ f_p ” y “ f_s ” pueden ser obtenidos de las siguientes graficas:

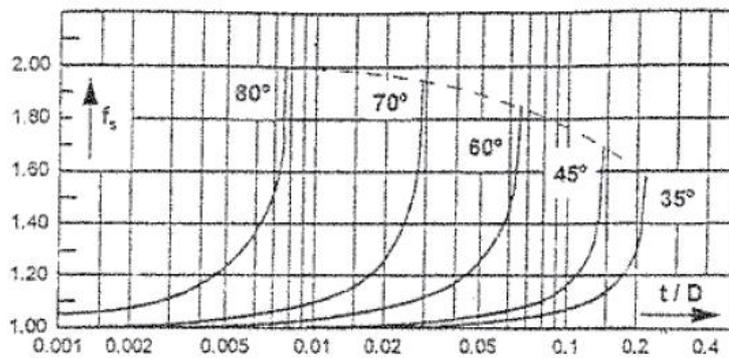
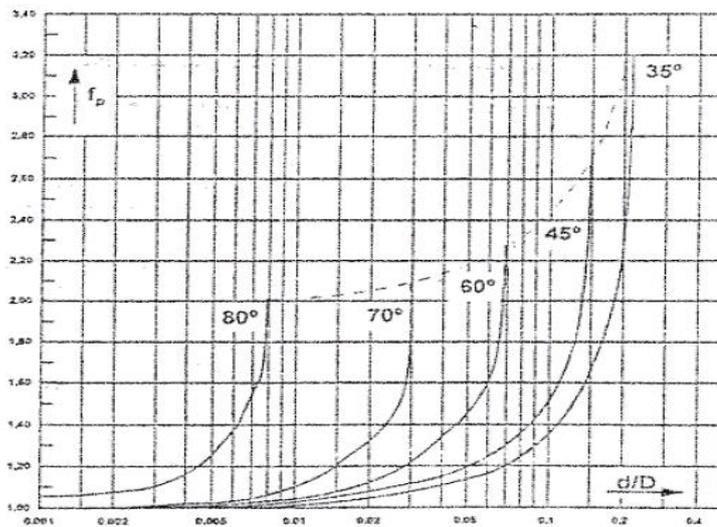


Figura 3.21 Tabla de valores f_p y f_s . [23]

3.9 Inspección de tuberías según la normativa de Petroecuador

Todas las condiciones de operación como son acabado superficial, frecuencia del transductor, calibración del sistema tipo de transductor y acoplante empleado deben ser las mismas durante la calibración y la inspección.

3.9.1 Requisitos de barrido

El nivel de barrido debe de realizarse a un ajuste de ganancia de por lo menos, dos veces del nivel de referencia primario y la velocidad de barrido no debe ser mayor a 6 pulg/seg (152,4 mm/seg).

3.9.2 Indicaciones registrables

En la medición de espesores todas las lecturas de espesor serán registradas para su análisis, también se registrarán cualquier indicación que cause pérdida completa de la reflexión de pared posterior cuando se inspeccione la zona de barrido para haz angular.

Para la inspección de zonas con corrosión interna se debe delimitar la zona afectada indicando cuantitativamente la zona más dañada (espesor mínimo detectado). En la aplicación del haz angular y recto en las tuberías, todas las imperfecciones que produzcan una amplitud de señal mayor al 20% con respecto al nivel de referencia, serán investigadas para determinar la forma, identidad y localización para evaluarlas en términos de los criterios aplicables.

Para cada indicación de discontinuidad registrable debe suministrarse la siguiente información:

- a) Máxima amplitud de la indicación.
- b) Profundidad de la discontinuidad a partir de la superficie de barrido.
- c) Ubicación de la discontinuidad en un croquis de la pieza o material inspeccionado.
- d) Orientación de la discontinuidad.
- e) Longitud de la discontinuidad.

- f) Tamaño equivalente de la discontinuidad.
- g) Tipo de discontinuidad (lineal, puntual, volumétrica, aislada, agrupadas, etc.)

3.9.3 Condiciones de la superficie

La superficie se encontrará libre de impurezas tales como maleza, costras de óxido polvo u otros materiales adheridos que puedan interferir con el adecuado acoplamiento del palpador, para lo cual se procederá a retirar la maleza, raspar con espátulas, lijás o cualquier instrumento que no lastime la superficie del tubo.

En el trazado de los puntos para la inspección en tuberías se lo hará describiendo una línea sinusoidal con una amplitud de pico a pico de aproximadamente cinco centímetros.

3.9.4 Corrosión general

Si la corrosión general ha reducido el espesor de pared nominal de la tubería a menos del espesor de diseño calculado con la siguiente formula, la sección o tramo de tubería debe ser reemplazado o reparado.

$$T = (P \cdot D)/(E \cdot S)$$

$$S = 0,72 \cdot E \cdot R$$

Donde:

P = Presión interna de diseño, psi (bar); debe ser mayor o igual a la presión máxima de operación.

T = Espesor de diseño calculado en pulg (mm).

E = Factor de eficiencia de junta soldada longitudinal.

D = Diámetro exterior del tubo en pulg (mm).

S = Valor del esfuerzo aplicable permitido psi (Mpa).

0,72 = Factor de diseño basado en el espesor de pared nominal (constante).

R = Limite elástico mínimo especificado.

3.9.5 Corrosión localizada

Si la corrosión localizada ha disminuido el espesor de pared de la tubería a menos del espesor de diseño calculado, la tubería debe ser reparada, reemplazada u operada a una presión menor. Esto es aplicable si la longitud del área corroída es mayor a la permitida por la formula mostrada abajo. Este método aplica únicamente cuando la profundidad de la corrosión es menor del 80% del espesor de pared nominal. El área corroída debe estar limpia y sin recubrimiento del metal. Se debe tener especial cuidado con la limpieza de las tuberías presurizadas, cuando el grado de corrosión es significativo.

$$L_c = 1,12 \cdot B \sqrt{D \cdot t}$$
$$B = \sqrt{\frac{\frac{d}{t}}{1,1 \left(\frac{d}{t}\right) - 0,15}}$$

En la normativa de Petroecuador se establece que para la medición de espesores e inspección angular en tuberías se lo hará describiendo una línea sinusoidal con una amplitud de pico a pico de aproximadamente cinco centímetros.

En tuberías de transporte de petróleo y agua, con diámetro nominal menor o igual a doce pulgadas se efectuará una medición en la base de la tubería y más dos anillos en los extremos como lo muestra la siguiente figura.

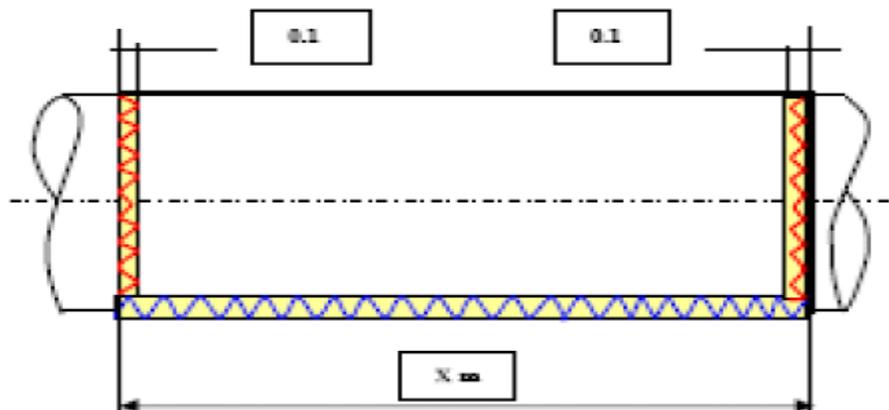


Figura 3.22 Trazado de zonas para la inspección. [24]

Nota: Cabe destacar que la normativa de Petroecuador establece los parámetros técnicos requeridos para realizar la medición de espesores mediante ultrasonido industrial del tipo pulso-eco y de contacto directo a sistemas de tuberías para la transmisión de hidrocarburos de producción primaria en líneas de transporte de crudo, reinyección de agua, power oil, y gas, a fin de determinar el espesor actual de sus paredes, establecer el límite de retiro y las condiciones de operatividad que presentan.

3.10 Desarrollo del examen

Para el desarrollo de los exámenes por ultrasonido se siguieron algunos pasos basándonos en los catálogos del fabricante del equipo de ultrasonido, la Norma ASME BPVC V 2010, y la normativa de PETROECUADOR para el desarrollo de exámenes de ultrasonido en tuberías.

3.10.1 Selección de las tuberías

Se escogieron tuberías de transporte de dos tipos de fluido: tuberías para agua y tuberías para vapor, dado el desgaste que sufren debido al servicio. Tuberías para fluidos como aire o combustible no sufren un desgaste importante, por lo tanto no se tomarán en cuenta para este ensayo.

En la figura 3.23 se puede apreciar la tubería de transporte de agua para el enfriamiento de los motores y elementos auxiliares. La figura 3.24 indica un tramo de la tubería seleccionada para el examen en laboratorio, esta tubería es de acero al carbono y tiene un diámetro exterior de 216 mm, el espesor nominal de pared es 6 mm y tiene una longitud de 610 mm.



Figura 3.23 Tubería para agua de enfriamiento. [22]



Figura 3.24 Tubería para agua de enfriamiento. [22]

La tubería de vapor seleccionada para el ensayo es una tubería de acero al carbono de 236 mm de largo, 21,5 mm de diámetro externo y un espesor de pared de 2,75 mm. La figura 3.25 muestra el tramo seleccionado para los ensayos.



Figura 3.25 Tubería para vapor. [22]

3.10.2 Limpieza de las tuberías

La limpieza y preparación de las tuberías se realizó tomando en cuenta todas las consideraciones del punto 3.5.7, para lo cual se retiró la capa de pintura y escoria con un cepillo.

3.10.3 Inspección visual

Se recomienda siempre antes de realizar un examen sea por ultrasonido, radiografía industrial, termografía, etc. realizar una inspección visual la cual nos permita encontrar indicios de desgaste, corrosión o cualquier otro defecto en el material (superficial). En la figura 3.26 se ilustran irregularidades encontradas en la tubería de agua.



Figura 3. 26 Irregularidades en la superficie. [22]

3.10.4 Calibración del equipo para ensayo por haz recto

La calibración se realizó siguiendo el procedimiento indicado en el Capítulo II.

3.10.5 Examen de tubería de prueba

Luego de haber realizado la calibración del equipo se procedió a comprobar el correcto funcionamiento del equipo, para lo cual se examinó una tubería de muestra de acuerdo con los procedimientos establecidos. En las figuras 3.27 y 3.28 se muestran la medición de espesor y la lectura del valor medido.



Figura 3.27 Medición de espesores en tubería de prueba. [22]

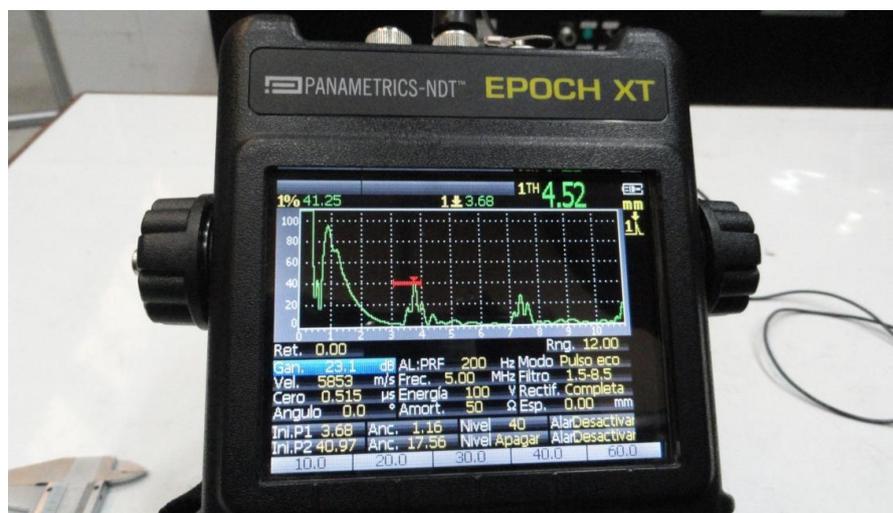


Figura 3.28 Lectura de espesor en tubería de prueba. [22]

3.10.6 Trazado de trayectoria para el ensayo

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del equipo, se continuó con el trazado de líneas que guíen una trayectoria sobre la cual se realizará el examen como lo establece la normativa de PETROECUADOR (Figura 3.22).



Figura 3.29 Trazado de trayectoria para realizar el examen. [22]

3.10.7 Medición de espesores

Una vez trazada la trayectoria, en primer lugar se realizó la medición de espesores en la tubería de agua, obteniéndose variaciones del espesor en la tubería.



Figura 3.30 Medición de espesor. [22]



Figura 3.31 Máximo espesor obtenido en la tubería. [22]

Las figuras 3.30 y 3.31 muestran la medición de espesor, encontrando un valor máximo de 4,76 mm a lo largo de la tubería.

Se encontró un valor mínimo de espesor de la tubería igual a 1,62 mm (figuras 3.32 y 3.33). A manera de comprobación se empleó un calibrador para medir el espesor obteniéndose valores coherentes (figuras 3.34 y 3.35).

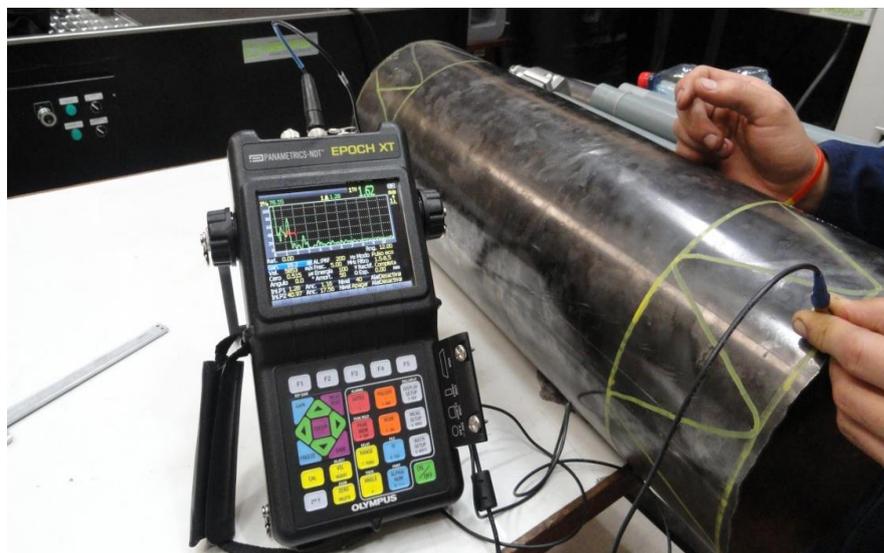


Figura 3.32 Medición de espesor. [22]

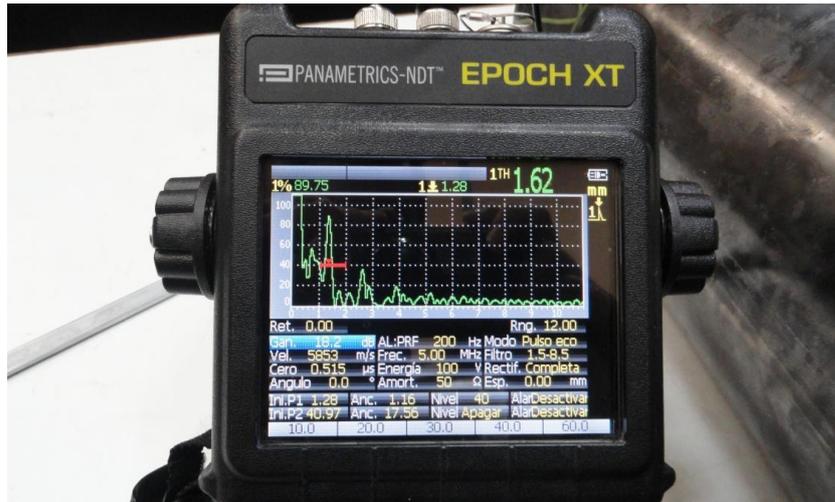


Figura 3.33 Mínimo espesor obtenido en la tubería. [22]

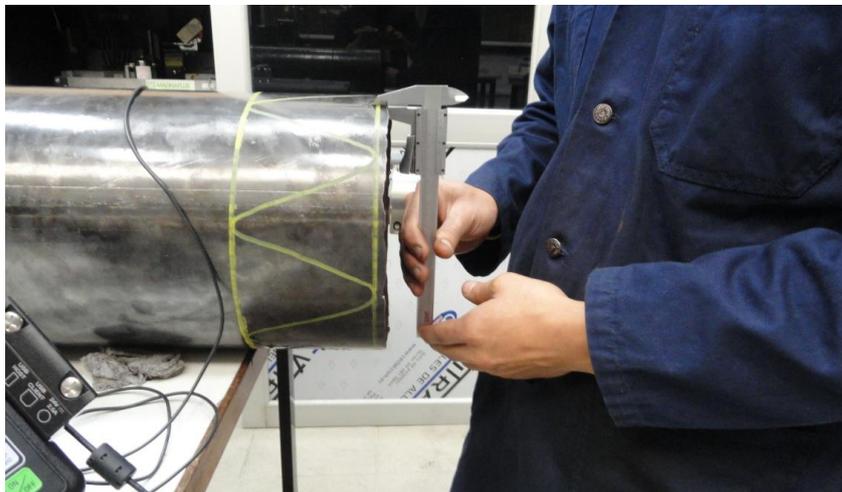


Figura 3.34 Medición de espesor con calibrador. [22]

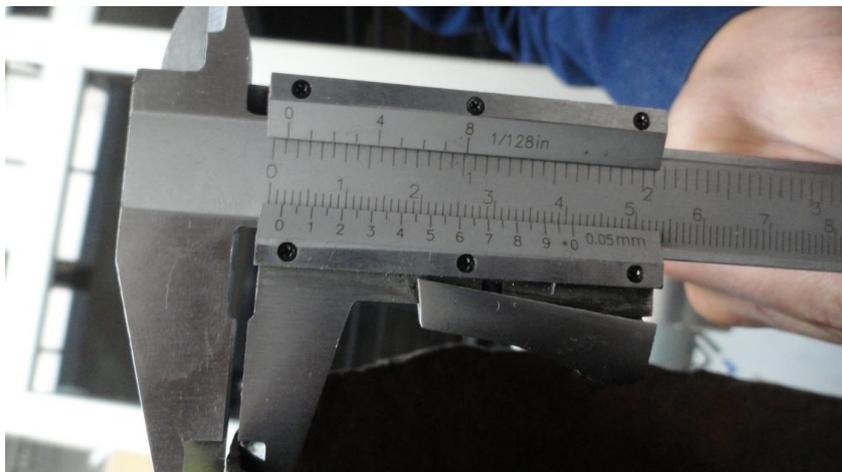


Figura 3.35 Espesor \approx 1.8. [22]

Luego de haber realizado la medición de espesores en la tubería de agua procedimos a efectuar el mismo examen para la tubería de vapor, obteniéndose valores similares en las mediciones siendo el valor del espesor obtenido igual a 2,75 mm.



Figura 3.36 Medición de espesor. [22]



Figura 3.37 Espesor obtenido. [22]

3.10.8 Calibración del equipo para ensayo por haz angular

La calibración para el procedimiento de la inspección de irregularidades en el material empleando un haz angular se realizó como consta en el Capítulo II.



Figura 3.38 Zapata de 45°. [22]

La figura 3.38 muestra una zapata de 45° para el examen por haz angular.

3.10.9 Examen de tubería de prueba

Al igual que en el procedimiento para medición de espesores, en el examen por haz angular también se realizó un ensayo en una tubería de prueba para comprobar un funcionamiento adecuado. Las figuras 3.39 y 3.40 muestran los resultados de las examinaciones.



Figura 3.39 Examen por haz angular en tubería de prueba. [22]



Figura 3.40 Lectura de imperfección en tubería de prueba. [22]

3.10.10 Examen por haz angular

En primer lugar se realiza el análisis en la tubería de agua (figuras 3.41 y 3.42).



Figura 3. 41 Examen por haz angular en tubería de prueba. [22]



Figura 3.42 Lectura de imperfección en tubería de prueba. [22]

La figura 3.43 muestra la ubicación de la irregularidad en la tubería.

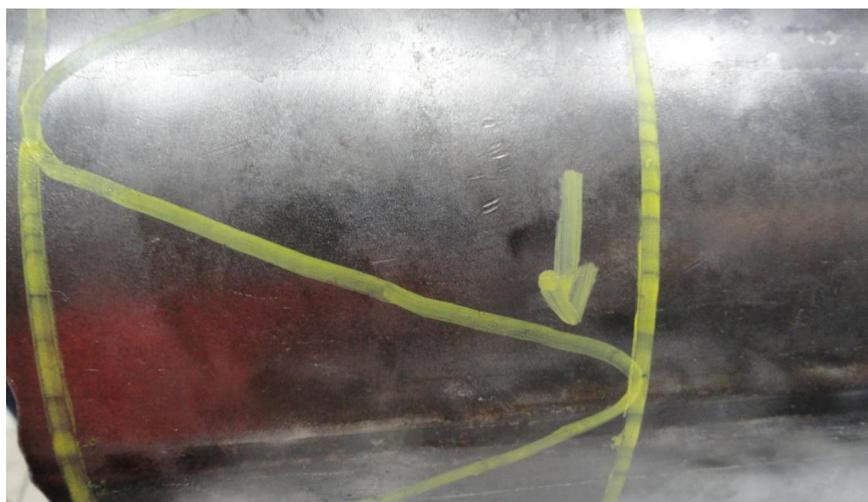


Figura 3.43 Ubicación de imperfección en la tubería de prueba. [22]

3.10.11 Limpieza post examen

El procedimiento de limpieza post examen se realizó de conformidad con 3.5.13, y para este caso al tratarse de tuberías en desuso se procedieron a limpiar con disolvente común.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Métodos de evaluación

Las pruebas no destructivas pueden ser diseñadas y especificadas para validar aplicaciones individuales, esto significa que puedan ser específicas para resolver un problema. Para ello, cada prueba debe basarse en el total entendimiento de la naturaleza y función de la pieza que está siendo inspeccionada y las condiciones de su servicio. Estos fundamentos son trasladados a la experiencia básica y los conocimientos que un técnico debería poseer para realizar los ensayos.

El técnico calificado como nivel II o III en cualquiera de los métodos de pruebas no destructivas debe estar familiarizado con el manejo e interpretación de documentos aplicables al método en el que está calificado y a los materiales que debe inspeccionar.

La inspección de un componente o de un material que este regulado o que sea crítico dentro de la industria puede estar cubierta por múltiples documentos como códigos, normas, especificaciones y procedimientos.

Existe un gran número de organizaciones responsables de la edición y revisión de estos documentos, como por ejemplo las normas ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos), AWS (Sociedad Americana de Soldadura), API (Instituto Americano del Petróleo), etc. las mismas que van a determinar los procedimientos y los criterios de aceptación y rechazo de los materiales en las diferentes pruebas no destructivas.

Cada inspección puede regirse por uno o más procedimientos que han sido elaborados y estructurados para cumplir con reglas o criterios de esos documentos aplicables. Para cumplir con los objetivos, el personal debe ser capaz de entender el punto de vista que dirige lo establecido en ellos; además debe tener la capacidad de elaborar procedimientos escritos e interpretar los resultados de la inspección basándose en los requisitos tomados de los documentos aplicables al producto o material inspeccionado, y por último, debe asegurar que quien realiza actividades de

inspección documentada en procedimientos, cumple con la variedad de requisitos y documentos aplicables.

4.1.1 Procedimientos de inspección

Se basan en un documento escrito, en forma de una secuencia ordenada de acciones que describen como debe ser aplicada una técnica de inspección. Es un documento que define los parámetros técnicos, requisitos de equipos y accesorios, así como los criterios de aceptación y rechazo que son aplicables a materiales, partes, componentes o equipos, todo de acuerdo con lo establecido en códigos, normas, y especificaciones.

El alcance de un procedimiento es deseado para cubrir componentes complejos o críticos o un grupo de artículos semejantes. Aun el técnico más experimentado no podrá determinar el estado de un producto sin la información aplicable al bien o servicio, de cómo se requiere que sea el producto en función de su calidad y, por lo tanto, de cómo el producto va a ser inspeccionado y evaluado.

A continuación se mencionan algunos beneficios que aporta el uso de los procedimientos de inspección:

- Apego a los documentos aplicables (códigos, normas o especificaciones).
- Se mantiene homogénea la técnica de inspección.
- El criterio de aceptación y rechazo es homogéneo.
- Se mantiene un nivel de calidad constante de los productos inspeccionados.
- Se obtienen resultados repetitivos.
- Evita discrepancias entre el fabricante y el comprador durante la inspección de recepción de materiales, cuando el comprador está enterado y ha autorizado la aplicación del procedimiento.

En base a los documentos aplicables, los procedimientos de inspección deben de cumplirse y realizarse preferentemente por un técnico nivel II o III, calificado y certificado en el método de inspección aplicable. Además, se establece que deben ser

revisados y aprobados por un técnico nivel III, calificado y certificado en el método de inspección aplicable.

El procedimiento debería contener cada aspecto que el técnico necesita saber para llevar a cabo la inspección, como sea requerido, por lo que antes de elaborar un procedimiento de inspección deberían considerarse varios aspectos preliminares importantes, como los siguientes:

- Definir los documentos que sean aplicables, por acuerdo entre el prestador del servicio y el cliente, tales como: especificaciones del cliente, códigos, normas, dibujos, pedido, etc.
- Definir el alcance y requisitos específicos.
- Verificar los requisitos específicos que sean aplicables contenidos en: notas técnicas, planos, especificaciones, pedido, etc.
- Determinar los equipos y accesorios necesarios.
- Definir los niveles de calidad requeridos.
- Considerar los programas de fabricación o mantenimiento, para que puedan determinarse los puntos críticos de la inspección como: las áreas de interés, la etapa de la inspección, la preparación de las superficies, etc.
- Seleccionar y preparar las muestras en caso que sea requerida la calificación del procedimiento.

4.1.2 Reporte de resultados

Los procedimientos de inspección normalmente hacen referencia a un formato de reporte de resultados de la inspección. Cuando se reportan y documentan los resultados de las inspecciones, se debe incluir la información completa y exacta de la inspección realizada, con el objeto de hacerla reproducible. Lo anterior se debe a que podrían existir revisiones por parte del cliente o por alguna agencia (durante auditorías, monitoreos, etc.). Esas revisiones pueden ocurrir mucho tiempo después de haber realizado la inspección y la aceptación por el cliente.

La falta de información y documentación pueden resultar en retrasos costosos, al tratar de resolver la aparente o sospechosa presencia de discontinuidades. La información necesaria para minimizar confusiones durante la revisión de un reporte de resultados debe incluir, pero no está limitada, a los requisitos establecidos por el código, norma, o especificación que sea aplicable.

4.1.3 Criterios de aprobación

Los criterios de aprobación se encuentran incluidos en algunos documentos, con el fin de proporcionar rangos, clases, grados y niveles de calidad aceptables de los productos.

Los documentos que contienen estos criterios presentan un método para la calificación de ciertos materiales o productos. Se consideran ciertas variables tales como la aleación, el proceso de fabricación, el acabado, el recubrimiento, el esfuerzo, la seguridad y la función, en el análisis de diseño antes de asignar una clase o grado del producto.

Esto establece el tamaño y tipo de una discontinuidad aceptable en un área especificada. El producto podría llegar a ser dividido por zonas, para permitir diferentes niveles de calificación en diferentes posiciones sobre el producto, si se desea. Sin embargo, en muchos casos, el criterio de aprobación solo tiene un tamaño de discontinuidad arriba del cual el defecto debe ser removido, o debe ser removido y reparado, o la pieza debe ser desechada.

4.2 Evaluación de las indicaciones

Cualquier indicación mostrada en la pantalla del equipo de inspección debe ser evaluada contra los valores especificados de tolerancias en lo relacionado con la longitud y comportamiento acústico (amplitudes del eco). Aunque los niveles de tolerancias y modos de evaluación de amplitudes pueden variar de un código a otro, en principio se puede decir que la evaluación siempre se hace comparando la amplitud de la indicación contra la curva de referencia. Por ejemplo el código ASME, artículo 5 de la Secc. V especifica que:

Cualquier reflector que ocasionalmente una respuesta mayor al 20% de la curva DAC, debe ser investigado de tal manera que el operador pueda identificar tal imperfección y le permita así evaluarla de acuerdo con los criterios de aceptación siguientes:

a) Indicaciones interpretadas como fisuras, falta de fusión o penetración incompleta son inaceptables sin importar su amplitud o longitud.

b) Otras imperfecciones son inaceptables si sus amplitudes sobrepasan el nivel de registros y sus longitudes son mayores que los valores especificados por espesor.

4.3 Registro y protocolización de los resultados de inspección

Cada procedimiento define qué tipo de defectos hay que reportar y la forma de hacerlo (formato del reporte, croquis de ensayo, etc.). Sin embargo, un protocolo de inspección debe contener por lo menos los siguientes datos:

- Identificación de la pieza.
- Identificación del área ensayada.
- Código aplicado.
- Código de aceptación.
- Equipo usado: fabricante y tipo.
- Transductor usado: tipo y referencia.
- Nivel de referencia.
- Acoplante.
- Condiciones superficiales.
- Resultados de inspección: indicaciones, localización y evaluación.
- Fecha y nombre del operador con su nivel de certificación.

A continuación se muestra un formato de reporte de inspección por ultrasonido a través del equipo EPOCH XT.

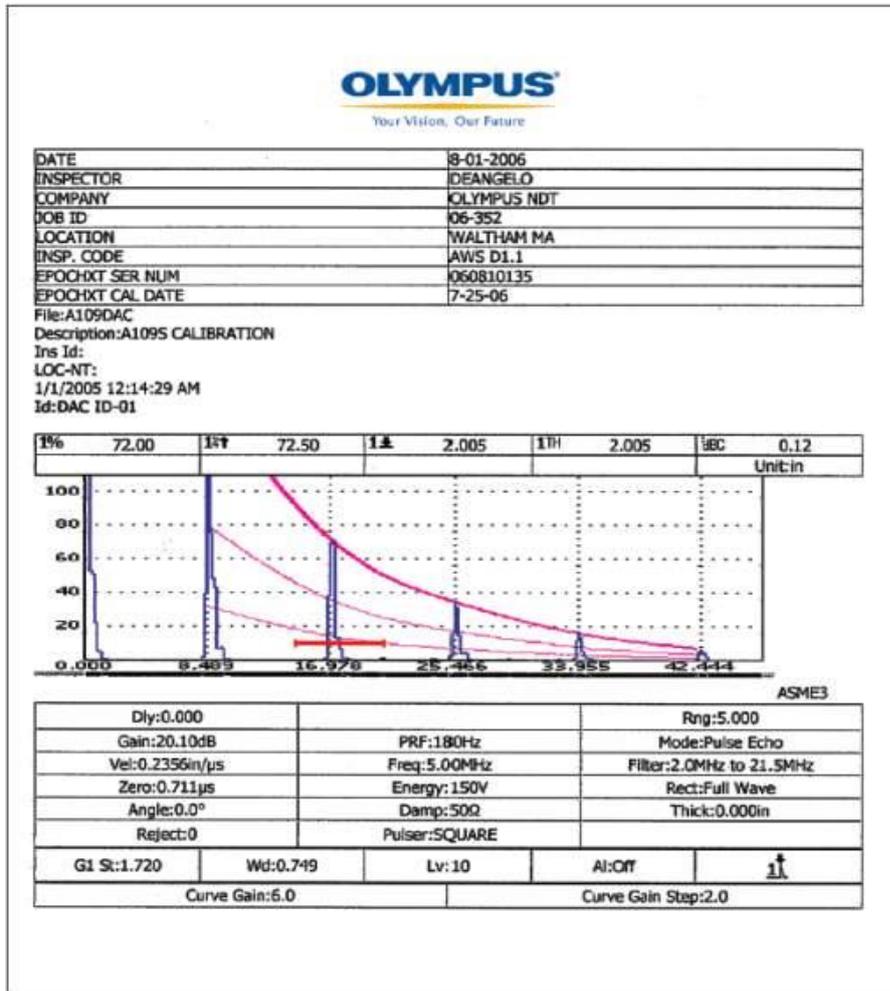


Figura 4.1 Formato de reporte de inspección por ultrasonido. [18]

4.4 Evaluación mediante comparación

Se ha mencionado antes que el ensayo por ultrasonido es un método comparativo ya que la sola amplitud de un eco no da ningún valor real para efectuar una evaluación del reflector causante de tal indicación, mucho menos para determinar si es aceptable o debe ser rechazada. Por lo tanto se deben establecer de sistemas de referencia para poder comparar el comportamiento de los reflectores a evaluar.

Dependiendo del código aplicable se pueden aplicar cuatro tipos de métodos:

1. Comparación directa.
2. Mediante patrones de referencia.
3. Mediante curvas de comparación.

4. Comparación Indirecta.

4.4.1 Método de comparación directa

Con este método de evaluación se comparan indicaciones de la pieza de ensayo directamente con indicaciones del patrón de referencia a la misma senda recorrida por el sonido. También se puede comparar la dinámica de ecos para obtener información sobre el tipo de falla, orientación del reflector y su forma.

Este método puede ser usado en la inspección de soldaduras para diferenciar entre indicaciones de forma y fisuras en la raíz.

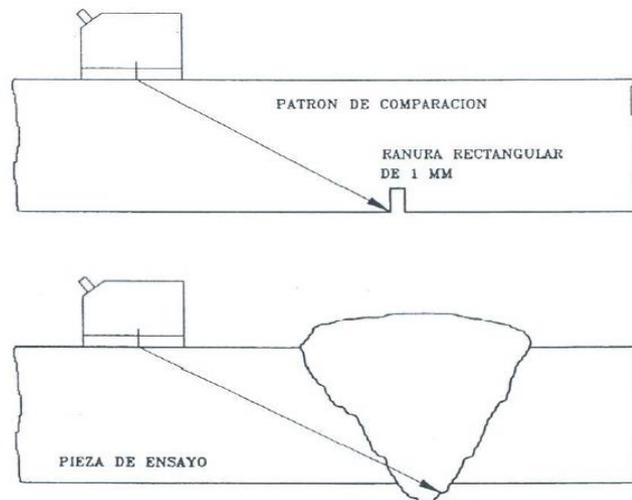


Figura 4.2 Comparación directa en la inspección de soldaduras. [23]

4.4.2 Método de patrones de referencia

En este método se comparan indicaciones de la pieza de ensayo contra una indicación del patrón de calibración evaluando las respectivas amplitudes contra el eco de referencia.

Sin embargo debido a la divergencia y a la atenuación este método está limitado a espesores delgados o a inspección de tubos (p.e. T-542.6.1.5 del artículo 5 y SE-273 del artículo 23 de la Secc. V del código ASME).

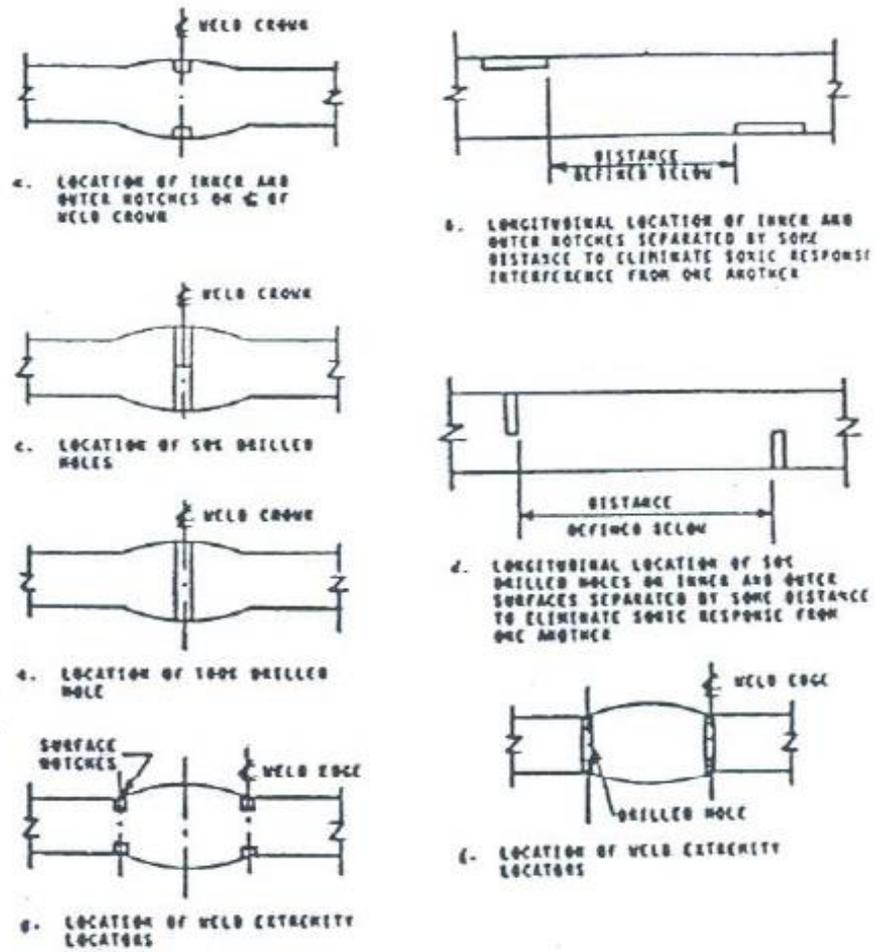


Figura 4.3 Ubicación de ranuras típicas para inspección de tuberías soldadas. [23]

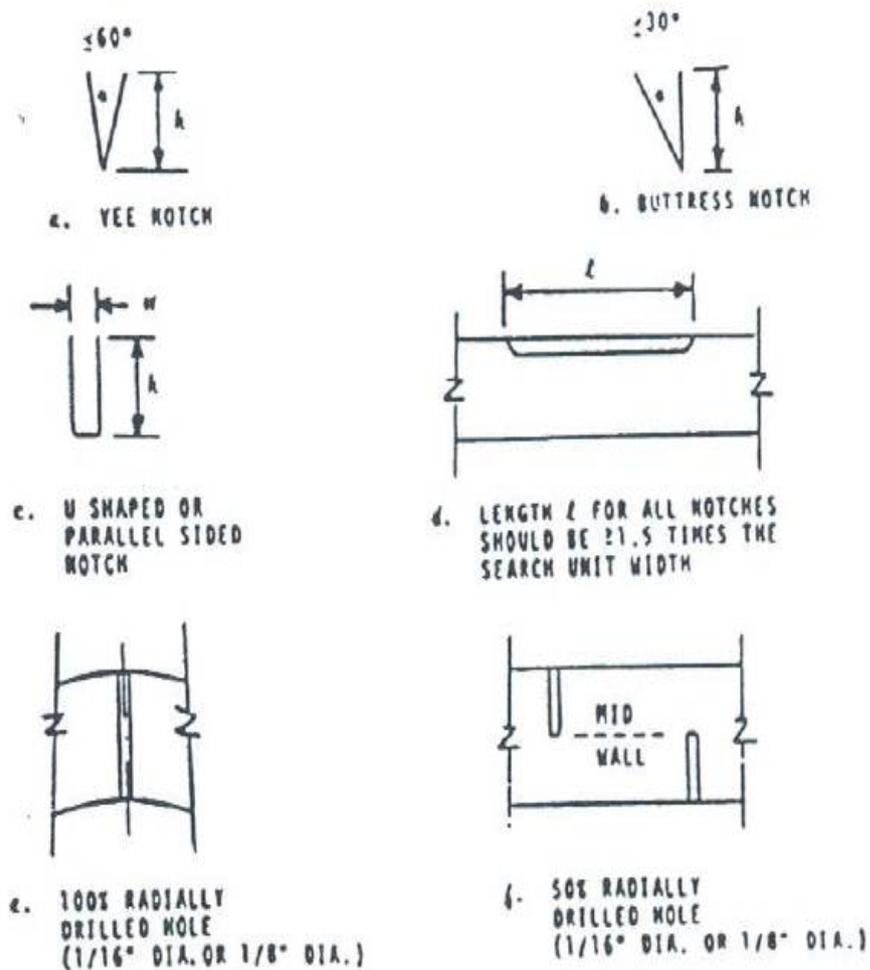


Figura 4.4 Reflectores comunes de referencia. [23]

Para poder garantizar una sensibilidad de ensayo suficiente para espesores mayores, se debe calibrar la ganancia de la sensibilidad de ensayo utilizando el reflector a mayor profundidad.

4.4.3 Método de curvas de referencia

Para este método se ajusta la sensibilidad de referencia usando varios reflectores a diferentes profundidades del patrón de calibración. Con ello se consideran las influencias del campo cercano, divergencia y de la atenuación por trayecto recorrido, garantizando así que todas las indicaciones de la pieza de ensayo tendrán la misma sensibilidad sin importar su distancia hasta el palpador.

4.4.4 Método de comparación indirecta

En el método indirecto, se comparan las indicaciones de la pieza de ensayo contra líneas de referencia. Estas han sido establecidas basándose en las leyes del comportamiento acústico y luego comprobado experimentalmente.

Estas líneas de referencia no incorporan características específicas del material a ensayar, la geometría de la pieza a ensayar, así como tampoco posibles variaciones del campo sonoro del palpador que puedan presentarse. Estos métodos son conocidos como diagramas y escalas AVG.

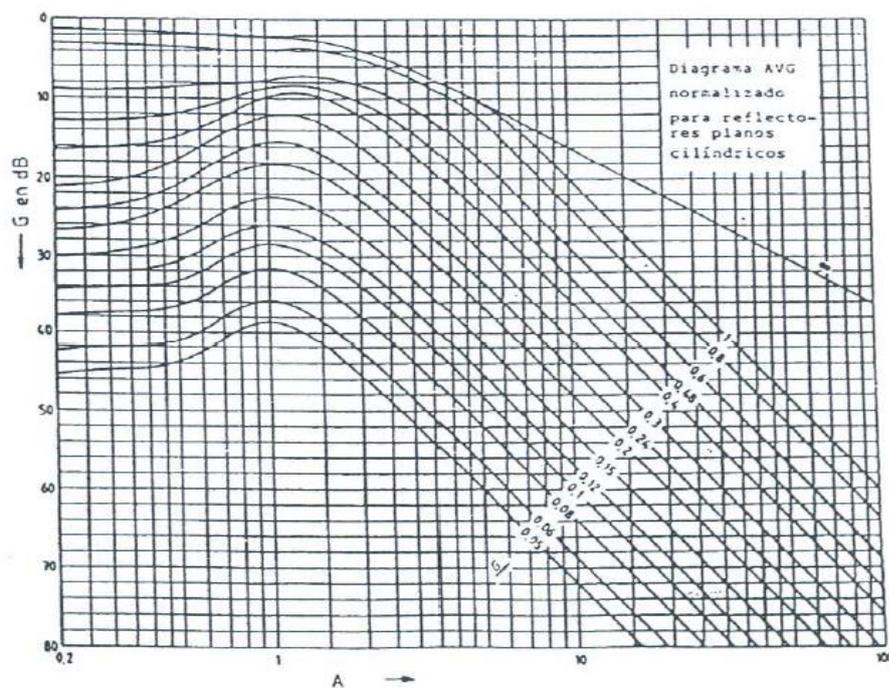


Figura 4.5 Diagrama AVG normalizado o universal. [23]

4.5 Inspección en revisiones de mantenimiento

En las revisiones de mantenimiento de las diferentes empresas, se debe prestar atención especial a las zonas críticas de la muestra y aplicar las técnicas de inspección más idóneas para la detección de discontinuidades primordialmente superficiales. La técnica de inspección por ultrasonido tiene la ventaja frente a otros métodos más idóneos para la detección de grietas y de otras discontinuidades superficiales de que puede aplicarse en muchos componentes estructurales montados

en un sistema y en los que las zonas críticas quedan ocultas, por lo que con frecuencia resulta insustituible evitándose gastos de desmontajes y ahorra tiempo en las revisiones de mantenimiento.

Las técnicas de inspección más utilizadas son las de incidencia normal o angular ocasionalmente las ondas de superficie y prácticamente en todos los casos, por contacto y aplicando el método pulso-eco.

4.5.1 Inspección en instalaciones de la empresa ELECAUSTRO S.A

En este caso, la inspección por ultrasonido se realizó en la central termoeléctrica “El Descanso” cuya propiedad es de la empresa pública ELECAUSTRO S.A de la ciudad de Cuenca.



Figura 4.6 Central Termoeléctrica “El Descanso”. [22]

Esta central dispone de cuatro motores estacionarios marca NIIGATA-SEMT PIELSTICK modelo 14PC2-5V que utiliza combustibles Diésel y Crudo residual, que accionan un generador para la producción de 4.2 MW de energía eléctrica.

4.5.2 Descripción de las instalaciones

En base a las tuberías que cuenta esta central se procede con la inspección de dos clases de tuberías, la primera tubería a inspeccionar es la de agua y sirve para transportar el fluido para la refrigeración de los motores estacionarios y sus sistemas

auxiliares, en el siguiente grafico se indica la ubicación de la tubería dentro del circuito de refrigeración del motor estacionario.



Figura 4.7 Esquema de ubicación de la tubería de agua seleccionada en la Central Termoeléctrica. [22]

La segunda tubería a inspeccionar es la de vapor cuyo propósito dentro de la instalación es la de conducir el vapor hacia el sistema de alimentación de combustible para que este a su vez se caliente hasta alcanzar la viscosidad adecuada para que pueda ser combustionado por el motor, en la siguiente figura se puede apreciar la tubería de vapor aunque no corresponde a su real dimensión debido a que esta se encuentra cubierta con aislante térmico para evitar pérdidas de calor y por normas de seguridad.



Figura 4.8 Ubicación de la tubería de vapor en la Central Termoeléctrica. [22]

Cabe destacar que estos dos tipos de tuberías han sido seleccionadas en base a que son las que más sufren desgaste, corrosión y desprendimiento de material en comparación con otros tipos de tuberías presentes en la central, esto se debe a que las condiciones inherentes del funcionamiento de cada motor permiten que se desgasten las tuberías por los cambios bruscos de temperatura, por la presión de agua-vapor y por la diferencia de temperatura que a la vez son factores que hacen que se generen estos fenómenos que reducen la vida útil en las tuberías.

4.6 Análisis de resultados

4.6.1 Análisis de resultados en tubería de agua

Al comenzar con el ensayo y al análisis de resultados, se revisa de manera fundamental cuales son los sectores de las instalaciones de la central termoeléctrica en donde se encuentran la tuberías de agua, que cuyo propósito puntual es la de refrigerar los sistemas auxiliares del motor y en base a que la misma sufre mayor deterioro a través del tiempo, parámetros del cual han sido considerados para la selección como objeto para la inspección con el equipo de ultrasonido.



Figura 4.9 Tuberías de agua para refrigeración de los sistemas auxiliares de los motores estacionarios. [22]

Al seleccionar la sección de la tubería a analizar; en la inspección visual se aprecia que a nivel superficial no existe desgaste considerable, a pesar de la presencia de rayones y marcas propias del montaje y desmontaje de la tubería, esto nos demuestra que las tuberías a nivel externo han sido bien conservadas (recubiertas por pintura), sin embargo en la parte interna existe mayor agente corrosivo por la propia circulación de agua, la siguiente imagen muestra el nivel de corrosión interna que posee la tubería.



Figura 4.10 Estado de la tubería de agua seleccionada. [22]

En base al gran nivel de corrosión, en primera instancia se ha procedido a la medición del espesor por distintas zonas de la tubería, debido a que la corrosión es un agente que reduce el espesor en dicho material, y por medio del equipo de ultrasonido se logra determinar cuánto espesor se ha reducido a través de los años de servicio de la tubería.

Partiendo con la normativa de PETROECUADOR se determina tres secciones a inspeccionar de la tubería, en la que como resultado de la medición del espesor nos muestra diferentes valores tanto máximos o mínimos, debido al cual se puede deducir que el desgaste ha sido disparejo, mediante la siguiente imagen y tabla se muestra el resultado de los valores obtenido en la inspección.

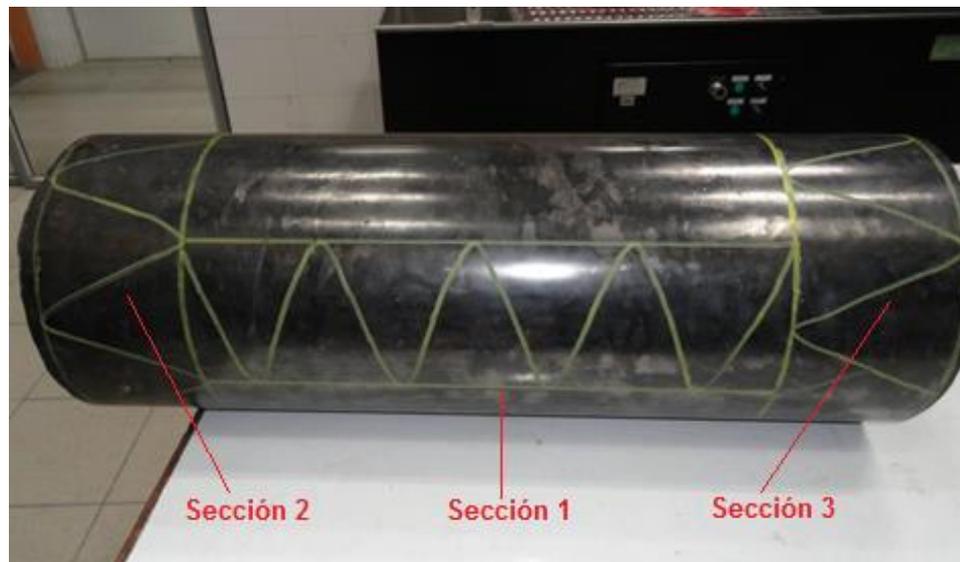


Figura 4.11 Trazado de las secciones de la tubería de agua a inspeccionar. [22]

	Valores	
	Mínimo	Máximo
Sección 1	2,77 mm	4,01 mm
Sección 2	2,94 mm	4,76 mm
Sección 3	1, 62 mm	4,33 mm

Tabla 4.1 Valores de espesores obtenidos en tubería de agua. [22]

A continuación la siguiente imagen muestra el valor mínimo de la sección 1 obtenida en la pantalla del equipo, las otras imágenes captadas de los valores en las demás secciones se puede apreciar en el anexo.



Figura 4.12 Espesor mínimo de la sección 1, de la tubería de agua. [22]

Ahora se procede a la inspección mediante haz angular, en la cual se hace necesario el uso de la zapata de 45°, y a la inspección en las diferentes secciones trazadas en la tubería, con lo que se pudo apreciar diferentes tipos de discontinuidades que con los criterios adquiridos en inspección por ultrasonido y en base a la revisión de la norma ASME BPVC sección 5, se logra determinar qué tipo de discontinuidad es la que nos muestra en la pantalla del equipo. A continuación se muestra las imágenes con las lecturas de las irregularidades encontradas a través de la inspección.



Figura 4.13 Detección de discontinuidad superficial en la tubería de agua. [22]



Figura 4.14 Valor de la distancia de la discontinuidad superficial de la tubería de agua. [22]

El diagnostico permite evaluar, que la imagen corresponde a una discontinuidad superficial, esto es en base a que el primer eco que se detecta se encuentra desplazado casi al inicio de la pantalla y al observar el eje horizontal que corresponde al tiempo se determina que el haz ultrasónico ha adquirido poco tiempo para detectar la irregularidad, por lo cual la profundidad de la discontinuidad está a una distancia de 0,71 mm. La siguiente imagen muestra la discontinuidad en la superficie de la tubería.



Figura 4.15 Ralladura superficial de la tubería de agua. [22]

Continuando en la inspección podemos apreciar otro tipo de discontinuidad captada por el equipo.



Figura 4.16 Detección de discontinuidad interna en la tubería de agua. [22]



Figura 4.17 Valor - distancia de discontinuidad interna en la tubería de agua. [22]

El criterio debido a las dos imágenes aprecia que el eco posee una amplitud del casi 60%, lo cual determina que aquí existe una discontinuidad que corresponde al tipo interna esto se debe a que se ha desprendido material o que el agente corrosivo a carcomido el material esta zona como se aprecia en la siguiente imagen.



Figura 4.18 Zona de la discontinuidad interna por desprendimiento de material. [22]

4.6.2 Análisis de resultados en tubería de vapor

En la tubería de vapor, partiendo desde la inspección visual se aprecia que posee mayor desgaste en la zona externa que en la zona interna. La zona interna posee un desgaste uniforme sin la aparición de discontinuidades como por ejemplo el desprendimiento de material, incrustaciones y demás defectos. Las imágenes siguientes muestran el estado de la tubería.



Figura 4.19 Estado superficial de la tubería de vapor. [22]



Figura 4.20 Estado interno de la tubería de vapor. [22]

Como análisis del espesor en la tubería, se comienza por utilizar el método de contacto superficial sin la utilización de zapata y ubicando el transductor en la zona donde no existe imperfección en la superficie puesto que como dato real determina que la tubería posee un espesor de 2,75 mm como se demuestra en las siguientes imágenes.

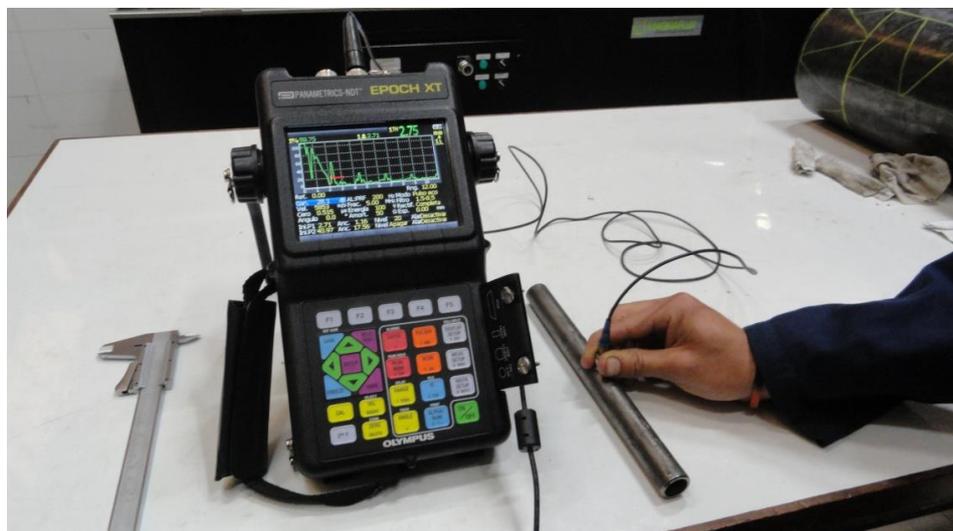


Figura 4.21 Determinación del espesor de la tubería de vapor. [22]



Figura 4.22 Valor del espesor de la tubería de vapor. [22]

A continuación se realiza el examen por haz angular utilizando la zapata de 45° para encontrar imperfecciones en el material. Las irregularidades encontradas son a nivel superficial, ya que, como lo muestran las imágenes siguientes, el eco se encuentra muy próximo al lado izquierdo de la pantalla del equipo de ultrasonido.



Figura 4.23 Determinación de discontinuidad superficial en la tubería de vapor. [22]



Figura 4.24 Valor de la distancia de la discontinuidad superficial en la tubería de vapor. [22]

Es necesario determinar que este eco no corresponde a un eco inicial como sucede en la inspección sin zapatas, esto es lo contrario a cuando se utiliza zapatas debido a que en la pantalla del equipo no existe un eco inicial, puesto que si lo mostrare, este definitivamente sería una imperfección o discontinuidad a nivel de la superficie. La siguiente imagen muestra la gráfica de una inspección con haz angular en una zona de la tubería sin imperfecciones, esto es para tomar en cuenta la diferencia con las gráficas anteriormente mostradas y denotar que no existe el eco inicial en una inspección con haz angular.

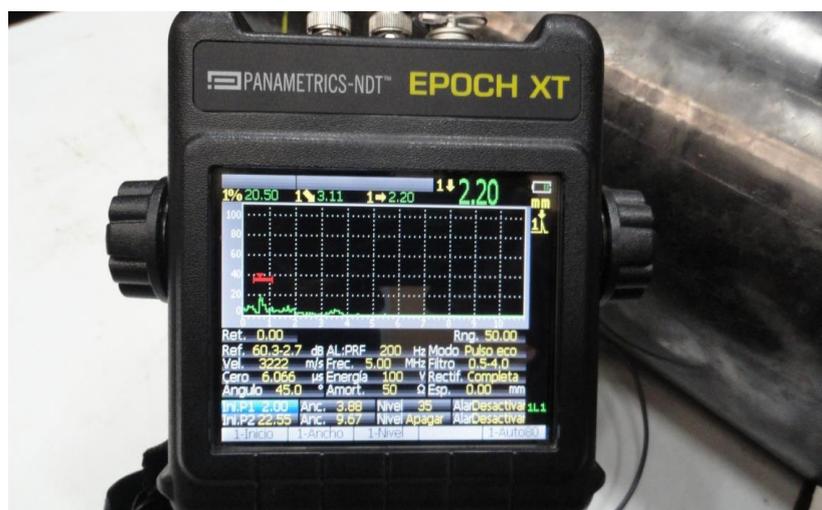


Figura 4.25 Diagnostico sin imperfecciones en tubería. [22]

4.7 Criterios de aceptación y rechazo

Como se menciona en la norma ASME BPVC V-2010, los criterios de aceptación o rechazo, serán aquellos que hayan sido acordados por las partes que intervienen en el examen ultrasónico (contratante y examinador). Defectos como grietas o fisuras encontradas en el material, son inaceptables a menos que se realice un estudio muy detallado que determine la utilización de la tubería.

Para el presente documento se ha considerado el criterio de rechazo fundamentado en el espesor de la tubería, dicho criterio se basa en la norma ASME B31.3-2010 (Anexo). El criterio de rechazo se basa en el cálculo del espesor mínimo requerido para presión interna de trabajo del sistema t , para lo cual se emplea la siguiente fórmula.

$$t = \frac{P \cdot D}{2[(S \cdot E \cdot W) + P \cdot Y]}$$

Donde:

t = espesor requerido por presión.

P = presión máxima de operación.

D = diámetro exterior.

S = esfuerzo permisible de trabajo (ver Tabla A-1 de ASME B31.3-2010).

E = factor de eficiencia de junta (ver Tabla A-1B de ASME B31.3-2010).

Y = coeficiente de temperatura de acuerdo al material (ver Tabla 304.1.1 de ASME B31.3-2010).

W = factor de reducción por junta soldada (ver párrafo 302.3.5 (e) de ASME B31.3-2010).

Para el cálculo del espesor que servirá para aceptar o rechazar la tubería, se obtuvieron los valores reales de trabajo tanto de presión como temperatura, en las siguientes imágenes se aprecia los valores mencionados.

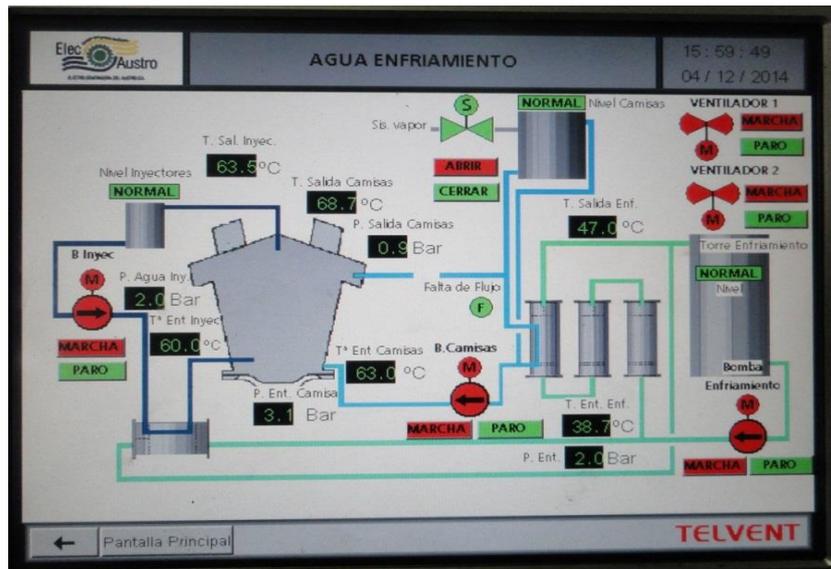


Figura 4.26 Circuito de refrigeración de motor. [22]

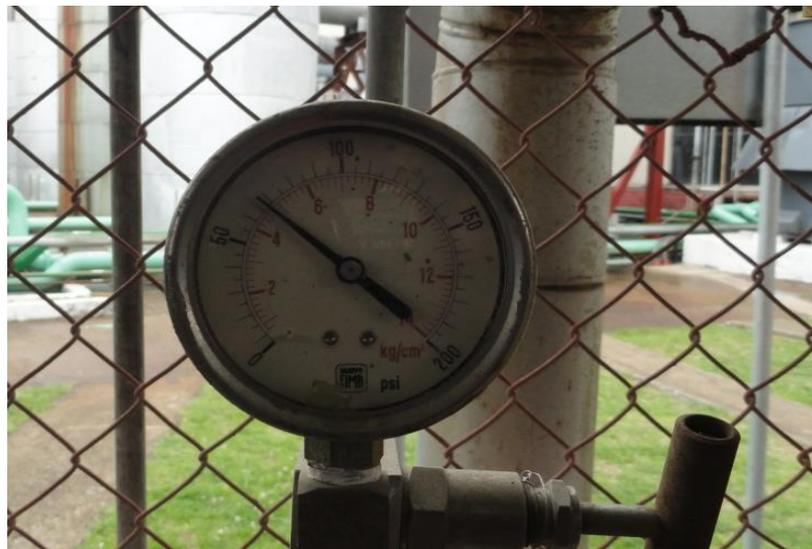


Figura 4.27 Presión del sistema de vapor. [22]

4.7.1 Cálculos

4.7.1.1 Cálculo del espesor para tubería de agua

Datos:

- Temperatura = 38°C (100°F)
- Presión = 2 bar (200 KPa)
- Diámetro exterior = 216 mm

- $S = 16 \text{ Ksi } (110.3152 \times 10^3 \text{ KPa})$
- $E = 0,60$
- $Y = 0,40$
- $W = 0,30$

$$t = \frac{200 \text{ KPa} \cdot 216 \text{ mm}}{2[(110,3152 \times 10^3 \text{ KPa} \cdot 0,60 \cdot 0,30) + (200 \text{ KPa} \cdot 0,40)]}$$

$$t = \frac{43200}{2(19856.736 + 80)} = 1,08 \text{ mm}$$

4.7.1.2 Cálculo del espesor para tubería de vapor

Datos:

- Temperatura = 100°C (212°F)
- Presión = 68 psi ($468,8396 \text{ KPa}$)
- Diámetro exterior = $21,5 \text{ mm}$
- $S = 16 \text{ Ksi } (110.3152 \times 10^3 \text{ KPa})$
- $E = 1,00$
- $Y = 0,40$
- $W = 0,15$

$$t = \frac{468,8396 \text{ KPa} \cdot 21,5 \text{ mm}}{2[(110,3152 \times 10^3 \text{ KPa} \cdot 0,15) + (468,8396 \text{ KPa} \cdot 0,40)]}$$

$$t = \frac{10080,0514}{2(16547,28 + 187,53584)} = 0,30 \text{ mm}$$

Nota: los valores de W , Y , E y S han sido obtenidos de las tablas correspondientes en la norma ASME B31.3-2010, y el tipo de material de las tuberías ha sido consultado a proveedores locales, dada la falta de datos reales en la central de donde se obtuvieron las muestras, siendo un acero ASMT A 53 el empleado en tuberías para agua y un acero ASTM A 106 para las tuberías de vapor.

4.7.2 Análisis de los resultados obtenidos

En el examen de las tuberías para conducción de agua se puede evidenciar un desgaste muy avanzado (figura 4.28), y esto se debe al nivel de corrosión que tiene dicha tubería. Durante la inspección visual se ha hecho evidente el desprendimiento de material lo cual es lógico dado que la tubería analizada ha venido funcionando desde el año 1981 hasta el 2013, período durante el cual ha estado sometida a un constante trabajo.



Figura 4.28 Superficie interna de tubería de conducción de agua. [22]

Los cambios de temperatura también provocan desgaste, ya que generan expansiones o contracciones en las tuberías lo cual tiende a curvar dichas tuberías.

Otro factor importante en el entorno de las tuberías es la vibración a la que están sometidas ya que la Central El Descanso contiene cuatro motores estacionarios los cuales provocan mucha vibración de todas las instalaciones, factor influyente en la fatiga de los materiales.

En el examen con el equipo de ultrasonido, el menor valor obtenido de espesor en la tubería de conducción de agua, ha sido de 1,62 mm, y al compararlo con el espesor mínimo calculado para la presión de trabajo (1,08 mm), además en el examen con haz angular se encontró una gran cantidad de irregularidades en el material, lo cual evidencia aún más el nivel de desgaste de la tubería.

Por lo expuesto, se puede continuar empleando la tubería, sin embargo lo recomendable es cambiarla con el fin de evitar paradas imprevistas.

En cuanto a la tubería para conducción de vapor, en la inspección visual se comprobó desgaste de la superficie externa, es decir, lo contrario al caso anterior (figura 4.29). Esto se debe a la corrosión que sufre la tubería, provocada por la ausencia de un medio para evitar dicho efecto (el recubrimiento de pintura se pierde debido a la alta temperatura que soportan), además son tuberías cubiertas por un aislante térmico, el cual, ante una fuga de fluido tiende a retener humedad, que a la postre oxidará la tubería.

En estas tuberías es más notorio el efecto de los cambios de temperatura, ya que sufren curvaturas en los tramos intermedios entre dos anclajes. Estas tuberías también están sometidas a vibración y tienen el mismo periodo de trabajo que en el caso anterior.

En el examen del espesor de la tubería no existen variaciones importantes en los valores medidos, y de igual manera para el examen por haz angular, en el cual no se demostró la presencia de irregularidades considerables.



Figura 4.29 Superficie externa de tubería de conducción de vapor. [22]

En la figura 4.30 se observa la superficie interna de la tubería de conducción de vapor, la cual no tiene mayor desgaste ni incrustaciones como en la tubería de conducción de agua, esto se debe a que las dos tuberías no conducen el mismo fluido.

El agua de enfriamiento es agua de río o agua dura (la dureza del agua mide la concentración de minerales disueltos, en particular sales de calcio y de magnesio) la cual es procesada en una planta de tratamiento de agua de la central antes de ser empleada para refrigerar los motores. Mientras que el agua que se ocupa para generar el vapor es agua a la cual se le da un tratamiento mejor, esto es, al agua que sale de la planta de tratamiento de agua se le adiciona productos químicos especiales y también fluye por un equipo denominado “ablandador de agua” antes de ser introducida al caldero, lo cual favorece para evitar las incrustaciones y reducir la corrosión.



Figura 4.30 Superficie externa de tubería de conducción de vapor. [22]

En la figura 4.31 se aprecia el análisis de la calidad del agua empleada para enfriamiento de motores y sistemas auxiliares y en la figura 4.32 se observa el análisis del agua empleada para producción de vapor en el caldero, estos análisis son realizados periódicamente para monitorear la calidad del agua de la central.



R-PCT1-6		PROCESO DE VENTAS					Edición #1
		REPORTE ANALISIS DE LAS TORRES					23/07/2012
CLIENTE:.....ELECAUSTRO FECHA: 29/11/2014 ATENCION:..... Tlgo. Jorge López Tlgo. Julio Machado							
PARAMETROS	COMO	M-1:	M-2:	M-3	M-4	M-5	PARAMETROS RECOMENDADOS
Parámetros	Unidades	Alimentación	Torre 1	Torre 2	Torre 3	Torre 4	Control
Alcalinidad P	CaCO3		0	0	0	0	>100
Alcalinidad M	CaCO3		40	40	30	40	>100
Dureza total	CaCO3	35	65	50	60	55	0 - 100
Dureza de calcio	CaCO3		16,25	12,5	15	13,75	>100
Hierro	Fe		0,6	0,8	0,6	0,4	<5
Fosfato	P04		12	8	10	10	0,1 a 50
pH	Unidad		8,5	8,49	8,62	8,78	5 a 10
TDS	ppm	100	190	140	190	140	>100
Cloruros	Cl		-----	-----	-----	-----	>100
Indice de Langelier	Unidad		-0.0028	0,12	-0,041	0,26	-1 a + 1
CC	Unidad		0,90	0,40	0,90	0,4	max 7
Temperatura	°C		37,1	36,4	37,2	39,1	15 a 40
RECOMENDACIONES:							
Las torres se encuentran estables							
REPRESENTANTE TECNICO:				FIRMA CLIENTE:			
TECNOLOGIA DE SERVICIOS QUIMICOS							

Figura 4.31 Análisis de la calidad del agua de enfriamiento. [25]

4.8 Metodología para revisión de tuberías en la central Termoeléctrica “El Descanso”

En base a los espesores obtenidos durante los ensayos con el equipo de ultrasonido y al tiempo de operación que ha estado expuesta la tubería de agua se puede determinar el desgaste que ha sufrido la misma durante los años, destacando que los datos del tiempo de operación han sido obtenidos de la base de datos de la empresa ELECAUSTRO.

Partiendo de la siguiente fórmula se puede determinar la pérdida del espesor que ha sufrido la tubería durante el tiempo, el cual, en base a la investigación hecha en la empresa, se ha prolongado desde el año de 1981 hasta el 2013, es decir un periodo de 32 años.

$$D_e = \frac{e_0 - e_t}{t}$$

Donde:

D_e Es la pérdida de espesor.

e_0 Espesor inicial de la muestra.

e_t Espesor de la muestra en el tiempo.

t Tiempo de exposición.

El siguiente cálculo se usa para establecer los coeficientes de seguridad en espesores de partes, piezas y equipos (útil desde el punto de vista ingenieril), permite comparar el comportamiento de materiales distintos y permite conocer la durabilidad de los materiales. [26]

$$D_e = \frac{6 \text{ mm} - 3,40 \text{ mm}}{32 \text{ años}} = 0,08 \text{ mm/año}$$

Es necesario indicar que el espesor de la muestra en el tiempo ha sido obtenido en base a los valores de espesor medidos por el equipo el cual se especifica en la tabla 4.1 y calculando de todos estos la media aritmética, la cual nos da el siguiente valor.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} = \frac{(2,77 + 1,62 + 2,94 + 4,01 + 4,33 + 4,76)mm}{6} = 3,40 \text{ mm}$$

La siguiente tabla muestra la escala de la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos, en función a los años en que estos pierden espesor.

Grupo de estabilidad	Velocidad (mm/año)	INDICE O GRADO
I. Absolutamente estable	<0.001	1
II. Muy estable	0.001 < X < 0.005	2
	0.005 < X < 0.01	3
III. Estable	0.01 < X < 0.05	4
	0.05 < X < 0.1	5
IV. Estabilidad disminuida	0.1 < X < 0.5	6
	0.5 < X < 1	7
V. Poco estable	1 < X < 5	8
	5 < X < 10	9
VI. Inestable	>10	10

Tabla 4.2 Escala de la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos. [26]

A continuación se puede comprobar el valor obtenido del cálculo de la pérdida de espesor el cual es de 0,08 mm/año; con la tabla 4.2, se denota que la tubería de agua está en un nivel III que corresponde a una tubería que por su material resistente, tiene un desgaste estable y permite proyectar un desgaste futuro para tomar las medidas correspondientes en el sentido de implementación de planes de inspección o mantenimiento.

La razón del uso de este cálculo es determinar una proyección de la vida útil de la tubería en el entorno en el cual va a trabajar, es necesario por lo tanto, llevar un registro periódico de las mediciones para en base a esto determinar cuánto se ha desgastado en un año dicha tubería y definir cuantos años más va a servir la misma.

4.8.1 Revisión de tuberías

De acuerdo a lo consultado a los responsables de la central El Descanso, los grupos motor-generador suelen someterse a mantenimientos programados cada 1000, 2000 y 12000 horas de funcionamiento (overhaul). Los trabajos de mantenimiento a las 1000 horas de funcionamiento abarcan actividades que son realizadas en un tiempo máximo de un día, los mantenimientos a las 2000 horas se realizan en un tiempo de 3 a 5 días dependiendo de las labores a ejecutar; y finalmente están los mantenimientos a las 12000 horas correspondientes al overhaul del grupo y que pueden ser ejecutados por un lapso aproximado de seis semanas. Por experiencia del personal de supervisión de la central se conoce que 12000 horas de funcionamiento se cumplen en aproximadamente un año, siendo a nuestro criterio un tiempo excesivo para la ejecución del examen dadas las condiciones avanzadas de desgaste y corrosión que se tiene sobre todo en la tubería de agua.

Por lo expuesto lo recomendable sería realizar las labores de inspección de las tuberías durante cada overhaul. Sin embargo el período de tiempo comprendido entre cada overhaul no siempre es constante, ya que éste depende de factores como la continuidad de la producción del grupo (disponibilidad) o la continuidad en el requerimiento de producción; es por esto que se fija un tiempo de 6 meses para la inspección de las tuberías.

Sin embargo antes de poner en práctica el plan de inspección de tuberías por ultrasonido industrial se debe considerar que resulta más conveniente para la empresa entre contratar un ente externo o si se realizará la inspección con personal propio. Nosotros recomendamos que los ensayos debieran ser realizados por personal propio, ya que el equipo puede ser empleado no solamente para inspección de tuberías sino también para aplicaciones en calderos y turbinas de turbocompresores especialmente, para lo cual la empresa debería adquirir un equipo de ultrasonido y capacitar al personal para su manejo.

Las labores que debe ejecutar el encargado de los ensayos por ultrasonido industrial en tuberías son:

- Mantener en buen estado el equipo y sus accesorios.
- Calibrar periódicamente el equipo.
- Identificar zonas críticas de las tuberías para la ejecución de los exámenes.
- Preparación de las zonas a examinar.
- Examinación de las tuberías.
- Limpieza y presentación de las tuberías examinadas.
- Presentación de informes sobre el estado de las tuberías.
- Llevar un registro histórico de los datos obtenidos.

En esta tesis se ha calculado una tasa de desgaste anual para las tuberías de vapor y agua, sin embargo lo recomendable es determinar esta tasa en base a un registro histórico de exámenes realizados, y para disponer de este registro se debe comenzar con la ejecución de los ensayos en las tuberías y así tener la suficiente cantidad de datos para proyectar tendencias más precisas.

CONCLUSIONES

- El análisis de las tuberías de conducción de vapor y agua mediante la técnica de ultrasonido industrial ha resultado provechosa ya que se ha logrado encontrar defectos e interpretar las lecturas que se han presentado en el material, mediante el uso de un equipo nuevo de propiedad de la Universidad, sin embargo se pueden conseguir mejoras resultados en base a completar el equipo con accesorios y el aporte de personal con experiencia en el manejo del mismo.
- Los ensayos no destructivos son un medio eficaz de comprobación de las condiciones en las que se encuentran tuberías, estructuras y elementos de máquinas, por lo tanto deben ser considerados siempre como la primera opción para la examinación de estos elementos.
- Existen muchas técnicas de ensayos no destructivos, sin embargo su utilización dependerá del nivel de detalle al que se pretenda llegar, por ejemplo para el análisis superficial y detección de fisuras se puede emplear tintes penetrantes o partículas magnéticas, pero para exámenes especiales para detección de defectos internos se puede emplear ultrasonido o radiografía industrial.
- Los análisis realizados demuestran un mayor desgaste de las tuberías de conducción de agua que en las de vapor, esto se debe al tiempo de exposición que han tenido las tuberías al fluido y también a la calidad del mismo, además en el sistema de refrigeración permanentemente existe flujo de líquido (recirculación de agua), por lo tanto existe una mayor tendencia al desprendimiento de material, situación que ocurre en menor medida en las líneas de vapor ya que en estos sistemas existen las denominadas “trampas de vapor” las cuales abren el sistema para evacuar el vapor condensado en la tubería y cuando no existe tal condensado cierran el sistema eliminando el flujo de vapor.

- La obtención de resultados mediante el examen es únicamente un paso para el diagnóstico del material que se está estudiando; en este sentido los criterios de aceptación o rechazo establecen los límites para designar un elemento como desechable o utilizable, por lo tanto los encargados de establecer dichos criterios deben tener el conocimiento y experiencia suficiente para asegurar si el elemento está en condiciones para continuar funcionando o se debe descartar.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la aplicación del ultrasonido industrial en las instalaciones de la central, pero dichos exámenes no se limitarían únicamente para las tuberías, existen otros elementos importantes como por ejemplo ejes de turbocompresores que podrían ser revisados con esta técnica, y de existir la factibilidad, se pueden incorporar a los planes de mantenimiento, procedimientos rutinarios de examinación ultrasónica para elementos críticos previamente identificados.
- En virtud que el equipo de ultrasonido es de propiedad de la Universidad, se recomienda la adquisición de equipos complementarios para efectuar otros análisis, tales equipos pueden ser recipientes para exámenes por inmersión, zapatas para ensayo por haz angular, bloques de calibración curvos, soportes y transportadores para los exámenes, etc.
- Es recomendable la certificación de los responsables para la ejecución de los exámenes por ultrasonido, ya que esto garantiza una correcta examinación y la obtención de resultados razonables para un diagnóstico del material en estudio.
- Se recomienda realizar un mantenimiento periódico del equipo así como su normalización tal como lo establece la norma ASME BPVC V 2010, con el fin de verificar las condiciones en las que se encuentra dicho equipo antes de realizar un examen.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Ensayos no destructivos,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.isotec.com.co/portal2/index.php?id=55>. [Último acceso: 03 11 2014].
- [2] I. Escalona, «Técnicas de Magnetización,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos30/particulas-magneticas/particulas-magneticas.shtml>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [3] «Líneas de fuerza magnética en un cable conductor,» 01 Septiembre 2011. [En línea]. Available: <http://primarialeemundofsico-carmen.blogspot.com/2011/09/experimentos.html>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [4] «Ensayo no destructivo con líquidos penetrante,» [En línea]. Available: <http://corquimalsac.es.tl/Tintes-Penetrantes-para-Ensayos-No-Destructivos.htm>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [5] C. H. M. Beltrán, «Principio de la técnica por líquidos penetrantes,» 23 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://ensayoliquidospenetrantes.blogspot.com/>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [6] «Rayos Gamma,» [En línea]. Available: <http://www.gammaend.com.ar/servicios.html>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [7] «Infrarrojo,» Abril 2012. [En línea]. Available: www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820402/T820402_ES.pdf. [Último acceso: 3 11 2014].
- [8] «Termografía Infrarroja,» [En línea]. Available: http://www.sgma.mx/termografia_infrarroja.shtml. [Último acceso: 3 11 2014].
- [9] G. P. López Lina, «Tipos de transductores,» Enero 2009. [En línea]. Available: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5033/147.pdf?sequence=1>.
- [10] J. Hernandez Ramos y J. García Navarro, «Ondas longitudinales ultrasónicas,» 13 Junio 2008. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos60/inspeccion-ultrasonido-materiales/inspeccion-ultrasonido-materiales2.shtml>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [11] C. Rubio y O. Marreno, «El transductor de ultrasonido,» [En línea]. Available:

- www.ndt.net/article/ndtnet/2010/11_Marrero.pdf. [Último acceso: 3 11 2014].
- [12] «Transductores de Inmersión,» [En línea]. Available: www.vicont.com.mx/index.php?section=&id=7. [Último acceso: 3 11 2014].
- [13] C. Rimoldi y L. M. Mundo, «Ensayo no destructivo por método de ultrasonido,» [En línea]. Available: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>.
- [14] «Discriminación de recubrimientos con el detector de fallas USN 60,» 2011. [En línea]. Available: http://www.llogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed_161.php.
- [15] P. A. Sanhueza Almonacid, «Barrido B-scan,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/doc/247211837/52/Barrido-A-Scan>.
- [16] «Aparato de inspección PND por ultrasonidos,» [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/olympus-industrial/transductores-ultrasonidos-17434-482211.html#product-item_482203.
- [17] «EPOCH XT,» [En línea]. Available: <http://www.olympus-ims.com/es/epoch-xt/>.
- [18] Manual de Equipo Epoch XT - Introducción y operaciones básicas.
- [19] «Block de calibración 5 pasos,» 28 Abril 2012. [En línea]. Available: <http://www.nuclearingenieria.com/productos/block-de-calibracion-5-pasos-acero-al-carbon-para-ultrasonido/>.
- [20] Norma ASME BPVC - 2010, Nueva York, 2011.
- [21] «Velocidad del sonido a través de los materiales,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.elcometer.com/es/laboratorio/espesor-del-material/todos-los-sustratos/productmanager?prod=657>. [Último acceso: 24 01 2015].
- [22] P. F. Mosquera Ávila y M. F. Sánchez Espinoza, Autores, Cuenca, Azuay, 2014.
- [23] Curso de Ultrasonido Industrial nivel I y II.
- [24] Inspección Técnica de tuberías de superficie de transporte de hidrocarburos instaladas, 2011.
- [25] Base de datos ELECAUSTRO, Cuenca, Azuay, 2014.

- [26] L. Á. Díaz, «Estudio desgaste prematuro en tuberías sistema de emulsión,» Abril 2011. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos96/estudio-desgaste-prematuro-tuberias-sistema-emulsion/estudio-desgaste-prematuro-tuberias-sistema-emulsion.shtml>. [Último acceso: 27 Enero 2015].
- [27] S. García Garrido, «www.santiagogarciagarrido.com,» [En línea]. Available: <http://www.santiagogarciagarrido.com/index.php/88-tecnicas-predictivas-la-termografia-infrarroja-y-su-aplicacion-en-centrales-de-ciclo-combinado>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [28] «Isotec Inspección y Diagnóstico Técnico,» [En línea]. Available: <http://www.isotec.com.co/portal2/index.php?id=56>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [29] «SIEEND SERVICIOS DE INSPECCIÓN, SUPERVISIÓN E INGENIERIA,» [En línea]. Available: http://sieend.com.mx/servicios_radiografia.html. [Último acceso: 3 11 2014].
- [30] G. P. López Lina, «<http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5033/147.pdf?...1>,» 1 2009. [En línea]. Available: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5033/147.pdf?...1>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [31] F. D. E. S. C. «http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf,» 2010. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf. [Último acceso: 3 11 2014].
- [32] «Física: La llave del universo,» [En línea]. Available: <http://fisicalallavedeluniverso.blogspot.com/>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [33] F. J. Villaescusa Egea, «Termografía,» [En línea]. Available: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3383/1/pfc5204.pdf>. [Último acceso: 3 11 2014].

ANEXOS

Tubería preparada para el ensayo



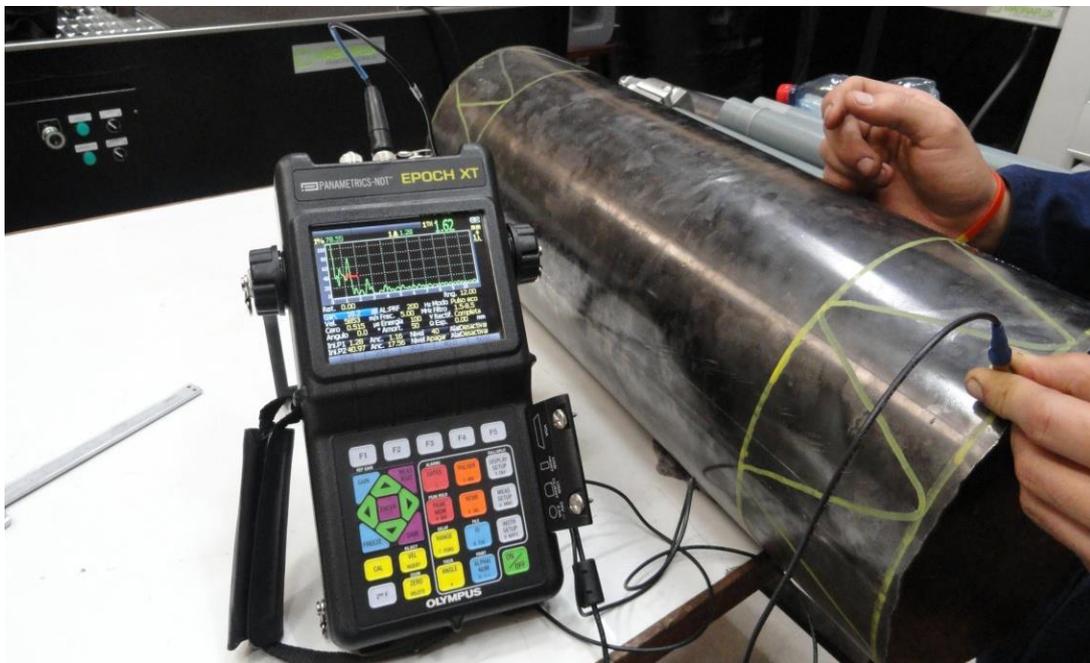
Máximo espesor de la tubería de agua en la sección 1



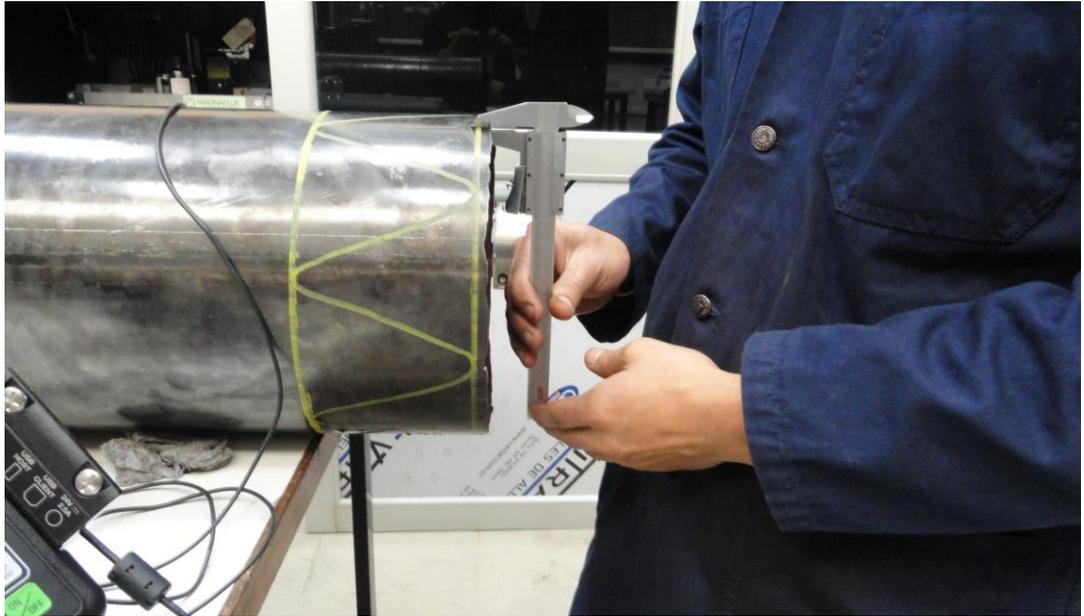
Máximo espesor de la tubería de agua en la sección 3



Mínimo espesor de la tubería de agua en la sección 3



Comprobación de espesor mediante calibrador



Mínimo espesor de la tubería de agua en la sección 2



Máximo espesor de la tubería de agua en la sección 2



Medición de espesor en la tubería de vapor



Inspección con haz angular en la tubería de agua



Rayón superficial de la tubería de agua



Acoplante utilizado para los ensayos



Marcador permanente para trazado de las secciones de la tubería de agua



Inspección con haz angular en la tubería de vapor



Tabla A-1 norma ASME B 31.3-2010

Tabla A-1 Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales¹ (cont.)

Los números en paréntesis se refieren a las notas para las Tablas del apéndice A; las especificaciones son ASTM a menos que se especifique de otra forma.

Material	No. de espec.	N.º P o N.º S (5)	Grado	No. UNS	Notas	Temp. mín. °F (6)	Mín. esfuerzo especificado, ksi				
							Tensión	Elasticidad	Temp. mín. a 100 200 300		
Acero carbón tuberías y tubos (2)											
A 285 Gr. A	A 134	1	...	...	(8b)(57)	B	45	24	15,0	14,7	14,2
A 285 Gr. A	A 672	1	A45	K01700	(57)(59)(67)	B	45	24	15,0	14,7	14,2
Soldadura a tope Smls y ERW	API 5L	S-1	A25	...	(8a)	-20	45	25	15,0	15,0	14,7
	API 5L	S-1	A25	...	(57)(59)	B	45	25	15,0	15,0	14,7
...	A 179	1	...	K01200	(57)(59)	-20	47	26	15,7	15,7	15,3
Tipo F	A53	1	A	K02504	(8a)(77)	20	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 139	S-1	A	...	(8b)(77)	A	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 587	1	...	K11500	(57)(59)	-20	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A53	1	A	K02504	(57)(59)	B	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 106	1	A	K02501	(57)	B	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 135	1	A	...	(57)(59)	B	48	30	16,0	16,0	16,0
...	A 369	1	FPA	K02501	(57)	B	48	30	16,0	16,0	16,0

Tabla A-1 Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales¹ (cont.)
 Los números en paréntesis se refieren a las notas para las Tablas del apéndice A; las especificaciones son ASTM a menos que se especifique de otra forma.

Esfuerzo permitido básico, S, ksi (1), a temperatura de metal, °F														Grado	No. espec.
400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100			
13,7	13,0	12,3	11,9	11,5	10,7	9,2	7,9	5,9	...	...	...	...	...	A 134
13,7	13,0	12,3	11,9	11,5	10,7	9,2	7,9	5,9	4,0	2,5	1,6	1,0	A45	A 672	
14,2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A25	API 5L
14,2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A25	API 5L
14,8	14,1	13,3	12,8	12,4	10,7	9,2	7,9	5,9	4,0	2,5	1,6	1,0	...	A 179	
16,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A	A 53
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A	A 139
16,0	16,0	15,3	14,6	12,5	10,7	9,2	7,9	...	...	...	...	...	...	A 587
16,0	16,0	15,3	14,6	12,5	10,7	9,2	7,9	5,9	4,0	2,5	1,6	1,0	A	A 53	
16,0	16,0	15,3	14,6	12,5	10,7	9,2	7,9	5,9	4,0	2,5	1,6	1,0	A	A 106	
16,0	16,0	15,3	14,6	12,5	10,7	9,2	7,9	5,9	4,0	2,5	1,6	1,0	A	A 135	
16,0	16,0	15,3	14,6	12,5	10,7	9,2	7,9	5,9	4,0	2,5	1,6	1,0	FPA	A 369	

Acero carbón
tuberías y tubos (2)

Tabla A-1B norma ASME B 31.3-2010

ASME B31.3-2010

Tabla A-1B factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tuberías, tubos y accesorios, E_f
 Estos factores de calidad son determinados de acuerdo con el párrafo 302.3.4(a). vea también párrafo 302.3.4(b) y Tabla 302.3.4 para factores de calidad incrementados aplicables a casos especiales. Las especificaciones, excepto API, son ASTM.

No. espec.	Clase (o tipo)	Descripción	E _f (2)	Notas. Apéndice A
Acero carbono				
API 5L	...	Tubería sin costura	1.00	...
		Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
		Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.95	...
		Soldada a tope en homo	0.60	...
A 53	Tipo S	Tubería sin costura	1.00	...
	Tipo E	Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
	Tipo F	Soldada a tope en homo	0.60	...
A 105	...	Forjas y accesorios	1.00	(9)
A 106	...	Tubería sin costura	1.00	...
A 134	...	Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.80	...
A 135	...	Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
A 139	...	Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0.80	...
A 179	...	Tubería sin costura	1.00	...
A 181	...	Forjas y accesorios	1.00	(9)
A 234	...	Accesorios con y sin costura	1.00	(16)
A 333	...	Tubería sin costura	1.00	...
		Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
A 334	...	Tubo sin costura	1.00	...
A 350	...	Forjas y accesorios	1.00	(9)
A 369	...	Tubería sin costura	1.00	...
A 381	...	Tubería soldada por fusión eléctrica, radiografiados al 100%	1.00	(18)
		Tubería soldada por fusión eléctrica, radiografía por lotes	0.90	(19)
		Tubería soldada por fusión eléctrica, como se fabricó	0.85	...
A 420	...	Accesorios soldados, radiografiados al 100%	1.00	(16)
A 524	...	Tubería sin costura	1.00	...
A 587	...	Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	...
A 671	12, 22, 32, 42, 52	Tubería soldada por fusión eléctrica, radiografiados al 100%	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Tubería soldada por fusión eléctrica, radiografía por lotes	0.85	...
A 672	12, 22, 32, 42, 52	Tubería soldada por fusión eléctrica, 100% radiografiado	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Tubería soldada por fusión eléctrica, radiografía por lotes	0.85	...
A 691	12, 22, 32, 42, 52	Tubería soldada por fusión eléctrica, 100% radiografiado	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Tubería soldada por fusión eléctrica, cordón doble a tope	0.85	...
Acero de baja y media aleación				
A 182	...	Forjas y accesorios	1.00	(9)
A 234	...	Accesorios con y sin costura	1.00	(16)
A 333	...	Tubería sin costura	1.00	...
		Tubería soldada por resistencia eléctrica	0.85	(78)
A 334	...	Tubo sin costura	1.00	...
A 335	...	Tubería sin costura	1.00	...
A 350	...	Forjas y accesorios	1.00	...
A 369	...	Tubería sin costura	1.00	...
A 420	...	Accesorios soldados, 100% radiografiados	1.00	(16)
A 671	12, 22, 32, 42, 52	Tubería soldada por fusión eléctrica, 100% radiografiado	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Tubería soldada por fusión eléctrica, cordón doble a tope	0.85	(78)

Tabla 304.1.1 norma ASME B 31.3-2010

Tabla 304.1.1 Valores de coeficiente Y para $t < D/6$

Materiales	Temperatura, °C (°F)					
	≤ 482	510	538	566	593	≤ 621
	(900 y menores)	(950)	(1.000)	(1.050)	(1.100)	(1.150 y mayores)
Aceros Ferriticos	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Aceros Austeniticos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otros metales ductiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Hierro Fundido	0,0	...	...	...	...	...

Factor de intervalo de esfuerzos, f . Norma ASME B 31.3-2010

