

CNEA-AC 14/86
PMTM/A-84

04.86.16

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE DESAROLLO
Departamento de Materiales

VI CURSO AVANZADO SOBRE
METALURGIA Y TECNOLOGIA DE MATERIALES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN TECNOLOGIA DE MATERIALES

100/105
JUAN N. BAEZ

CNEA

BUENOS AIRES
1986

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN TECNOLOGIA DE MATERIALES

1.- INTRODUCCION

Los Ensayos no Destructivos (END) aparecen como una expresión de la actividad inteligente del hombre en sus primeros deseos de dominar y transformar la naturaleza.

Pese a su aplicación continuada en el tiempo sólo se los reconoce como medio sistemático de ensayo de los materiales a principios de la era industrial y recién hace algunas décadas como una nueva disciplina tecnológica.

Su introducción en la tecnología de los materiales se hace a través del control de calidad, aunque desde el principio también se los utilizó en mantenimiento de equipos y por razones de seguridad. Un ejemplo de esto último sería el ensayo sonico (golpe de martillo) en las llantas de vagones ferroviarios en servicio.

El poder asegurar que las condiciones de funcionalidad y confiabilidad de un producto se cumplen dentro de las especificaciones de su diseño, ha sido una preocupación constante en el desarrollo industrial. El primer enfoque se hizo a través del Control de Calidad. Actualmente los requerimientos que aparecen en las nuevas áreas de avance tecnológico han impulsado el perfeccionamiento de las metodologías de calidad con la aplicación de nuevos conceptos tales como la Garantía de Calidad y los Sistemas Totales de Calidad.

Dentro de estos conceptos los END constituyen una herramienta de importancia relevante con un amplísimo campo de aplicación a nivel de ingeniería.

En estas condiciones el papel de los especialistas en END trasciende la tarea de operador o supervisor que se le solía asignar en el Control de Calidad. Actualmente el especialista de END debe participar activamente en la ingeniería del producto desde las etapas iniciales del diseño.

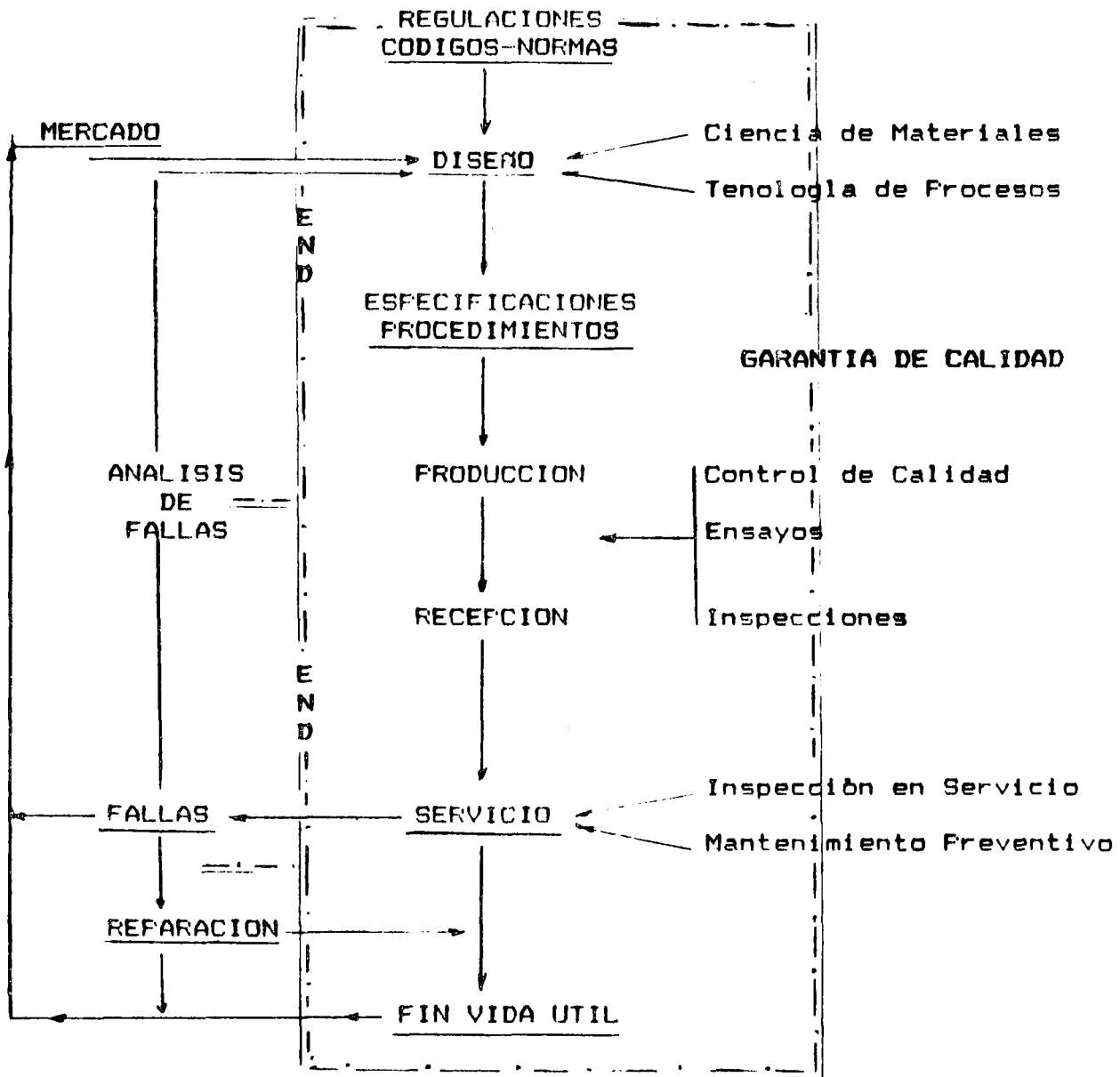
En la implementación de los Programas de Garantía de Calidad los END constituyen una herramienta importante, cualquiera sea su campo de aplicación

En un "Sistema total de Calidad", como el que ejemplificamos en el siguiente esquema, los END participan en todas sus etapas.

Dentro de un sistema como el que se describe, la GARANTIA DE CALIDAD es un mecanismo técnico administrativo que asegura que el sistema se desenvuelve de manera tal que cualquier falta de conformidad en el producto pueda ser:

- _ Detectada oportunamente
- _ Identificada la etapa en que se originó
- _ Determinada su causa
- _ Aplicada una medida correctiva

SISTEMA TOTAL DE CALIDAD



El examen mediante END debe ser considerado desde la Ingeniería de diseño, la cual previendo las condiciones de seguridad de la instalación, establece los niveles de calidad (grados de funcionalidad y confiabilidad, para todos los componentes teniendo en cuenta su criticidad (importancia) con respecto a la operación segura de toda la planta en su conjunto.

Ingeniería de diseño es responsable en la fijación de todas las necesidades de examen: desde el material hasta el componente en operación. Para efectuar estos exámenes se recurre a:

- Analisis químicos y metalográficos
- Ensayos mecánicos
- Ensayos no destructivos

Entre estos medios de examen el END tiene un rol importante ya que permite evaluar condiciones del material o componente, sin modificar su aptitud para el servicio evitando los problemas de toma de muestra, especialmente cuando se trata de producción en series muy cortas o aún unitarias como ocurre con muchos de los componentes para la industria nuclear.

Los END permiten además realizar exámenes durante la ejecución de procesos de fabricación que deben completarse en obra durante la erección de las instalaciones.

Para una mejor comprensión del sentido y la importancia de los END en la industria, particularmente en instalaciones nucleares, es conveniente establecer una distinción entre dos grandes campos en los que resultan indispensables:

- Control de calidad en todo el proceso de fabricación, instalación y recepción.
- Control de seguridad de la instalación durante su vida útil.

El control de calidad implica la verificación de que todo material y componente cumple con las especificaciones de diseño.

El control de seguridad de la instalación implica la verificación de que, durante la operación, los materiales y componentes no sufren alteraciones o modificaciones que disminuyan el grado de funcionalidad y confiabilidad establecidos en el diseño. En caso de que éstas se produzcan los END deben permitir detectarlas y evaluarlas.-

En las instalaciones nucleares este último campo de aplicación corresponde a lo que corrientemente se designa como "inspección de preservicio" e "inspecciones en servicio"

La inspección de preservicio corresponde a un inventario de las condiciones estructurales en que se encuentra la instalación antes de entrar en servicio. Debe ser hecha aplicando los métodos de END mediante técnicas y procedimientos que puedan ser repetidos exactamente durante toda la vida útil de la central.

El grado y extensión de los exámenes de preservicio, que luego serán repetidos en servicio, son establecidos por Ingeniería de Diseño en función de las regulaciones locales, de los códigos de aplicación contractual y con intervención de especialistas en END.-

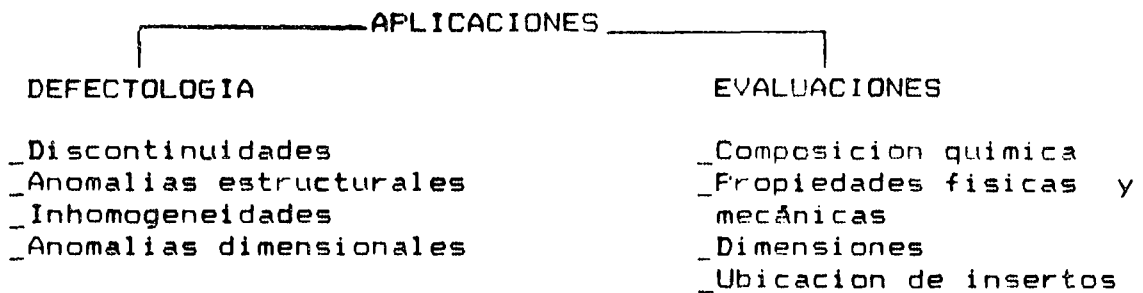
La inspección en servicio implica la repetición periódica de los exámenes realizados en preservicio a fin de detectar la evolución de las indicaciones de defecto registradas en preservicio y detectar, evaluar y registrar las indicaciones de defecto que aparezcan durante la operación de la instalación.

La inspección en servicio se realiza de acuerdo a un programa establecido de antemano y que siguiendo las recomendaciones y regulaciones aplicables, debe cubrir toda la vida útil de la instalación.-

En las centrales nucleares, paralelamente al programa de inspección en servicio se llevan a cabo "programas de vigilancia" dirigidos a verificar el comportamiento de materiales estructurales (recipiente de presión, por ejemp.) frente al daño por radiación y "programas de pruebas repetitivas" que están destinados a verificar periódica y sistemáticamente la funcionalidad de los componentes (bombas, válvulas, motores etc).

2.1. APLICACIONES DE LOS END.

Los END cubren un amplio campo de aplicaciones que, con criterio de síntesis podemos reunir en el siguiente cuadro:



En este cuadro el término "defectología" se refiere a la detección y evaluación de aquellas discontinuidades, inhomogeneidades, anomalías estructurales o dimensionales que de acuerdo al diseño pueden constituir defecto. A los fines de la selección de los métodos se suelen clasificar los defectos de acuerdo al siguiente cuadro:



Son considerados defectos planares aquellos en los cuales una de sus dimensiones no es significativa con respecto a las otras dos (fisuras, laminaciones, despegues, etc). Defectos volumetricos son aquellos que sus tres dimensiones resultan significativas para la detección (poros, contracciones, sopladuras etc.). Se consideran defectos superficiales aquellos que están en la superficie o que están abiertos o conectados a la superficie. Subsuperficiales son aquellos que están cerca de la superficie pero no la afectan.

Cuando nos referimos a evaluaciones consideramos la aplicación de los END para evaluación o medición de una propiedad, dimensión o composición referida o no a una especificación.

2.2. AREAS DE APLICACION DE LOS PRINCIPALES METODOS

a) Métodos que se aplican únicamente en defectología

Ensayo Visual (EV)	Superf./ Plan.y Volum.
Líquidos Penetrantes (LF)	Superf./ Plan.y Volum.
Partículas Magnéticas (FM)	Subsup./ Plan y volum.
Ensayo de Perdidas (EP)	Superf.e internas interconec.

b) Métodos que se aplican tanto en defectología como en evaluaciones.

Radiografía Industrial (RI)	Internas(superf.)/Volum.(plan.)
Ultrasonidos (US)	Internas(superf.)/Planares(vol.)
Corrientes Inducidas (CI)	Superf.(inter.)Planares/Volum.
*Emisión Acústica (EA)	Superf./Internas/Volumetricas

* Este método se aplica únicamente en condiciones de sollicitación del material y en tiempo real.)

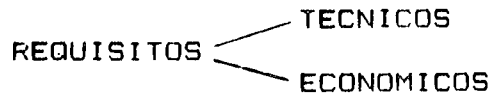
PRINCIPALES METODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO Y SUS APLICACIONES

METODO	TECNICAS PRINCIPAL	CAMPO DE APLICACION	APLICACIONES TIPICAS
ENSAYO VISUAL	Vision directa	Deteccion de defectos superficiales en produccion	Inspeccion de uniones soldadas Inspeccion en servicio de Instalaciones
	Transmision imagen	Deteccion de corrosión, erosión y fisuras superficiales en mantenimiento.	
	Replicas	Rugosidad y estructuras metalográficas	Examen de recalentadores de vapor en
LIQUIDOS PENETRANTES	Coloreados	Deteccion de defectos abiertos a la superficie, principalmente fisuras, en todo tipo de materiales metálicos o no metálicos, excepto los porosos.	Examen de soldaduras en aceros austeniticos
	Fluorescentes		Examen de alabes de turbinas en aeronautica
PARTICULAS MAGNETICAS	Via seca, coloreadas y fluorescentes	Deteccion de defectos superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagneticos.	Inspeccion de soldaduras en acero.
	Via humeda, coloreadas y fluorescentes		Examen de forjas en metales ferromagneticos
RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	Rayos X (50-400KV)	Deteccion de discontinuidades e inhomogeneidades internas ,principalmente volumetricas, en todo tipo de materiales.	Examen de fundiciones y soldadura
	Rayos Gamma		Examen de soldaduras en montaje de obra
	Rayos X Alta Energia		Exam. soldadura y fundicion en gran espesor
ULTRASONIDO	Transmision	Medicion de espesores, evaluacion de corrosion, deteccion y evaluacion de discontinuidades	Examen de componentes y chapas colaminadas
	Pulso-eco	internas y superficiales en materiales elasticos	Examen de soldaduras en cualquier espesor
CORRIENTES INDUCIDAS	Bobina con nucleo	Deteccion y evaluacion de defectos en pequeños espesores, evaluacion dimensional, evaluacion de	Inspeccion de tuberias metalicas.
	Bobina sin nucleo	estructuras metalograficas, clasificacion de aceros	Deteccion de fisuras en aeronautica
ELECTRICO	Potencial	Medicion de profundidad de fisuras	Examen de cigueñales y ejes
	Capacitivo	Evaluaciones dimensionales y de dielectricos	Medicion de diametro interno en tuberia
EXUDACION De GASES	Burbujeo	Deteccion de perdidas	Estanqueidad en esclusas
	Espectrometro de He	Deteccion y evaluacion de perdidas	Examen de perdidas en plantas nucleares
INFRARROJO	Termografia	Relevamiento de niveles de isotermas Transferencia de calor a traves de superficies	Examen de aislaciones termicas Balances caloricos

2.2. CONDICIONES PARA LA SELECCION DE METODOS.

Dadas las características propias de los END, que hemos descripto, la selección del método a aplicar frente a un determinado problema de inspección es una etapa fundamental ya que de ella depende que pueda obtenerse o no la información buscada al hacer la aplicación y que el costo sea el menor posible.

Para esta selección tenemos que considerar dos tipos de requisitos iniciales:



2.2.1 Requisitos técnicos.

Pueden ser resumidos como sigue:

a) Especificaciones de examen:

- Tipo de Defectología o evaluación requerida
- Áreas a cubrir y su importancia o criticidad
- Tipo de materiales a examinar
- Características del diseño
- Proceso de fabricación
- Niveles de aceptación o rechazo
- Umbral de detección exigido
- Registro o documentación del ensayo

b) Condiciones operativas:

- Ensayos en laboratorio
- Inspecciones en línea de producción
- Ensayos en obra o montaje
- Inspecciones en servicio
- Operación manual
- Operación automatizada
- Disponibilidad de técnicas alternativas

2.2.2. Requisitos económicos:

Si bien las condiciones económicas pueden ser muy variables según el tipo de obra, es necesario siempre considerar, por lo menos:

- Incidencia de mano de obra
- Cantidad y tipo de insumos requeridos
- Complejidad y costo del equipamiento
- Consumo de energía (si corresponde)
- Tiempo que demanda la preparación y el ensayo
- Costo de la seguridad industrial

3.-E N S A Y O V I S U A L

3.1.-FUNDAMENTOS Y ALCANCE

El ensayo visual consiste en la observación detallada de un espécimen en condiciones especificadas, efectuada a ojo desnudo o con ayuda de instrumental auxiliar que mejoren la capacidad de percepción del sentido de la vista o permitan acceder al lugar de interés en las condiciones de visión establecidas en la especificación correspondiente

Esta basado en las leyes fundamentales de la optica y en las propiedades de la radiación luminosa que constituye el campo de energia aplicado.

Para su aplicación se han desarrollado diferentes tecnicas, algunas de ellas muy complejas pero sin excluir algunas muy simples y efectivas.

A fin de disminuir el factor de subjetividad que lleva implicito el metodo se han desarrollado tambien tecnicas de registro que van desde la fotografia al registro computado.

La luz como campo de energia queda definida fisiologicamente como el intervalo de radiaciones electromagneticas para las cuales el ojo humano es sensible. Este intervalo se extiende entre las longitudes de onda de 390 y 720 nm(nanometros= 10^{-9} m)

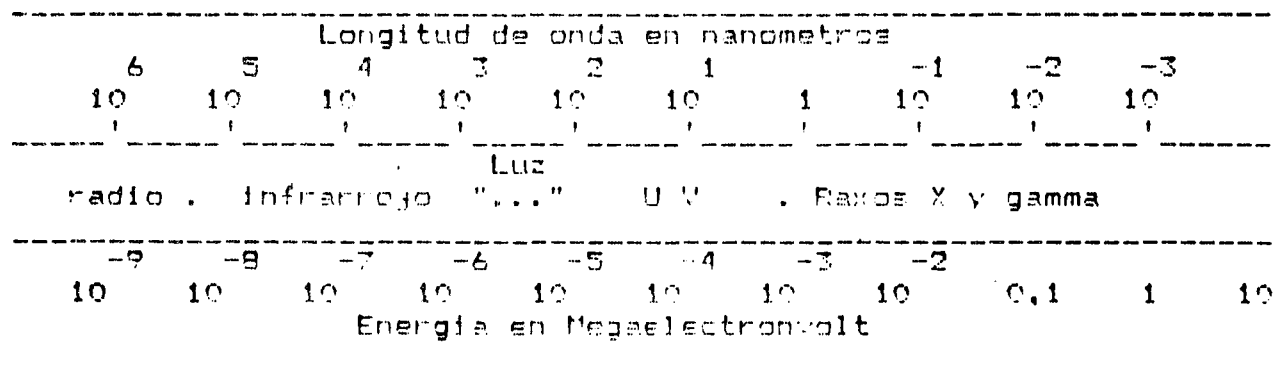


FIGURA No 1.- Espectro de Radiacion electromagnetica.

La aplicación primaria del ensayo esta dirigida al examen de superficies expuestas, accesibles en forma directa o indirecta y para el examen interno de cuerpos transparentes. En todos los casos sirve para determinar cantidad, forma, tamaño, terminación superficial, reflectividad, matices de color u otras características de color, discontinuidades o fisuras superficiales, así como características funcionales y desarrollo de procesos.

A pesar de su caracter subjetivo es de aplicación muy generalizada por su aptitud para dar información cualitativa y cuantitativa en forma directa y en razon de ser un complemento imprescindible para otros metodo de ensayo

Se lo incorpora tanto en las tareas de control de calidad como en las de mantenimiento, siendo su principal limitación la imposibilidad de su aplicación al examen volumetrico de los cuerpos opacos.

3.2. VISION.

La vision comprende factores tales como: percepcion de la luz, de la forma, del color, del contraste, de la profundidad y de la distancia.

Con respecto a la percepcion de la luz el ojo tiene una respuesta variable que depende de la longitud de onda y de la intensidad de la excitacion

con un nivel de iluminacion superior a 100 Lux el ojo puede percibir adecuadamente los colores (longitud de onda) teniendo su maxima sensibilidad para el color amarillo (555 nm) y una respuesta adecuada para los demas factores enunciados.

Con menor iluminacion, del orden 10 Lux la capacidad para reaccionar frente todos los factores disminuye sensiblemente y la maxima sensibilidad de color se corre hacia el azul

Con iluminacion menor que 0,01 Lux el ojo pierde la capacidad para reconocer el color de la excitacion, pero a medida que disminuye la iluminacion aumenta su sensibilidad para la percepcion de luz. El umbral fisiologico de un ojo normal, para la percepcion una señal luminosa es de 10 a la -9 Lux.

Formacion de imagenes:

La formacion de imagenes en el ojo sigue las leyes de la optica geometrica. El cristalino, ver FIG. No 2 , actua como una lente convexa cuya distancia focal puede ser variada y que en condiciones normales, produce una imagen real, invertida y disminuida del objeto sobre la retina.

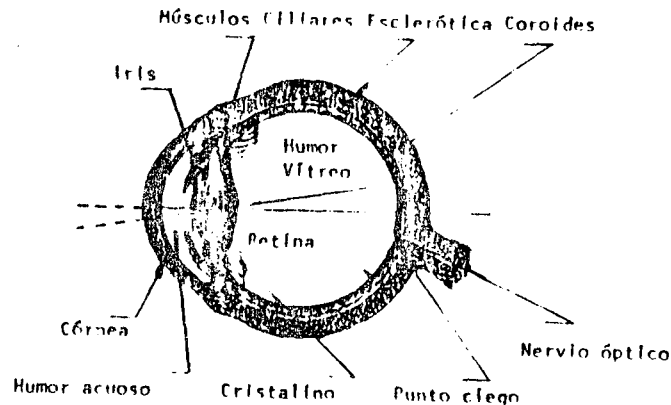


FIGURA No 2. --CORTE TRANSVERSAL DEL OJO HUMANO.

La distancia focal del cristalino se puede modificar por accion de los musculos ciliares que cambian la curvatura de las capas de distinto indice de refraccion que lo constituyen.

Esto permite al ojo normal hacer un enfoque entre 25 cm e infinito. Cuando el ojo se encuentra relajado la distancia minima de enfoque es de 30 cm y se la llama DISTANCIA DE VISION DISTINTA

Poder de separacion:

para poder distinguir separadamente dos puntos luminosos provenientes de un objeto es preciso que sus imagenes en la retina originen dos percepciones distintas, es decir sobre dos puntos sensibles distintos. Estos elementos sensibles estan constituidos por dos tipos de corpusculos, los cono y los bastones, que se hallan distribuidos en la retina.

Si tenemos en cuenta que la distancia media entre dos conos o bastones es de 5 micrones el ángulo que deberán formar dos rayos luminosos que se cruzan en el campo óptico del ojo, para incidir sobre dos de ellos contiguos será tal que su tangente resulte igual a la relación entre dicha distancia y la distancia desde el cristalino a la retina. Es decir:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0.005 \text{ mm}}{15 \text{ mm}} = 0.00033$$

Para la tangente 0.00033 corresponde un ángulo de 1 minuto y este ángulo se llama ANGULO DE SEPARACION, la inversa de su tangente mide lo que se designa como PODER SEPARADOR del ojo cuyo valor para un ojo normal será de:

$$1/0.00033 = 3.000$$

Agudeza visual:

Se llama AGUDEZA VISUAL a la mínima distancia a que deben estar separados dos puntos luminosos para que puedan ser distinguidos en forma independiente, observando a la distancia óptima de visión distinta (30 cm). Este valor es igual a:

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot 30 \text{ cm} = 0.00033 \cdot 300 \text{ mm} = 0.1 \text{ mm}$$

En la FIG. No 3, se muestran las distancias mínimas que deben existir entre dos puntos, para poder verlos separados, cuando se los observa a distancias diferentes de las de visión distinta.

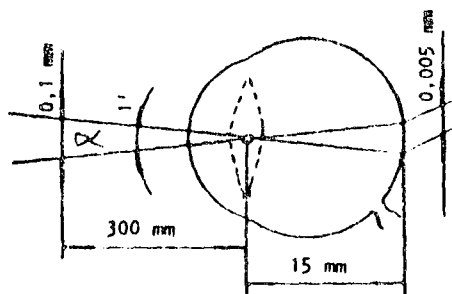


FIG. 3a.- EL OJO NORMAL APRECIA DOS PUNTOS LUMINOSOS A 30 cm DE DISTANCIA SEPARADOS 0,1 mm

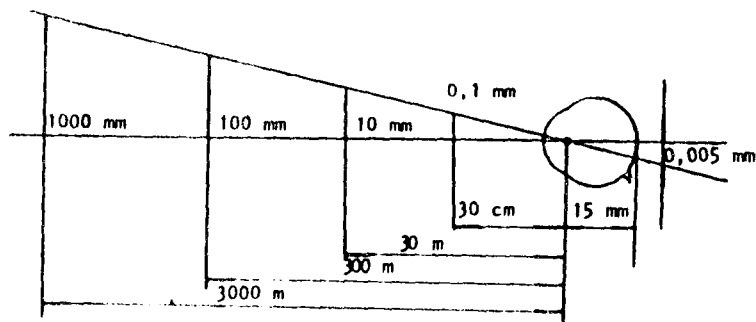


FIG. 3b: SEPARACION QUE APRECIA EL OJO SEGUN LAS DISTANCIAS

FIGURA No 3: ANGULO DE SEPARACION Y AGUDEZA VISUAL

Distancia y relieve

La visión binocular es el factor que permite la apreciación de las distancias, que es a su vez base de la apreciación de profundidad y relieve.

La visión estereoscópica depende, al menos en parte, del hecho de que cada ojo suministra una vista ligeramente diferente de los objetos cercanos. El ojo derecho ve un poco más del lado derecho del objeto. La experiencia sensorial permite que cuando las imágenes en la retina difieren en dicha forma, el objeto sea visto como tridimensional, poseyendo profundidad.

Apreciación del contraste:

La sensación diferencial de claridad es la que en primer término permite la percepción de un objeto al aparecer más claro o más oscuro que su entorno.

Cuando las superficies contiguas iluminadas tienen distinto valor de reflectancia (el ojo percibe los objetos por la luz reflejada), sus brillos ("luminancia") serán diferentes. Esta diferencia de brillo es el contraste. Se puede decir que la sensibilidad al contraste es una medida de la capacidad de percibir diferencias de brillo.

Para un ojo normal en condiciones de iluminación adecuada el valor umbral de diferencial de contraste es de 0,01.

Por lo tanto, para un cierto nivel de iluminación, la sensibilidad al contraste estaría dada por la percepción de una diferencia de 0,01 entre los brillos de las superficies contiguas entre las cuales exista una diferencia de reflectancia, en cuyo caso el valor de sensibilidad al contraste sería de 100.

La sensibilidad es el valor inverso del umbral de detección.- (El brillo o luminancia de una superficie es proporcional a la iluminación que recibe dicha superficie multiplicada por la reflectancia de la misma).

Pero la sensibilidad al contraste del ojo varía con el brillo. En la FIG.No 4, se muestra esta variación.

Con baja iluminación, es decir en las zonas de visión crepuscular y compuesta (actúan bastones en la primera y bastones y conos en la segunda) la sensibilidad al contraste aumenta mucho con el brillo.

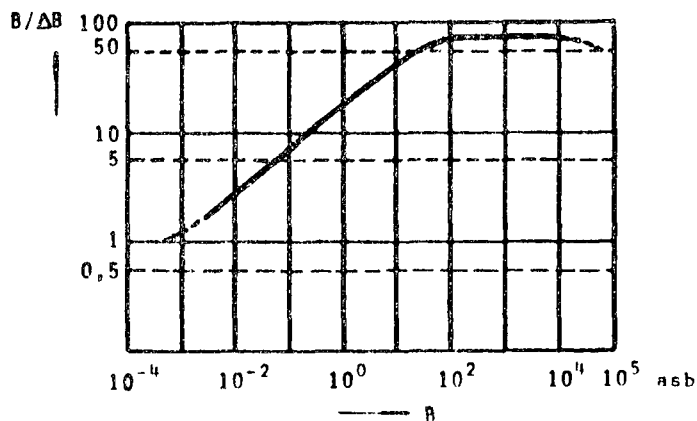


FIGURA No 4.- SENSIBILIDAD AL CONTRASTE EN FUNCION DEL BRILLO

Con mayor iluminación, con brillos entre 75 y 2500 Cd/m², la sensibilidad es casi constante alcanzando sus valores máximos para el ojo normal.

Cuando las superficies tienen brillos mayores que 3.000 Cd/m² la sensibilidad al contraste tiende a descender por efectos del "encandilamiento" o deslumbramiento producido por la superficie brillante.

3.3 LA LUZ.

Como ya dijimos la luz es la parte del espectro de radiaciones electromagnéticas que sensibiliza al ojo humano.

Como podemos ver en la curva de la FIG.No 5, esta sensibilidad no es igual para todo el intervalo, existiendo una máxima sensibilidad (asignamos el 100%) para una longitud de onda de 555 nm, la sensibilidad hacia los extremos disminuye asintóticamente, con lo cual los límites no son bien precisos. Arbitrariamente se suele tomar como límites del espectro visible a los valores de longitud de onda para los cuales la sensibilidad se reduce al 1%. Estos límites serían de 430 y 690 nm.

La sensibilidad relativa del ojo de un supuesto observador de referencia a diversas longitudes de onda para niveles normales de iluminación.

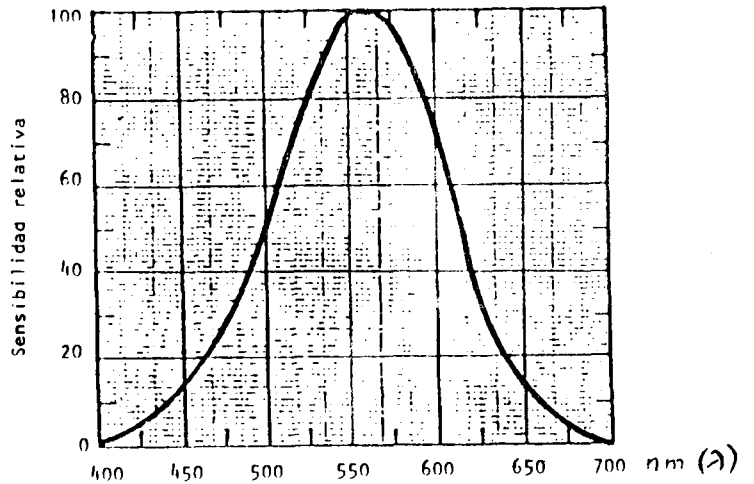


FIGURA No 5.- SENSIBILIDAD ESPECTRAL DEL OJO.

Color y vision:

La vision del color es una funcion de la adaptacion del ojo a la luz y depende de la actividad de los conos.

El color que depende de la longitud de onda de las radiaciones, tiene tres características principales: tono o matiz, saturacion o pureza y brillo o luminosidad.

El tono es la característica de color que usualmente da su nombre (azul, verde, etc.) y puede ser definido como la longitud de onda dominante en el ancho de banda que lo determina.

Saturacion es el grado de concentracion de un color en su estado puro. Como la mezcla de todas las longitudes de onda producen en el ojo la sensacion de blanco, si a una pintura de un determinado color le agregamos blanco, estaremos disminuyendo su saturacion.

El brillo o luminosidad de un color, para una iluminacion dada (con luz blanca) depende del coeficiente de reflexion (reflextancia) que le es propio, siendo maximo (1) para el blanco y minimo (0) para el negro.

Unidades fotometricas

En el cuadro de la FIG.No 6 se dan algunas de las unidades usuales en el ensayo visual.

MAGNITUD	DEFINICION	UNIDADES
Intensidad Luminosa I	Se establece por convención	CANDELA (Cd)
Brillo e	$B = \frac{I}{s}$	Candela por m ² ($\frac{Cd}{m^2}$)
Iluminación E	$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$	Lux (Lx) ó candela - metro (Cd - m)
Flujo Luminoso θ	$\theta = E \cdot S$ $\theta = I \cdot \Omega$	Lumen = 1 lux . 1 m ² Lumen = 1 candela . 1 esterradian

FIGURA No 6.- UNIDADES FOTOMETRICAS.

3.4. INSTRUMENTACION.

Como dijimos el ensayo visual puede ser realizado mediante vision directa o con medios auxiliares de la vision.

Entre estos medios auxiliares los mas usuales son:

Espejos, lupas, endoscopios (rigidos y flexibles), periscopios, prismaticos y sistemas de Tv.

Para el registro de las observaciones se utiliza la fotografia, las replicas, la grabacion en video, etc.

Para la iluminacion se utilizan distintos tipos de luminarias capaces de proveer luz concentrada o difusa segun necesidades. Se suele ademas utilizar en ciertos casos luz polarizada o bien radiacion UV para la observacion mediante fluorescencia.

Espejos.

Se utilizan para mejorar el angulo de observacion o para hacer observaciones en lugares que no permiten el acceso. Se debe tener en cuenta que la distancia de observacion correspondera a la suma de los caminos opticos.

Lupas.

Se utilizan para aumentar la agudeza visual, con distintos aumentos, que pueden llegar hasta 10x en lupas simples de pequeño diametro.

Presentan el problema de la aberraciones geometrica y cromatica, que se acentua para los mayores aumentos y diametros.

Cuando se trata de lupas para usar en mano, con distancias de enfoque que se hacen variar, la especificacion se hace en base a las dioptrias o potencia de la lente. Si se trata de lupas de tipo joyero, que se utilizan a distancia de enfoque fija, la especificacion puede hacerse por su aumento eficaz.

Recordemos que la dioptria es la inversa de la distancia focal de la lente, mientras que el aumento eficaz es la relacion entre la distancia de observacion distinta y la distancia focal de la lente

Endoscopios.

Permiten la observacion en el interior de huecos inaccesibles y a diferencia de los sistemas de espejo permiten la transmision de la imagen de manera que la observacion pueda hacerse bajo angulos de aceptancia que se pueden ajustar a fin de que correspondan a observaciones a distancia de vision distinta o a un aumento o disminucion de imagen.

De acuerdo a su construccion y aplicacion existen dos tipos de endoscopios:

- _Rigidos, con sistema optico centrado.
- _Flexibles, con transmision por fibras

Endoscopios rigidos.

El cuerpo principal esta formado por un tubo rigido que aloja un sistema optico centrado, constituido por pares de lentes que forman un sistema optico acromatico.

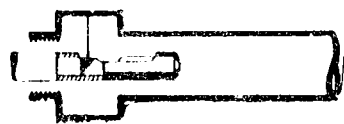
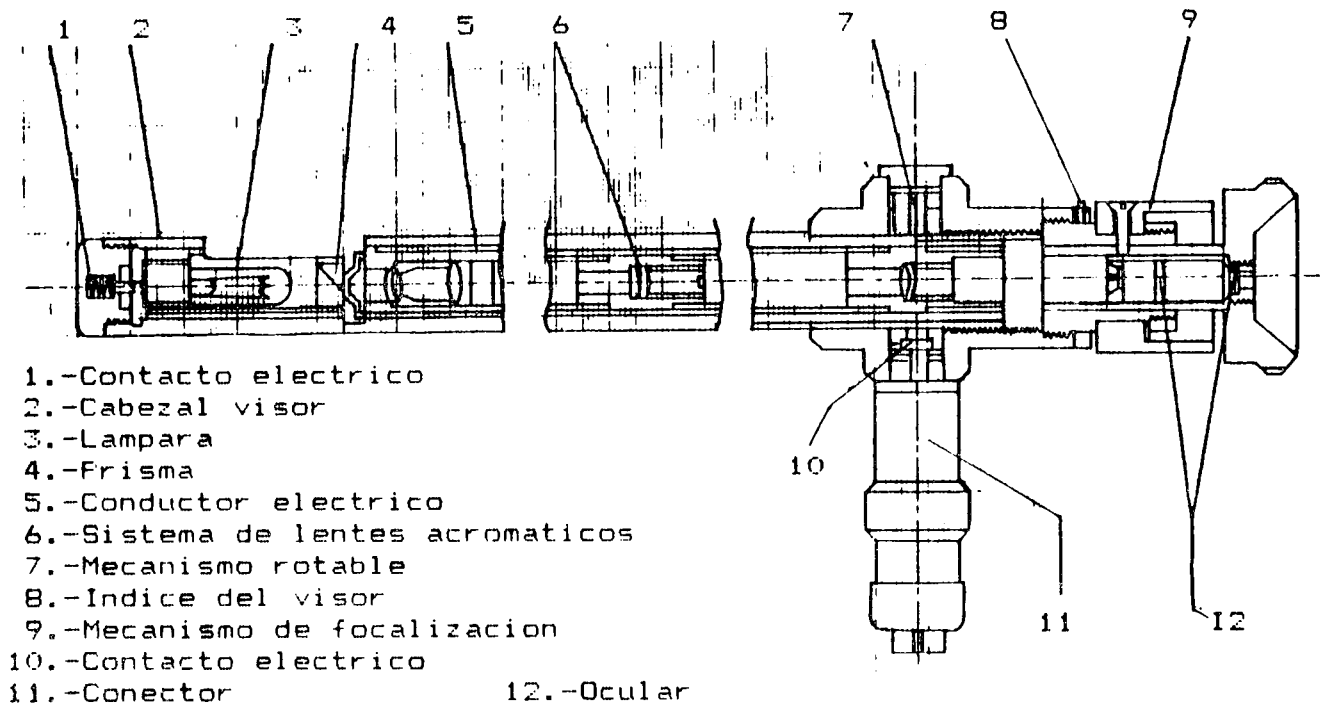
El objetivo esta formado por un cabezal, generalmente intercambiable, provisto de un prisma de reflexion total y de un sistema de iluminacion, alimentado por una fuente externa de baja tension.

En general estos instrumentos tienen una gran profundidad de campo y cuenta ademas con un sistema de enfoque en el ocular. Ver la FIG.No 7.-

Para cubrir requerimientos especificos se han diseñado una serie de cabezales intercambiables y adaptables al cuerpo principal.

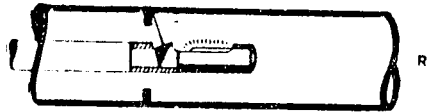
Los diametros exteriores van desde unos 5 mm hasta 45 mm y el largo entre 0,3 y 3 a 4m. El largo queda limitado por el diametro.- Para mayores diametros se construyen endoscopios de hasta 4m de longitud, pero generalmente en tramos ensamblables de aproximadamente un metro cada uno.

En general el ángulo de visión es fijo para cada cabezal, pero existen ciertos cabezales provistos de un tornillo excéntrico que permite fijar el ángulo de observación.



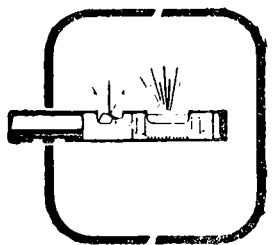
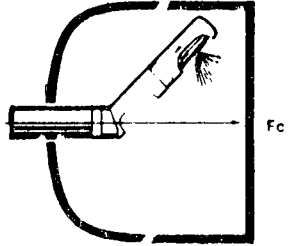
D Provee visión lateral de paredes bajo \angle de 90° . Para observación de gargantas y fileteados.

Provee retrovisión, para observación de ojivas, flanco de gargantas o filetes.



F Provee visión axial hacia adelante. Para observación de fondos de agujeros ciegos.

Provee visión axial hacia adelante con ángulo muy abierto. Para observación de fondos de gran superficie.



Provee visión lateral con ángulo variable regulable a distancia desde la misma posición que el ocular. Para observación de paredes de cilindros.

FIGURA No.7.- ENDOSCOPIOS RIGIDOS. DISTINTOS TIPOS DE CABEZALES.

Endoscopios flexibles.

Este tipo de endoscopio esta compuesto fundamentalmente de las mismas partes que uno rigido, reemplazando el tubo rigido por un haz de fibras flexibles muy delgadas, que tienen la propiedad de transmitir la luz, en razon de su elevado angulo de reflexion total, en su superficie interior.

Las fibras opticas se producen en dos tipos de material: cuarzo o de acrilico. El diametro de la fibra es de tanta importancia como el indice de refraccion respecto del aire, que es lo que determina su angulo limite.

Cuanto mas fina es la fibra, mayor es su flexibilidad y mas facil de alcanzar el angulo limite, por la limitacion en la divergencia del haz de luz que ingresa.

Por otra parte se trata de que cada fibra contribuya individualmente a la formacion de la imagen, evitando mediante el ploteado exterior de las mismas que la luz pase de una a otra. Ademas cuanto menor sea el diametro de la fibra mejor sera la definicion de la imagen.

El diametro de las fibras varia mucho de un tipo de endoscopio a otro pero cuanto menor sea, mejor sera la calidad de la imagen. Las fibras de cuarzo son siempre de menor diametro, del orden de los micrones, en cambio las de acrilico pueden llegar hasta un diametro de 1 mm. En ciertos endoscopios de fibra de acrilico se puede observar el campo dividido en pequenas celdas, debido a que el diametro de las fibras es mayor que el de agudeza visual ($>0,1\text{mm}$).

El endoscopio de fibras esta compuesto por dos sistemas coaxiales concentricos de transmision de la luz. Un haz periferico que conduce la iluminacion al lugar de observacion y un haz interno, coherente (en ambos extremos las fibras conservan sus mismas posiciones relativas), para la transmision de la imagen.

Tanto el ocular como el objetivo tienen disposiciones similares a las descriptas para los endoscopios rigidos.

En cuanto a la eficacia o rendimiento de estos endoscopios es inferior a la de los rigidos, siendo sus indices de transmision de solamente 0,45 a 0,60, aproximadamente.

AUMENTO.

La imagen transmitida mediante un endoscopio sufre un aumento o disminucion en funcion de la distancia del objetivo a la superficie enfocada. La FIG.No 8, muestra la variacion del aumento en funcion de la distancia del objetivo al objeto, para un endoscopio convencional.

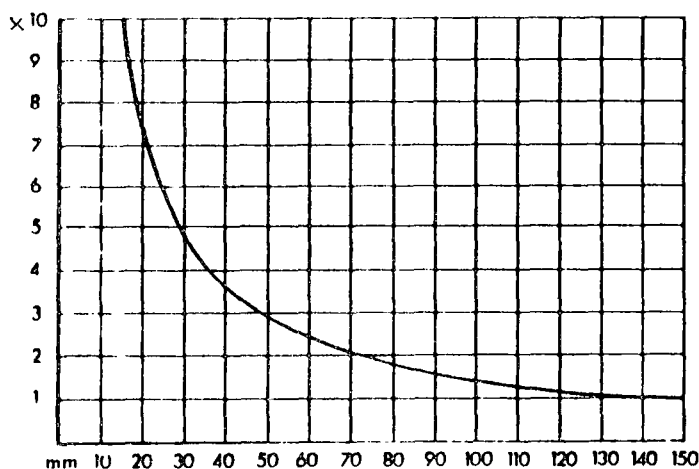


FIGURA No 8. ENDOSCOPIOS. AUMENTOS EN FUNCION DE DISTANCIA

1.3. NORMAS Y PROCEDIMIENTOS.

Debe entenderse que el ensayo visual no es una mera observación en condiciones más o menos determinadas sino que siendo una técnica de END, su aplicación, esta basada en la misma metodología que los demás métodos y por lo tanto su ejecución debe realizarse en base a procedimientos escritos y las condiciones de ensayo deben encuadrarse dentro de las normas establecidas a tal efecto.

Como referencia podemos remitirnos al CODIGO ASME, sección V, Art. 9, que trata sobre los procedimientos y condiciones para el ensayo visual.

En cuanto a las condiciones de examen, este Código establece que el EV es usado generalmente para determinar las condiciones de superficie, alineamiento, formas o evidencias de fallas.

Consideraciones básicas para el ensayo deben ser:

ACCESIBILIDAD, ILUMINACION Y ANGULO DE VISION

Este Código define las formas de examen al cual es aplicable el EV, clasificandolas en:

- a) examen visual directo.
- b) " " remoto
- c) " " por transparencia.

El EV directo comprende aquellas situaciones en que el observador puede ubicarse a menos de 610 mm (aprox. el doble de la distancia de visión distinta) y con un ángulo de observación no menor que 30°. En esta forma de examen se admite el uso de espejos y lupas. El nivel mínimo de iluminación se fija en 350 LUX. Se exige un examen de agudeza visual del operador repetido al menos una vez al año.

Para el EV remoto se utilizan los equipos de transmisión de imagen ya mencionados. Se exige mostrar evidencia de que la capacidad de resolución sea por lo menos igual a la mínima exigida por la especificación de examen.

Respecto del EV por transparencia, se lo considera como un complemento del EV directo, aplicable a cuerpos transparentes.

Procedimientos.

Un procedimiento escrito para EV debe incluir como mínimo los siguientes puntos:

- 1) La forma en que se llevara a cabo el ensayo
- 2) Se tendrá en cuenta la condición superficial.
- 3) El método de preparación de la superficie a examinar.
- 4) Establecer la técnica de ensayo visual directo o remoto.
- 5) Iluminación, tipo e intensidades.
- 6) Instrumentos y equipos utilizados, si los hay.
- 7) Secuencia de realización del ensayo, si es aplicable
- 8) Información a ser tabulada, si la hay.
- 9) Informe y normas generales a ser completadas.

Cuando se trata de una obra compleja se suelen redactar un "Procedimiento General" que establece las condiciones del ensayo en forma general para toda la obra y luego se escriben "Procedimientos Específicos" para los distintos casos de examen.

4.- LIQUIDOS PENETRANTES.

4.1.-FUNDAMENTOS.

El metodo de ensayo por LIQUIDOS PENETRANTES (LP) tiene una importante aplicacion en el examen superficial para la deteccion de defectos abiertos a la superficie (grietas, poros, erosiones, etc.) en todo tipo de materiales, metalicos y no metalicos, que no sean porosos ni presente escamado o rugosidad excesiva.

Se distingue porque es practicamente independiente de la forma o geometria de la pieza a examinar, requiere un equipamiento minimo y permite obtener una gran sensibilidad en la deteccion de fisuras superficiales, superior a la que suele obtenerse con otros metodos como la radiografia industrial o ultrasonidos.

En condiciones favorables, su umbral de deteccion esta en el orden 0,1 micrones de ancho de fisura para una profundidad de solo algunas decenas de micrones.-

El fundamento del metodo reside en la capacidad de ciertos liquidos, para penetrar y ser retenidos en fisuras, poros, y discontinuidades estrechas abiertas a la superficie.

Esta capacidad depende de tres propiedades: mojabilidad o angulo de contacto entre liquido y solido; tension superficial y viscosidad.

4.2.-TECNICA DE ENSAYO.

En su estado actual el metodo de ensayo por LP comprende las siguientes operaciones:

- _ Preparacion y limpieza efectiva de la superficie a examinar incluyendo un perfecto secado.
- _ Aplicacion del liquido penetrante de manera que cubra toda la superficie.
- _ Dejar transcurrir el tiempo necesario para asegurar la penetracion. De 5 a 30 minutos segun los casos y tipo de penetrante.
- Remocion del liquido penetrante de la superficie evitando extraer el retenido en las discontinuidades. La remocion puede hacerse mediante trapos o papeles secos o humedecidos en agua o solvente; con agua pulverizada directamente o utilizando una etapa previa llamada de emulsificacion, en la cual se incorpora un emulsificador al penetrante que esta sobre la superficie, sin llegar al que se encuentra dentro de las discontinuidades.
- _ Secado de la superficie, si es necesario, y aplicacion del revelador que esta constituido por talco u otra sustancia blanca e inerte, en forma de polvo muy fino. El revelador puede aplicarse en forma de polvo seco, o en forma de suspension humeda, acuosa o mas generalmente no acuosa (mezcla de alcohol y acetona).
- _ El revelador aplicado en forma de capa fina, homogenea y porosa, tiene por funcion extraer el penetrante de las discontinuidades difundiendo hacia la superficie donde aparece formando las indicaciones de defecto. Si el penetrante es coloreado, generalmente rojo, se observa por su buen contraste respecto de la superficie blanca del revelador. Si es fluorescente se debe observar utilizando radiacion ultravioleta ("luz negra") en un ambiente oscurecido.

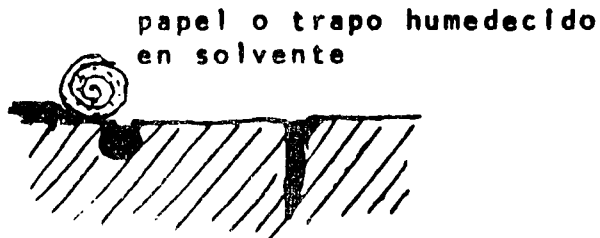
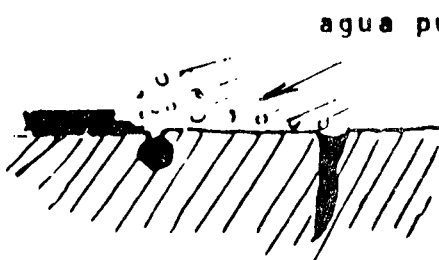
Las etapas de un ensayo con LP han sido esquematizadas en la FIG.No 9, de la pagina siguiente.



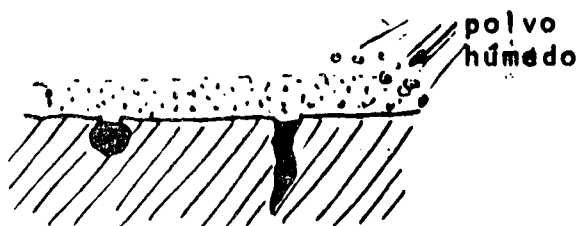
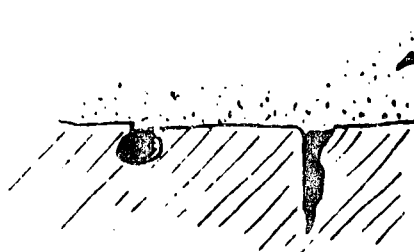
a) Superficie limpia con fallas



b) Líquido penetrante aplicado



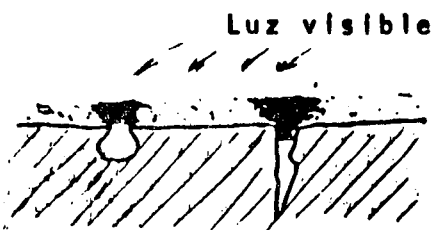
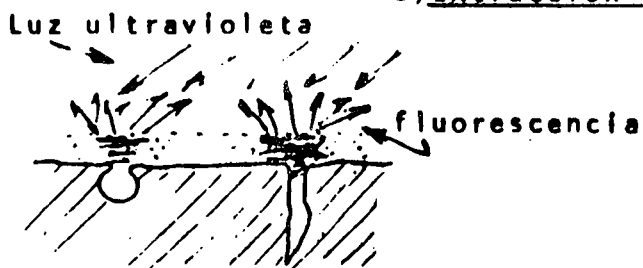
c) Remoción del exceso de penetrante



d) Aplicación del revelador



e) Extracción del penetrante por el revelador



f) Observación de los defectos

FIGURA No 9.-DESCRIPCION DE LA APLICACION DEL ENSAYO FOR LF

4.3.-CLASIFICACION DE LAS TECNICAS

En la descripción precedente se puede observar que el tipo de líquido penetrante determina variantes en la aplicación del método.

Los materiales para el ensayo (removedor, penetrante, emulsificador, revelador) son formulados y seleccionados de acuerdo a la aplicación prevista y a las condiciones en que se debe hacer el ensayo. Estos productos deben ser compatibles entre sí, por lo cual cada fabricante los suministra en forma de conjuntos, sistemas, técnicas o procesos cuyos componentes generalmente no son sustituibles.

Estos conjuntos de productos mutuamente compatibles se diseñan para usos específicos y están constituidos por:

- Penetrante
- Removedor o limpiador si corresponde
- Emulsificador, si corresponde.
- Revelador.

Estos diferentes procesos usados en el ensayo han motivado la necesidad de su normalización. Las normas los definen y los clasifican. En el cuadro siguiente damos la clasificación correspondientes a las normas IRAM, ASTM y MIL.

IRAM-CNEA/1001 ASTM E-165		MIL-I-6866		Figmento	Caracterización
Tipo	Técnica	Tipo	Técnica		
A	1	I	A	Fluorescente	Removible con agua
	2		B		Post-emulsificable
	3		C		Removible c/solvente
B	1	II	A	Coloreado	Removible con agua
	2		B		Post-emulsificables
	3		C		Removible c/solvente

TABLA I.-CLASIFICACION DE PROCESOS CON LIQUIDOS PENETRANTES

La norma ISO 3452/84 establece una clasificación de los productos por separado y luego una clasificación para el conjunto que constituye un sistema o proceso.

Los productos se clasifican como sigue: Penetrantes

- A _ penetrantes fluorescentes
- B _ " coloreados
- C _ " coloreados-fluorescentes (duals)
- D _ " para propósitos especiales

Removedores

- A _ Agua
- B - Emulsificador + agua
 - 1 _ Emulsificador lipofílico.
 - 2 _ " hidrofílico
- C _ Solvente líquido

Reveladores

- A _ Polvos secos
- B _ Polvos en suspension o solucion, en agua
 - 1 _ Suspension en agua
 - 2 _ Solucion en agua.
- C _ Polvos en suspension no acuosa
 - 1 _ Solvente no inflamable.
 - 2 _ Solvente inflamable.

La clasificacion de los procesos o sistemas es similar a la de las normas mencionadas anteriormente ya que establece:

De acuerdo al tipo de observacio.

- A _ Penetrantes fluorescentes.
- B _ Penetrantes coloreados.
- C _ Penetrantes duales.

De acuerdo al tipo de remocion.

- 1 _ Removibles con agua.
- 2 _ Postemulsificables.
- 3 _ Removibles con solvente.

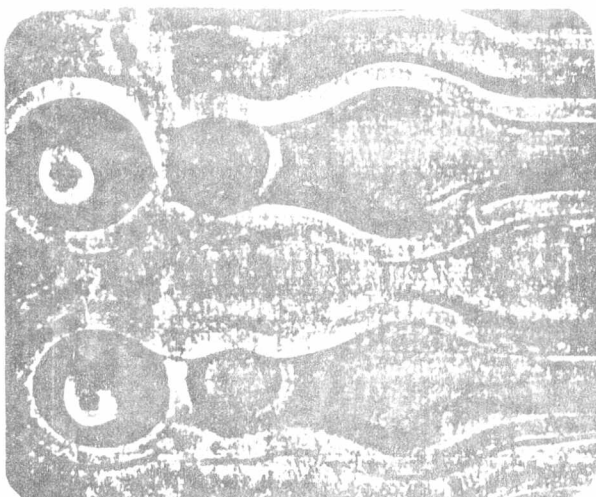
Esquemas de aplicacion de los distintos procesos.

De acuerdo con estas clasificaciones generalmente el ensayo por LF se aplica siguiendo distintas etapas de operacion, segun las seis tecnicas o procesos diferentes que se describen en la FIGURA No 11.-

INDICACIONES DEL ENSAYO.

El resultado del ensayo se obtiene a traves de la interpretacion de las indicaciones que aparecen luego de aplicado el revelador.

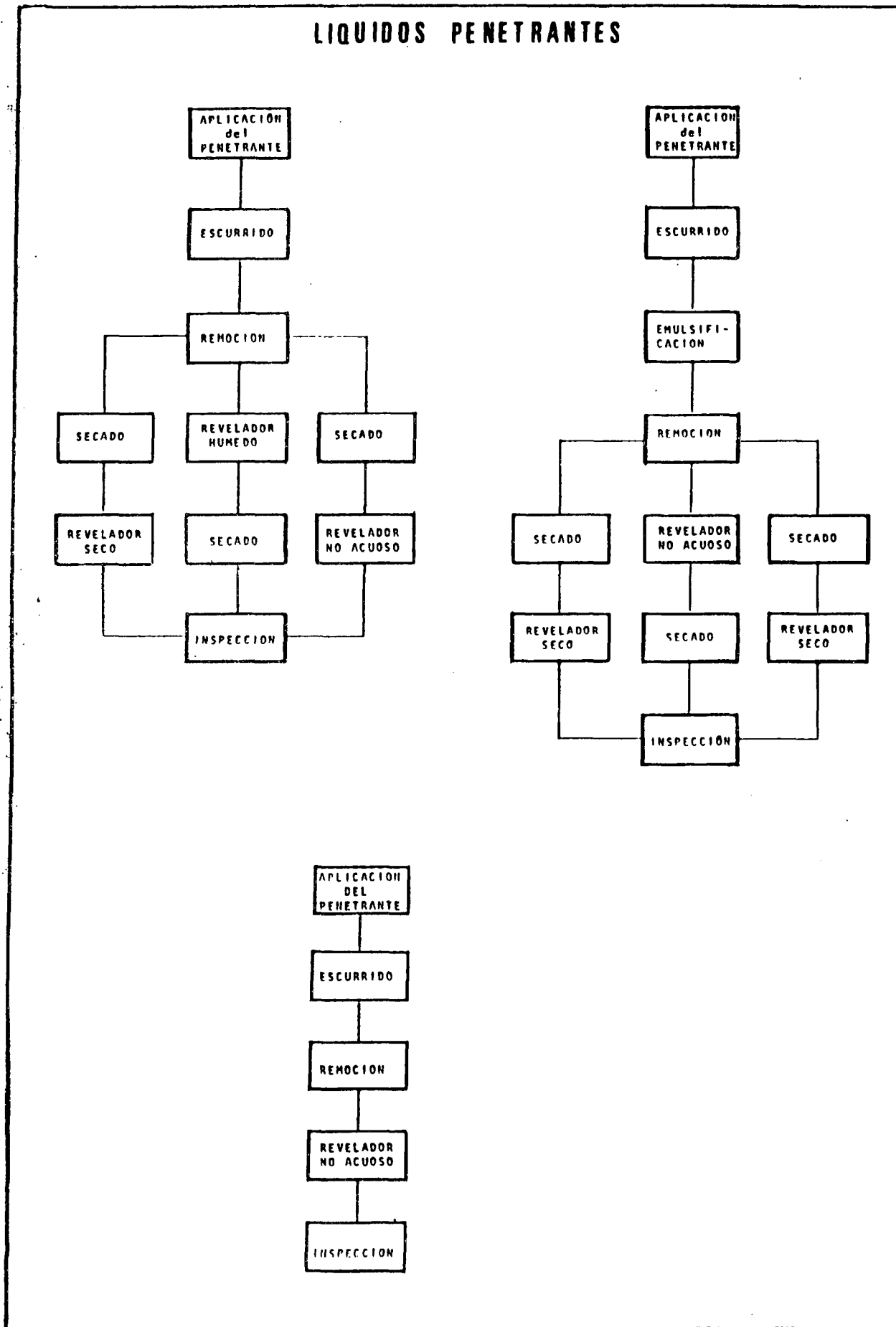
La observacion debe iniciarse inmediatamente despues de que se haya formado la capa de revelador, a fin de poder seguir la evolucion de las indicaciones, repitiendose luego a intervalos regulares, segun lo establecido en el procedimiento. No debe anotarse como definitivo ningun resultado hasta que haya transcurrido un cierto tiempo minimo, generalmente mayor que 10 minutos, aunque algunas normas establecen tiempos de observacion de hasta 2 horas.



a) Matriz de forja. LF coloreados b) Rec. Fresion. LF fluorescentes

FIGURA 10.- APARIENCIA DE INDICACIONES EN ENSAYO CON LF.

FIGURA No 11.- ETAPAS DE APLICACION DE LOS DISTINTOS PROCESOS



Presentacion de los resultados.

El operador o inspector que realiza el ensayo debe elevar un informe escrito en el cual, ademas de indicar los resultados, debe dejar constancia de las condiciones en que recibio la pieza para el examen, preparacion efectuada, especificacion o norma aplicada, procedimiento, proceso y tipo de penetrante utilizado. En dicho informe se indicara ademas el tipo de limpieza, forma de aplicacion del penetrante, tiempo de penetracion, forma de remocion, condiciones de revelado y tiempo de observacion de las indicaciones. En la pagina siguiente se da una hoja de informe como ejemplo.

EQUIPAMIENTO.

Para considerar el equipamiento para el ensayo debemos distinguir entre aplicaciones en montaje y aplicaciones en laboratorio o planta industrial.

Para montaje o trabajos en obra o talleres el equipamiento es muy simple y generalmente requiere de sistemas de pulverizado para remocion de penetrante removible con agua y para la aplicacion de revelador. En ciertos casos, para inspecciones puntuales se suelen usar los productos en forma de aerosoles, aunque esto es solamente ventajoso para la aplicacion de revelador.

Los pulverizadores usados son del tipo de pistola de pintar con compresor de aire.

Para el trabajo en laboratorio o en plantas industriales en las que se deben ensayar piezas no muy grandes, se utilizan instalaciones fijas compuestas generalmente por bateas que contienen los distintos productos, en las cuales se procesan las piezas por inmersion, y etapas de secado, lavado y observacion como se ejemplifica en la FIG. No 12.

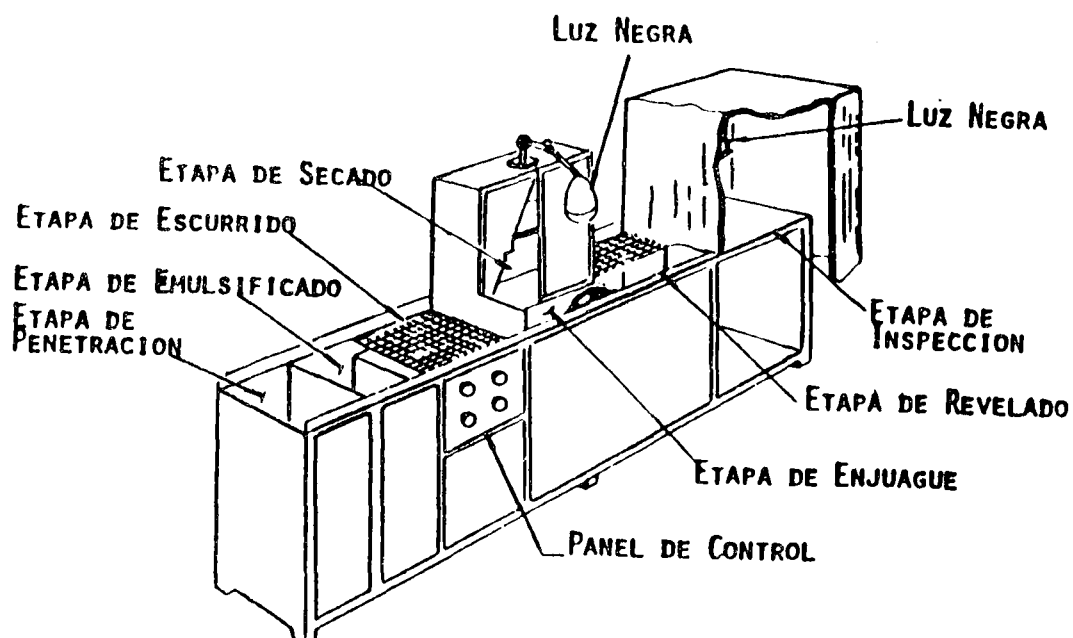


FIGURA No 12.- INSTALACION PARA ENSAYO CON LIQUIDOS PENETRANTES.

EJEMPLO DE HOJA TECNICA DE ENSAYO CON LIQUIDOS PENETRANTES

Compañía Nombre y Dirección

Ensayo con LP Hoja técnica		Hoja de hojas	Hoja técnica Referencia N°
Componente: Fabricante: Lugar de entrega:		Parte N°	
Propósito de ensayo: Area a ser ensayada Normas de aceptación:		Especificación del material componente:	
Documentación asociada *	Preparado por: Aprobado por:	Fecha: Fecha:	
Penetrante	Removedor	Revelador	
Operación	Procedimiento	Requerido	Detalles
1	Pre-limpieza		
2	Desengrasado		Solvente
3	Enfriado		
4	Penetrante a aplicar		Tiempo de penet
5	Lavado		
6	Removedor a aplicar		Tiempo contacto
7	Lavado		
8	Secado		
9	Revelador a aplicar		Tiempo revelado
10	Inspección		Magnificación requerida
11	Limpieza		
12	Protección		
Precauciones especiales			
Detalles Adicionales			

* Norma internacional y/o normas nacionales

Fuentes de luz ultravioleta.

Para la observación de indicaciones con penetrantes fluorescentes se utiliza radiación ultravioleta de características especiales que se designa comunmente como "LUZ NEGRA".

La mal llamada luz negra corresponde a un espectro de radiación UV que se obtiene filtrando una fuente de radiación, generalmente una lampara de vapor de mercurio, mediante un filtro de WOOD-, que deja pasar un pico de radiación en la longitud de onda de 365 nm.

Comercialmente las lamparas de luz negra se ofrecen en dos versiones, una en forma de bulbo y otra como reflectora, con potencias de 100 O 150 wattios.

SENSIBILIDAD DEL ENSAYO.

La sensibilidad de un proceso de ensayo por líquidos penetrantes solo puede ser evaluada mediante la aplicacion del mismo en las condiciones especificadas por el proveedor.

Este tipo de ensayo que se realiza mediante la utilizacion de bloque patrones o de referencia con fisuras controladas, permite ademas comprobar el comportamiento de los distintos productos del proceso y evaluar la performance del conjunto.

Existen distintos tipos de bloques normalizados para este uso. Segun la norma MIL-I-25135 se puede usar un bloque de aluminio fisurado por fatiga termica, que se presenta dividido en dos sectores simetricos para permitir la comparacion simultanea de dos procesos diferentes.

Otros bloques son preparados en base a chapas de acero o laton con deposito de niquel o cromo duro en el cual por deformacion se induce la formacion de fisuras. En estos bloques es posible controlar el ancho y profundidad de las fisuras con lo cual se pueden obtener evaluaciones mas objetivas.

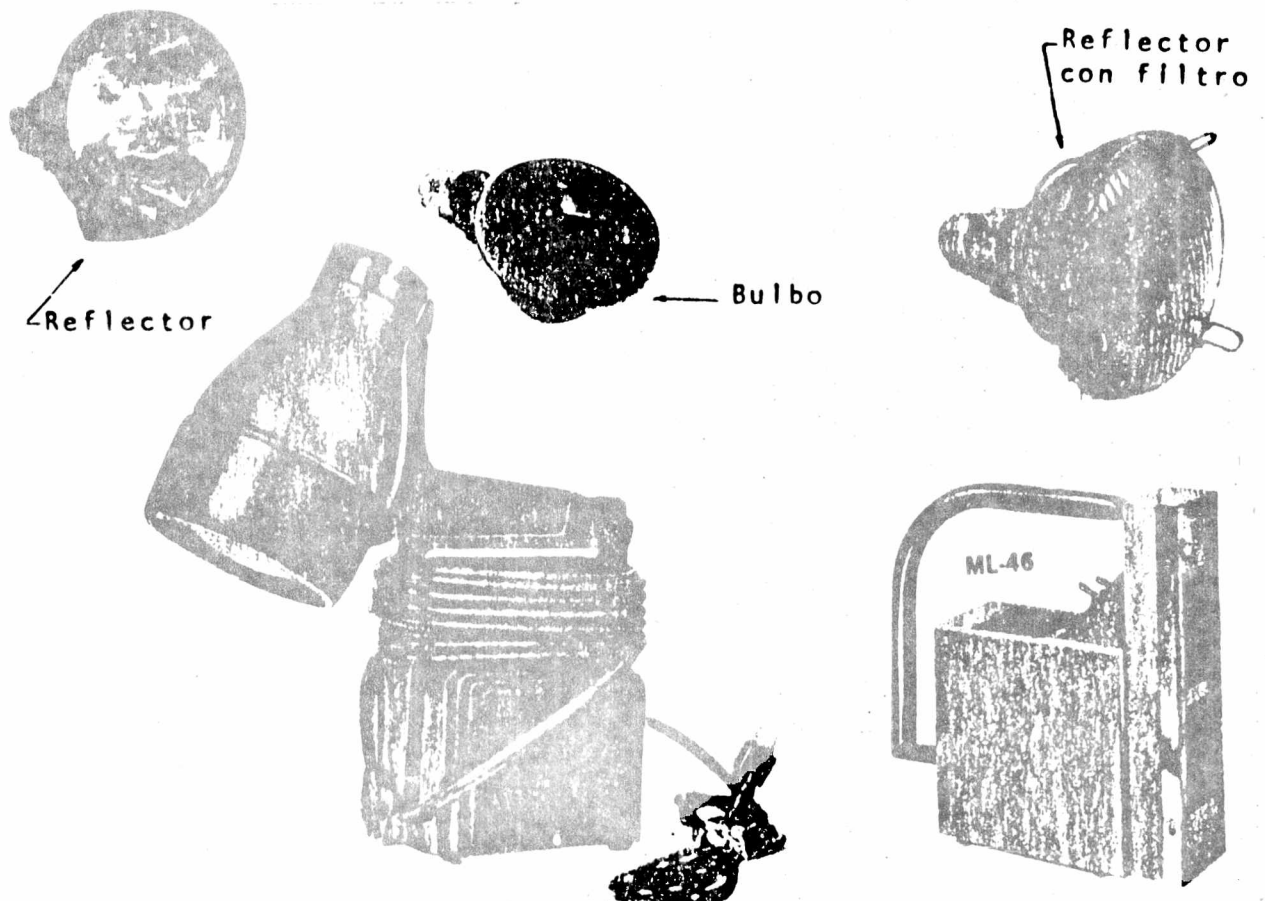


FIGURA 13.-TIPOS DE LAMPARAS PARA "LUZ NEGRA".

5.- PARTICULAS MAGNETICAS.

5.1. FUNDAMENTOS.

El metodo de ensayo por PARTICULAS MAGNETICAS esta basado en la deteccion del campo magnetico de fuga que producen las discontinuidades superficiales y subsuperficiales de un material ferromagnetico, cuando se le aplica un campo magnetico que lo satura. El medio de deteccion elsta constituido por particulas magnetizables de alta permeabilidad y baja retentividad, finamente divididas para su mayor movilidad.

Es por lo tanto un metodo aplicable solamente a materiales ferromagneticos, en los cuales la permeabilidad magnetica es elevada pero es a su vez variable en funcion de la intensidad del campo magnetico aplicado.

El ensayo requiere que la intensidad del campo magnetico sea tal que, en la curva de permeabilidad del material, se haya sobrepasado el punto de maxima permeabilidad y por lo tanto la induccion magnetica en el mismo este proximo al de saturacion.

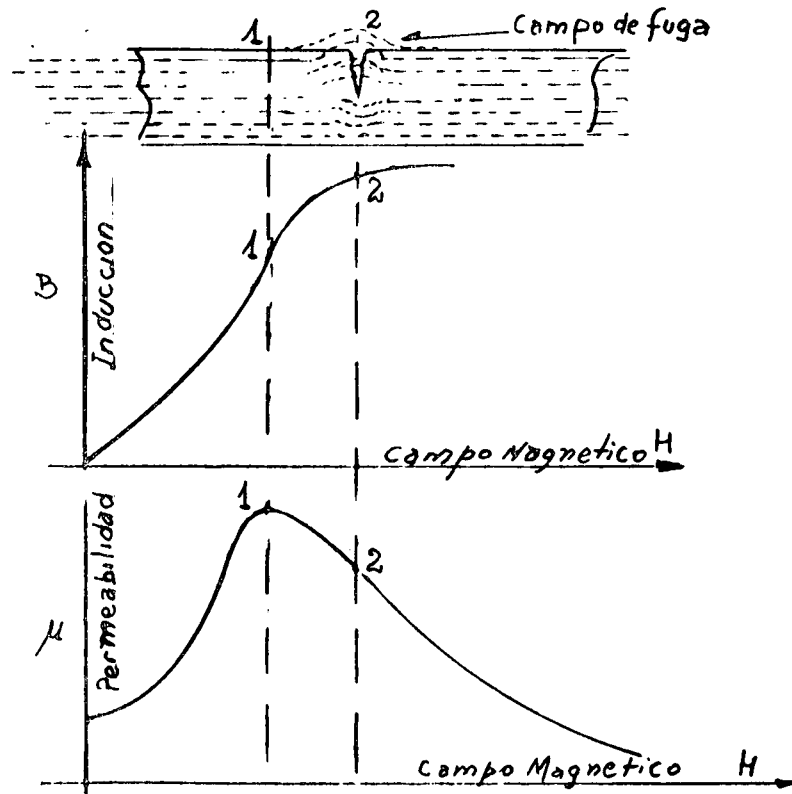


FIGURA 14.-CURVAS DE PERMEABILIDAD Y DE INDUCCION MATERIALES FERROMAGNETICOS

Una condicion determinante para la deteccion de las discontinuidades es que las lineas de fuerza del campo magnetico aplicado sean normales al plano de la discontinuidad. Por lo tanto se requiere conocer la direccion probable de las discontinuidades o en caso contrario aplicar sucesivamente el ensayo con distintas direcciones de campo.

La sensibilidad del ensayo es mayor para las discontinuidades superficiales que para las subsuperficiales, disminuyendo rapidamente hacia el interior de la pieza.

Las sensibilidades relativas varian segun que el campo magnetico aplicado sea continuo o alterno. Con campo continuo se pueden detectar discontinuidades hasta profundidades de 10 a 15 mm.

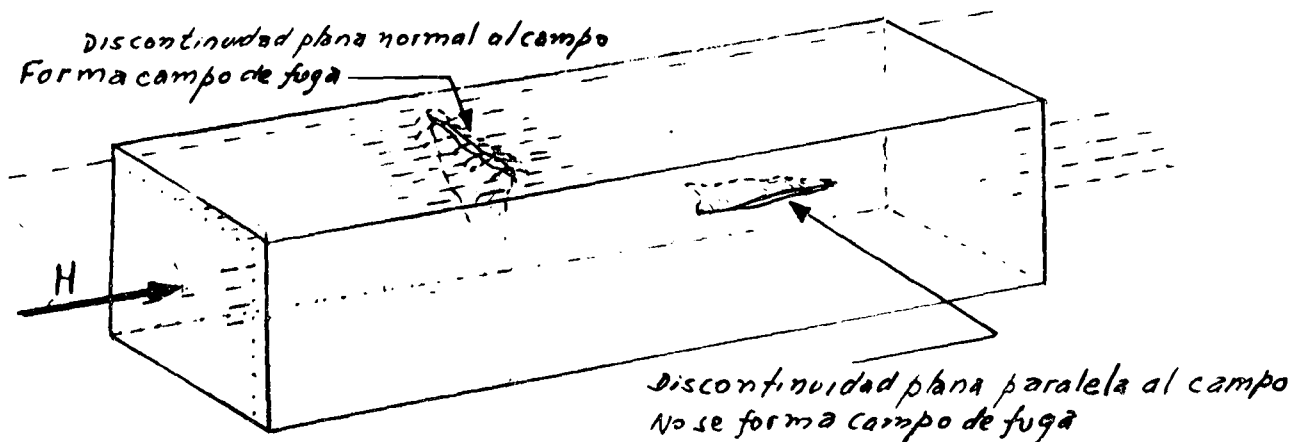


FIGURA 15.- CONDICIONES PARA LA DETECCION DE DISCONTINUIDADES POR FM.

5.2. TECNICAS DE ENSAYO.

MODOS DE MAGNETIZACION.

Magnetización Longitudinal: esta caracterizada por el hecho de que las líneas de fuerza tienen puntos de entrada y de salida en el material (polos magnéticos), cerrándose externamente al mismo.

Este tipo de magnetización es producido por imanes, electroimanes, o bobinas.

Magnetización Circular: en este modo las líneas de fuerza del campo magnético se cierran dentro del mismo material ensayado no presentando polos magnéticos.

Este tipo de magnetización se obtiene mediante el paso de corriente eléctrica que genera campo magnético circular alrededor de sus líneas de flujo. La corriente eléctrica circula a través de la pieza en ensayo o a través de un conductor central.

Magnetización vectorial: este modo resulta de la aplicación simultánea de los dos modos anteriores, resultando un campo cuya orientación depende de la composición vectorial de los campos aplicados.

Se obtiene esta magnetización aplicando simultáneamente paso de corriente y bobina de magnetización.

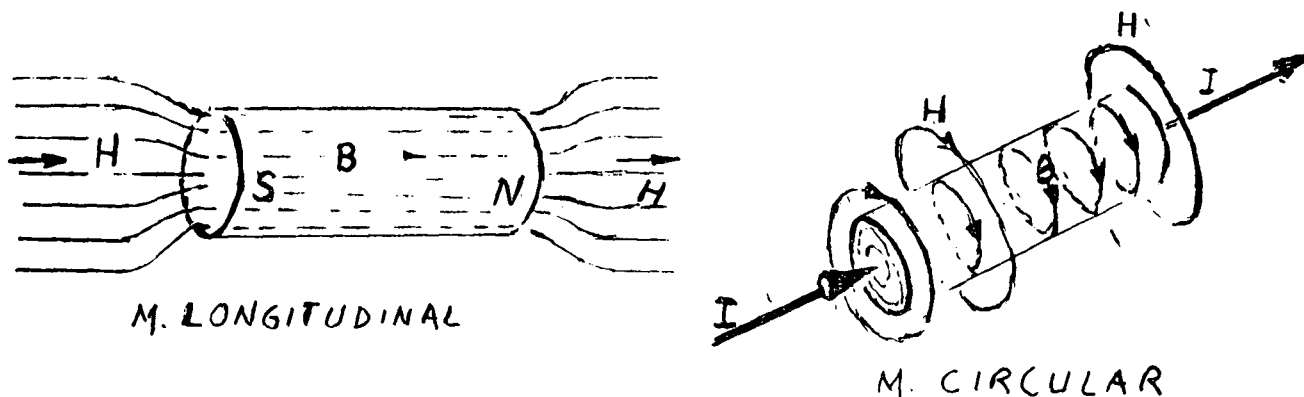


FIGURA 16.- MODOS DE MAGNETIZACION.

TECNICAS DE MAGNETIZACION.

_ Imanes Permanentes: Pueden ser del tipo herradura o estar constituidos por un par de piezas polares unidas entre si por un flexible que ademas de fijar la distancia maxima de operacion evita que se apliquen dos polos iguales a la pieza. No estan normalizadas y para evaluar la intensidad de campo disponible se puede medir su capacidad portante para la maxima separacion de las piezas polares. Se obtiene magnetizacion longitudinal.

_ Electroimanes: son yugos de material de alta permeabilidad y baja retentividad, con un bobinado excitado por corriente continua o alterna. Estos ultimos solo se usan para deteccion de defectos superficiales. Estan normalizados y se requiere una fuerza portante minima de aprox. 20 Kg para los corriente continua y de 5 Kg. aprox. para electroimanes de corriente alternada. Se obtiene magnetizacion longitudinal.

_ Bobinas: estan constituidas por arrollamientos de conductor electrico de seccion suficiente para permitir el paso de altas intensidades de corriente, con reducido numero de vueltas (10 a 20 aprox.) y con diametros de mas 300 mm, instaladas generalmente en bancos disenados especialmente para ensayo con FM. Tambien se suelen usar los conductores, en cortocircuito, de una maquina de suministro de corriente para el ensayo con FM, dando varias vueltas de enrollamiento alrededor de la pieza que queda como nucleo de la bobina asi formada. Se obtiene magnetizacion longitudinal.

El calculo de la intensidad de campo se hace en base a formulas empiricas, normalizadas, que tienen en cuenta la seccion y el largo de la pieza a ensayar.

_ Paso de corriente.

a) entre cabezales: se utilizan equipos especialmente disenados para el ensayo con FM, llamados "bancos de magnetizacion" que disponen de contactos electricos, en forma de cabezales ajustables entre los cuales se coloca la pieza a ensayar de manera que la direccion preferencial de los posibles defectos sea paralela a la direccion de la corriente. El calculo se hace en base al diametro o seccion de la pieza, no importando la longitud.

b) entre puntas de corriente: se utilizan equipos, generalmente portatiles, que suministran corriente a traves de un par de conductores terminados en contactos especiales que se apoyan sobre la pieza a ensayar a fin de hacer pasar la corriente por la misma. La distancia minima aceptable entre puntas o contactos es de 150 mm, la maxima dependera de la tension disponible en el equipo. Como la corriente entre las puntas fluye siempre por el camino mas corto lo importante para el calculo es la distancia entre puntas, siendo el espesor de importancia relativa.

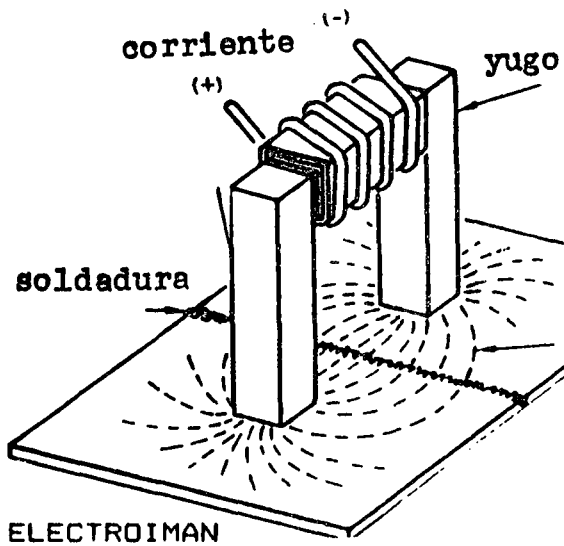
Campo obtenido es de tipo circular distorsionado por efecto de las puntas de contacto.

c) por conductor central: se utiliza para el examen de piezas cilindricas o huecas haciendo pasar la corriente, no por la pieza, sino por un conductor que pasando a traves de la misma, se fija entre los cabezales de un equipo de magnetizacion. Para el calculo se utiliza el diametro externo de la pieza.

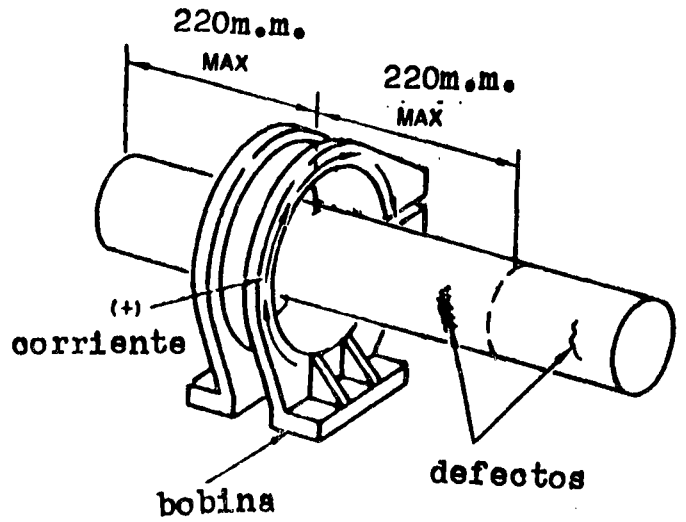
d) por induccion: se aplica tambien para piezas cilindricas o huecas, utilizando un electroiman cuyo circuito magnetico se cierra a traves de una barra de material de alta permeabilidad que se hace pasar por el hueco de la pieza, con lo cual

esta se convierte en el secundario de un transformador.

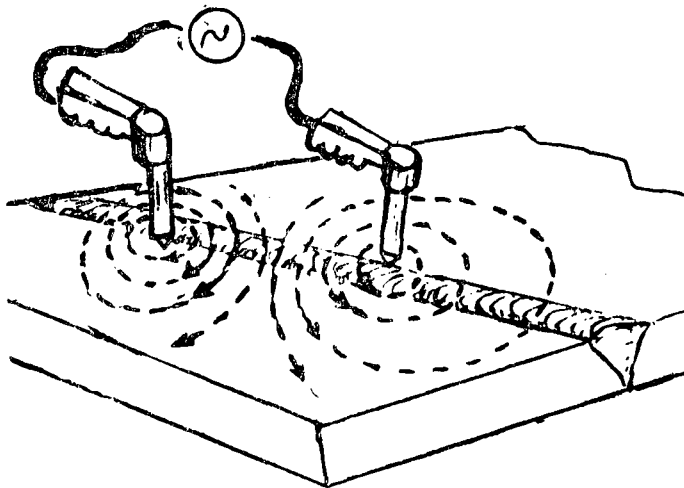
El calculo resulta complejo por lo cual es necesario hacer verificaciones con piezas usadas como referencia.



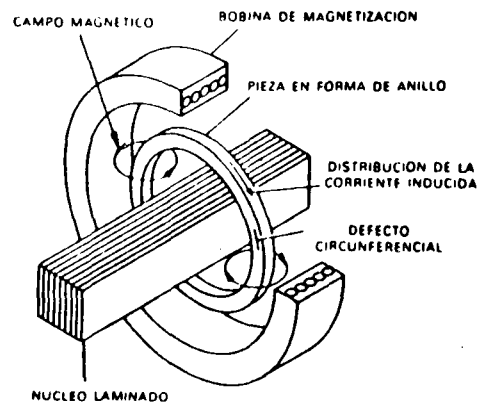
ELECTROIMAN



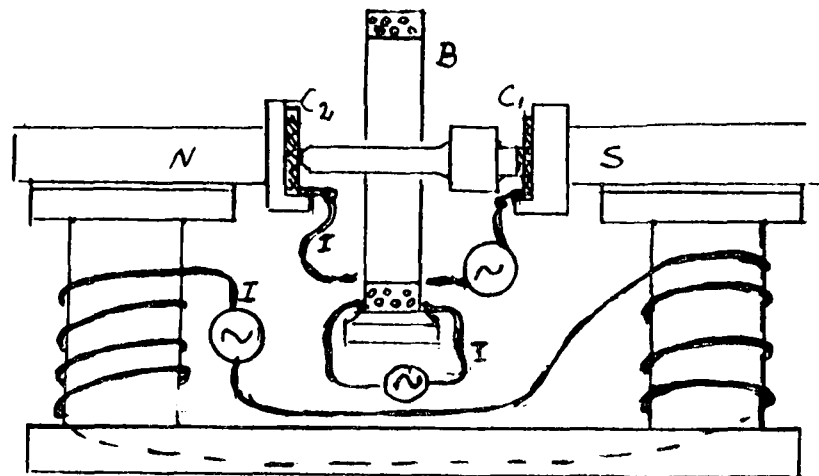
BOBINA



PUNTAS DE CONTACTO



INDUCCION



N-S: PIEZAS POLARES C1-C2: CABEZALES DE CONTACTO B: BOBINA

FIGURA 17.-TECNICAS DE MAGNETIZACION.

5.3. MEDIO INDICADOR.

El medio indicador constituido por las partículas magnetizables debe poseer las siguientes propiedades:

- _ Elevada permeabilidad y baja retentividad magnética.
- _ Granulometría adecuada al modo operatorio, es decir no demasiado finas para el uso en seco y no demasiado gruesas para el uso en suspensión líquida.
- _ Debe estar constituido por una mezcla de partículas de formas redondeadas, para facilitar la movilidad y de formas alargadas para facilitar la formación de polos magnéticos.
- _ El color debe permitir un elevado contraste con la superficie a examinar. Para mejorar este contraste se dispone de partículas magnetizables de distintas coloraciones, principalmente: grises, negras, rojas, y amarillas.

Cuando se desea aumentar la sensibilidad de detección se utilizan partículas magnetizables fluorescentes, cuyas indicaciones deben ser observadas en un ambiente oscurecido y utilizando radiación UV "luz negra"

APLICACION DEL MEDIO INDICADOR.

El medio indicador puede ser aplicado en forma de polvo seco, que se moviliza mediante una ligera corriente de aire (en algunos casos basta un ligero soplado), con el objeto de lograr su acumulación en las zonas donde aparece el campo de fuga debido a una discontinuidad.

Otra forma de aplicación es en forma de suspensión en un líquido de baja viscosidad. En estas condiciones el medio indicador se rocía sobre la pieza y luego se aplica el campo magnetizante. Las partículas se desplazarán en el medio fluido hacia los puntos en los cuales exista un campo de fuga. El rociado del medio indicador se debe suspender al aplicar el campo magnético para evitar que las corrientes de fluido arrastren las partículas impidiendo su retención en los campos de fuga.

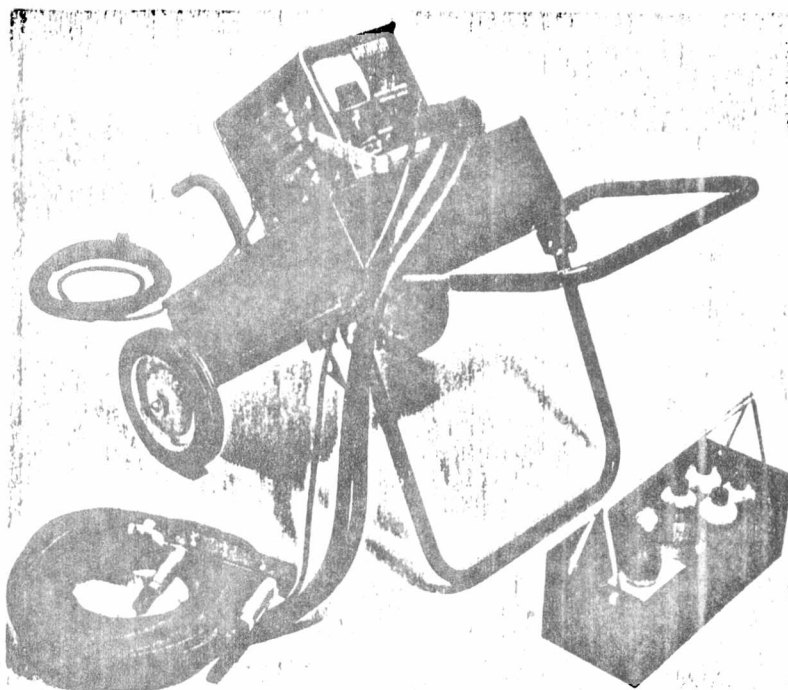


FIGURA 18.- EQUIPO DE MAGNETIZACION.

5.4. MODO DE OPERACION.

Existen dos modos de operacion :

- Modo Continuo; en este modo la aplicacion del medio indicador es simultanea con la aplicacion del campo magnetico. Este es el modo normal de operacion y es aplicable a cualquier tipo de acero.

- Modo residual; en este modo se efectua primero la magnetizacion, lo que puede lograrse con un pulso muy corto de corriente y luego se aplica el medio indicador aprovechando el magnetismo remanente en la pieza. Como el magnetismo remanente solo sera significativo en el caso de materiales que presentan elevado magnetismo remanente, elevada fuerza coercitiva, este modo solo es aplicable a aceros de alto carbono

Tiempo de Magnetizacion: para la realizacion del ensayo no se requieren tiempos de magnetizacion demasiado largos. Generalmente bastan algunos segundos para lograr la acomodacion de las particulas. Si hay dudas sobre la formacion de las indicaciones es preferible actuar varias veces por tiempos cortos antes que prolongar demasiado el tiempo de una aplicacion.

5.5. SENSIBILIDAD DEL ENSAYO.

Para la realizacion del ensayo hemos mencionado que se debe hacer un calculo previo del campo magnetico a aplicar. En la practica esto basta para asegurar la sensibilidad especificada por lo cual se deben emplear otros medios que permitan evaluar si el campo aplicado es el adecuado.

Un medio directo es medir la intensidad de campo externo en la superficie de la pieza, utilizando un Gausmetro por ejemplo. Segun normas un valor adecuado es de una perdida de flujo de 30 Oersted.

Otra manera de calibrar la sensibilidad del ensayo es utilizar indicadores como el propuesto en la norma JIS que consiste en una chapa delgada de acero, 100 micrones de espesor, que lleva grabada una circunferencia con una profundidad de 30 o 60 micrones. Aplicada sobre la pieza durante el examen, con la parte grabada hacia adentro, la aparicion de las correspondientes indicaciones da una medida de la sensibilidad alcanzada. La norma ASME-E 1 propone el uso de una probeta, conocida como probeta "Berthold" que esta constituida por seis sectores de acero, separados por delgas de laton, que permite determinar la direccion del campo externo y, cualitativamente su intensidad.

5.6. DESMAGNETIZACION.

Una etapa muy importante en el ensayo con FM, que solo puede ser obviada en casos justificados, es la desmagnetizacion de la pieza. Salvo en el caso de materiales de muy baja retentividad, al finalizar el ensayo la pieza queda con magnetismo remanente que en el caso de magnetizacion longitudinal se evidencia facilmente por la aparicion de polos, pero que en el caso de magnetizacion circular puede pasar totalmente desapercibida.

El magnetismo remanente puede ser muy perjudicial especialmente en el caso de piezas de motores.

Por esta razón debe ser eliminado aplicando sucesivos ciclos de histeresis magnética, partiendo de una magnetización ligeramente superior a la usada en el ensayo y reduciendo las intensidades de campo extremas de cada ciclo hasta valores ínfimos.

Estos ciclos de histeresis se cumplen con magnetización longitudinal aun que se haya usado anteriormente magnetización circular ya que todo campo más intenso anula al anterior. Además al magnetizar longitudinalmente, al final de la desmagnetización se podrá verificar su efectividad evaluando la posible existencia de polos remanentes con cualquier medio adecuado.

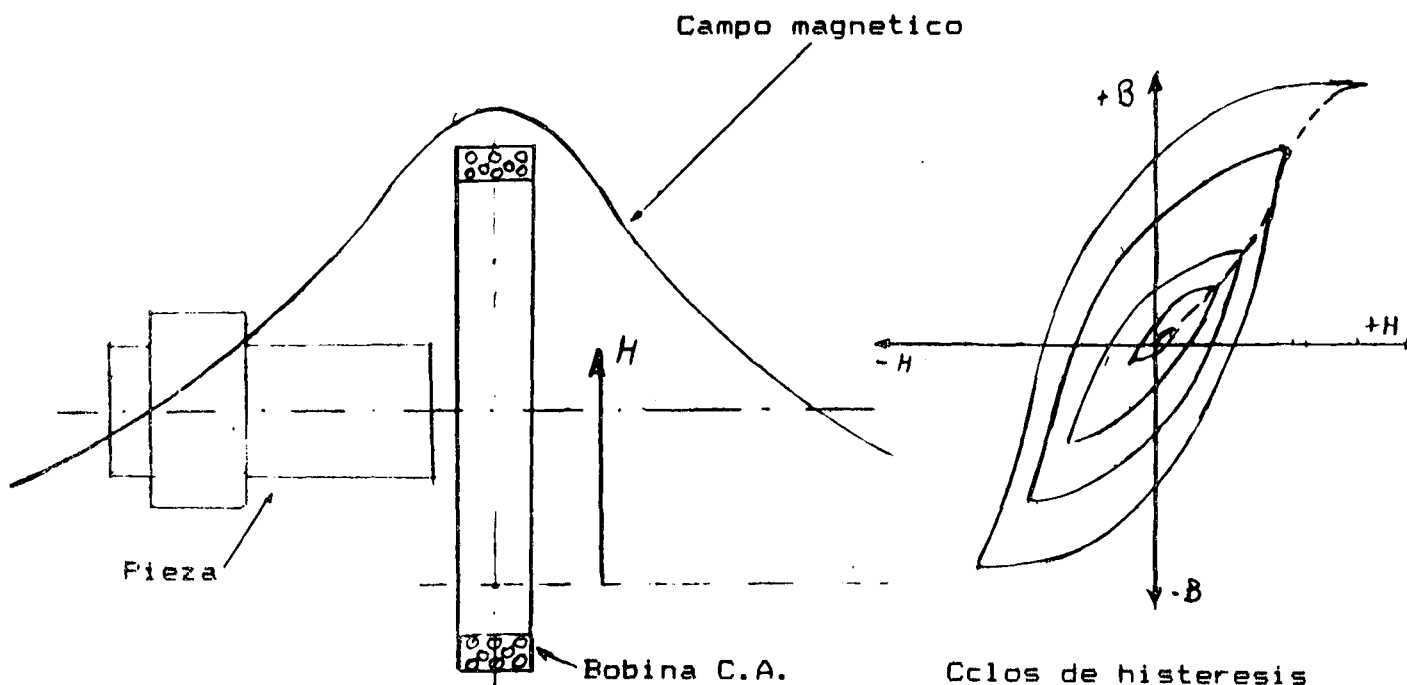


FIGURA 19.-DESMAGNETIZACION.

5.7. INTERPRETACION DE LAS INDICACIONES.

Para la interpretación de las indicaciones en el ensayo por FM se deben primer lugar disponer de la iluminación adecuada. Si se trata de partículas coloreadas el nivel de iluminación no debe ser inferior a 500 LUX.

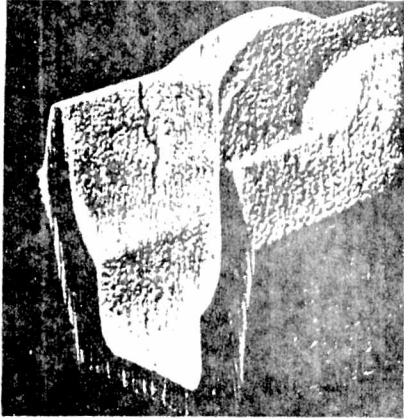
En el caso de partículas fluorescentes la intensidad de iluminación en el entorno no debe exceder de 10 LUX mientras que la intensidad de la radiación UV en el lugar de observación debe ser de 800 microWatt/cm².

Las indicaciones suelen ser clasificadas en "alargadas" y "redondeadas" y en "contrastadas" y "difusas". Se valoran luego según su diámetro, largo y anchura.

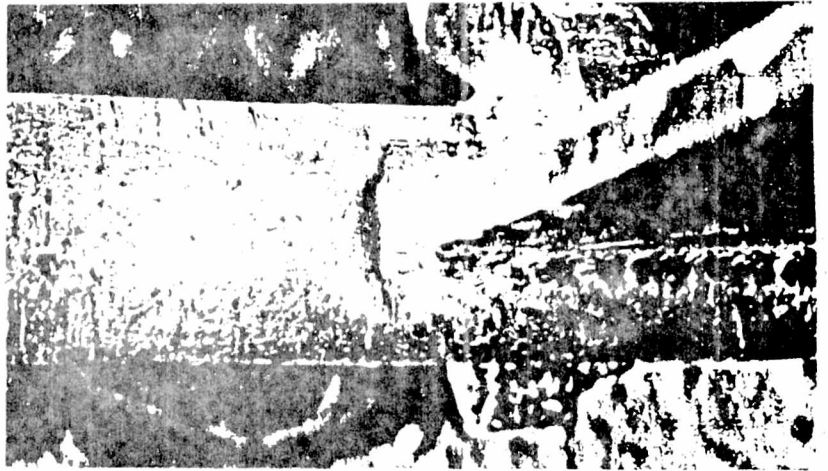
Las indicaciones correspondientes a discontinuidades superficiales aparecen como más contrastadas que las que corresponden a discontinuidades subsuperficiales.

Para facilitar la evaluación en función de niveles de aceptación o rechazo se dispone de algunas normas, como la ASTM que brindan fotografías de referencia de indicaciones típicas, clasificadas tipos y clases de severidad

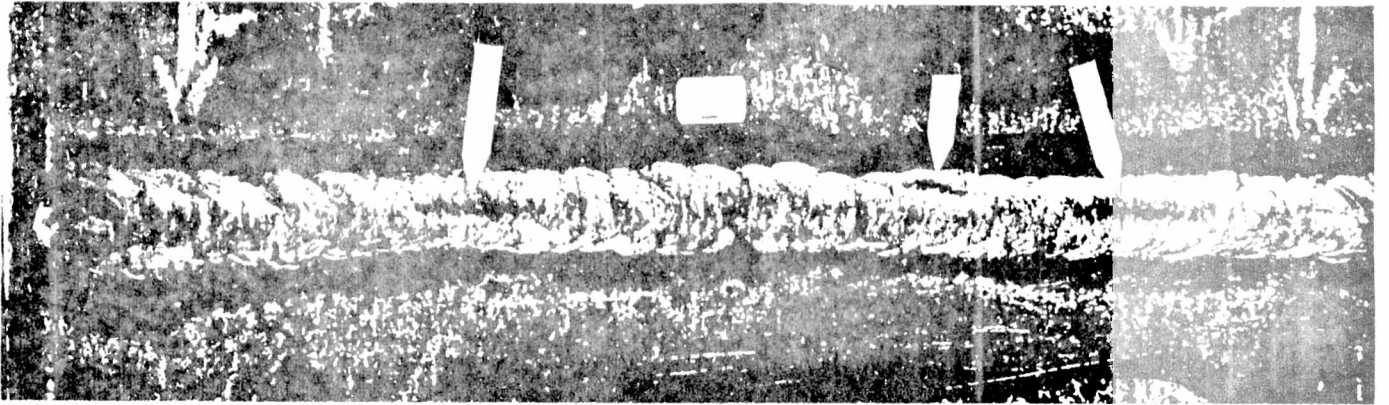
En la página siguiente se dan ejemplos de indicaciones obtenidas con el ensayo de Partículas Magnéticas.



Fisura en fundicion,
PM negras, via seca



Fisura de fatiga en eje,
PM coloreadas, via seca.



Falta de penetracion y escoria alargada, en soldadura.
Particulas magneticas negras, via seca, corriente continua.



Fisuras de tratamiento termico en engranaje.
Particulas magneticas fluorescentes, via seca.

6.- RADIOGRAFIA INDUSTRIAL.

6.1. FUNDAMENTOS.

El ensayo de RADIOGRAFIA INDUSTRIAL se aplica en el examen volumetrico para la deteccion de discontinuidades internas que pueden estar constituidas por solucion del continuo, por variaciones en densidad o por segregaciones de distintos elementos.

Permite ademas detectar variaciones de espesor y posicion de piezas internas o insertos en componentes sin acceso interior.

La absorcion diferencial de las radiaciones electromagneticas X o Gamma, en los materiales y la sensibilizacion de las emulsiones fotograficas por dichas radiaciones constituyen los principios fisicos en que se basa el metodo.

La radiografia obtenida en el ensayo constituye un registro permanente (en la forma correspondiente al negativo de una fotografia) de la imagen radiante que se obtiene del cuerpo examinado al ser sometido a un haz de radiaciones penetrantes.

Una radiografia es entonces la proyeccion plana de un cuerpo volumetrico, por lo tanto para cualquier evaluacion de tamaño y forma se debe tener en cuenta el angulo, plano y distancia de proyeccion.

De acuerdo con la metodologia de los END, que hemos descripto, en este caso el campo de energia esta constituido por radiaciones X o gamma que, al atravesar el objeto bajo examen, es diferenciado en su intensidad, en funcion de las variaciones de espesor, de densidad y/o de segregaciones.

El haz de radiacion asi diferenciado constituye la imagen radiante del objeto que contiene toda la informacion, acompañada por un ruido.

La señal que forma la imagen esta constituida por la radiacion primaria que ha atravesado el material sin perdida de energia. El ruido esta constituido por la radiacion dispersa que se origina en el proceso de atenuacion de la radiacion primaria en el material.

La imagen radiante es detectada por la pelicula radiografica que la registra, inicialmente, como una imagen latente formada por los centros sensibles desarrollados en la misma por la radiacion incidente.

Una vez procesada la pelicula se obtiene la imagen radiografica que esta conformada por la plata metalica reducida durante el proceso de revelado en funcion de los centros sensibles existentes.

La observacion de esta imagen se hace por transparencia correspondiendo las zonas mas oscuras a una mayor intensidad de radiacion, es decir a zonas del objeto que tienen menor espesor o menor densidad.

En las radiografias la oscuridad, ennegrecimiento, se mide en terminos de DENSIDAD RADIOGRAFICA, cuya definicion corresponde al logaritmo decimal de la relacion entre la luz incidente y la luz absorbida por la pelicula, en formulas:

$$D = \text{Log} \frac{Li \%}{Lt \%}$$

en la cual:

D = Densidad radiografica
 Li = Luz incidente, en % , para evitar unidades
 Lt = Luz transmitida, en % de Li

Como ejemplo podemos suponer que una radiografia presenta una absorcion del 10% de la luz incidente . En ese caso su desidad sera de:

$$D = \text{Log} \frac{100 \%}{10 \%} = \log 10 = 1$$

En la radiografia las diferencias de espesor del objeto radiografiado son registradas como diferencias de densidad radiografica. La diferencia de densidad entre dos zonas de una radiografia se denomina CONTRASTE RADIOGRAFICO.

La nitidez con que se separan dos zonas de distinta densidad se denomina DEFINICION. La definicion esta determinada por la penumbra que se puede producir en la proyeccion de la imagen radiante (FENUMBRA GEOMETRICA) y la indefinicion de bordes debida al tamaño de grano de la pelicula radiografica (FENUMBRA INHERENTE). En ambos debemos incluir ademas el fenomeno de fluctuacion estadistica de los procesos involucrados.

ALCANCES Y LIMITACIONES.

La RI es un metodo de ensayo esencialmente volumetrico. Permite tambien la deteccion y evaluacion de defectos superficiales pero con menor sensibilidad y mayores costos que otros metodos. Se aplica a todo tipo de materiales con la limitacion del espesor ya que no es posible radiografiar espesores mayores que unos 400 mm de acero o su equivalente en otros materiales. Una limitacion adicional reside en la necesidad de disponer de acceso a ambas caras del material a ensayar.

Una de las principales ventajas del metodo es que brinda un registro objetivo e inviolable del resultado del ensayo.

6.2.-TECNICAS RADIOGRAFICAS.

La aplicacion del metodo implica el control de una gran cantidad de parametros que afectan el resultado del ensayo.

Esto da origen a distintas tecnicas radiograficas que deben ser detalladas en procedimientos que fijen las condiciones para lograr la Calidad Radiografica exigida por la especificacion de examen que emite ingenieria de diseño.

En ciertos casos, a falta de una especificacion, el radiologo debe fijar una calidad radiografica que asegure la deteccion de defectos en funcion de los niveles de exigencia que debe satisfacer el componente.

El establecimiento de una tecnica radiografica implica la seleccion de:

- a) Angulo y cantidad de exposiciones, considerando;
 - _ geometria de la pieza,
 - _ volumenes a examinar,
 - _ especificaciones de diseño

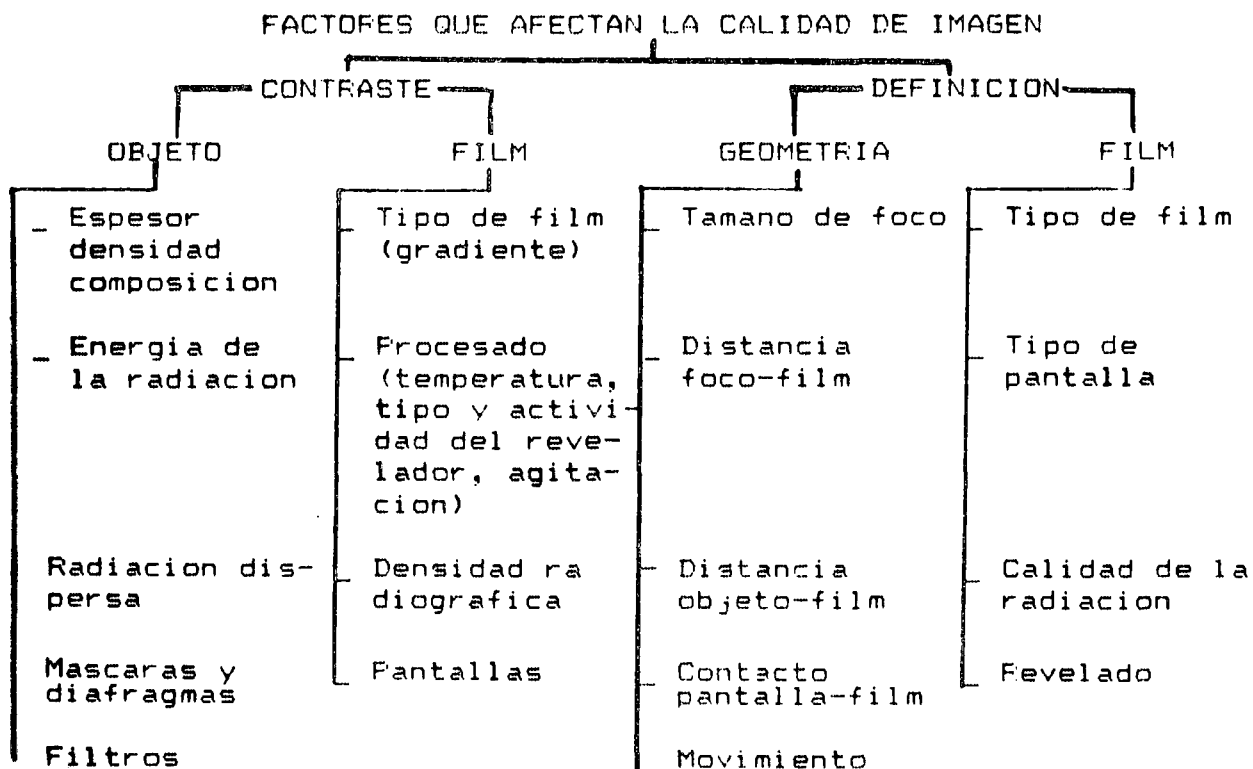
- b) Energía de la radiación a utilizar, considerando:
 - _ especificaciones de diseño
 - _ espesores y material de la pieza,
 - _ proceso de fabricación,
 - _ limitación de energías s/normas de aplicación,
 - _ posibilidades de acceso,
 - _ calidad radiográfica exigida,
 - _ equipos disponibles
- c) Filtros, mascararas y compensación de espesores, considerando:
 - _ contraste geométrico de la pieza,
 - _ energía de la radiación a utilizar,
 - _ tipo de material y espesor,
- d) Película radiográfica y pantallas, considerando:
 - _ espesores y contraste geométrico de la pieza,
 - _ material de la pieza
 - _ energía de la radiación a utilizar,
 - _ intensidad de la fuente de radiación disponible,
 - _ calidad radiográfica especificada,
 - _ condiciones de procesado.

La técnica radiográfica debe diseñarse de manera de lograr la optimización de la imagen radiante, puntos a), b) y c), y la optimización de la imagen radiográfica, punto d).

6.3.-CALIDAD RADIOGRAFICA.

La Calidad Radiográfica queda determinada por el contraste y la definición obtenida en su ejecución. Es el único elemento objetivo que permite evaluar la sensibilidad alcanzada con el ensayo.

Al hacer una radiografía se debe proveer la inclusión de un elemento que permita determinar la calidad de imagen lograda. Estos elementos se encuentran normalizados y se designan como INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN (ICI)



6.4.-EQUIPOS DE RAYOS X.

En la FIG.No 6.2, se da un esquema simplificado de un equipo de rayos X convencional. Los rayos X son emitidos por bombardeo electrónico de un blanco de tungsteno dentro de una valvula termoionica. El espectro emitido corresponde al espectro de rayas caracteristico del material del blanco y a un espectro continuo producido por frenamiento de los electrones en el campo nuclear.

- 1.- Llave de linea
- 2.- " de alta tension
- 3.- Autotransformador
- 4.- Voltimetro de A.T.
- 5.- Control de filamento
- 6.- Corriente anodica
- 7.- Transformador A.T.
- 8.- Transf. de filamento
- 9.- Tubo de Rayos X
- 10.- Angulo emision RX

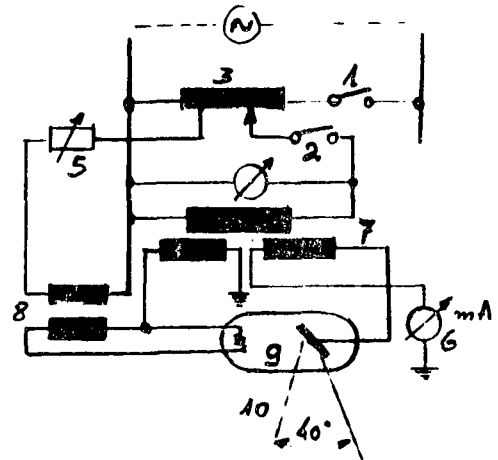


FIGURA 6.1: CIRCUITO DE UN EQUIPO DE RAYOS X

El circuito de la FIG.No 5.2, corresponde a equipos autoirrectificados en los cuales la emision de rayos X solo se produce durante los semiciclos positivos de corriente. Son conocidos como equipos de potencial variable. La tension se mide en valor maximo o de pico (KVp)

En otro tipo de equipos, conocidos como de "potencial constante" (KVc), el tubo de rayos X es alimentado con tension continua, provista por una fuente de alta tension rectificada, con lo cual la emision de rayos X es tambien continua.

Espectro de emision.

El espectro correspondiente a la emision de un equipo de rayos X se modifica en energia e intensidad cuando varia el KV de aceleracion y varia unicamente en intensidad (flujo de fotones) cuando se varia la corriente anodica (mA).

En la FIG.No 6.2, se muestran estas variaciones.

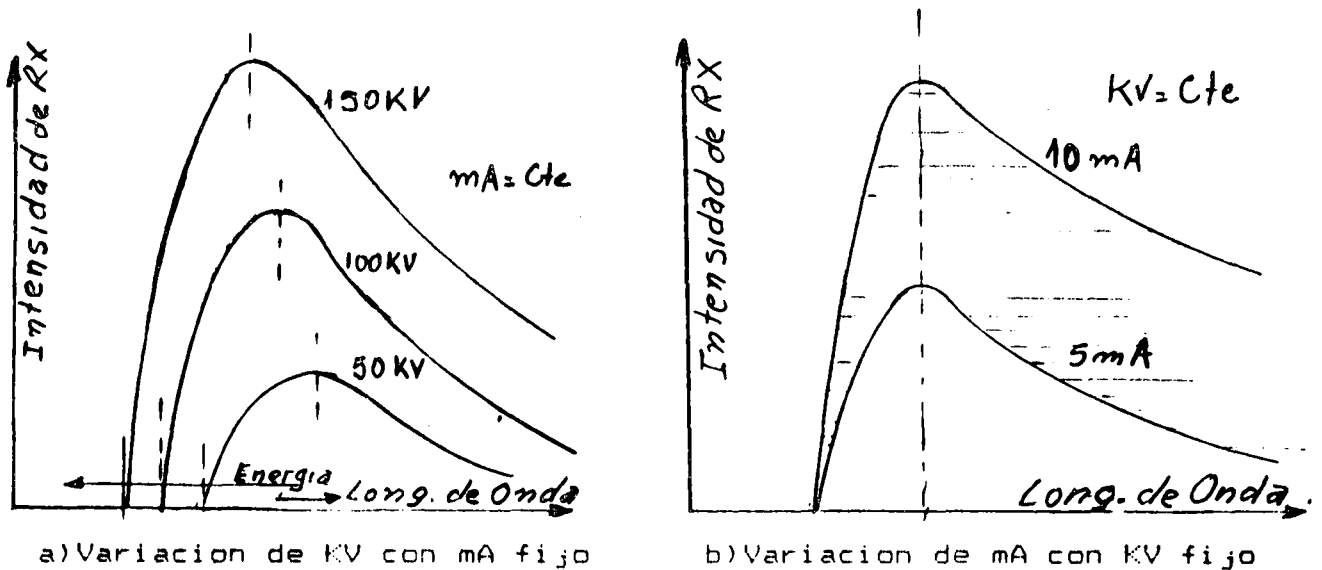


FIGURA 6.2.- ESPECTRO DE EMISION DE UN EQUIPO DE RAYOS X.

Equipos comerciales de rayos X.

El conjunto de equipos ofrecidos comercialmente puede ser agrupado de la siguiente manera:

Tipo de equipo	Caracteristicas	Tension	Corriente
Convencional	Potencial variable	50 a 300KVp	3 a 8 mA
	Potencial constante	120 a 450KVc	5 a 20 "
Alta Energia	Aceleradores lineales	1 a 12 MeV	-
	Betatrones	15 a 30 Mev	-
Uso Especial	Microfoco. Alta definicion	70 a 120KV	-
	Radiografia flash	-	-

FIGURA 6.3.- EQUIPOS PARA RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

En todos los equipos de rayos X la conversion de energia electrica en radiacion es muy baja, del orden de 0,01 a 10%. La mayor eficiencia se obtiene cuanto mayor sea el potencial de aceleracion.

6.5. EQUIPOS DE GAMMAGRAFIA.

Los equipos para gammagrafia estan constituidos esencialmente por un blindaje provisto de sistemas para la exposicion o proyeccion, que permiten la manipulacion segura del radioisotopo (en forma de fuente sellada) a utilizar durante la operacion de radiografiado. En la FIG.No 5.4, se da un esquema de estos equipos.

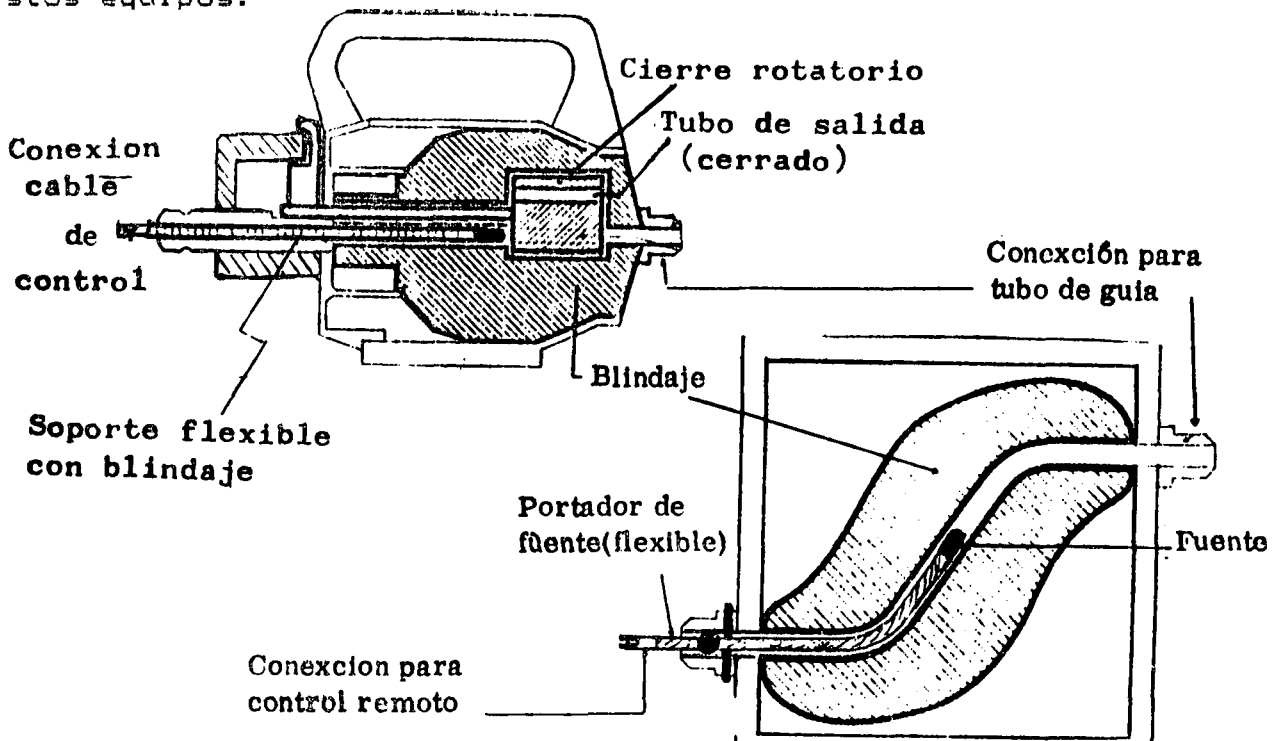


FIGURA 6.4.- EQUIPOS USADOS EN GAMMAGRAFIA.

Las fuentes radioactivas utilizadas son principalmente las que se detallan en el cuadro siguiente (FIG.No 6.5.-). En dicho cuadro se dan ademas los parametros mas importantes para su uso en el ensayo radiografico.

RADIOISOTOPO	ENERGIA MeV	Periodo de Semi-desint	EMISION R/Ci.h a 1m	APLICACION mm de Acero
Iterbio 169	0,063 a 0,30	31 dias	0,125	1 a 15
Thulium 170	0,05 a 0,16	127 dias	-	2 a 10
Iridio 192	0,2/0,3 a 0,47/0,6	75 dias	0,50	10 a 75
Cesio 137	0,66	30 años	0,37	35 a 100
Cobalto 60	1,17 1,33	5,3 años	1,3	30 a 170

FIGURA 6.5.- FUENTES RADIOACTIVAS USADAS EN GAMMAGRAFIA.

Con respecto al cuadro precedente es conveniente recordar que la emision esta dada en terminos de cantidad de radiacion emitida por cada Curie de radioisotopo en una hora y a una distancia de un metro.

Las unidades usadas son:

ROENTGEN = Cantidad de radiacion X o Gamma que produce una unidad electrostatica de carga de ambos signos en un centimetro cubico de aire a presion y temperatura normales.

CURIE = Cantidad de radioisotopo que produce $3,7 \times 10^{10}$ a la 10 desintegraciones por segundo.

El periodo de semidesintegracion ($T_{1/2}$) corresponde al tiempo al cabo del cual la cantidad de radioisotopo se ha reducido a la mitad.

De acuerdo a la ecuacion $A_t = A_0 e^{-\lambda t}$ tendremos que:

$$T_{1/2} = \frac{0,69}{\lambda}$$

$\lambda =$ Constante de desintegración

En la aplicacion practica de los radioisotopos la seleccion de energia se hace seleccionando el radioisotopo y la intensidad se especifica en Curie, teniendo en cuenta que de acuerdo al coeficiente de emision gamma, la misma cantidad de dos radioisotopos distintos producirán distintas cantidades de radiacion util. Ademas en el calculo de las exposiciones y aun de la disponibilidad de la fuente para el ensayo se debe tener en cuenta el decaimiento radioactivo.

Asi, una fuente de Ir 192 que al 1 de enero tenia 100 Ci de actividad al cabo de 225 dias solo tendrá una actividad de 12,5 Ci (cada 75 dias pierde la mitad de lo que tiene...)

Una formula practica para calcular la actividad actual cualquier radioisotopo, conociendo su T 1/2 es la siguiente:

$$A_t = \frac{A_0}{2^n}$$

donde: A_t = es la actividad al cabo del tiempo t transcurrido desde la calibración o dato de actividad disponible.
 A_0 = es la actividad de la fuente en el momento de iniciar la cuenta t .
 $n = \frac{t}{T_{1/2}}$ = al número de periodos de semidesintegración transcurridos.

Para el ejemplo de la página anterior tendríamos:

$$A_0 = 100 \text{ Ci} \quad t = 225 \text{ días} \quad n = \frac{225}{75} = 3$$

$$\text{luego: } A_t = \frac{100}{2} = \frac{100}{8} = 12,5$$

6.7.- PRACTICA RADIOGRAFICA

La disposición para un ensayo radiográfico se puede ver en la fig. 5.6. El haz de radiación X o gamma proveniente de una fuente lo más puntual posible se hace incidir normalmente sobre la pieza en exámen. La radiación es parcialmente absorbida, según vimos antes, en función del espesor y densidad del material atravesado, emergiendo diferenciada en su intensidad y constituyendo la "imagen radiante" del objeto. Esta imagen radiante es recogida por el film radiográfico colocado inmediatamente detrás del objeto y protegido, por una cubierta (chasis) contra el efecto de la luz. Se produce en el film una imagen latente que es puesta de manifiesto como la radiografía del objeto una vez realizado el procesado del film. En la radiografía aquellas partes más oscuras corresponden a las zonas donde la intensidad de radiación ha sido mayor, es decir a las partes del objeto que tienen menor espesor o menor masa específica.

El film consiste en un soporte transparente cubierto de ambos lados con una capa de gelatina que contiene en suspensión granos extremadamente finos de haluro de plata. Cuando el film es expuesto a radiación X, gamma, ultravioleta o luz visible se produce una excitación fisicoquímica de los granos de haluro de plata. Así excitados pueden ser reducidos a partículas negras de plata metálica mediante un proceso químico controlado que se conoce como "revelado de film"; terminado este proceso se deben eliminar los granos de haluro de plata no reducidos mediante el "fijado" y lavado del film que elimina además todos los agentes químicos incorporados durante el "procesado del film". Seco el film su observación se debe hacer por transparencia.

La densidad en el film es medida mediante el instrumento conocido como "Densitómetro" que utiliza una fuente de luz estable y una célula fotoeléctrica para medir la luz transmitida, dando el resultado en valores de densidad según la definición anterior.

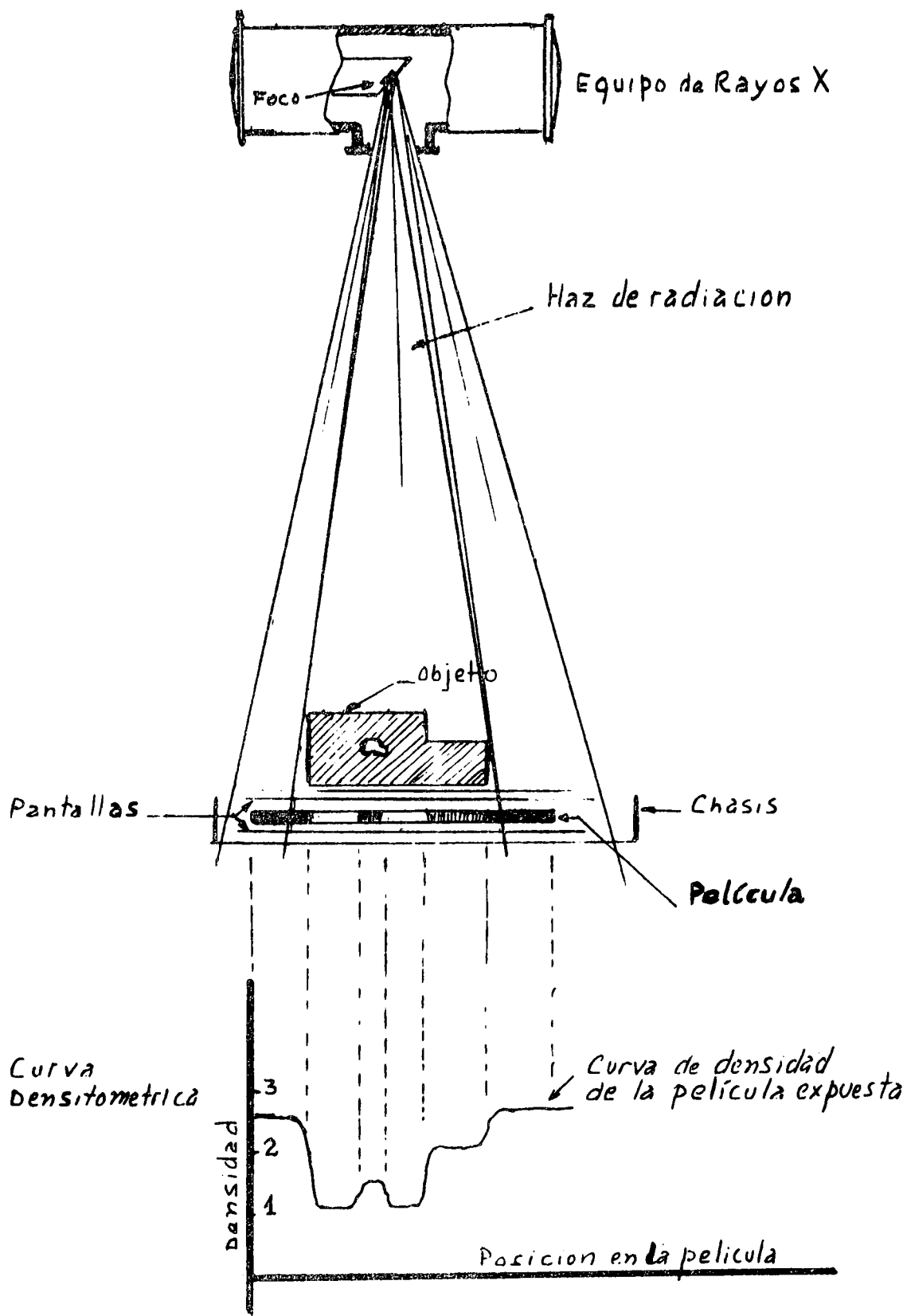


FIGURA 6.6.- EXPOSICION RADIOGRAFICA

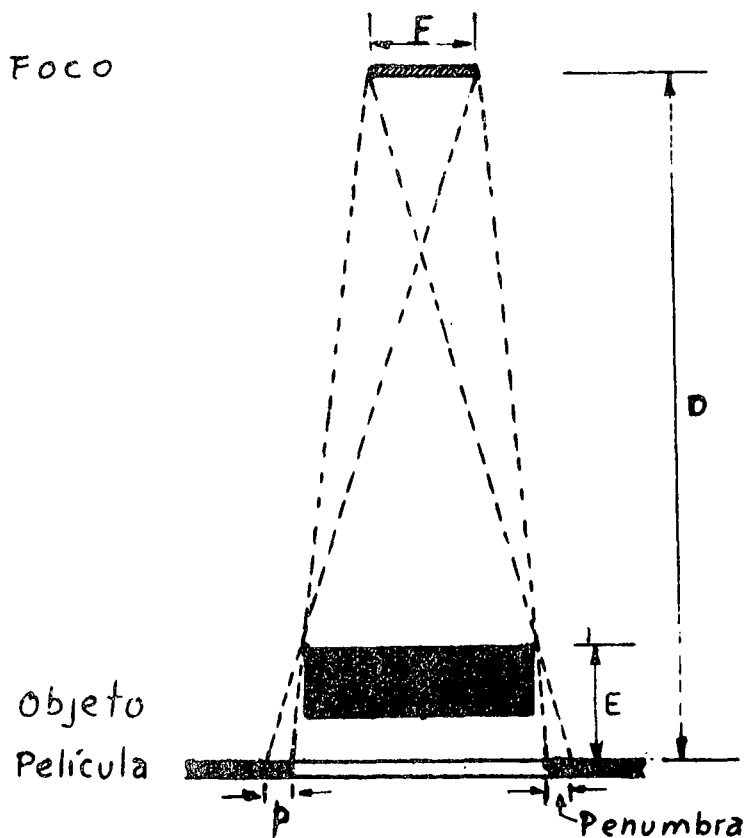
FACTORES GEOMETRICOS.

La apariencia de la imagen radiográfica está influenciada por las posiciones relativas entre la fuente de radiación, objeto y película.

En una radiografía la falta de definición causada por el tamaño de foco F , la distancia del foco a la película D y la distancia del objeto a la película (o espesor del objeto) E se denomina penumbra geométrica o simplemente penumbra, P .

Si observamos en la fig. 5.7 vemos que el valor de P puede ser calculado en función de F , D y E . Debemos aclarar que E significa la distancia entre el plano de la película y el plano que pasa por el punto del objeto más alejado de la película. Si el objeto está colocado junto a la película E , equivale al espesor máximo del objeto. La fórmula para calcular P es :

$$P = \frac{F \cdot E}{D - E}$$



Inversamente es común calcular la distancia a la cual se debe colocar la fuente para no sobrepasar un determinado valor de P (generalmente entre 0,2 y 0,4 mm.) En ese caso tenemos:

$$D = \frac{F \cdot E}{P} + E$$

Como en la práctica la película se coloca contra el objeto y el espesor de éste es mucho menor que la distancia foco-película se puede usar la fórmula:

$$D = \frac{F \cdot E}{P}$$

FELICULA RADIOGRAFICA

Las películas radiográficas están compuestas por una emulsión de haluros de plata suspendidos en gelatina que cubre ambas caras de un soporte transparente flexible, de celuloide con un tinte ligeramente azulado.

Existen en el comercio una amplia variedad de películas radiográficas, que se adaptan a distintas técnicas y condiciones de uso. En términos generales todos los films pueden ser agrupados en dos tipos diferentes: aquellos de exposición directa a rayos X o gamma que pueden ser usados también con pantallas de plomo o metálicas y aquellos para usar únicamente con pantallas salinas que actúan como convertoras de la radiación X o gamma en radiación fluorescente.

Las características más importantes de las películas radiográficas son el tamaño de grano, la velocidad (o sensibilidad a la radiación), el contraste y la latitud de exposición.

SENSITOMETRIA DE LAS FELICULAS RADIOGRAFICAS

A pesar de que usualmente se hacen comparaciones cualitativas entre diferentes películas refiriéndose por ejemplo a la "velocidad" o al "elevado contraste" para obtener un significado exacto en estas comparaciones es necesario medir las densidades producidas por un rango bien medido de exposiciones y dibujar las curvas de densidad en función de la exposición.

Estas curvas características expresan la relación entre la exposición aplicada y la densidad fotográfica obtenida bajo condiciones específicas de procesado. Las exposiciones se expresan en forma logarítmica por tres razones: 1) La densidad es un valor logarítmico, 2) El uso del logaritmo permite reducir el largo de la escala correspondiente a la exposición, 3) Cada par de exposiciones que tenga la misma relación será representado por el mismo intervalo en la escala independientemente de su valor absoluto.

Como la escala del logaritmo de exposición es referida como exposición relativa el operador puede usar la curva característica para determinar sus niveles de exposición sin necesidad de relacionar sus valores de exposición y condiciones de operación con aquellos valores absolutos con los cuales se preparó la curva.

En la fig. 6.8 se muestra una curva sensitométrica típica. Se observa que la curva no arranca de densidad cero, existe siempre una densidad inicial (0,2 a 0,3) llamado velo inherente que se obtiene aún con la película sin exponer. Luego observamos que debe alcanzarse un cierto valor de exposición (punto B) para obtener un aumento significativo de densidad. Este valor mínimo indica la sensibilidad de la película. A partir del punto B el aumento de densidad se hace más rápido hasta llegar a la máxima densidad obtenible en la película. Por razones prácticas esta densidad máxima utilizable es del orden de 4, punto C. El tramo de la curva comprendido entre B y C es la parte útil para la radiografía y su extensión en el eje de abscisas en una medida de latitud de exposición de película. La pendiente de la curva en el tramo B-C es la medida del contraste radiográfico. Este contraste varía según la parte de la curva y es mayor a mayor densidad. Este hecho indica lo incorrecto de realizar radiografías demasiado claras, se recomienda por el contrario trabajar con densidades superiores a 1,5 en las zonas de interés.

PROCESADO

El procesado de la película tiene gran influencia en la curva característica. En la fig. 5.8 se han indicado los efectos de un revelado excesivo y de un revelado incompleto.

Una vez revelada la película se pasa al baño de detención (solución de ácido acético al 2% generalmente) luego al fijador que solubiliza las sales de plata no reducidas y finalmente al lavado para extraer todos las sales y reactivos. El tiempo de lavado debe ser de por lo menos de dos a tres veces el tiempo de fijado usando agua en circulación.

El secado debe hacerse en lugar apropiado para evitar la deposición de partículas suspendidas que interferirán en la observación de la radiografía.

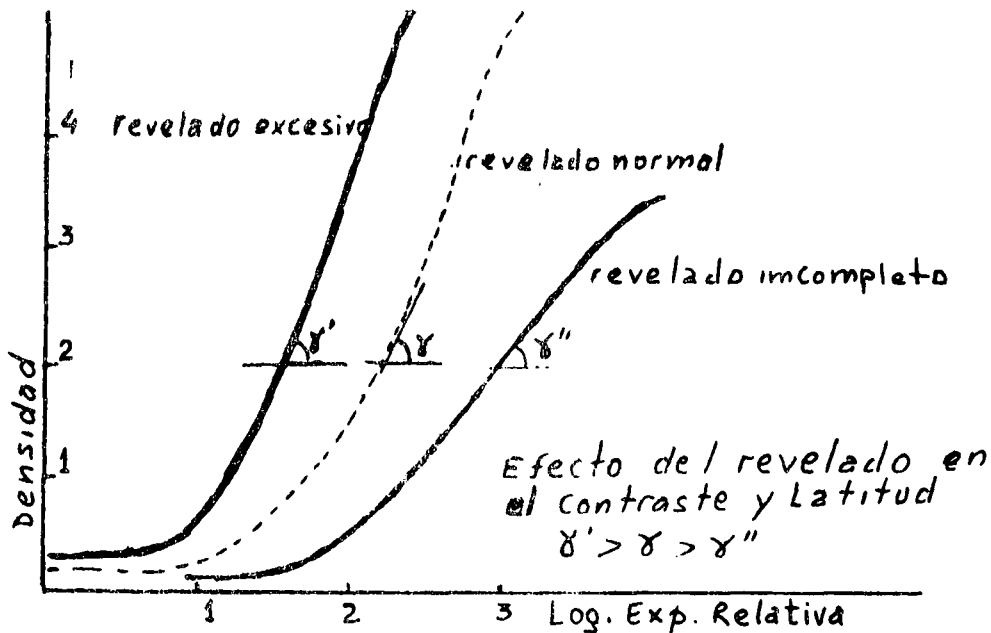
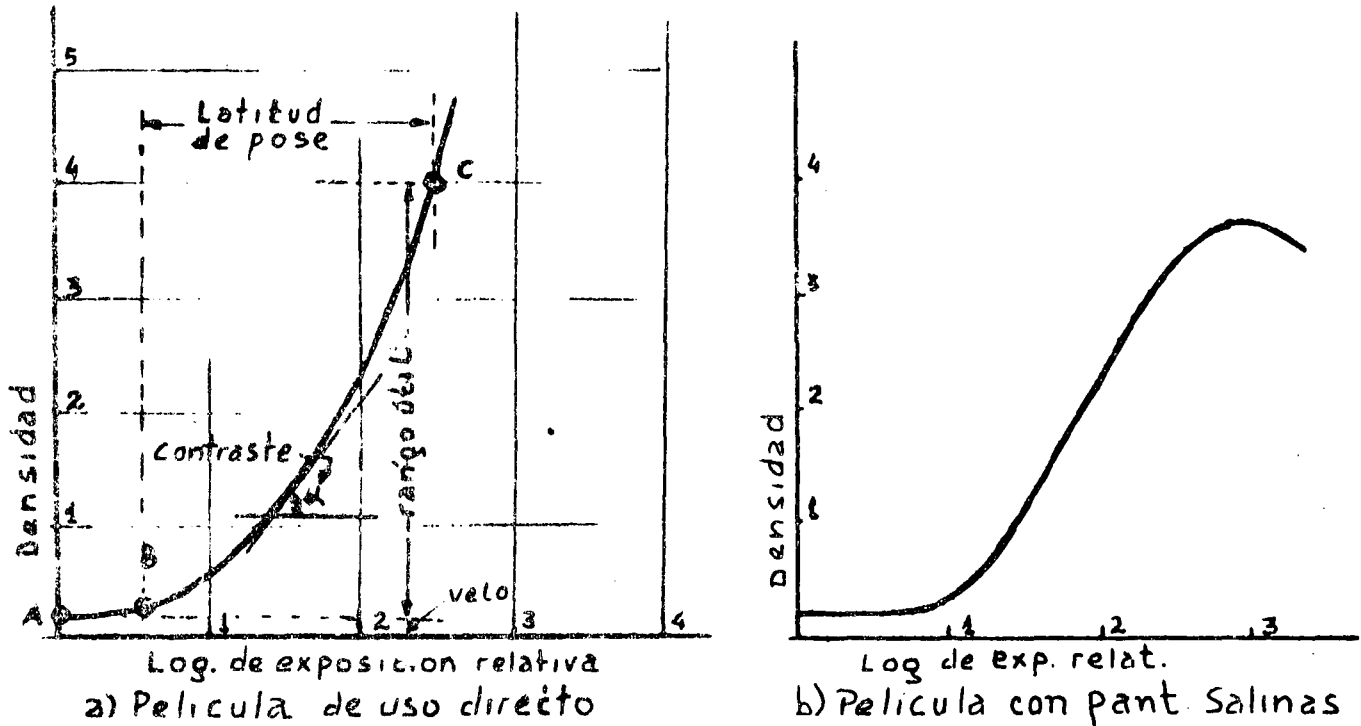


FIGURA 6.8.- CURVAS SENSITOMETRICAS

FANTALLAS

En la práctica radiográfica se utilizan pantallas sobre la película por dos razones:

- 1) Absorber radiación dispersa mejorando la calidad radiográfica
- 2) Disminuir el tiempo de exposición

Existen tres tipos de pantallas:

- 1) Pantallas metálicas:
Generalmente de plomo, en espesores entre 20 y 250 micrones. Se usan como filtro de radiación dispersa y como intensificadoras para disminuir el tiempo de exposición.
- 2) Pantallas salinas:
De tungsteno al calcio. Se usan como intensificadoras con películas especiales, logrando disminuir los tiempos de exposición hasta 1000 veces. Refuerzan la radiación dispersa y aumentan el tamaño de grano de la radiografía. Para examen de soldaduras suele no estar permitido su uso.
- 3) Pantallas fluorometálicas:
Están constituidas por combinación de las anteriores en capas superpuestas. Tienen efecto intensificador y filtran radiación dispersa, pero pueden aumentar el grano de la radiografía.

DIAGRAMAS DE EXPOSICION

Para el cálculo de la exposición se debe hacer uso de los diagramas de exposición que son provistos por los fabricantes de películas radiográficas pero que también pueden ser preparados por el propio operador.

Para rayos X los diagramas de exposición llevan en abscisas los espesores de material y en ordenadas la exposición en "miliamper-minutos" y como parámetro de cada curva el kilovoltaje de operación (fig. 6.9). En el diagrama figura además el tipo de película, distancia fuente-film, material, pantallas usadas, procesado y densidad de la radiografía. Por razones prácticas la exposición se da en escala logarítmica. Cuando se desea trabajar a distancia distinta de la indicada se aplica la ley del cuadrado de la distancia para corregir el tiempo de exposición.

Para el caso de rayos gamma corresponde un diagrama para cada radioisótopo. En dichos diagramas se lleva en ordenadas la exposición en curie-hora (en escala logarítmica) y en abscisas el espesor. Los parámetros de las distintas curvas pueden corresponder a distintas distancias o bien a distintas películas. Se dan además todas las condiciones de la radiografía (pantallas, procesado, densidad, etc.).

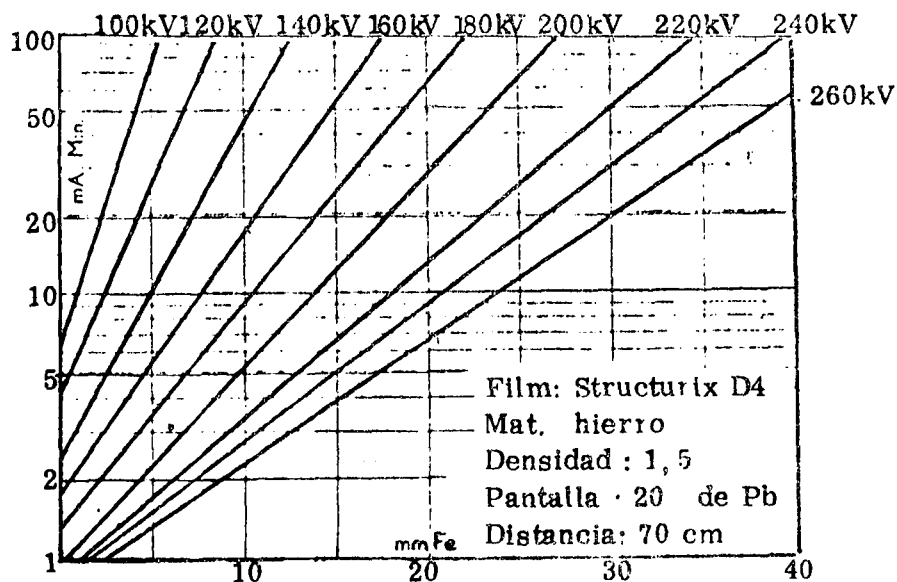
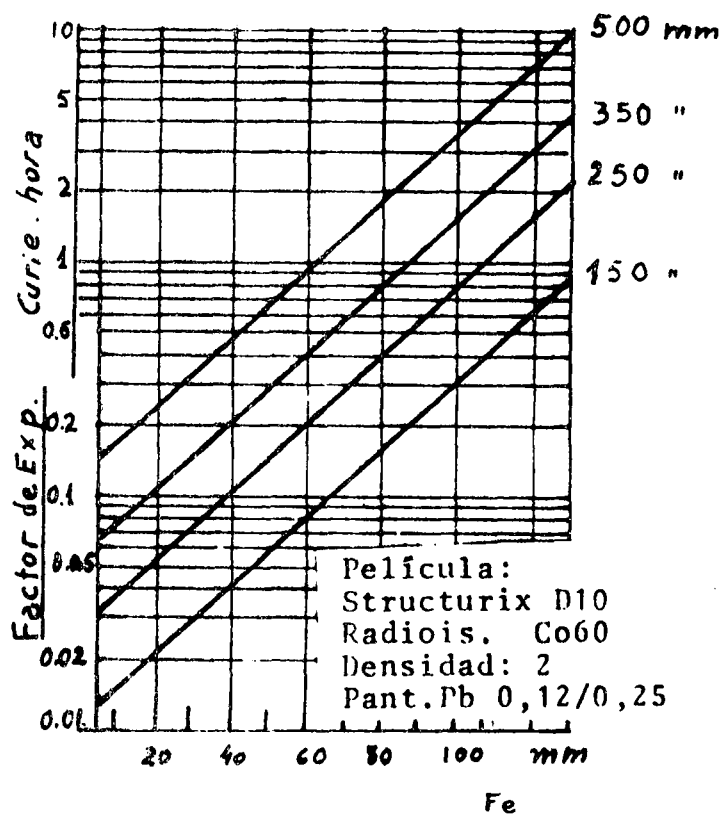
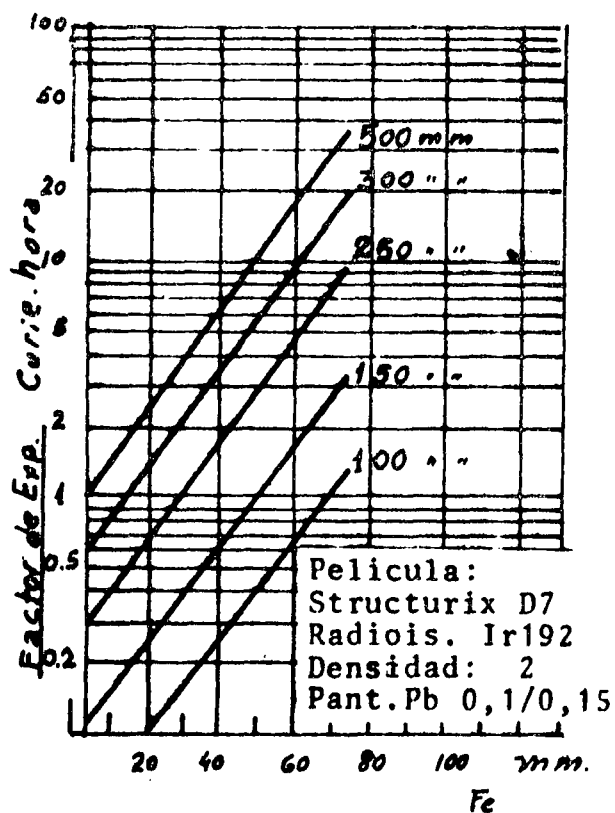


Diagrama de Exposición para Rayos X



Diagramas de Exposición para Gammagrafía

FIGURA 6.9.- DIAGRAMAS DE EXPOSICION

INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN

Para evaluar la calidad de una radiografía se usan los indicadores de calidad de imagen que consisten en plaquetas o alambres del mismo material que el objeto a radiografiar cuyos espesores o diámetros representan digamos, el 1%, 2%, 3% y 4% etc. del espesor máximo del objeto. El indicador se coloca sobre la cara del objeto que enfrenta la radiación en la parte que queda más alejada del film (zona de mayor espesor) y en la posición geoméricamente más desfavorable, por ejemplo en el extremo más alejado respecto del punto en que la radiación incide normalmente.

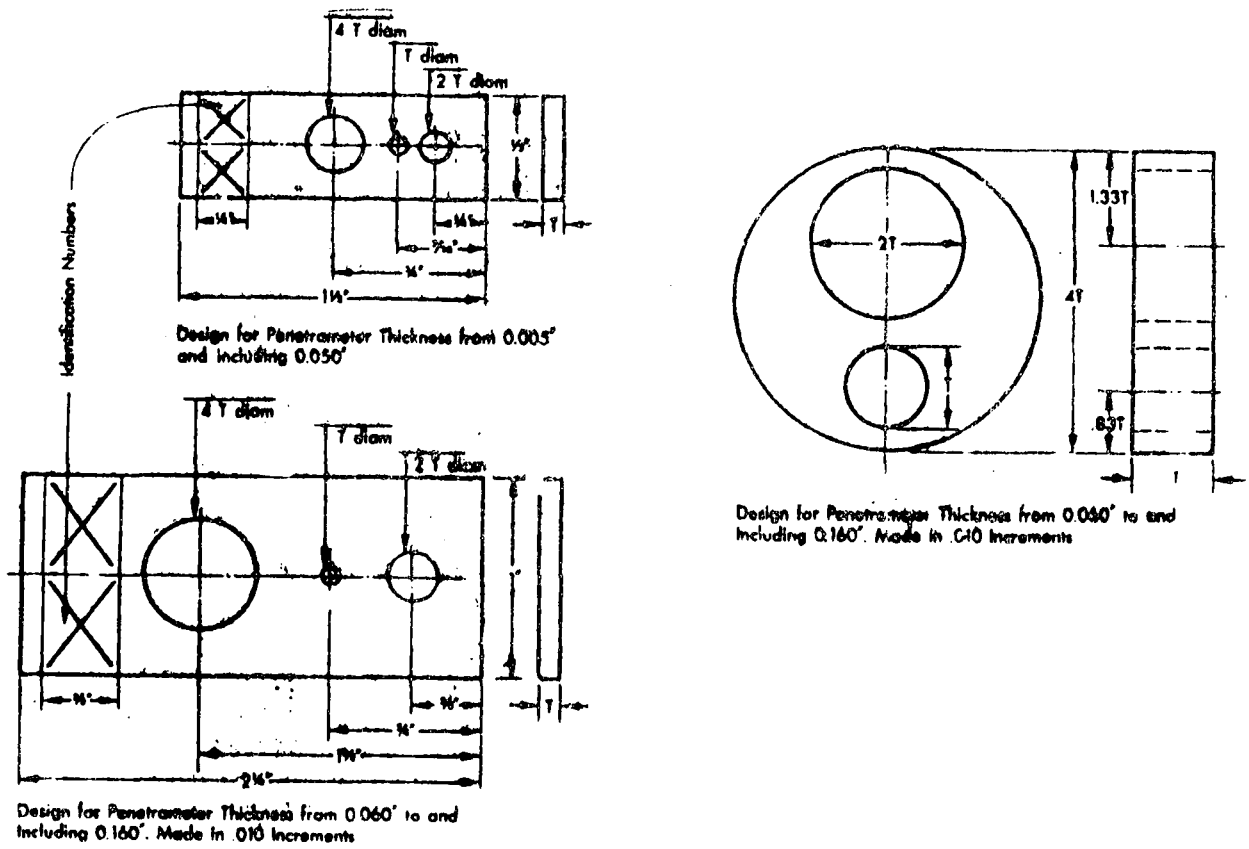
El espesor de escalón más delgado o el diámetro del hilo más fino que sea visible en la radiografía se usa para evaluar la calidad de la técnica radiográfica usada. Esta evaluación suele hacerse en términos de "sensibilidad porcentual" calculada en base al ICI de menor espesor o diámetro visible en la radiografía, expresado como % del espesor radiografiado.

Es importante destacar que ni la imagen del indicador en la radiografía ni el valor de la "sensibilidad" calculado pueden ser usados para asegurar el tamaño mínimo del defecto detectable. Sin embargo es absolutamente necesario usar siempre un ICI adecuado que permita valorar la calidad de imagen radiográfica y asegurar el uso de una técnica correcta.

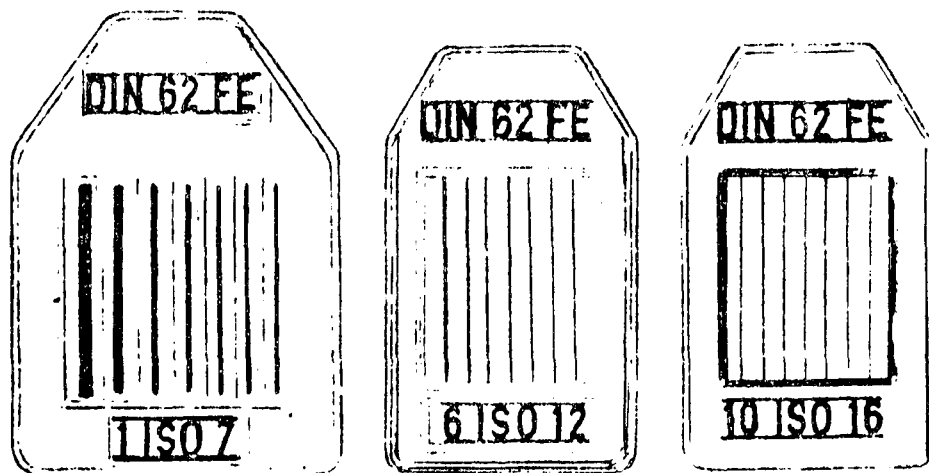
El uso de ICI está normalizado en muchos países ya sea por organismos oficiales o por asociaciones profesionales o empresarios. Daremos las características de algunos de ellos:

ASTM (U.S.A.): Son los más usuales en nuestro país y la norma correspondiente es la ASTM-E 142. Consiste en una plaqueta plana cuyo espesor se elige de manera que represente un 2% del espesor a radiografiar. Lleva tres orificios cuyo diámetro es una vez, dos veces y cuatro veces el espesor de la plaqueta. La calidad se expresa como 2-1t si se ven los tres orificios. Si solo se perciben 2 la calidad será 2-2t y si solo se observa un orificio la calidad será 2-4t. Si se observa la plaqueta y no los orificios la radiografía estará fuera de calidad.

DIN (Alemania Occidental): Es un indicador de hilos de distinto diámetro escalonados según la progresión geométrica ISO R 10 conteniendo la unidad (en milímetros). Son 16 hilos distribuidos en tres indicadores con siete hilos cada uno. La correspondencia entre número de hilo y diámetro se da en la tabla III. El largo del hilo puede ser 50 o 25 mm. y se colocan en cada indicador en forma paralela a 5 mm. de distancia entre ellos. El primero tiene los hilos 1 al 7, el segundo 6 a 12 y el tercero 10 a 16. En cada indicador figura en plomo el símbolo del material con que está hecho; Fe, Al o Cu. En la norma de uso correspondiente se indica el número del hilo de menor diámetro que debe verse según el espesor radiografiado, según se halla obtenido calidad I o calidad II. La norma de referencia es la DIN-54109 (1962).



Norma ASTM E 142/68



DIN 54109(alemana) e IRAM 750

FIGURA 6.10. INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN

EVALUACION DE RADIOGRAFIAS

1) Etapa preliminar:

- a) Verificar identificación.
- b) Reconocer defectos del film; si es un film aceptable
- c) Verificar la sensibilidad mediante el I.C.I.
- d) Ajustar las condiciones de observación a la densidad del film.
- e) Separar la observación de films tomados con técnicas muy diferentes: por ejemplo RX y gamma.

2) Análisis e interpretación de defectos:

Cumplida la etapa preliminar la atención debe concentrarse exclusivamente en la observación de los defectos, teniendo presente los siguientes hechos básicos:

a) Las zonas de menor densidad óptica corresponden a mayor espesor y/o mayor densidad en la zona correspondiente del objeto.

A toda cavidad, disminución de espesor o densidad física en el objeto corresponde un aumento de densidad óptica en el film.

b) Excepto cuando se usen técnicas de proyección del film (muy caro) la imagen de los defectos es 10% aumentada respecto al tamaño natural, según las relaciones geométricas del ensayo.

c) La forma de la imagen de un defecto es la proyección geométrica del defecto tridimensional en el plano del film. La apariencia de dicha imagen depende también de la posición y orientación del defecto y del espesor de la pieza.

d) Un defecto de un tamaño determinado dará imágenes cada vez menos visibles al aumentar el espesor de la pieza en que se encuentra y pequeños defectos pueden llegar a desaparecer.

e) La imagen del defecto depende también del tipo de radiación usada. A más alta energía menor contraste y menor definición.

d) La detectabilidad de los defectos planares depende de su orientación. Las grietas o fisuras se desarrollan normalmente en planos que no mantienen constante su ángulo respecto del haz de radiación. Es relativamente fácil, por ello diferenciarlas de otros defectos planares tales como falta de fusión, falta de penetración, o defectos así lineales como los capilares gaseosos. En caso de duda se puede ordenar la variación del ángulo de inspección. Los standards de referencia rara vez dan la variación de aspecto con variación de ángulo.

7. ENSAYO ULTRASONICO

7.1.-FUNDAMENTOS.

El ensayo ultrasonico de los materiales esta basado en los fenomenos que se producen en la propagacion de vibraciones mecanicas, con frecuencias entre 0,25 y 25 MHz. Este intervalo de frecuencias se inscribe muy por encima de lo que constituye el sonido y no siendo detectadas por el oido humano se las designa como ULTRASONIDO.

La mas extendida de las aplicaciones se basa en la reflexion del ultrasonido en la interfase producida por defectos o discontinuidades en los materiales..

Los principales fenomenos fisicos que intervienen en los ensayos ultrasonicos son: velocidad de propagacion, atenuacion, reflexion y refraccion.

ONDAS ULTRASONICAS.

Todo material con propiedades elasticas puede ser sede de la propagacion de ondas sonicas y ultrasonicas, en tanto las fuerzas elasticas sean capaces de retraer las particulas del mismo a su posicion de reposo luego de ser desplazadas por una energia mecanica.

En aquellos materiales con estructura cristalina (metales por ejemplo) las particulas que forman la red pueden ser desplazadas de su posicion de equilibrio describiendo oscilaciones con trayectorias diversas, en funcion de la energia mecanica aplicada, originando distintos tipos de ondas, a saber:

- ONDAS LONGITUDINALES
- " TRANSVERSALES
- " SUPERFICIALES
- " DE LAMB

Antes de entrar a describir estos tipos de ondas recordemos que en todos los casos estamos hablando de la propagacion de una perturbacion, constituida por la puesta en oscilacion de las particulas del material alrededor de sus posiciones de equilibrio y no de transporte de materia.

Ondas longitudinales:

En este tipo de ondas la vibracion de las particulas es producida por un esfuerzo de compresion y por lo tanto oscilan en direccion paralela al sentido de propagacion de la onda.

Ondas transversales:

Si en el material, por la direccion en que se ejerce la excitacion, se producen esfuerzos de corte la vibracion de las particulas puede ser transversal a la direccion de propagacion. Este caso corresponde a las ondas transversales o de corte, que no se podran propagar ni en liquidos ni en solidos ya que estos no ofrecen resistencia a esfuerzos tangenciales o de corte.

Ondas superficiales:

Son ondas que se propagan solamente en la superficie del material. Las particulas estan sometidas a esfuerzos combinados, de corte y de compresion, resultando una oscilacion de tipo eliptica. Pueden recorrer toda una superficie siempre que la misma este libre y no tenga interrupciones bruscas.

Ondas de Lamb:

Cuando el espesor de una lamina o el diametro de un alambre es del orden de la longitud de onda de la vibracion, la

onda se propaga masivamente en toda la seccion, originando las llamadas ondas de Lamb. Vibrando todo el material en su conjunto son infinitos los posibles modos de vibracion, pero existen dos modos fundamentales que son:

- _ ondas simetricas de compresion,
- _ ondas asimetricas de flexion.

Velocidad de propagacion de ondas ultrasonicas.

Cada tipo de onda tiene su propia velocidad de propagacion, que depende en cada caso de las propiedades del medio y es independiente de la frecuencia, salvo en el caso de ondas de Lamb en que existe una dependencia del producto entre la frecuencia y el espesor del material en que se propaga.

Son de aplicacion las siguientes formulas:

$$O. \text{ Longitudinales } V_L = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1-\sigma}{1+\sigma}}$$

$$O. \text{ Transversales } V_T = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

$$O. \text{ Superficiales } V_S = V_T \cdot \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1-\sigma}$$

en las cuales; E = modulo de elasticidad

δ = densidad

σ = relacion de Poisson

Para ondas de Lamb existen formulas que dependen de los modos de transmision y de las relaciones entre frecuencia y espesor.

Reflexion del haz ultrasonico.

Cuando un haz de ultrasonidos se propaga en un medio y alcanza una superficie limite (interfase), se produce su reflexion con un comportamiento analogo al de un haz luminoso. La cantidad de energia reflejada depende de las impedancias acusticas relativas de los dos medios separados por la interfase.

La IMPEDANCIA ACUSTICA es un parametro que caracteriza la resistencia que opone el medio a la propagacion del ultrasonido y esta definido por la relacion:

$$Z = \delta \cdot v$$

donde; Z= impedancia acustica

δ = densidad del material

v= Velocidad de propagacion

Si llamamos I a la energia ultrasonica incidente, la parte de energia que es reflejada sera igual a I multiplicado por el coeficiente de reflexion R mientras que la energia transmitida al segundo medio sera igual a I multiplicado por el coeficiente de transmision T. Obviamente $R+T=1$.

Si llamamos Z_1 y Z_2 a las impedancias acusticas del primer y segundo medio, respectivamente, los correspondientes coeficientes de reflexion y de transmision seran:

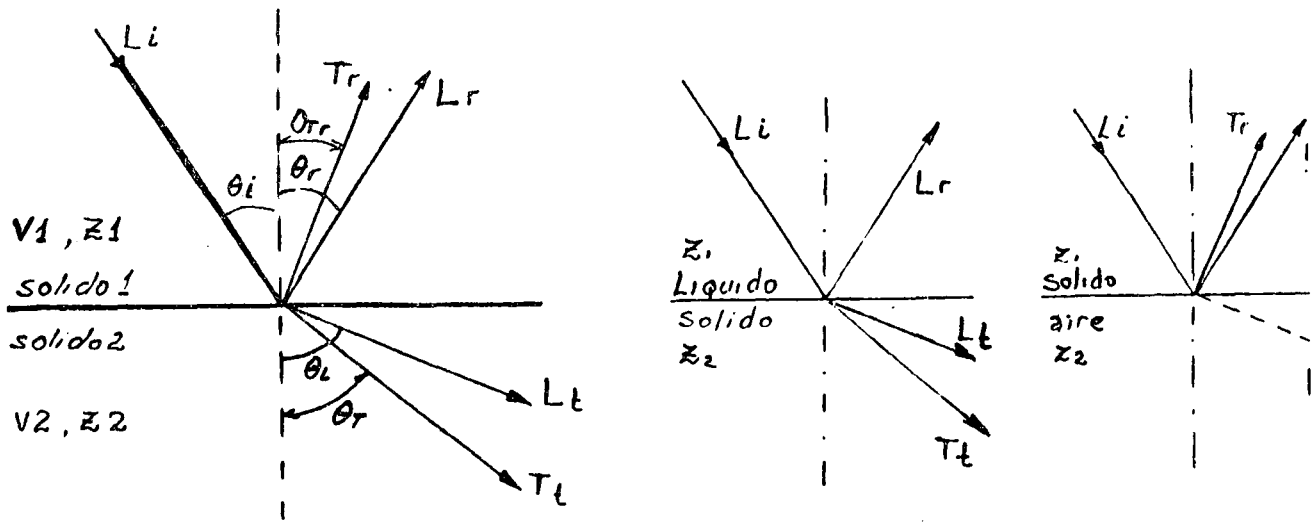
$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{y} \quad T = \frac{4 Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

De acuerdo con estas formulas podemos ver que la reflexion sera maxima cuando sea maxima la diferencia de impedancia entre los dos medios, independientemente de cual de ellos sea el menor.

Refraccion y conversion de modo

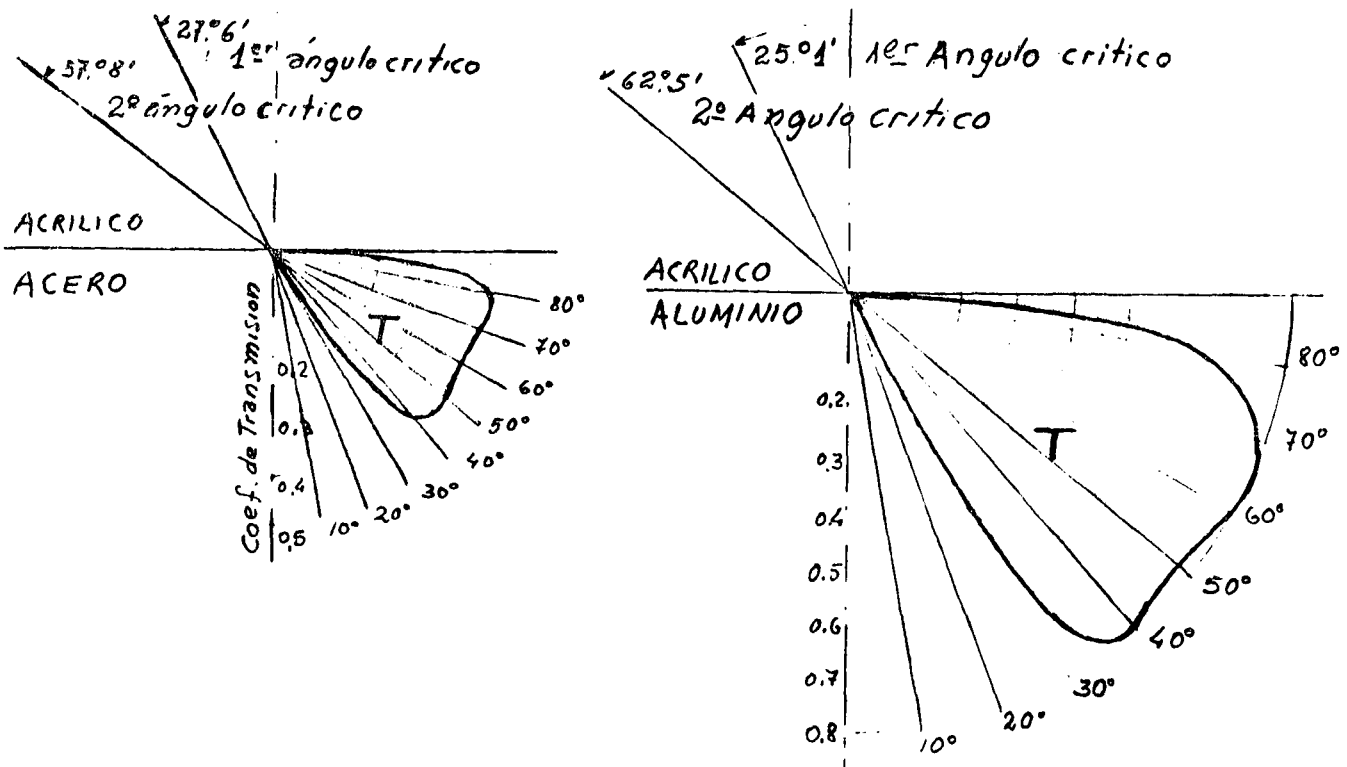
Cuando un haz ultrasonico llega con un angulo distinto de la normal, a la interfase entre dos medios, cuyas impedancias relativas permiten transmision de energia de un medio a otro, se produce una reparticion de la misma entre haces reflejados y refractados.

Las relaciones entre los angulos formados por los distintos haces se pueden calcular segun la Ley de Snell, que expresa que la relacion entre el seno del angulo que forma con la normal a la interfase y la velocidad de propagacion en el medio considerado, es constante



V_1 y V_2 = velocidades en medio 1 y 2 L_t = O.long.refractada
 Z_1 y Z_2 = impedancias de medio 1 y 2 T_t = O.transv.refractada
 L_i = Onda longit. incidente θ_i = Angulo de incidencia
 L_r = " " reflejada θ_L = Ang.de refrac.Onda Longit.
 θ_r = Angulo de reflexion θ_T = " " " " Transv.

REFLEXION Y REFRACCION DEL HAZ ULTRASONICO EN INTERFASE.



CAMPO DE UTILIZACION DEL HAZ ANGULAR EN ACERO Y ALUMINIO

FIGURA 7.1.- COMPORTAMIENTO DEL HAZ ULTRASONICO EN UNA INTERFASE

Cuando el haz ultrasonico incide oblicuamente en una superficie, ejerce una presion que puede ser descompuesta en dos componentes principales: una normal, que provoca desplazamiento longitudinal de las particulas, originando ondas longitudinales y otra componente tangencial que determina la propagacion de ondas transversales, por esfuerzos de corte.

En razon de ello se tienen finalmente ondas longitudinales y transversales reflejadas en el primer medio y ondas transversales y longitudinales refractadas en el segundo medio.

Los angulos que cada una de estas ondas forma con la normal a la superficie limite, estan dados por la ley de Snell, segun se ha visto:

$$\frac{\text{Sen } \theta_i}{V_{1L}} = \frac{\text{Sen } \theta_{Tr}}{V_{1T}} = \frac{\text{Sen } \theta_L}{V_{2L}} = \frac{\text{Sen } \theta_T}{V_{2T}}$$

Se define como PRIMER ANGULO CRITICO al angulo de incidencia para el cual el angulo de refraccion de las ondas longitudinales se hace igual a 90 grados. Con valores de angulo de incidencia iguales o superiores al primer angulo critico en el segundo medio dejan de propagarse ondas longitudinales.

Aumentando mas el angulo de incidencia se llega al SEGUNDO ANGULO CRITICO, para el cual el angulo de refraccion de las ondas transversales se hace igual a 90 grados y se produce la propagacion de ondas superficiales.

En la FIG.No 7.1.- se describen estos fenomenos y se dan valores de angulo critico para acero y aluminio.

7.2.- HAZ ULTRASONICO.

En el ensayo ultrasonico la produccion de energia ultrasonica se basa generalmente en el efecto piezoelectrico.

En los cristales piezoelectricos la energia mecanica aplicada se transforma en parte en energia electrica que se manifiesta como una polarizacion, apareciendo cargas electricas en las caras del cristal que determinan un potencial electrico. Este fenomeno es reversible, de manera que si aplicamos una carga electrica en las caras opuestas de un cristal piezoelectrico, se induce una deformacion con la consiguiente transformacion de energia electrica en energia mecanica. Si la tension aplicada es alternativa el cristal asi excitado vibrara con una frecuencia que depende de sus propiedades elasticas y de su espesor.

Un efecto similar se obtiene con ciertos materiales ceramicos, formados por oxidos o sales de metales como el plomo, titanio, bario, boro etc. Estos sinterizados en forma de pastillas, previamente polarizados exhiben el mismo efecto que los cristales piezoelectricos.

En la formacion del haz ultrasonico la pastilla ceramica o el cristal piezoelectrico, pueden ser considerados como constituidos como un conjunto de pequeños cristales que excitados simultaneamente brindan cada uno su aporte de energia vibratoria en forma independiente. Se originan en cada punto ondas esfericas que al propagarse producen interferencias entre si, por lo tanto hasta una cierta distancia, a partir de la cual el frente de onda se puede considerar plano, la distribucion de presiones dentro del haz se ajustan al principio de Huygens.

Si consideramos una fuente de emision de ultrasonido (el cristal piezoelectrico) frente a un medio material, sus ondas se propagaran siguiendo una forma geometrica suficientemente definida, que depende de las dimensiones del cristal y de la longitud de onda de

las vibraciones en el medio considerado. Esquemáticamente esta forma de propagación, que llamamos haz ultrasonico, esta representada en la figura siguiente:

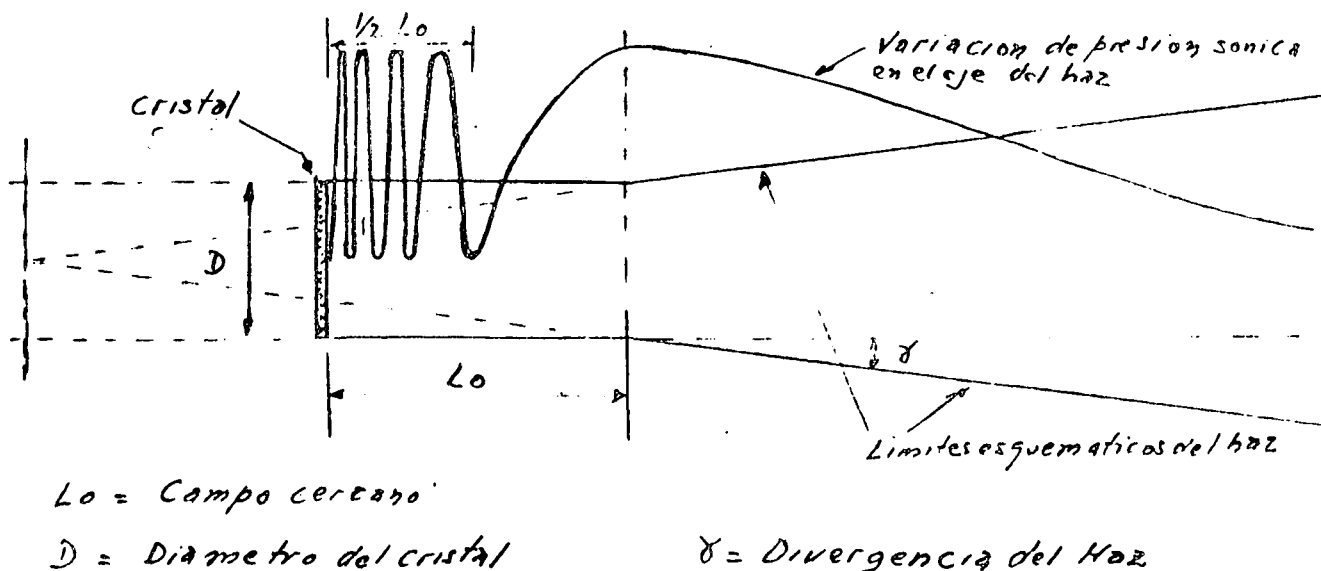


FIGURA 7.2.- CONFIGURACION DEL HAZ ULTRASONICO.

De acuerdo con esta figura podemos ver que en las proximidades del cristal se tiene una zona de longitud L_0 , en la cual el haz se propaga en forma cilíndrica, de diámetro casi igual el del cristal. En esta zona la presión sonora no es homogénea presentando máximos y mínimos resultantes de la suma de presiones correspondientes a los frentes de onda originados en los distintos puntos que conforman el cristal. Esta zona se llama CAMPO CERCANO, y su valor esta dado por la formula:

$$L_0 = \frac{D^2}{4\lambda}$$

A partir del campo cercano la propagación se hace en forma de haz conico, con una divergencia que se calcula según la formula:

$$\text{Sen } \gamma = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Esta configuración depende de la frecuencia (longitud de onda en el medio) y del diámetro del cristal. Determina una serie de condiciones para la práctica del ensayo, entre las que podemos mencionar:

_En la zona del campo cercano se pueden detectar reflectores pero resulta insegura su evaluación.

_En la zona conica o campo lejano la altura de un eco depende no solo del tamaño del reflector sino tambien de su distancia.

_En especímenes de espesor relativamente pequeño la divergencia del haz puede dar lugar a reflexiones en las paredes que originan ecos que parecen provenir de mayor distancia que el eco de fondo.

Atenuación del haz:

En la zona lejano o conica la presión sonora disminuye por divergencia del haz, pero además por otros dos efectos: la absorción de energía debida a la resistencia mecánica del material

y la dispersion del haz producida por pequeños reflectores constituidos por imperfecciones del material.

El fenomeno de dispersion es un factor que se debe controlar en base a la frecuencia de ensayo por lo que muchas veces resulta un factor limitante de la sensibilidad y resolusion del ensayo.

Para tamaños de grano del orden de $1/1000$ a $1/100$ de la longitud de onda la dispersion resulta practicamente nula. Con tamaños de grano mayores la dispersion aumenta rapidamente. Si el tamaño de grano se hace mayor $1/10$ de la longitud de onda la dispersion es tan intensa que hace imposible el ensayo.-

7.3.- PALFADORES.

Los palpadores se contruyen sobre la base de un cristal piezoelectrico o una pastilla ceramica que actua como generadora/receptora de las vibraciones ultrasonicas, con elementos conductores electricos para excitacion, material de soporte para proteccion mecanica y material de amortiguacion de las vibraciones.

Se construyen en cuatro tipos pricipales:

- _Normales de ondas longitudianales para contacto,
- _Angulares para contacto.
- _De ondas superficiales para contacto.
- _De inmersion.

Existen ademas tipos especiales tales como palpadores para alta temperatura, palpadores normales de ondas transversales, de rodamiento, enfocados, etc.

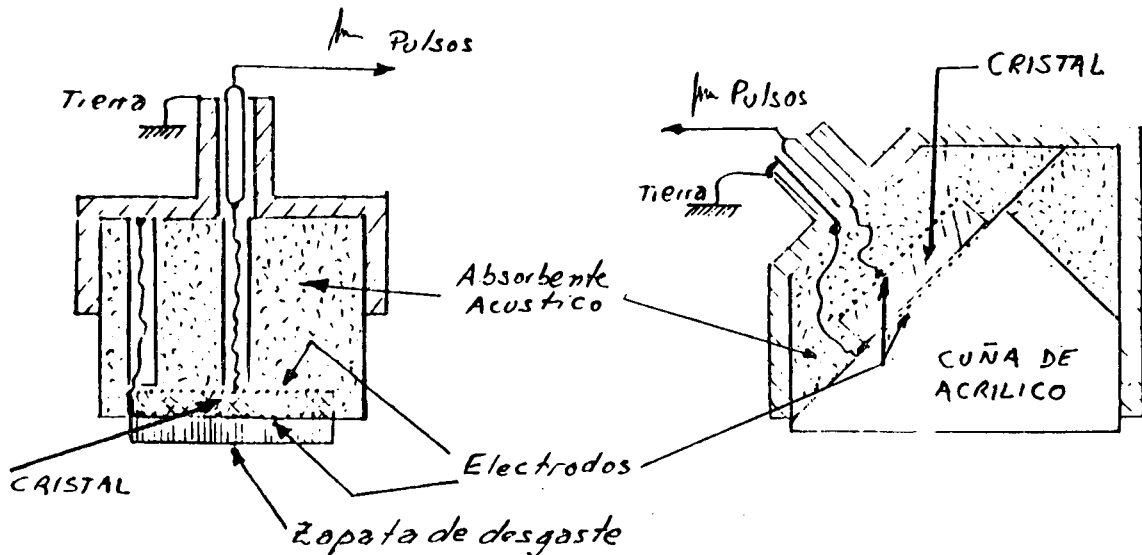


FIGURA 7.3.- PALFADORES DE ULTRASONIDO

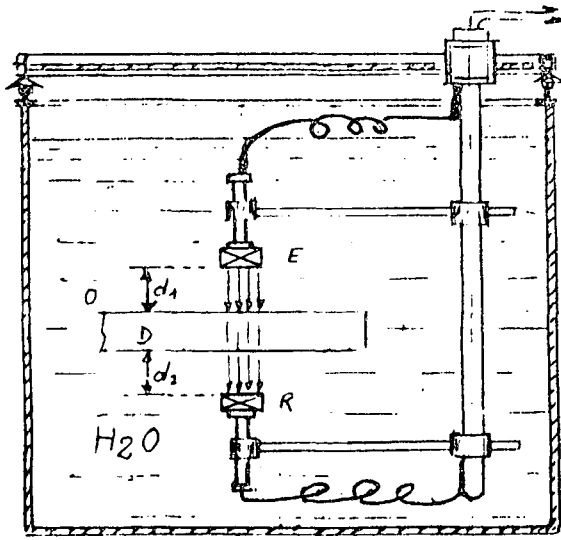
7.4.- TECNICAS DE ENSAYO

Las principales tecnicas de ensayo son:

- _Transmision con emision continua
- _Transmision por pulsos
- _Pulso-eco
- _Resonancia.

Todas estas tecnicas pueden ser empleadas por contacto, es decir logrando el acoplamiento con una delgada pelicula de un liquido o pasta, o bien por inmersion lo que implica sumergir los elementos bajo liquido y lograr el acoplamiento por columna liquida.

TECNICAS POR TRANSMISION



A) Inmersión

E = Emisor
R = Receptor

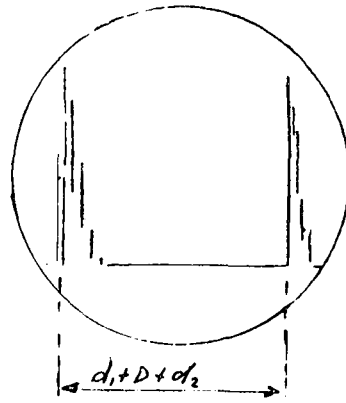
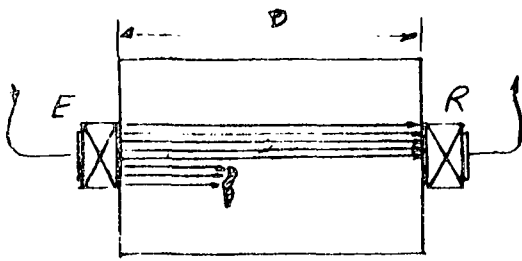


Imagen TRC
sin indicación
de defecto

d_1 y d_2 = Columna ligada.
D = Espesor objeto



Objeto con defecto

B) Contacto

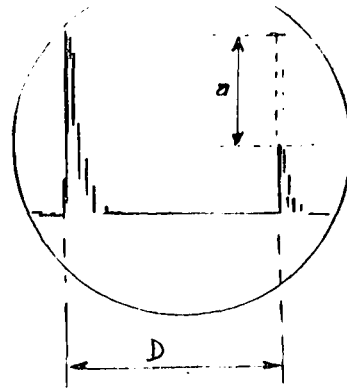
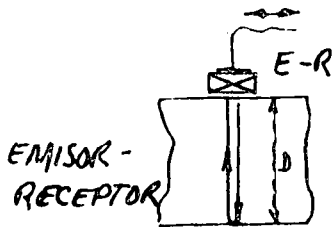
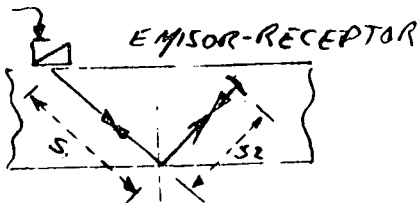


Imagen TRC con Indicación de defecto

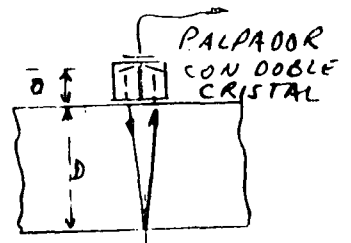
TECNICAS POR PULSO-ECO



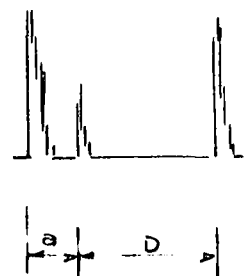
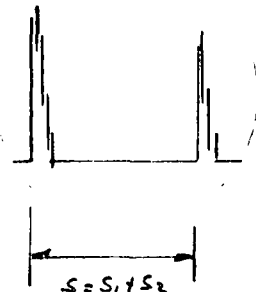
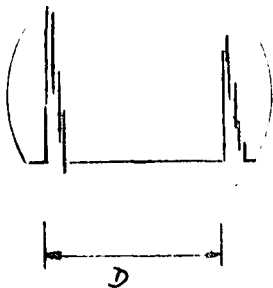
EMISOR-RECEPTOR



EMISOR-RECEPTOR



PALPADOR
CON DOBLE
CRISTAL



19
EP

FIGURA 7.4.- TECNICAS DE ENSAYO.

7.5.- EQUIPOS PARA ENSAYO.

La técnica más utilizada es la de Pulso-eco, para cuya aplicación se usan equipos con presentación de la información en tubo de rayos catódicos, especialmente diseñados para evaluación de defectos.

Otro tipo de equipo de uso muy extendido, que también utiliza la técnica de Pulso-eco, es el llamado medidor de espesores. Este tipo de equipo mide electrónicamente el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y el retorno del eco y de acuerdo a una calibración de la velocidad del sonido en el material bajo examen expresa el espesor en presentación digital o analógica.

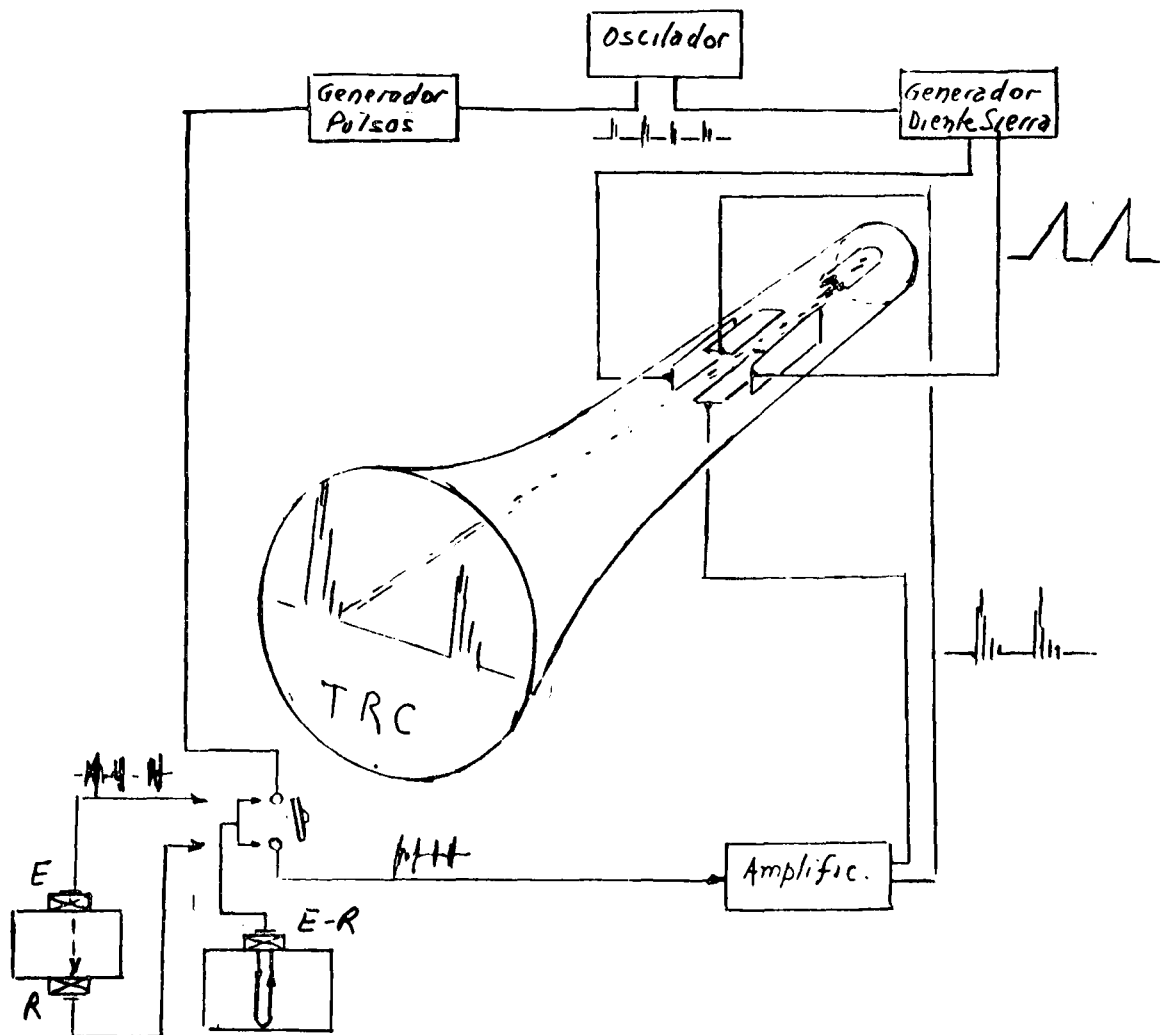


FIGURA 7.5.- CIRCUITO ESQUEMATICO DE UN EQUIPO DE ULTRASONIDOS.

7.6.- EVALUACION DE DEFECTOS.

En la FIG No 7.6.- se ha esquematizado el comportamiento de las indicaciones obtenidas por la técnica de Pulso-eco, en la pantalla de un tubo de rayos catódicos, en el caso de distintos tipos de defecto.

El caso a) representa un pequeño defecto en relación con el diámetro del haz, b) representa el caso de varios defectos pequeños en distintas profundidades, c) un defecto grande respecto del diámetro del haz y detrás de él un defecto más pequeño, que en esta situación no produce indicación.

En el caso d) el defecto es grande pero su plano reflector no es normal a la dirección del haz, por lo tanto lo desvia y no da indicación, en el caso e) el defecto es pequeño pero la indicación del eco de fondo desaparece pues la pared posterior está inclinada respecto del haz. En el caso f) se obtiene una gran cantidad de indicaciones múltiples y pequeñas debidas a estructura gruesa o inclusiones en el material, que impiden distinguir la indicación de defecto.

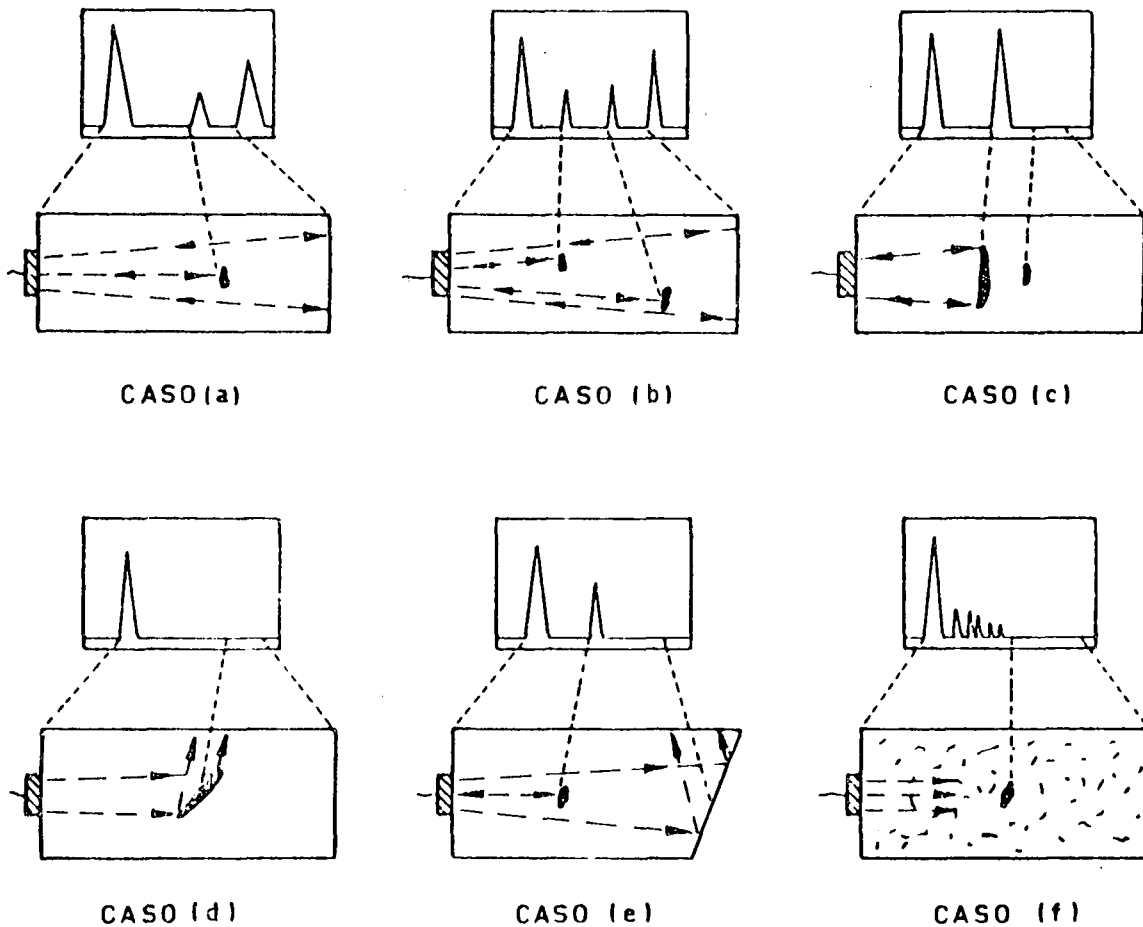


FIGURA 7.6.- INDICACIONES DE DEFECTO.

7.7.- CALIBRACIONES

Para que la información obtenida en el ensayo sea confiable y pueda ser repetida y comparada se requieren dos tipos de calibraciones.

La primera es la calibración del equipo, comprendiendo instrumento cables, palpadores y acoplante. Se realiza periódicamente utilizando probetas normalizadas conocidas como "bloques de calibración", que permiten verificar el estado de funcionamiento del equipo, especialmente en lo referido a linealidad de la base de tiempos y de la ganancia de amplificación. Esta calibración permite además verificar posición de salida del haz desde el palpador, ángulo de salida, poder de resolución etc. Se debe realizar esta calibración cada seis meses, por ejemplo, o cada vez que se introduce una modificación o se realiza una reparación.

La otra calibración esta referida a la fijación de las escalas de distancia y de las sensibilidades (ganancia) de trabajo de registro y de aceptación o rechazo. Se utiliza una probeta de calibración preparada al efecto y del mismo material a examinar. La forma de preparación de estas probetas esta normalizada segun diferentes criterios, entre los cuales son los mas usuales el DAC (distance, attenuation, compensation) y el DGS (distance, gain, size).

En el primer caso, DAC, se usa como reflector un orificio cilindrico, trazando curvas de altura de eco en funcion de la distancia.

En el sistema DGS (AVG), se utilizan como reflectores de calibración agujeros de fondo plano de distintos diametros, formando familias de curvas que relacionan la altura del eco con la distancia de reflexion y el diametro del reflector.

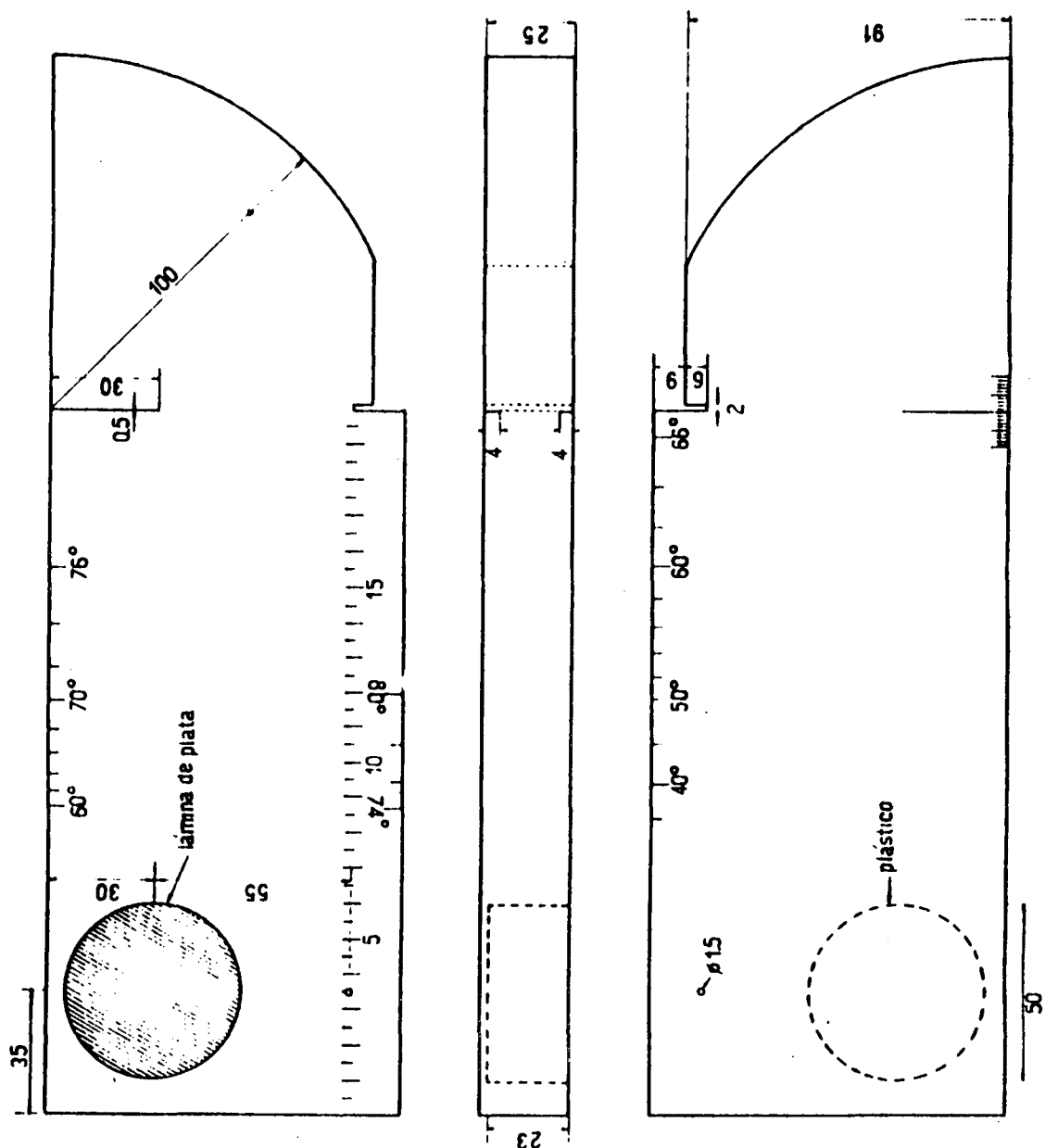


FIGURA 7.7.- BLOQUE DE CALIBRACION DE EQUIPOS DE US. IFAM 723.

7.8.-EJEMPLO DE ENSAYO ULTRASONICO.

El examen de soldaduras por US es una de las practicas mas extendidas actualmente, adquiriendo importancia comparable al tradicional ensayo radiografico.

Este ensayo se realiza usualmente mediante palpadores angulares que generan en el material ondas transversales a angulos prefijados. Se preparan procedimientos escritos teniendo en cuenta la forma tipo y procedimiento de soldadura.

Por ejemplo una soldadura de chapa a tope puede ser examinada de cualquiera de ambos lados, haciendo correr el palpador perpendicularmente a la soldadura desde una posicion de reflexion a), de segunda reflexion (paso completo) a una posicion b) de reflexion directa (1/2 paso), segun se indica en la FIG.No 7.8.-

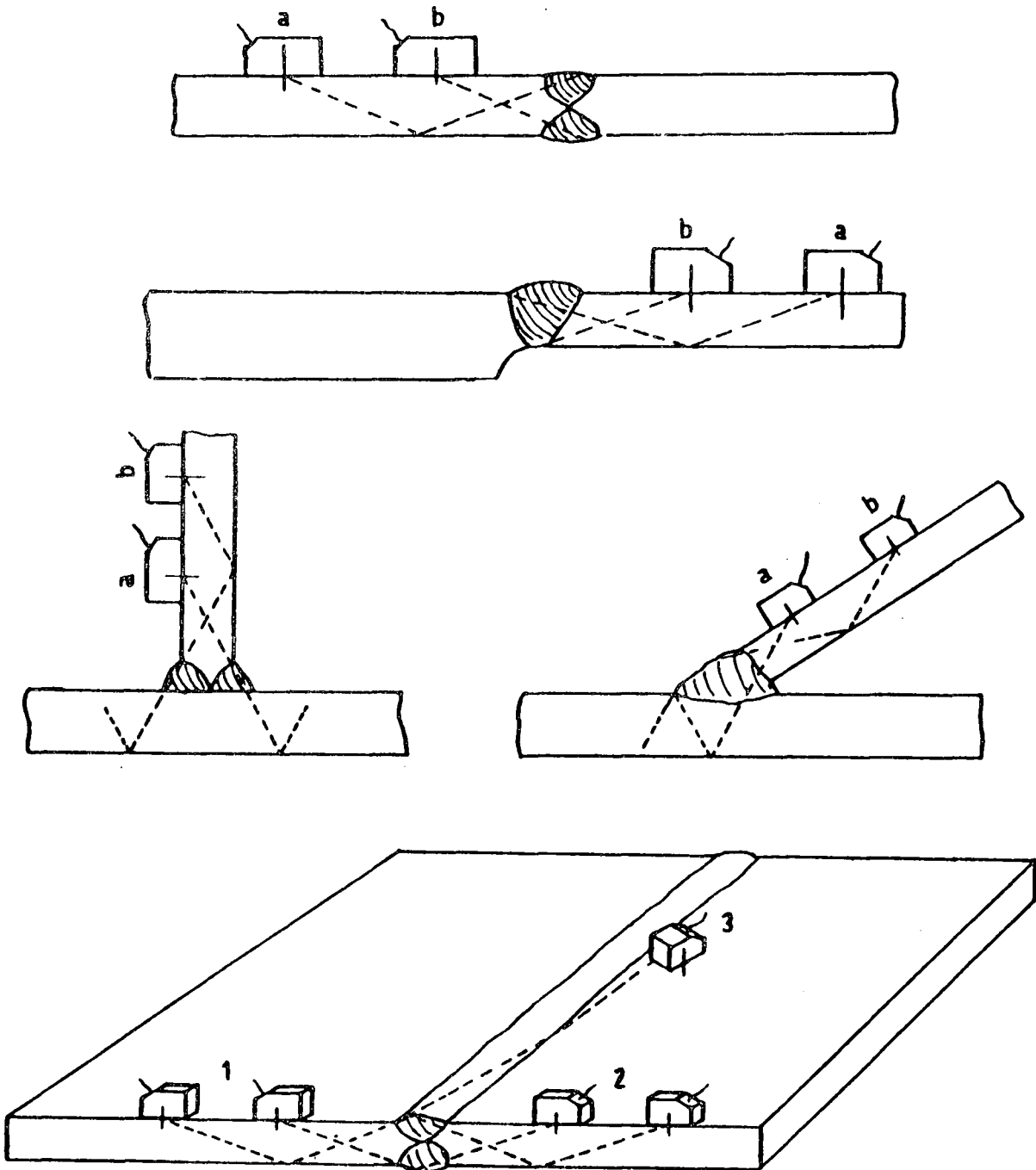


FIGURA 7.8.- EXAMEN DE SOLDADURAS POR ULTRASONIDOS.

Si se trata de chapas soldadas en T o en angulo el examen con palpador angular solo se podra hacer desde la chapa normal o angulada y no desde la chapa base. En este caso el procedimiento indicara ademas un examen adicional con palpador normal desde la chapa base.

Cuando se considera un examen ultrasonico completo, se debe utilizar mas de una direccion de examen. En todos los casos los angulos de examen se eligen de manera que el haz incida lo mas normal posible al plano de desarrollo de los posibles defectos. En soldaduras para el caso de faltas de fusion lateral es importante tratar de incidir normalmente al plano del bisel de preparacion de la chapa.

En los casos que ejemplificamos se puede utilizar como patron de calibracion de ganancia a un trozo de chapa del mismo material, preparada como se indica en la FIG.No 7.9.-

En la calibracion se fija la ganancia para la cual la altura del eco en la pantalla alcanza por ejemplo el 80 o/o en la distancia de mayor intensidad.

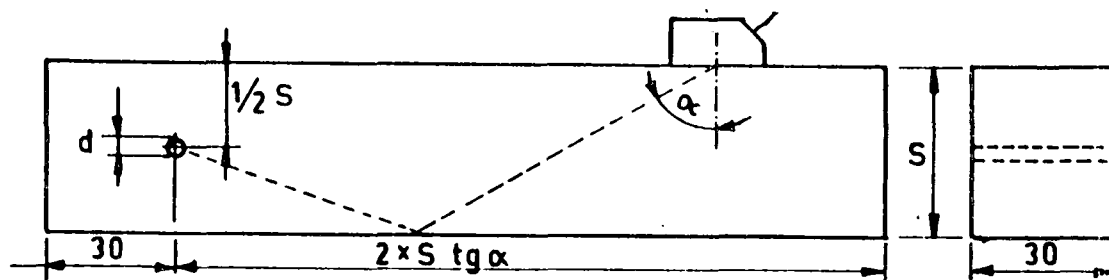


FIGURA 7.9.- PROBETA DE CALIBRACION DE GANACIA.

Este mismo patron se utiliza para calibrar en distancia la base de tiempo del osciloscopio, ya sea en camino sonico o en distancia proyectada.

Con el aparato calibrado el operador debe registrar la altura de la indicacion y la posicion del palpador en el momento del registro. Con estos datos puede calcular donde y a que profundidad se encuentra el defecto y si esta dentro del limite de aceptacion o rechazo.

8.-ENSAYO POR CORRIENTES INDUCIDAS

8.1.-CARACTERIZACION DEL METODO

De acuerdo con la metodología de los END el método de Corrientes Inducidas está caracterizado por la utilización de un campo de energía electromagnética en su interacción con materiales conductores de la electricidad.

La excitación y detección del campo electromagnético se realiza a través de bobinas electromagnéticas en las cuales fluye corriente alterna de alta frecuencia (100Hz a 10MHz).

El procesamiento de la información, obtenida de la interacción entre el campo electromagnético y el material, se hace en forma electrónica. Este procesamiento puede conducir a una simple presentación en un instrumento analógico, a una visualización de la señal en pantalla de tubo de rayos catódicos (TRC) o bien proveer un análisis detallado de las señales a través de una instrumentación más compleja que puede incluir etapas de computación.

La interpretación se basa principalmente en el análisis de las modificaciones de amplitud y fase de las tensiones que se desarrollan en la bobina de detección por influencia de variaciones en los parámetros de interés del espécimen que se ensaya.

Como en todos los métodos de END la evaluación de las indicaciones se hace en base a la comparación con las que se obtienen de probetas de calibración especialmente preparadas para cada caso particular de ensayo, según normas y procedimientos establecidos.

8.2.- CAMPO DE APLICACION Y LIMITACIONES

Este, como todos los métodos de END, tiene un campo de aplicación definido y limitaciones en su empleo.

Se aplica tanto en defectología como en evaluaciones. Se lo debe considerar como un método para exámenes superficiales y subsuperficiales, salvo que el espécimen sea de pequeño espesor (orden de mm), en cuyo caso se pueden lograr exámenes volumétricos.

Los principales problemas de defectología que pueden ser resueltos con este método, son la detección y evaluación de:

- _Discontinuidades (grietas, poros, pliegues, contracciones)
- _Inclusiones, segregaciones
- _Modificaciones de estructura y cambio de fases
- _Erosión, corrosión, fisuras de fatiga

Este método tiene también un amplio campo de aplicación en distintos tipos de evaluaciones, entre las que podemos mencionar:

- _Medición de propiedades físicas (permeabilidad y conductividad eléctrica)
- _Composición química (clasificación de aceros)
- _Medición de espesores (tubos delgados, láminas, alambres)
- _Medición de recubrimientos (material conductor sobre no conductor, material no conductor sobre conductor)

En cuanto a la limitaciones del método debemos considerar que:

- _El método sólo es aplicable a materiales conductores de la electricidad
- _La penetración del campo electromagnético es limitada, no permitiendo por lo tanto el examen volumétrico de especímenes que excedan un cierto espesor
- _Presenta dificultades para la localización de pequeñas discontinuidades en superficies extensas o de geometría compleja

Entre las principales ventajas que presenta este método podemos mencionar:

- _No requiere contacto entre transductores y material bajo examen
- _Es el método de ensayo que permite las más altas velocidades de examen.
- _Puede ser aplicado en materiales a alta temperatura.
- _Permite un rápido y fácil análisis de las indicaciones.

Actualmente las principales aplicaciones de este método a través de sus distintas técnicas se desarrollan en:

Control de Calidad;

- _mediciones de conductividad,
- _control de tratamientos térmicos,
- _examen de tubería de pared delgada (discontinuidades y dimensiones),
- _control de espesores de recubrimientos,
- _clasificación de aceros.

Mantenimiento;

- _inspección en servicio de intercambiadores de calor, condensadores de turbinas, generadores de vapor,
- _mantenimiento aeronáutico (ejes, eyectores, componentes de turbinas, etc),
- _detección y evaluación de fisuras de fatiga,
- _evaluación de desgaste de recubrimientos.

8.3.-FUNDAMENTOS DEL ENSAYO.

Si por un conductor o solenoide se hace pasar una corriente alterna, a su alrededor se generará un campo magnético, también alterno que dependerá de las condiciones de excitación y de las características del solenoide o conductor (Fig.1a). Si en el campo magnético así formado coloco otro solenoide, con sus extremos abiertos, entre estos extremos se desarrollará una diferencia de potencial eléctrico pero, como por el mismo no circula corriente, el campo magnético generado por el primer solenoide no se modificará.

En estas condiciones el circuito eléctrico corresponderá a un generador que hace circular corriente a través de una inductancia. Siendo la excitación de corriente alterna y considerando (idealmente) nula la resistividad del conductor, en cada ciclo se producirá un almacenamiento de energía en forma de campo magnético y una restitución de dicha energía como energía eléctrica, sin que se produzca pérdida de energía apreciable.

La condición descrita en el párrafo anterior corresponde a un circuito totalmente inductivo en el cual el valor total de impedancia "Z" sería igual a la inductancia reactiva de la bobina:

$$Z = X_L = 2 \pi f L = \Sigma \cdot L$$

Si en cambio cierro los extremos del segundo solenoide con una resistencia "R", por el mismo circulará una corriente que genera a su vez un campo magnético que se opone al que la origina. (Fig 1b)

Como en estas condiciones circula corriente también a través del solenoide secundario y de su resistencia tendrá en cada ciclo, además de creación de campos magnéticos, una pérdida de energía por efecto Joule en la resistencia de cierre "R".

En estas condiciones la impedancia de la primera bobina o solenoide a la cual aplicamos la tensión de excitación no se comporta más como una inductancia pura, sino como una impedancia que tiene una componente resistiva que está representada por la pérdida de energía en la resistencia de cierre de la segunda bobina que está acoplada únicamente a través del campo magnético.

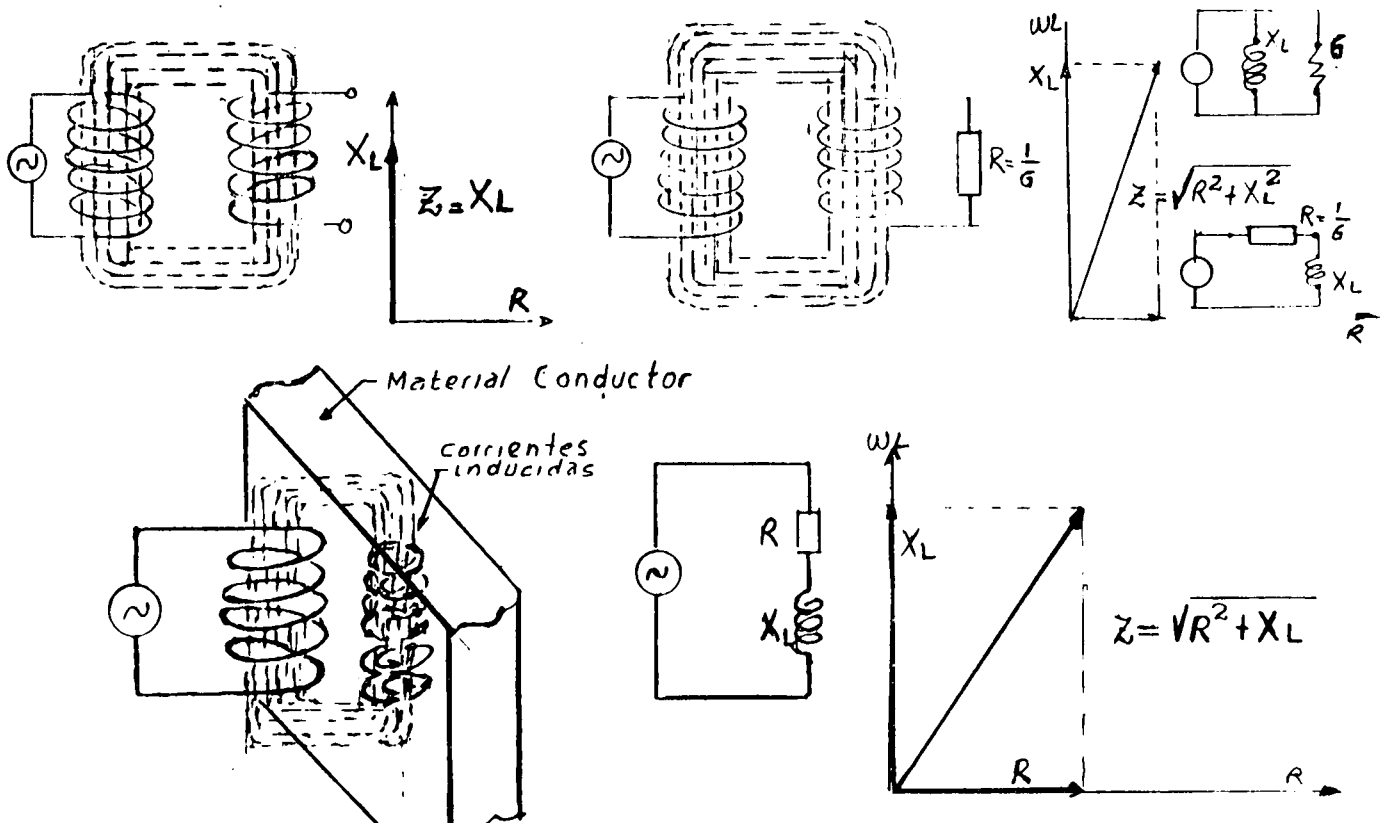


FIGURA 1.- Comportamiento de la impedancia de una bobina en aire o en proximidades de otra bobina o de material conductor.-

Si consideramos ahora un solenoide o bobina excitado por corriente alterna y en lugar del segundo solenoide colocamos un material conductor, de conductividad " Σ " de valor finito y resistividad $R=1/\Sigma$, podremos observar que este se comportará como un solenoide cerrado, en el cual el conductor estará representado por las líneas de corriente que, en forma circular o de torbellino origina el campo magnético variable creado por el primer solenoide. En este caso la "resistencia de cierre" corresponderá a la resistividad propia del material (Fig 1c).

Cuanto mayor sea la conductividad del material mayor será la circulación de corrientes inducidas, mayor será la pérdida de energía al aumentar la corriente ($I \cdot R$) y por lo tanto mayor será la variación de impedancia efectiva en el solenoide que utilizamos para la excitación.

La circulación de estas corrientes inducidas y su efecto modificando la impedancia de la bobina de excitación depende no sólo de la conductividad del material sino también de su permeabilidad, de las relaciones geométricas, de la frecuencia de excitación y de las discontinuidades que presente el material.

La aplicación del fenómeno descrito y el manejo de los parámetros indicados constituyen el principio de aplicación del método de ensayo por corrientes inducidas.

Se debe aclarar que si bien hemos basado nuestra explicación en el uso de la misma bobina de excitación como bobina de detección de los cambios producidos, en la práctica se suele utilizar una bobina para excitación y otra para detección, quedando ambas concatenadas por el flujo magnético a través del material bajo ensayo.

Por otra parte según el tipo de problema a resolver se utiliza más de una bobina con diferentes tipos de conexiones como veremos más adelante.

8.4.-SISTEMA BASICO PARA ENSAYOS

Los sistemas utilizados en el ensayo por corrientes inducidas varían en tipo y complejidad según la naturaleza del problema a resolver, pero en términos generales todos incluyen las siguientes funciones:

- a) Bobinas de ensayo en conexión absoluta, diferencial o de comparación.
- b) Fuente de excitación de la o las bobinas de ensayo. Frecuencias fijas o variables.
- c) Modulación de la señal de la bobina por acción de las variables del material bajo ensayo.
- d) Acondicionamiento de las señales obtenidas en la etapa de detección, para su amplificación.
- e) Amplificación de las señales.
- f) Demodulación de las señales. Análisis y discriminación de las señales.
- g) Presentación de las indicaciones en un instrumento de medida o en osciloscopio.
- h) Registro de las señales en cinta magnética u otros medios.
- g) Sistemas de soporte y manipulación de bobinas de ensayo y de las partes a examinar.

8.4.1.-Elementos de un sistema de ensayo típico.

En la Fig.2 se ha ejemplificado un sistema preparado para examen de tubería o de barras.

Un generador suministra la corriente de excitación a la bobina de ensayo y una señal de sincronización para selección de fase. El selector de fase provee además señales de disparo para el detector.

Al cargar las barras o tubos dentro de la bobina se produce una modulación en el campo electromagnético de la misma. Esta modulación se manifiesta como un cambio de fase y de amplitud en la tensión de salida de la bobina.

La salida de la bobina se alimenta al amplificador y luego de amplificada es demodulada en el detector.

La señal demodulada luego de algún filtrado y análisis es llevada a la pantalla de un TRC o a un registrador. Estas señales ya demoduladas pueden aun sufrir variaciones debido a: a) cambios en la velocidad de ensayo, c) cambios en la alimentación de los tubos en la bobina de ensayo.

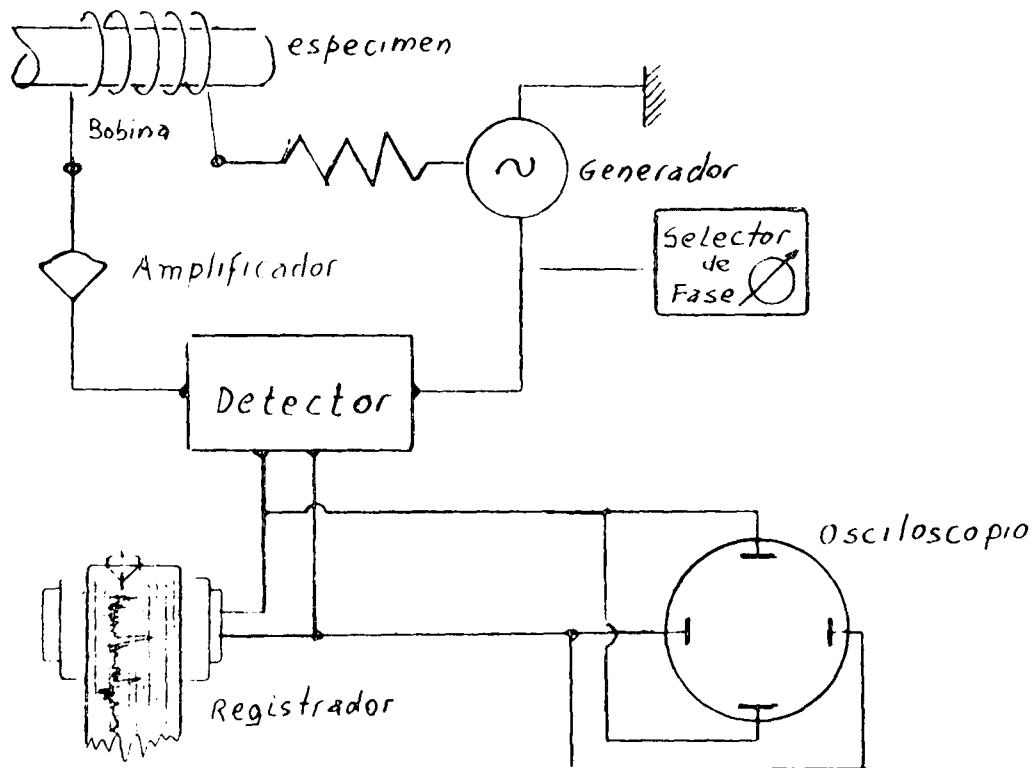


FIGURA 2.- Esquema de un sistema de ensayo por Corrientes Inducidas, para examen de tubos.-

5.- VARIABLES DE OPERACION

Las principales variables de operación que se tienen en cuenta en el ensayo por corrientes inducidas son:

- _ Impedancia de la bobina
- _ Conductividad eléctrica del material
- _ Permeabilidad magnética del material
- _ Efecto de separación (lift-off)
- _ Factor de llenado
- _ Efecto de borde
- _ Efecto pelicular

Este gran número de variables si bien permite un amplio campo de aplicaciones obliga a un profundo análisis de cada problema y de la técnica de ensayo a aplicar a fin de evitar que influyan en los resultados aquellas variables que no son motivo del examen.

La separación de variables constituye uno de los principales puntos de estudio en el diseño de los procedimientos de ensayo con corrientes inducidas.

8.5.- INSTRUMENTOS PARA ENSAYO POR CI

En la Fig.3 se muestran los circuitos simplificados de los distintos tipos de conexiones que se utilizan en instrumentos para CI. En estos circuitos se ha indicado la medición de la tensión de la señal obtenida por medio de un voltímetro que daría una indicación analógica conteniendo únicamente información sobre variaciones de amplitud y no de fase.

El más simple de los circuitos corresponde al tipo de instrumentos detectores de metales, por ejemplo.

Este tipo de instrumentos generalmente utilizan el efecto de "lift-of" y solo son sensibles a variaciones amplias de impedancia-

En los instrumentos con puente de impedancias (Fig. 3b y 3c) la señal se suele medir con sistemas más complejos que permiten obtener información sobre amplitud y fase.

En este tipo de instrumentos las evaluaciones de variación de impedancia se hace con mayor sensibilidad y precisión. En buenos equipos se logran mediciones de variación de impedancia del orden de 0,01% con suficiente exactitud.

Estos circuitos comprenden:

- _una fuente de excitación con frecuencia adecuada,
- _un puente con impedancias de caída y la bobina o bobinas de ensayo en una de las ramas,
- _una impedancia ajustable para el balance del puente en otra de las ramas.

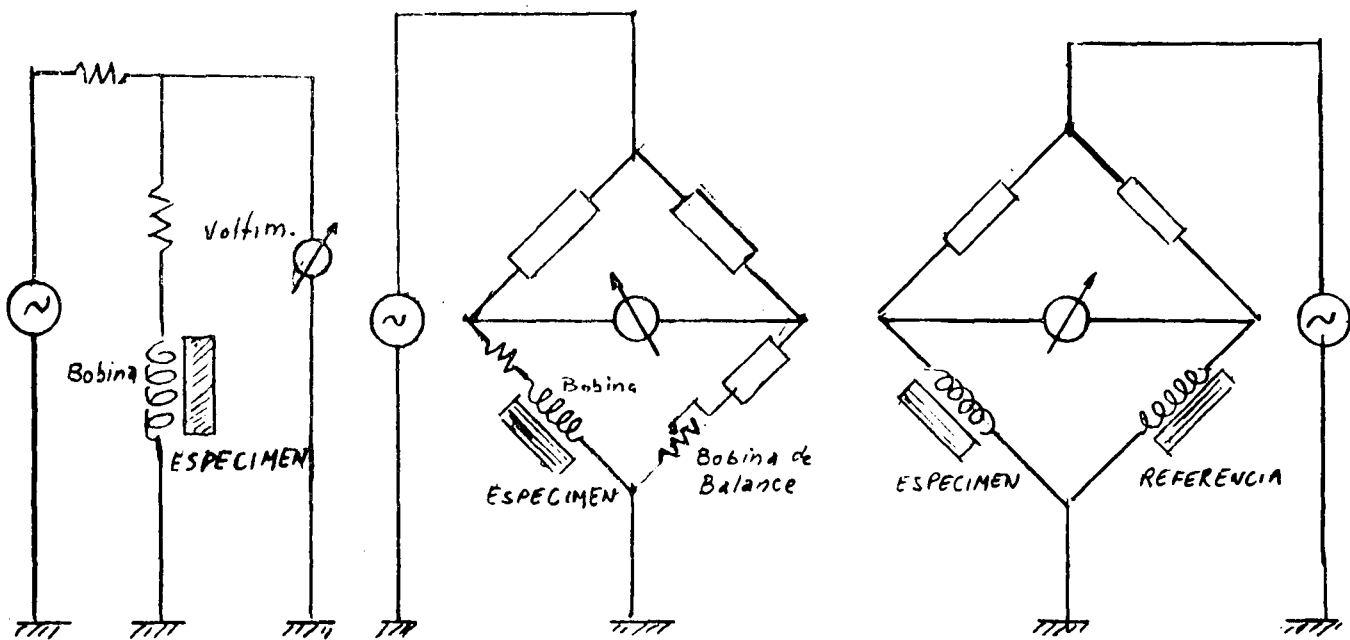


FIGURA 3.- Ejemplos de circuitos básicos usados en instrumentos para el ensayo por CI

La impedancia de balance puede estar constituida por una bobina igual a la de ensayo, en la cual se puede colocar una muestra de referencia. En este caso el puente se debe encontrar balanceado cuando la muestra en la bobina de ensayo es igual a la que se encuentra en la bobina de referencia

Equipos que disponen de puente de impedancias la medición de las señales en el puente no se hace con un voltímetro sino utilizando un sistema que permite evaluar amplitud y fase.

En estos casos la forma de presentación de las indicaciones depende del tipo y uso del equipo.

En equipos incorporados asistemas de producción las indicaciones pueden ser alarmas sonoras o luminosas que indican que se han excedido los niveles fijados en los parametros de control. La señal puede admas activar circuitos electricos que accionan mecanismos de separación de piezas defectuosas segun los niveles de aceptacion o rechazo fijados.

Existen equipos con presentación de las indicaciones en pantalla de TRC con memoria. En pantalla aparece una indicación en tiempo real y transiente de las variaciones del vector impedancia representado en su plano complejo. El inconveniente de que sobre la pantallase van superponiendo indicaciones sucesivas (si el TCR tiene pantalla con memoria) se subsana con borrados sucesivos y con el acoplamiento de un sistema de registro grafico o magnetico de las señales.

En el caso de tener que separar los efectos de distintas variables, algunos instrumentos permiten operar de manera que en condiciones de calibración el puente de impedancias no se encuentre compensado. Al trabajar con un punto de referencia distinto de cero se produce un cambio de origen en el plano de impedancias de la pantalla de manera que se hace posible la separacion de variables que afectan de distinto modo la amplitud y la fase de la señal, como se ejemplifica en la Fig.4

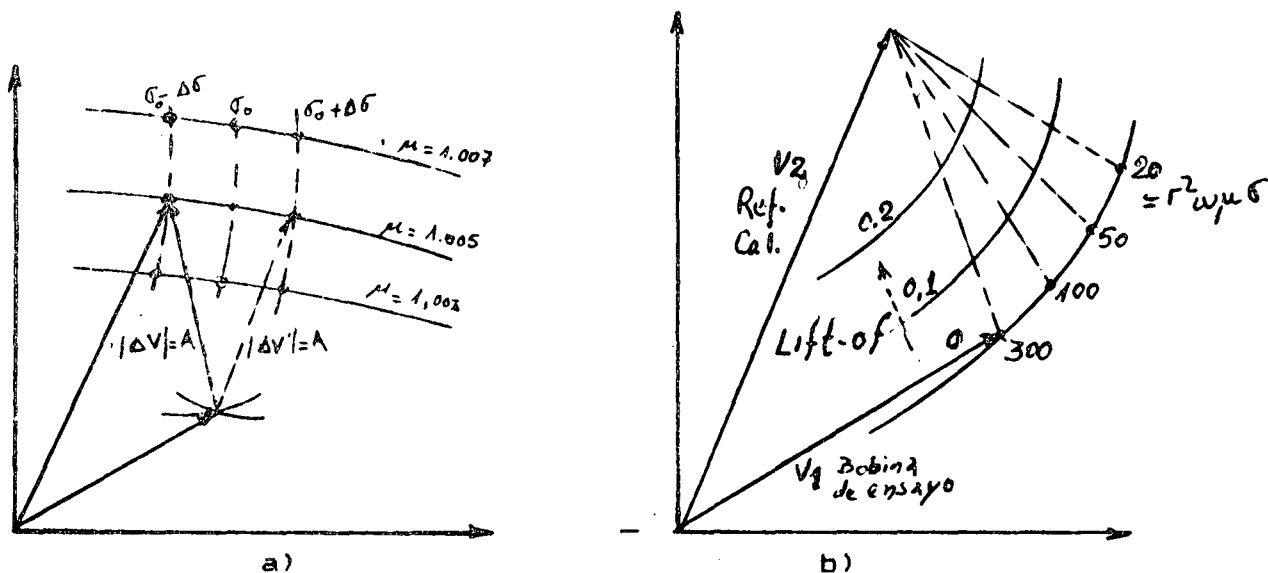


FIGURA 4.- Separación de variables por cambio de origen en el plano de impedancias. Fuente no compensado

8.5.1- Bobinas de ensayo

Las bobinas de ensayo constituyen una de las partes esenciales en el diseño de los procedimientos de ensayo con CI. Su forma y características depende en gran parte del proposito del ensayo y de la forma de las piezas a examinar.

En el diseño de su forma se debetener en cuenta que para la detección de grietas o discontinuidades planares el flujo resultante de las corrientes inducidas en la muestra debe ser normal al plano de la discontinuidad.

Los dos tipos de bobinas mas usuales son las bobinas envolventes (la muestra constituye el nucleo de la bobina de ensayo) y las bobinas tipo frontal (la bobina enfrenta la muestra). Son tambien muy

usadas las bobinas tipo sonda (internas) para el examen de tuberías desde el interior. Las bobinas frontales se distinguen en su diseño porque generalmente llevan un núcleo.

El número y disposición de los arrollamientos en las bobinas de ensayo determinan distintos tipos que se adecuan a las diferentes técnicas de aplicación.

Tenemos así:

Bobinas absolutas, con uno o dos arrollamientos. Si tiene dos arrollamientos uno actúa como excitación (driving coil) y el otro como bobina de detección. Fig. 5a.

Bobinas de comparación, con dos o cuatro arrollamientos. Uno o un par de ellos actúan como bobina de examen y el otro u otros actúan como bobina de comparación o de referencia. Fig. 5b.

Bobinas diferenciales o de autocomparación. Pueden estar constituidas por una bobina con dos arrollamientos opuestos o por dos bobinas. En este último caso una bobina es de excitación y la otra de detección con dos arrollamientos en sentido opuesto. Fig. 5c.

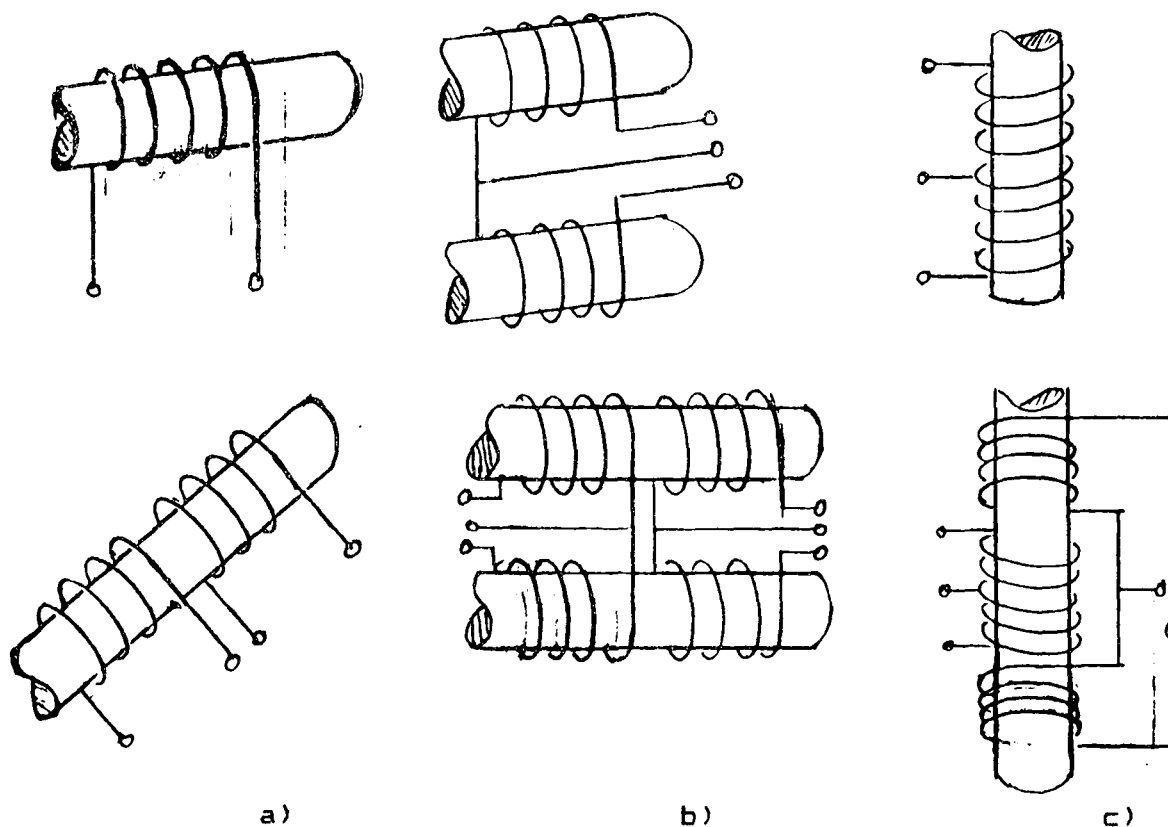


FIGURA 5.- Distintos tipos de conexiones en bobinas de ensayo por CI.

Cuando se trabaja con bobinas en conexión absoluta es más difícil controlar interferencias entre distintas variables pero se facilita la evaluación de modificaciones graduales en la variable de interés.

Con bobinas diferenciales se logra una clara identificación de cambios abruptos en la variable de interés pero resulta casi insensible para variaciones graduales. Por ejemplo no se puede usar esta conexión para evaluar variaciones de espesor en tubos pero sí es muy adecuada para detectar sus discontinuidades.

8.5.3.- DISCONTINUIDADES DETECTABLES POR CI

Ademas de permitir la medicion de parametros fisicos y evaluaciones dimensionales el ensayo por CI permite la deteccion y evaluacion de discontinuidades que ocurren en distintos tipos de procesos y afectan la calidad de los materiales metalicos.

Basicamente toda discontinuidad que afecte el flujo de las corrientes inducidas puede ser detectada por este metodo. Para que ello ocurra la discontinuidad debe presentar una seccion apreciable dispuesta perpendicularmente a las lineas de flujo de las CI generadas en el ensayo.

Si se trata del examen de tubos o barras usando bobinas envolventes, todas las discontinuidades superficiales que tengan componentes dimensionales longitudinales y radiales son facilmente detectables. En cambio seran dificilmente detectables aquellas discontinuidades laminares que se desarrollen en planos perpendiculares al eje del tubo o barra.

8.5.4.- CALIBRACION DEL ENSAYO

Como en todos los END, un requisito basico para lograr resultados confiables y comparables consiste en la correcta calibracion del equipo utilizado, que permita fijar la sensibilidad en forma adecuada cada vez que sea necesario.

Para este proposito se utilizan patrones de calibracion o referencia, sin cuyo uso el resultado tendra poco valor.

Generalmente se emplea una pieza, parte o trozo de tubo o barra segun sea el caso, que se selecciona de manera de asegurarse que no produzca indicaciones apreciables con la tecnica a utilizar, cuando se lo procesa a traves del sistema empleado.

Conseguida esta muestra se procede a hacer en la misma una serie de discontinuidades artificiales que deben servir de referencia. Existen normas (ASTM, API, etc) que establecen los requerimientos para estos patrones, indicando el tipo y forma de las discontinuidades a efectuar en los mismos, para distintos tipos de aplicaciones.

9.- ENSAYO DE PERDIDAS

9.1.- CARACTERIZACION DEL METODO

El ensayo de pérdidas consiste en la aplicación de métodos operatorios que permitan detectar la presencia y/o evaluar la magnitud del paso de un fluido a través de una pared de confinamiento que por diseño debe ser estanca.

Este paso de fluido que constituye una pérdida puede ser localizado en algún lugar de la pared de confinamiento o puede producirse a través de un área más o menos extensa que resulta permeable al fluido en cuestión.

Esta detección y/o evaluación se puede realizar utilizando varios métodos pero en todos los casos, considerando la metodología de aplicación de los END, el campo de energía a considerar es la diferencia de presión entre ambos lados de la pared de confinamiento. Como única excepción podría considerarse el uso de Líquidos Penetrantes que no requiere la condición de diferencia de presiones, pero en este caso se debe considerar que se aplica el Ensayo de Líquidos Penetrantes para detectar pérdidas, no se trata por lo tanto de lo definido como Ensayo de Pérdida.

Hemos definido una "pérdida" como el paso de un fluido a través de una pared pero en términos técnicos también se da el nombre de pérdida a la discontinuidad del material a través del cual se produce el paso del fluido.

En Inglés técnico el término "leak" se refiere a la discontinuidad que permite el paso de fluido mientras que "leakage" se refiere al fluido que ha pasado a través de la pérdida. En castellano este último término podría ser llamado "derrame" mientras que el término "leak rate" corresponde a tasa de derrame o velocidad de pérdida que es la cantidad de fluido perdido por unidad de tiempo.

9.2.- SENSIBILIDAD DEL ENSAYO

La magnitud de una discontinuidad que permite el paso de un fluido (pérdida) puede ser evaluada por la cantidad de fluido que se derrama a través de la misma en determinadas condiciones. Dado que esta cantidad depende no sólo del tamaño de la pérdida sino también de las condiciones (temperatura, diferencia de presión, etc.), cuando se trata de determinar la sensibilidad del ensayo de pérdida deben hacerse algunas aclaraciones.

El tamaño mínimo de agujero o discontinuidad que constituye una pérdida es difícilmente medible y las especificaciones de diseño no hacen referencia al mismo.

La velocidad de pérdida mínima detectable se refiere a la mínima cantidad de flujo fluido que puede ser detectado.

La cantidad de pérdida o derrame de fluido requerida para que un instrumento de una señal evaluable puede ser determinada con suficiente aproximación. Esta cantidad es usada generalmente para determinar la sensibilidad del instrumento pero no puede ser tomada como sensibilidad del ensayo.

La sensibilidad del ensayo dependerá no solo de la sensibilidad del instrumento sino del sistema o técnica aplicada (presión interior, presión exterior, vacío, etc.) y de las condiciones bajo las cuales se hace el ensayo (presión, temperatura, tipo de fluido, etc.).

Así por ejemplo: si disponemos de un espectrómetro de He como instrumento para el ensayo, su sensibilidad puede ser de 10^{-10} cm^3 (PTN)/seg. Aplicado a un ensayo en el cual existe un sistema de integración del flujo de pérdida durante un cierto tiempo la sensibilidad del ensayo puede llegar a 10^{-14} cm^3 (PTN)/seg. Por el contrario si se usa el mismo instrumento con una técnica de aspersión de He y aspiración directa la sensibilidad del ensayo puede bajar a 10^{-6} cc (PTN)/seg.

Otro factor importante en la sensibilidad de un ensayo de pérdida está constituido por el fluido de prueba utilizado.

Este fluido puede ser:

- Gas Inerte (He)
- Gas reactivo (NH₃) (Freon)
- Gas radioactivo (Kr85)

En ensayos con menores requerimientos de sensibilidad se suele usar directamente aire y en ciertos casos agua u otros líquidos.

Siempre el fluido de ensayo determina el tipo de instrumento a utilizar o dicho de otra manera para cada instrumento detector existe un fluido de prueba específico.

9.3. UNIDADES

En el párrafo precedente hemos utilizado la unidad cm^3 (PTN)/seg., que corresponde a una pérdida de 1 centímetro cúbico de gas a presión y temperatura normales (760 mm Hg - 20°C) por segundo.

De acuerdo a la ley de Boyle, a temperatura constante $PV = K$ por lo tanto se pueden utilizar otras unidades y establecer las relaciones correspondientes (Tabla 1)

La pérdida se expresa, prácticamente, por el producto de la presión por el volumen dividido por el tiempo, a la temperatura normal de 20°C.

Una pérdida puede ser expresada, también, en términos de potencia. En efecto:

$$P(\text{Kgf/cm}^2) \cdot V(\text{cm}^3) \cdot \text{seg}^{-1} = W(\text{Kgf.cm. seg}^{-1})$$

$$\text{Kgf.cm} = \text{trabajo}$$

$W(\text{Kgf.cm. seg}^{-1})$ es por lo tanto un valor de potencia y en las unidades que se adopten, podrá expresar el valor de una pérdida.

Unidades de Presión

$$1 \text{ Atm} = 760 \text{ Torr} \quad 1 \text{ Bar} = 10 \text{ Megadinas/cm}^2$$

$$1 \text{ mBar} = 100 \text{ Pascal} \quad 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Newton/m}^2$$

Cantidades de Gases

$$1 \text{ g aire PTN} = 0,773 \text{ l}$$

$$1 \text{ g aire a 1Atm y 20°C} = 0,829 \text{ l} = 829 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ Atm. cm}^3 = 0,76 \text{ Torr.litro} = 1,013 \text{ mBar. litro}$$

Tasa de flujo gaseoso

$$1 \text{ Lusec} = 10 \text{ Torr.litro/seg} = 1 \text{ a Hg.litro/seg.}$$

$$1 \text{ Atm.cm}^3/\text{seg} = 760 \text{ Lusec}$$

$$1 \text{ mBar. litro/seg} = 0,76 \text{ Lusec}$$

$$1 \text{ Clusec} = 0,01 \text{ Lusec}$$

9.4.- TIPOS DE PERDIDAS

Existen dos tipos básicos de pérdidas: pérdidas reales y pérdidas virtuales.

Las pérdidas reales están constituidas por el flujo del fluido a través de una discontinuidad discreta que puede tener cualquier forma o tipo de sección y recorrido más o menos directo a través de la pared de confinamiento pero que permite en todos los casos establecer un flujo directo del fluido. En este caso la pérdida real se considera además pérdida localizada.

Existen también pérdidas reales extendidas que son debidas fundamentalmente a fenómenos de permeabilidad del fluido a través de la pared de confinamiento. Este proceso involucra procesos de difusión a través del sólido y puede también comprender varios fenómenos de superficie, tales como absorción, disociación, migración y desorción de moléculas de gas.

Pérdidas virtuales son aquellas que se producen especialmente en los sistemas que operan en alto vacío. En este tipo de pérdida no hay realmente un pasaje de fluido a través de la pared sino que los gases se absorben en el material durante los períodos en los cuales se encuentran a mayor presión y luego son restituidos al sistema por desorción a bajas presiones.

9.5.- TIPOS DE FLUJO

El tipo de flujo correspondiente a una instancia específica de pérdida en un componente es una función de la diferencia de presión, tipo de gas y configuración de la pérdida.

Los seis tipos de flujo que se pueden considerar son los siguientes: Permeabilidad, flujo molecular, flujo transicional, flujo viscoso, flujo laminar y turbulento y flujo de obstrucción.

9.5.1.- Permeabilidad

Es el pasaje del fluido a través de una barrera sólida que no tiene agujeros suficientemente grandes, tales que solamente una fracción mínima del total puede pasar a través de uno de ellos. Este proceso incluye la difusión a través del sólido así como otros fenómenos tales como la absorción, disociación, migración y desorción.

9.5.2.- Flujo Molecular

Ocurre cuando el camino libre medio de las moléculas del gas es mayor que la mayor sección transversal de la pérdida. La relación entre λ = camino libre medio del gas y d = diámetro del conductor se conoce como el número de Knudsen y se expresa por

$$NK = \frac{\lambda}{d}$$

λ es la distancia promedio que una molécula puede recorrer sin chocar con otra. Su valor es una función inversa de la presión y por lo tanto en un flujo molecular la pérdida (derriame) es proporcional a la diferencia de presiones entre ambas caras de la pared. Este tipo de flujo se tiene generalmente en ensayos al vacío.

9.5.3.- Flujo de Transición

Ocurre cuando el número de Knudsen es aproximadamente igual a 1, es decir, cuando λ es semejante al diámetro del conducto de pérdida.

$$0,01 < NK < 1,0$$

9.5.4.- Flujo Viscoso

Ocurre cuando el número de Knudsen es $< 0,01$, es decir el camino medio de las moléculas λ es mucho menor que el diámetro del conducto de pérdida. En este tipo de flujo la pérdida (derrame) es proporcional a la diferencia de los cuadrados de las presiones.

Se presentan dos tipos de flujo viscoso: el flujo laminar y el flujo turbulento.

En el flujo laminar la distribución de velocidades en la vena fluida según una sección transversal corresponde a una parábola con su mayor valor en el centro del conducto.

Cuando el número de Reynolds es superior a un valor crítico (aproximadamente 2100 para conductos cilíndricos) se tiene el flujo turbulento en el cual las partículas recorren caminos erráticos describiendo vórtices. Este tipo de flujo no ocurre prácticamente nunca en el ensayo de pérdidas.

9.5.5.- Flujo de Obstrucción o Sónico

Supongamos que existe un paso en forma de orificio o tubo venturi y asumamos que la presión corriente arriba del orificio se mantiene constante. Si disminuimos gradualmente la presión después del orificio la velocidad del fluido a través del orificio aumentará gradualmente y podrá llegar a la velocidad del sonido, si la presión se baja hasta un valor llamado presión crítica. Si la presión, luego del orificio, se baja por debajo de la presión crítica no se consigue aumentar la velocidad del fluido a través del orificio. La consecuencia es que con el valor de presión crítica descrito se alcanza el máximo flujo de masa posible a través del orificio.

9.6.- TIPO DE FLUJO EN LAS PERDIDAS

Una dada pérdida puede exhibir distintos tipos de flujo, según el gradiente de presión, la temperatura y el tipo de fluido. Por lo tanto es importante identificar el tipo de flujo posible a fin de poder predecir el efecto de cambios en estas variables. Por otra parte para una dada temperatura presión y tipo de fluido será la configuración de la pérdida la que determinará el tipo de flujo.

Dado que una pérdida puede estar constituida por un agujero, una fisura, permeabilidad o una combinación de estos es a menudo imposible dar una seguridad sobre el tipo de flujo, pero en general se pueden dar indicaciones empíricas como las que siguen:

Si la tasa de pérdida es:

- menor que 10^{-6} atm.cc/seg. el flujo es usualmente molecular.

- _ menor que 10 Atm.cc/seg. ; el flujo es usualmente molecular
- _ entre 10 y 10 Atm.cc/seg.; generalmente flujo de transición
- _ entre 10 y 10 Atm.cc/seg.; generalmente flujo laminar
- _ > 10 Atm.cc/seg. ; flujo generalmente turbulento.

9.6.- TECNICAS DE ENSAYO

Las diferentes técnicas de ensayo pueden ser clasificadas según la presión y el flujo del sistema. A su vez se debe tener en cuenta si se tratan de técnicas de detección directa o a través de un gas trazador.

9.6.1.- Tecnicas de detección directa

Son de aplicación para detección de pérdidas relativamente grandes con baja sensibilidad.

9.6.1.1.-Acústicas:

El flujo turbulento de un fluido a través de un orificio o conducto produce la emisión de ondas en el rango sónico y ultrasónico.

Las pérdidas mayores pueden así ser detectadas directamente por el oído. Para mejorar la sensibilidad se usan estetoscopios y micrófonos direccionales. Cuando se trata de ubicar pérdidas más pequeñas con mayor sensibilidad se usan transductores ultrasónicos en el rango entre 35 y 40 KHz.

La performance de un transductor ultrasónico es función de la distancia, del diámetro de la pérdida y de la presión. A su vez el nivel de sonido producido es una función inversa del peso molecular del gas.

Si el ruido de fondo es bajo se pueden alcanzar sensibilidades del orden de 10^{-2} Atm.cc/seg.

9.6.1.2.-Ensayo de Burbujas:

Se puede aplicar de dos maneras: sumergiendo el recipiente presurizado en una cuba con líquido o cubriendo con solución jabonosa (de baja tensión superficial) las superficies a inspeccionar manteniendo el recipiente presurizado.

Cuando se utiliza inmersión, la sensibilidad del ensayo aumenta al reducir: a) la presión sobre el líquido, b) la densidad del líquido, c) la tensión superficial del líquido y d) la profundidad.

Tanto en inmersión como por aplicación de solución jabonosa se debe tener cuidado en no producir burbujas en el manejo de las soluciones. Las superficies deben estar limpias y se requiere operadores bien entrenados.

En óptimas condiciones de sensibilidad puede llegar a 10^{-4} Atm. cc/seg., aunque se considera normal 10^{-3} Atm. cc/seg.

9.6.2-Técnicas de Detección de Gases

Existen muchos tipos de detectores de pérdida basados en reacciones sobre un gas o grupo de gases específicos sean de orden físico o químico. Describiremos algunos de los más usuales:

9.6.2.1.-Detectores químicos

Uno de los más simples utiliza la reacción coloreada de la fenolftaleína u otros indicadores de pH para detectar la reacción alcalina del amoníaco (NH_3) al solubilizarse en agua. El gas indicador consiste en una mezcla del 1 al 10% de NH_3 en aire con el cual se presuriza el recipiente a ensayar. Exterio^rmente se aplica la solución de fenolftaleína que se colorea de rojo en los puntos de pérdida. El indicador se puede aplicar en forma de cinta. Usando estas cintas se pueden lograr sensibilidades del orden de 10^{-6} Atm. cc/seg.

Otro tipo de detector de reacción química está constituido por las llamadas torchas de halógeno que consisten en un mechero que calienta una plancha de bronce. El aire primario es tomado por el mechero a través de un tubo de plástico que actúa como aspirador del gas trazador el cual al ingresar a la llama produce una coloración característica. La sensibilidad que se suele alcanzar es del orden de 10^{-3} Atm. cc/seg.

9.6.2.2.- Diodo Detector de Halógenos utiliza un detector de gases halógenos que es sensible a la mayoría de los gases que contienen cloro, bromo, iodo o fluor. Por lo tanto en el ensayo se debe usar uno de tales gases como trazador, con alguno de los cuales se presuriza el recipiente y desde el exterior se pasa la sonda que aspira las pérdidas para enviarlas al detector que exitado da la indicación correspondiente.

El detector opera bajo el principio de la emisión de iones de una placa caliente a un colector. La emisión de iones positivos aumenta con el aumento de gas halogenado presente. Esta corriente de iones es amplificada y da una señal eléctrica de la pérdida. La sensibilidad puede llegar a 10^{-9} Atm. cc/seg pero depende en mucho del gas trazador usado. Hay diferentes tipos pero en todos los casos comprenden una unidad de control y una sonda a través de la cual se arrastra aire con un caudal de aproximadamente 30 cu.in. por minuto.

9.6.2.3.- Detector de Hexafluoruro de Azufre

En este caso el gas trazador es el hexafluoruro de azufre y el detector está basado en el principio de captura electrónica

La cámara sensitiva está constituida por una celda cilíndrica con un electrodo central aislado.

La pared interna de la celda está recubierta con un radioisotopo (P.Ejem. 300 mCi de Tritium).

Los electrones de baja energía emitidos por el radioisotopo son colectados por el electrodo central que se encuentra polarizado por una fuente de tensión. La corriente eléctrica producida es amplificada y medida en un microamperímetro. El cero del equipo se fija pasando nitrógeno puro a través de la celda.

Cuando un gas alta sección de captura electrónica, como lo es el hexafluoruro, entra en la celda la corriente electrónica disminuye proporcionalmente al flujo, con lo cual puede evaluarse la pérdida. La sensibilidad del ensayo puede alcanzar a 10 Atm. cm³/seg. La sensibilidad del detector es de una parte de hexafluoruro por 10 partes de aire.

9.6.2.4.-Espectrometro de Masa de Helio

Un espectrómetro de masa es básicamente un aparato para separar partículas cargadas, pero en el caso de los espectrómetros usados para detección de pérdidas el diseño es tal que el aparato sólo es sensible a la presencia de iones de helio, gas que se usa como trazador.

Su principio de funcionamiento es el siguiente: La muestra de gas (que contendrá trazador en proporción a la pérdida del sistema) es aspirada hacia el aparato que opera con un vacío mejor que 10^{-4} torr. De esta manera entra en el analizador donde las moléculas son bombardeadas por una corriente de electrones emitidos por un filamento, como consecuencia del choque de los electrones las moléculas se ionizan positivamente y en su trayecto atraviesan un campo magnético transversal que determina sobre la trayectoria de los iones distintos radios de curvaturas. Según su masa el aparato analizador está contruido de tal manera que según el radio de curvatura adquirido por los iones de helio estas vayan a chocar sobre un colector de iones resultando una corriente eléctrica que es proporcional a la cantidad de iones de helio que ingresaron al detector.

La sensibilidad de un espectrómetro de masa de helio es de cerca de 10^{-12} Atm. cc/seg, no obstante esta sensibilidad no se puede alcanzar en el ensayo de sistemas grandes en razón de contaminaciones de fondo, permeabilidad del helio, fenómenos de absorción y desorción etc., por lo que la sensibilidad práctica en estos casos se reduce a 10^{-9} , 10^{-8} Atm. cc/seg.

9.6.2.5.-Detectores de Radiación

Estas técnicas de detección de pérdidas pueden usarse tanto con trazadores gaseosos (Kr 85) como con trazadores en solución líquida (Na 24).

En estos casos el detector está constituido por tubos Geiger-Muller, cámaras de ionización o cristales de centelleo. El método se basa en la alta sensibilidad de detección de la radioactividad emitida por el elemento (radioisótopo) usado como trazador.

9.7.- PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

Independientemente del sistema trazador-detector utilizado en el ensayo de pérdidas existen procedimientos que son de aplicación general y que dependen fundamentalmente del tipo de sistema a ensayar y de la sensibilidad requerida.

La base de todos los procedimientos consiste en cubrir el área de examen con un fluido trazador y establecer una diferencia de presión a través de la pared yasea presurizando o haciendo vacío. La aparición del fluido trazador en el medio de más baja presión es entonces determinada y evaluada.

El ensayo puede ser hecha en condiciones de flujo transiente, es decir dinámico o bien con integración de flujos, es decir estático.

9.7.1.-Tipos de elementos a ensayar

Ya dijimos que el tipo de elemento determina en parte el procedimiento de ensayo. Debemos considerar entonces que desde este punto de vista conviene distinguir dos tipos diferentes:

- a) Unidades abiertas
- b) Unidades selladas

En las primeras existe acceso de ambos lados y están referidas a unidades o componentes de plantas industriales o instalaciones nucleares, que son sometidas a procesos de montaje o ensamblaje con otras unidades. Se trata de tanques, recipientes de presión, válvulas, cañerías, etc.

En las del segundo tipo no existe acceso interior y corresponden generalmente a productos de producción masiva tales como tubos de rayos catódicos, unidades selladas para refrigeración, válvulas electrónicas, elementos combustibles nucleares, etc.

9.7.1.1.-Unidades abiertas

- a) Sonda detectora: con presurización interior se incluye un trazador y desde el exterior se utiliza una sonda detectora o medio detector. En la Figura 1 se esquematiza este procedimiento utilizando un gas como trazador.

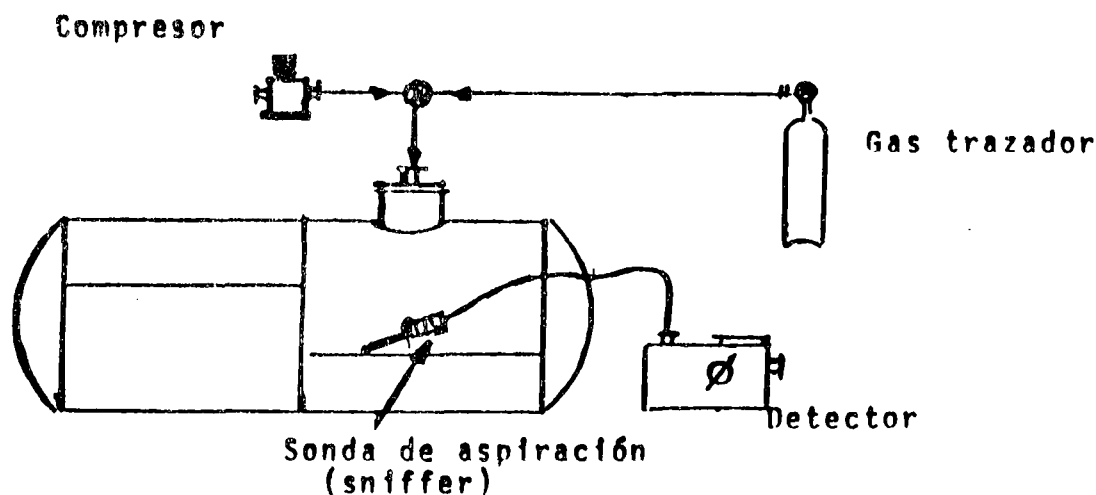


FIGURA 1

En estos casos, tratándose de especificación de baja sensibilidad se puede utilizar también líquido durante el ensayo de presión hidrostática. La detección puede ser visual o aplicando papel soluble que al humedecerse permite el paso de corriente desde una cinta de aluminio polarizada convenientemente y aislada del recipiente por el papel seco. Señales eléctricas son indicación de la pérdida.

b) Sonda trazadora: En ciertos casos se trabaja con vacío interior y desde el exterior se aplica una sonda que distribuye sobre las áreas de examen el gas trazador (no se utiliza líquido) el cual es aspirado a través de la pérdida y desde dentro del sistema se lo extrae con el sistema de vacío para que llegue al detector. Este segundo tipo de procedimiento que se ilustra en la Figura 2, presenta mayores inconvenientes en su aplicación cuando se trata de sistemas grandes. Principalmente por los problemas de evacuación hasta los valores requeridos (10^{-4} - 10^{-5} torr.) y además por la distribución de los flujos gaseosos dentro del sistema, donde se forman laminaciones y flujos irregulares que falsean los resultados.

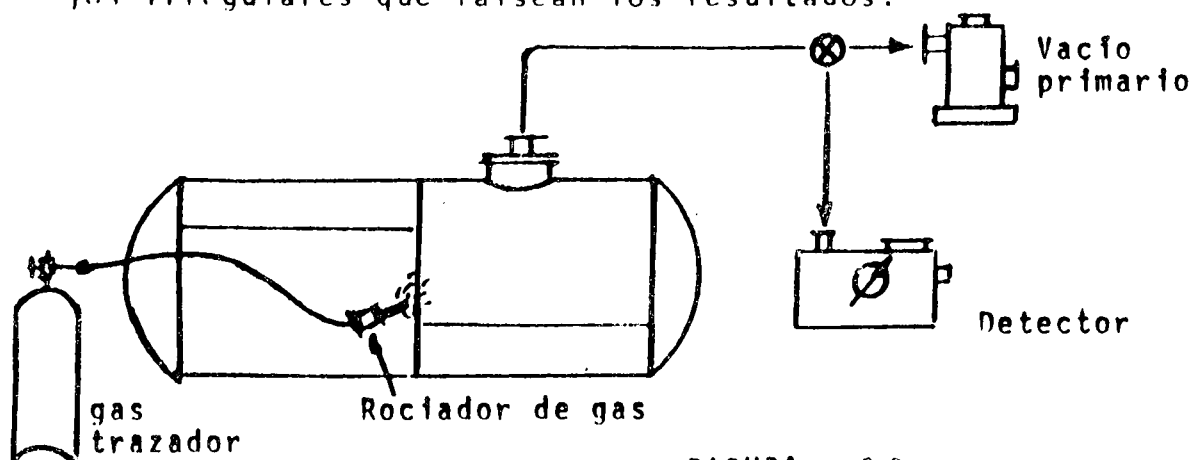


FIGURA 3.2

9.7.1.2.-Unidades selladas

Las unidades selladas pueden tener o no trazador cuando no tienen un trazador intrínseco, el procedimiento clásico consiste en colocar el elemento dentro de un recipiente que se presuriza con gas trazador. Este gas se introduce por la pérdida dentro de la unidad. En una segunda etapa se retira el gas trazador del recipiente de presurización se lava con otro gas inerte para eliminar restos de gas trazador luego se vuelve a colocar el elemento a ensayar dentro del recipiente y se hace vacío para extraer el gas trazador que se hubiera incorporado por la posible pérdida. Figura 3.

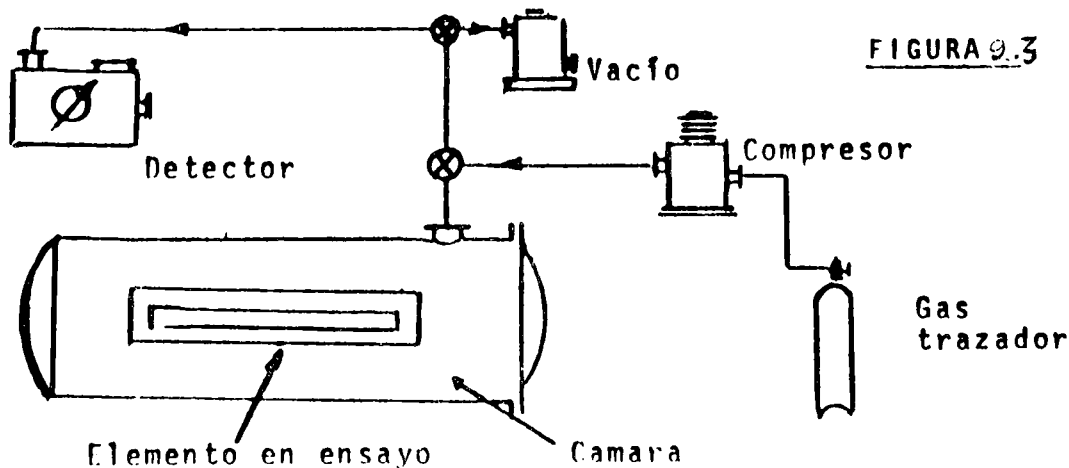


FIGURA 9.3

En unidades selladas con trazador como sería el caso de barras combustibles Atucha I, los elementos a ensayar se colocan dentro de un recipiente que es evacuado, en caso de pérdida el helio sale de la barra combustible y pasa al sistema detector. Figura 4.

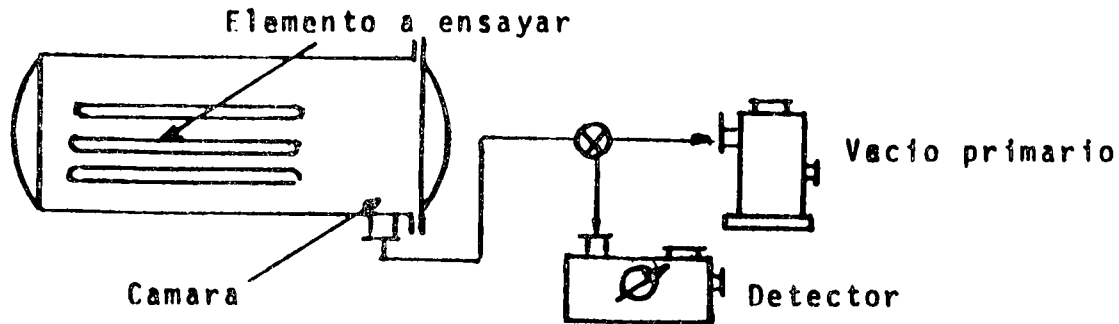


FIGURA 3.4

9.8.- SELECCION DE TECNICA DE ENSAYO

Una selección correcta del método de ensayo de pérdida, debe permitir optimizar la sensibilidad, el costo y la confiabilidad del ensayo.

Los distintos métodos se deben considerar en relación con su aplicabilidad en cada caso particular considerado.

La Norma ASTM E-432/81 da una guía para la selección de los métodos de ensayo de pérdida, analizando las distintas situaciones y condiciones en que se suelen requerir estos ensayos.

En la Fig.9.5.- se muestra un cuadro para facilitar la selección, de acuerdo a la norma mencionada.-

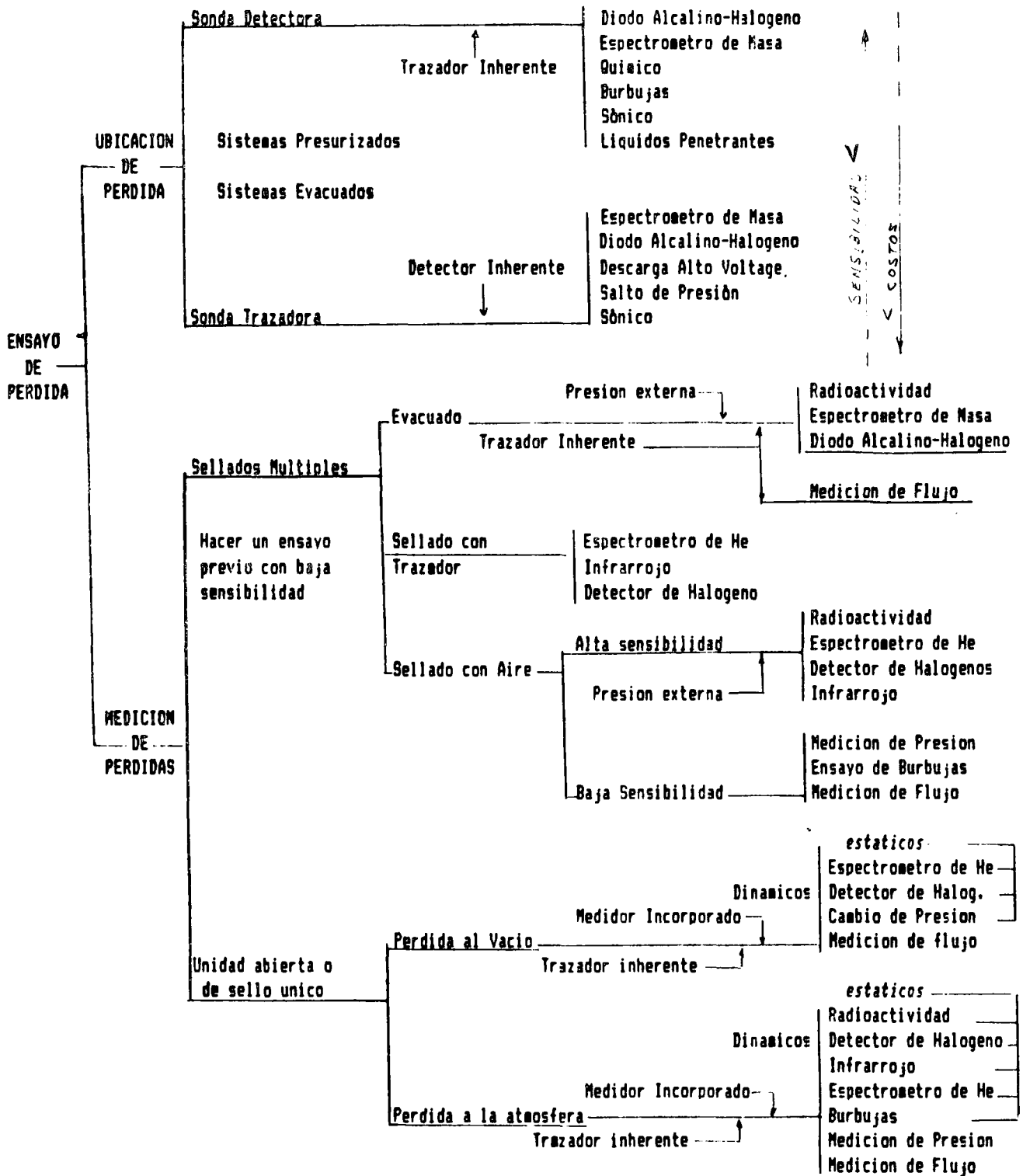


FIGURA.:9.5.- SELECCION DE METODOS DE ENSAYO