

300617

19  
2 ej



# UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA  
Incorporada a la U. N. A. M.

## APLICACION DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN SOLDADURA

**T E S I S   P R O F E S I O N A L**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
Ingeniero Mecánico Electricista  
**P R E S E N T A**  
**ERNESTO MARCELINO ALVAREZ SOLIS**  
Director de Tesis: Ing. Ezequiel Ruiz Muñiz

MEXICO, D. F.

1990

**FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

	Pág
Introducción	1
<b>Capítulo I: Generalidades</b>	<b>3</b>
1.1 Fundamentos	3
1.2 Juntas de soldadura	4
1.3 Soldadura con arco eléctrico	9
1.3.1 Soldadura Automática	10
1.3.2 Soldadura con protección gaseosa	11
1.3.3 Soldadura con arco sumergido	13
1.4 Soldadura con rayo energético	15
1.5 Soldadura con termita	16
1.6 Soldadura con gas	18
1.7 Soldadura a presión	19
1.8 Soldadura con latón, soldadura dura, y soldadura blanda	22
1.9 Ensayos no destructivos	25
1.10 Código ASME	30
<b>Capítulo II: Radiografía</b>	<b>33</b>
2.1 Generalidades	33
2.2 Fuentes de radiación	33
2.3 Materiales de radiografiado	38
2.3.1 Cobalto 60	38
2.3.2 Cesio 137	39
2.3.3 Iridio 192	39
2.4 Radiaciones	39
2.5 Factor de equivalencia radiográfico	39
2.6 Componentes de una exposición radiográfica	41
2.7 Indicadores de imagen (penetrámetros)	44
2.8 Producción de la imagen radiográfica	48
2.9 Identificación de defectos radiográficos	51
2.10 Estándares de aceptación	54
2.11 Normas de seguridad	59
<b>Capítulo III: Ultrasonido</b>	<b>66</b>
3.1 Generalidades	66
3.2 Transductores	68
3.2.1 Tipos de transductores	69
3.2.2 Grupos de transductores	69
3.2.3 Propagación de ondas	70
3.2.4 Vibraciones ultrasónicas	75
3.2.5 Reflexión de ondas ultrasónicas	76

3.3.6 Refracción y conversión de ondas ultrasónicas	77
3.3.7 Análisis matemático del perfil haz del transmisor ultrasónico	78
3.3.8 Sistemas ultrasónicos	81
3.3.9 Representación	84
<b>Capítulo IV: Líquidos penetrantes</b>	<b>89</b>
4.1 Antecedentes	89
4.2 Fundamentos, aplicaciones y limitaciones	89
4.3 Naturaleza y propiedades de los líquidos penetrantes	94
4.4 Naturaleza y propiedades de los reveladores	96
4.5 Tiempo de penetración	97
4.6 Tiempo de eliminación, revelado. Formación de las indicaciones	97
4.7 Aspecto de las discontinuidades	100
<b>Capítulo V: Examen de partículas magnéticas</b>	<b>104</b>
5.1 Generalidades	104
5.2 Características de los campos magnéticos	105
5.3 Efectos de las discontinuidades	108
5.4 Características de las discontinuidades	110
<b>Conclusiones</b>	<b>115</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>116</b>

## INTRODUCCION

La presente tesis tiene por objeto al instruir acerca de los ensayos no destructivos (END) al personal interesado que por primera vez tiene contacto directo con este tipo de trabajo.

Se considera de suma importancia en el conocimiento de este tipo de ensayos no destructivos, el hecho que las interpretaciones hechas por los técnicos puedan ser evaluadas por el ingeniero o supervisor encargado del proyecto y que se inicien por primera vez en este tipo de trabajos.

Aunque el objetivo de esta tesis no es dar una norma de aceptación específicas, ya que esta depende del proyecto u obra que se esté evaluando, el trato de dar un enfoque de cómo se encuentran y se interpretan los distintos defectos en las pruebas realizadas, para así poder evaluar problemas específicos que se encuentren durante el análisis de las pruebas.

Otro punto importante que se abordó, es dar los lineamientos que se deben seguir en el momento de aplicar los ensayos no destructivos, siendo este punto de suma importancia para asegurar la correcta ejecución de los mismos y así obtener un resultado confiable. Este punto en muchas ocasiones, en la práctica, no se lleva a cabo gracias a que el personal administrativo o supervisor de la obra o proyecto únicamente recibe los resultados de la prueba y no se lleva a cabo una inspección adecuada de la aplicación de los ensayos, para así asegurar la confiabilidad de los mismos.

Se debe de tomar en cuenta, que este trabajo no pretende sustituir ningún código o norma específicos, si no que trata únicamente de establecer los lineamientos en la aplicación de cualquier examen, ya sea por radiografía, ultrasonido, partículas magnéticas y líquidos penetrantes. Así así, y para tener una idea de estas normas de aceptación, se ha incluido en el capítulo correspondiente a radiografiado un apartado que indica este tipo de norma. Se escogieron las normas del código ASME sección I, ya que los estándares de aplicación para los ensayos no destructivos también están dados generalmente en este mismo código.

Especial énfasis recibe el radiografiado, considerado el examen más importante, ya que es el de mayor aplicación dentro de la industria en la actualidad. Otro punto importante es el hecho que dentro del grupo de ensayos no destructivos es el más difícil de interpretar debido a la complejidad que supone la lectura de los resultados, las dificultades que intervienen para la aplicación de los mismos y las normas de seguridad que deben de intervenir en la aplicación de los mismos.

Posteriormente se describen las pruebas de ultrasonido,

líquidos penetrantes y partículas magnéticas, de menor importancia en la industria, ya que su registro muchas veces no es cuantitativo sino cualitativo.

A la descripción de todos los ensayos no destructivos se considera de importancia para la comprensión de los mismos tener las bases suficientes acerca de soldadura. Para cumplir con este objetivo se elaboró un capítulo referente a soldadura, en el que se incluyen los principios básicos del proceso, la simbología de soldadura y de ensayos no destructivos y una breve descripción del código ASME que sirve como referencia para la aplicación de las pruebas no destructivas.

## CAPITULO I GENERALIDADES

### 1.1 Fundamentos

Una definición general del término soldadura puede ser un procedimiento de unión de materiales cuyo objetivo sea formar un todo continuo y homogéneo, bajo la acción directa del calor como energía disponible para el proceso, con o sin la adición de un material externo de aporte.

Por otro lado de manera específica se dice que soldar es el método o proceso de unir o juntar metales, ya sea porque se calientan las piezas metálicas hasta que se funden y se unen entre sí, o que se calientan hasta una temperatura inferior a su punto de fusión y se unen una con otro material también fundido, como relleno, o bien que se calientan hasta que se ablandan ambas piezas lo suficiente para poder unirlos por martillos o por presión.

Con base en las consideraciones anteriores, es posible establecer que para toda soldadura existirá un material base que lo constituyen las piezas por unir, más un material de aporte que sólo se utiliza en determinados procesos de soldadura, y un fundente o atmósfera de gas inerte que sólo se emplean en la soldadura de ciertos metales. En la figura 1.1 se muestra en forma esquemática la ubicación de los elementos que forman una unión de soldadura

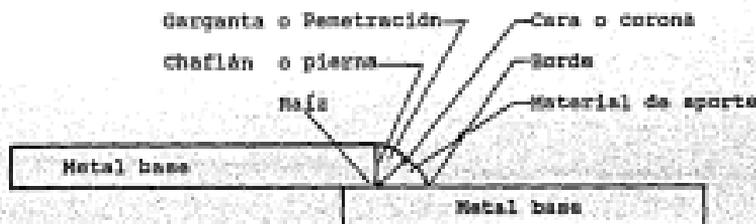


Fig. 1.1 Términos aplicados a una soldadura

La soldadura por fusión es un medio para unir metales concentrando calor o presión, o ambos, en el empalme con el fin de causar la coalescencia de las áreas adyacentes. En casi todos los procesos se funde el metal base en la unión y se añade otro metal, ordinariamente, para llenar la unión. Otra clase de procesos depende de la unión de las piezas por presión en el empalme o unión. De ordinario, se calienta el metal localmente hasta que adquiere un estado plástico, pero es posible obligar al metal a que se una con la aplicación de presión únicamente.

Cuando existan condiciones favorables para ello. Los procesos comunes de soldadura de importancia comercial se encuentran anotados en la tabla 1.1..

La soldadura con arco eléctrico, soplete de gas, rayo energético y termita son procesos de fusión en los que el metal de relleno es esencialmente igual al metal de base en las partes que se están uniendo. En la soldadura con soldadura fuerte y en la operación de soldar con soldadura blanda se emplean metales de relleno que son diferentes al metal de base y que funden a temperaturas más bajas que ese metal, que no se funde a la temperatura de operación. Los principales tipos de los procesos de unión del metal en condiciones plásticas son la soldadura por resistencia, presión y forjado.

La soldadura por fusión se efectúa en operaciones manuales, semiautomáticas o automáticas dependiendo esto principalmente de la cantidad y diversidad del trabajo a efectuarse. La automatización puede consistir en el manejo y colocación de las partes por medios mecánicos, efectuándose la alimentación del metal de relleno y del fundente, o la manipulación y el control del dispositivo de soldar también por medios mecánicos.

Las operaciones de soldadura han sustituido casi totalmente al remachado para fabricar calderas, reactores a presión, tanques y miembros estructurales para puentes y edificios; es el medio principal empleado para unir firmemente tableros y miembros para la construcción de carrocerías de automóviles; ha ocupado el lugar de las piezas coladas en una proporción importante de bases para máquinas, marcos y accesorios de montajes, cuerpos de equipos industriales y bastidores; asimismo, se ha convertido la soldadura en el medio para unir por lo menos algunas de las partes en la mayoría de los productos manufacturados actualmente.

### 1.2. Juntas de soldadura.

En la fig. 1.2. se ilustran juntas soldadas que se encuentran en uso común; cada una posee varios elementos. Estos son el tipo de unión, el de soldadura y la preparación para efectuar la soldadura. Los elementos constituyentes puedan reunirse en varias maneras diferentes. Por ejemplo, una unión sobrelapada puede quedar sujeta por una soldadura de filete, tapón o ranura y una junta en "T" puede quedar sujeta por una soldadura de filete o muelle. La naturaleza de la unión depende de la clase y tamaño del material, del procedimiento y de la resistencia que se exige. El material más delgado que 0.254 mm se solapa, ordinariamente; el material más grueso se suelda a tope, por lo común. Las uniones a tope se preparan para aceros de alta resistencia porque es más fácil inspeccionarlas interviniendo con estos patrones de esfuerzo más sencillos que en las juntas solapadas. Las uniones solapadas son las más apropiadas para casi todas las operaciones de soldadura a presión y resistencia y efectuadas sobre láminas y para la soldadura con haz electrónico cuando no se agrega un metal de relleno. Puede salir sobrando darla a una unión alguna preparación especial, por ejemplo,

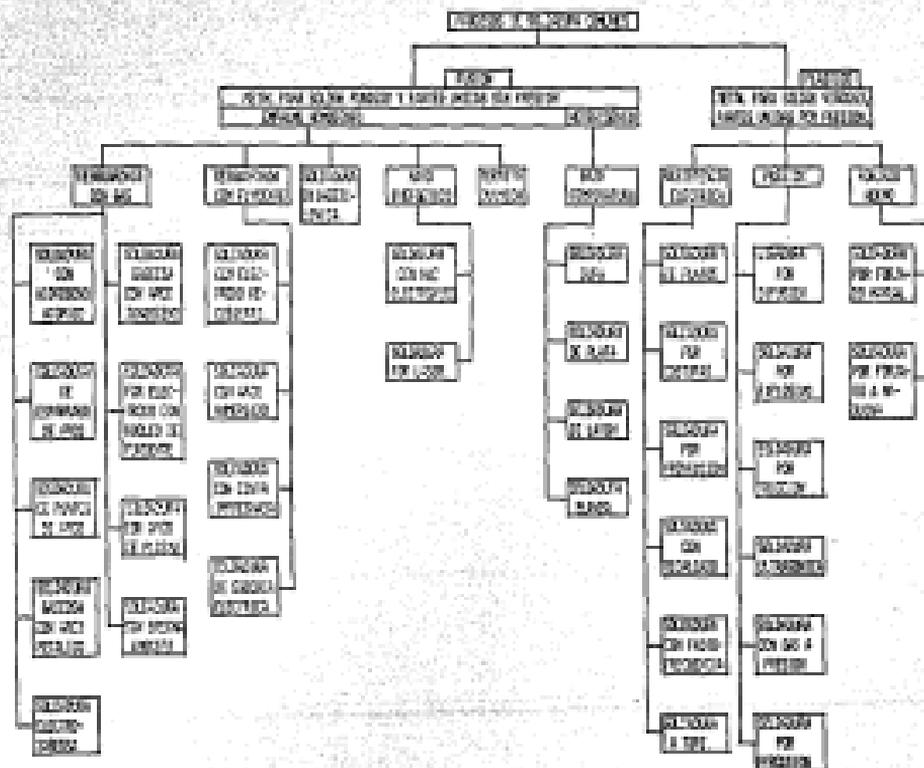


Tabela 1.1 Tipos de processo de licitação

cuando se trata de una junta a tope cuadrado. Esa unión no necesita metal llenador y puede ser hasta 30% más rápida para soldarse que una que sí lo necesite, pero una unión a tope cuadrada depende de la penetración dentro de las aristas de la pieza y no es fuerte excepto cuando el material es delgado. Por otra parte, una junta amasada forma una soldadura más fuerte pero necesita una preparación previa, y eso recarga los costos. Una junta se selecciona en cada caso para satisfacer las necesidades al costo más bajo.

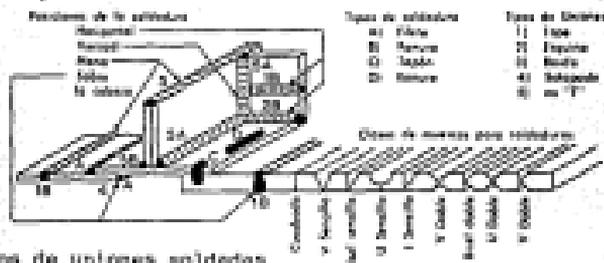


Fig 1.2 Tipos de uniones soldadas

La posición como se ha definido en la fig. 1.2, representa un punto importante a considerarse en cualquier junta a soldarse. El efecto de gravedad ayuda a situar el metal de soldadura en una posición plana que es la más fácil y rápida para realizarse.

Pueden impartirse instrucciones precisas para la preparación de una junta soldada marcando un plano con símbolos y signos convencionales. Este es un idioma especial y está recogido por reglas definidas, como las reglas gramaticales. En la tabla 1.2 se muestran los diferentes símbolos de soldadura.

Casi todos los metales conocidos pueden soldarse por uno u otro proceso. Sin embargo, la soldadura de arco eléctrico utilizando electrodos recubiertos es principalmente aplicable a los aceros. Los aceros tienen muchas propiedades diferentes, dependiendo de la cantidad de aleación que contengan. Los electrodos para soldadura deben seleccionarse de acuerdo con la composición del metal que se desea soldar. Los aceros se fabrican y especifican de muchas formas distintas. En general se clasifican, de acuerdo con el carbón que contienen, o sea, bajo carbón, medio carbón o alto carbón. Además también se clasifican de acuerdo con el tipo de aleación empleada, tales como cromo, molibdeno, manganeso, etc.. Los aceros también se venden bajo muchas marcas registradas y especificaciones.

SÍMBOLOS DE SOLDADURA

Tipo de soldadura		Lado de la flecha	Otro lado	Ambos lados
Angulo				
Tapón o rasura				NO SE USA
Punto o costura				NO SE USA
A escuadra				
B I B E L	V			
	Chafian			
	U			
	J			
	V abierta			
chafian abierto				
Tipo de soldadura		Lado de la flecha	Otro lado	Ambos lados
De soporte		<i>simbolo de bisel</i> 		NO SE USA
Fusión total		<i>simbolo de bisel o borde</i> 	<i>simbolo de bisel o borde</i> 	NO SE USA
Rebordo		NO SE USA	NO SE USA	NO SE USA
B O R D E	Rebordo			NO SE USA
	Esquina			NO SE USA

LADO DE LA FLECHA es el lado de la junta señalado por la punta de la flecha  
OTRO LADO es el lado opuesto de la junta

Tabla 1.2 (a) Símbolos de soldadura

## LOCALIZACIÓN E INFORMACIÓN DE SÍMBOLOS DE SOLDADURA

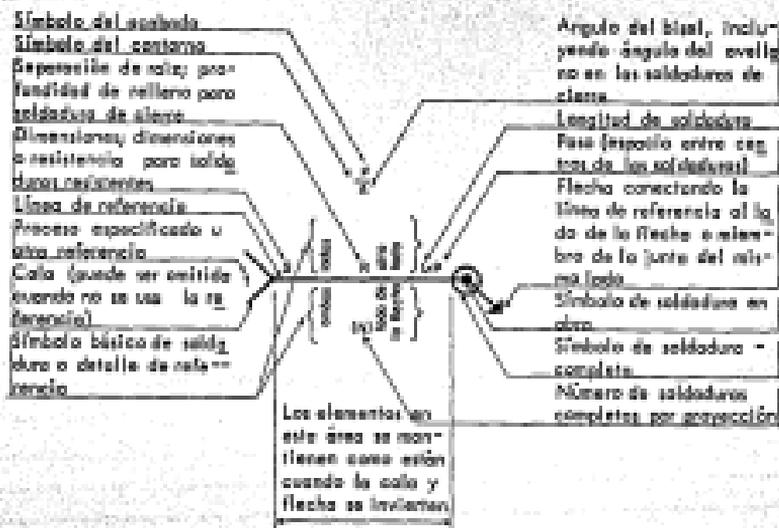


Tabla 1.3 (b) Símbolos de soldadura

### 1.3. Soldadura con arco eléctrico.

La base de la soldadura por arco eléctrico es un arco eléctrico formado entre un electrodo y la pieza de trabajo o entre dos electrodos. El arco está constituido por una descarga eléctrica sostenida a través de una trayectoria de partícula ionizadas conocido como plasma. La temperatura puede ser superior a unos 18,000 °C en el interior y a unos 11,110 °C en la superficie del arco. Sus aplicaciones se clasifican según el electrodo sea no consumible, para soldadura al arco de carbono o al arco de tungsteno, o consumible para soldadura al arco metálico. Entre estos se usa en pocas ocasiones la soldadura con arco de carbono.

El electrodo metálico usado para la soldadura de arco a metal se funde progresivamente por efecto del arco y este se hace avanzar para mantener la longitud del arco. Los electrodos recubiertos muestran un escudo protector gaseoso y escoria que flota sobre la superficie de la fusión, protegiéndola también, como se ilustra en la fig. 1.3. Otros métodos para la protección de la soldadura consiste en verter un fundente formador de

acacia, o en inyectar un gas inerte alrededor del arco y del metal fundido, cuando se usa un electrodo sin recubrimiento.

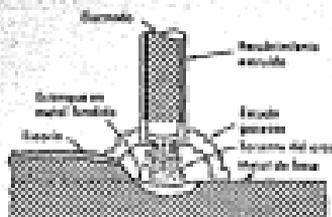


FIGURA 1.3 El electrodo recubierto con un metal fundido, espacio del arco y el metal fundido, metal depositado y espacio por encima.

Fig. 1.3 Soldadura con arco eléctrico

Las soldaduras con arco tienen las ventajas de ser sumamente versátiles y capaces de operar en circunstancias muy diversas produciendo trabajos de soldadura de alta calidad, depositando el metal rápidamente y de ser de costo competitivo en muchas situaciones, se utilizan más que cualquier otro procedimiento de soldar. Entre ejemplos de estructuras soldadas con arco encontramos: Tanques, puentes, calderas, edificios, tuberías, maquinaria, barcos, etc.. La mayoría de los metales pueden soldarse por una o más de las formas que hay de soldadura con arco.

1.3.1 Soldadura automática con arco consiste en un electrodo de alambre desnudo que se alimenta continuamente a través de unos rodillos movidos a motor cuando el equipo es semi o enteramente automático. Ordinariamente se emplea alambre macizo, pero en algunos casos puede estar hueco y lleno de fundente en el centro para obtener los beneficios derivados de los electrodos recubiertos.

En las industrias de alto volumen de producción son comunes las máquinas de soldar destinadas a propósitos especiales. Un ejemplo de éstas es una máquina enteramente automática para producir miembros transversales de bastidor de sección caja para la construcción de automóviles. Un operario coloca dos mitades de una sección en la primera estación en donde se oprimen una contra la otra y afianza aplicando puntos por soldadura de resistencia. Una viga viajera transfiere la sección a la estación de soldar en donde unas mordazas automáticas cuadran las bridas, aseguran el ajuste y la colocan en posición. Cuatro cabezas de soldadura, alimentando alambre de 1.93 mm de diámetro, y guiadas a lo largo de los perfiles curvos, completan soldaduras de 1.93 m en menos de ocho segundos.

El costo de los equipos va desde menos de 1.000 dólares para los modelos semi-automáticos pequeños hasta decenas de miles de dólares para las máquinas enteramente automáticas destinadas a la producción pesada.

1.3.2. Soldaduras con protección gaseosa: En la soldadura de arco con protección gaseosa, el arco y el estanco metálico pueden quedar protegidos por la acción de una envoltura apartada por un gas inerte o semiinerte. Este gas puede estar contenido en una cámara cerrada en la que se efectúa la operación de soldadura, pero comúnmente se inyecta el gas en el espacio abierto que rodea al punto en donde se lleva a cabo la soldadura. Uno de los diversos procesos de esta clase es la operación de soldadura con gas, tungsteno y arco, GTA, conocido también como soldadura TIG ilustrado en la fig. 1.4. Este método utiliza un electrodo de aleación de tungsteno que no se deteriora apreciablemente en una atmósfera de gas inerte. El metal de relleno se introduce por medio de una varilla o alambre separada a medida que se necesita. Para formar el escudo protector se utiliza helio y argón solos, juntos o mezclados con algún otro gas. Este procedimiento es costoso pero con él se obtienen trabajos de soldadura limpios y confiables, y es importante en construcciones aeronáuticas y otras aplicaciones críticas, principalmente de metales no ferrosos. No hay necesidad de que una sustancia extraída entre en contacto con la soldadura. Puede iniciarse el arco con una descarga de alta frecuencia y alto voltaje para evitar hasta que el electrodo toque la pieza de trabajo.

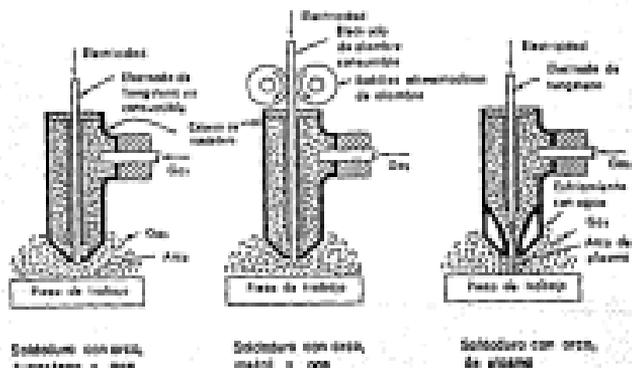


Fig. 1.4 Tipos de soldadura con arco, protegidos con escudo gaseoso

La soldadura con arco en medio de hidrógeno es parecida a la soldadura de tungsteno con arco en medio gaseoso pero se lleva a cabo con un arco desajustado entre dos electrodos de tungsteno en una corriente de hidrógeno gaseoso. El hidrógeno protege el

trabajo contra la atmósfera. Las moléculas de hidrógeno se separan quedando en forma atómicas en el calor del arco y el gas transfiera el calor más rápidamente en ese estado. Además, los átomos vuelven a combinarse al quedar alejados del arco y desprender calor en la pieza de trabajo. De esta manera se generan temperaturas altas que facilitan la soldadura. Una varilla separada suministra al metal de relleno a medida que se necesita este. El proceso descrito forma soldaduras excepcionalmente limpias, pero es costoso y no se utiliza frecuentemente excepto en caso de soldaduras profundas, como para bloques de dados y para aleaciones de alta temperatura, especialmente para acabados superficiales.

La soldadura con arco a metal, con protección gaseosa, conocida como GMA o MIG o soldadura con escudo de gas inerte, se efectúa usando un alambre que se alimenta a través de una cabeza de soldar que actúa como electrodo y suministro de metal de relleno, como se describe en la fig. 1.4. Los gases inertes se aplican en la realización de trabajos delicados pero el dióxido de carbono, que es más económico, se emplea ampliamente para una gran diversidad de operaciones de producción. El dióxido de carbono no mantiene bien el arco. Un remedio contra este defecto consiste en mantener un arco corto, con dispositivos para limitar automáticamente la corriente durante periodos de cortocircuito frecuentes. También se tiene el hecho que el dióxido de carbono se disocia formando monóxido de carbono y coqueos haciéndose necesario añadir antioxidantes para proteger la soldadura. Una de las formas del proceso utiliza alambre con núcleo de fundente que contiene estabilizantes para el arco y desoxidantes. Otra variante del proceso se conoce como soldadura con microalambre y alimenta alambres muy delgados, hasta de 0.762 mm de diámetro, efectuando la alimentación a alta velocidad. Con densidades de corriente altas, hasta 150 000 amperes/pulgada cuadrada se precalleanta el alambre de manera satisfactoria y la corriente se concentra en la soldadura. La soldadura GMA es rápida y versátil y se ha descubierto que es aplicable para operaciones de soldadura semi-automática, en cualquier posición.

La soldadura de botón, o de puntos con arco, se efectúa con arco a metal, en medio gaseoso, aplicado un punto en cada etapa de soldadura. Una forma de la operación de este tipo está programada para atravesar, quemando, una o más capas, hasta de 3.325 mm de espesor y detenerse luego dejando un tapón de metal fundido que pasa a través de las laminas, dejando en la superficie un botón de metal excedente. La principal ventaja que reporta este método atriba en que puede hacerse toda la operación desde un lado, sin aplicar presión alta. Una manera para perforar el metal consiste en quemar a través de una pieza utilizando para ello un electrodo protegido y expulsar el metal fundido por medio de un chorro de aire o gas. Un proceso empleado en la producción en cantidades grandes utiliza una hilera de electrodos situados a lo largo de una línea recta o curva. Los electrodos se disparan en sucesión rápida y se produce una serie de puntos de soldadura sobrelapados. Se reporta que algunos juntas se forman más rápidamente por este sistema que cuando se

usan electrodos de avance. Este método de soldar se conoce como soldadura MIGNE que son las siglas de soldaduras con electrodos múltiples, con gas inerte, programada.

En la soldadura con arco y plasma se conoce por plasma a un gas ionizado a alta temperatura y ocurre en cualquier arco eléctrico. Si se hacen fluir a través de una restricción un chorro de gas inyectado y el arco, siendo esa restricción, se incrementan marcadamente la densidad de corriente del arco y también la velocidad del gas. De esta manera se aumentan mucho el grado de ionización y la temperatura del gas. Las partículas excitadas ceden grandes cantidades de energía cuando vuelven a constituirse en átomos, algunas de ellas en la superficie de la pieza de trabajo. Cuando se trabaja sobre material delgado es suficiente la fuerza del chorro para abrir un agujero que se llena de metal fundido a medida que se desplaza el arco. La penetración es profunda y completa y puede ejecutarse una cantidad de trabajo grande sin el auxilio del metal de relleno.

Es posible fundir y aun vaporizar cualquier material conocido utilizando el proceso de arco y plasma quedando así al alcance de las operaciones de soldadura. El resultado es un trabajo limpio.

1.3.3. Soldadura con arco sumergido: En la soldadura con arco sumergido se deja caer un fundente granular sobre el área de soldadura por delante del arco en movimiento. El electrodo es un alambre desnudo que se alimenta automáticamente a la cubierta de material fundente. El fundente se licua alrededor del arco, protege a éste y a la soldadura y se deposita como escoria encima de la soldadura cuando endurece. El efecto descrito, se muestra en la Fig. 1.5.. El fundente puede ser de carácter neutro o contener elementos aleantes para enriquecer la soldadura. La protección permite que se obtenga una soldadura de buena calidad y elimina salpicaduras del arco. El fundente sobrante puede devolverse al depósito para volver a utilizarlo en otra ocasión. La escoria puede desprenderse fácilmente con algún instrumentado.

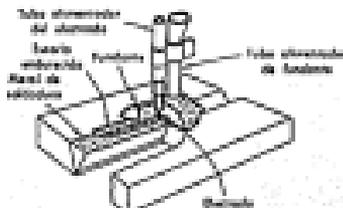


Fig. 1.5 Vista de corte seccional de una soldadura con arco sumergido.

El método de arco sumergido se usa para trabajos de soldadura automática o semiautomática principalmente de acero y se obtienen con las grandes velocidades de deposición de metal. Existe la posibilidad que el operario no pueda ver el arco y tropiece con dificultades para seguir el desarrollo de la unión, pero no necesita un protector de ojos. El método funciona con corriente alterna o continua.

La soldadura de electroescoria ilustrada en la fig. 1.6. es una forma de la soldadura vertical utilizada especialmente para unir piezas de más de 3.81 cm de espesor para la fabricación de flechas para turbinas, partes para calderas y prensas pesadas. La operación de soldadura se principia en un bloque de inóculación situado en el fondo de la unión colocada verticalmente. El fundente se convierte en escoria que flota sobre una capa de metal fundido confinado en la unión por tapetas de cobre refrigeradas con agua que se desliza a los lados. No es visible ningún arco y se dice que una parte importante de calor proviene de la resistencia eléctrica de la escoria. Las cortinas y la cabeza de soldadura se mueven hacia arriba a medida que se solidifica el metal de soldadura y los electrodos de alambre introducen nuevas cantidades de metal. El alambre oscila, por la acción de un mecanismo apropiado, desplazándose sobre la junta para distribuir la soldadura uniformemente siendo posible introducir dos o tres alambres a la vez cuando una junta es ancha.

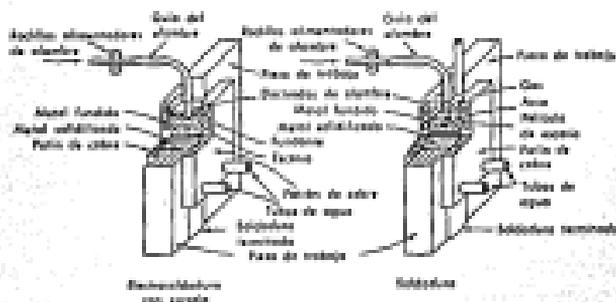


Fig. 1.6 Dos formas de soldadura vertical.

La soldadura electrogaseosa es apropiada para soldar en una pasada uniones de 12.7 mm hasta 38.1 mm de espesor. El electrodo de alambre consumible puede ser macizo o tener núcleo de fundente, pero la mayor parte de la protección, o toda ella, es impartida por medio de una neblina gaseosa de argón y dióxido de carbono que se inyecta en el claro. El calor se introduce por medio de un arco eléctrico que se descarga entre el electrodo y el estanco metálico. La cabeza y las cortinas se mueven hacia arriba a medida que progresa la operación.

La operación de soldadura vertical es la más natural y fácil para muchas operaciones. Es económica para soldar secciones en una sola pasada que exigen de otra manera varias pasadas. La preparación es fácil en caso de la soldadura vertical porque para la soldadura con arco convencional se necesita hacer preparativos de biselés y ajustas precisos, operaciones que se eliminan en la soldadura vertical. El calentamiento y el enfriamiento son inherentemente lentos de manera que no existe la necesidad de efectuar un calentamiento preliminar ni de un enfriamiento regulado. La zona afectada por el calor es grande, sin embargo, después de la operación de soldadura vertical es deseable ordinariamente aplicar un calentamiento térmico con el fin de obtener propiedades de fatiga aceptables.

El proceso de soldadura de espárrago con arco utiliza una pistola que controla automáticamente un arco eléctrico y fija un espárrago en su sitio. Se muestra en la figura 1.7 el esquema de la distribución original donde se prende una corriente y el espárrago se aleja de la pieza de trabajo para iniciar un arco dentro del anillo de refuerzo hecho de material cerámico. Al cabo de un tiempo determinado previamente se corta la corriente y se empuja el espárrago contra el estanco de metal fundido. Después de haberse solidificado el metal se retira el equipo para dejar el espárrago soldado a la pieza de trabajo. Una variante del proceso que es especialmente apropiada para unir espárragos a láminas delgadas es la solución por descarga de capacitor. Una descarga de corriente densa funde la proyección y establece un arco en el espacio libre. A continuación se oprime el espárrago contra la pieza de trabajo para terminar la soldadura.

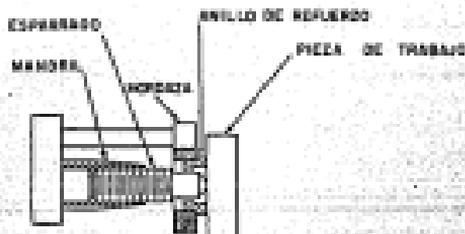


Fig 1.7 Arreglo para soldadura con arco, de espárrago

#### 1.4. Soldadura con rayo energético

Mediante la soldadura con haz de electrones, es posible introducir energía para soldar y cortar dirigiendo un haz de electrones concentrado para bombardear la pieza de trabajo. El

has se concentra en un ambiente al alto vacío. Si el trabajo se efectúa en un vacío cercano a 0.1 micra no existe necesidad para que lo contengan electrodos, gases o metal de relleno y pueden hacerse soldaduras puras. La soldadura con haz electrónico puede desempeñar los mismos trabajos que la soldadura TIG y la de plasma y arco: en algunos aspectos resulta hasta mejor. El haz energético puede concentrarse fuertemente para soldar metales ferrosos y no ferrosos, refractarios, desiguales, y aun metales reactivos. Las soldaduras pueden confinarse a sitios poco profundos o prolongarse hasta una profundidad de unos 18.25 cm, con una relación de profundidad a anchura hasta de 35 a 1. Esto significa que es posible confinar la licuación del metal a límites bastante angostos, y efectuarse tan velozmente que la zona afectada por el calor es pequeña. Las tasas de desplazamiento de la aplicación de soldadura pueden ser elevadas; el tamaño del grano permanece pequeño y las soldaduras son, esencialmente de lados rectos.

Si la soldadura se efectúa en una cámara de alto vacío es probable que se pierda un tiempo muy considerable si existe la necesidad de evacuar las cámaras al introducir cada pieza nueva. Se han utilizado cierres y sellos de aire para realizar una pieza después de la otra hasta su posición, o para pasar piezas largas a través de una cámara. Otra solución, consiste en pasar al haz a través de dos o más cámaras efectuándose la soldadura en un vacío intermedio o aun expuesta a la atmósfera. Puede reducirse el tiempo de operación total a unos segundos pero entonces se pierden algunas de las ventajas propias del proceso. Un haz de electrones se dispersa en un medio gaseoso en proporción a la densidad del medio; se necesitan unas tres veces más de energía para obtener una penetración determinada después de haber pasado un haz electrónico a través de una capa de 9.325 cm de un gas a presión atmosférica, que cuando atraviesa un espacio al alto vacío. La soldadura se acaba y ocurre cierto grado de contaminación aun en presencia de una cantidad reducida de gas.

**Laser:** Un haz luminoso de alta energía capaz de soldar y cortar metales se produce por medio de un laser, de la manera descrita en la fig. 1.8. Un medio comúnmente una barra de rubí, se expone a un estallido de luz brillante. Los iones en el cristal absorben la luz y se elevan hasta un nivel de energía inestable. Luego vuelven a caer a su sitio original y desprenden un estallido intenso de un solo color de luz puro. El estallido de un extremo de la barra se enfoca por medio de un sistema óptico convencional sobre un punto tan pequeño como 0.00254 cm de diámetro.

### 1.3 Soldadura con termita.

La soldadura con termita se efectúa rellenando una unión con metal fundido que se obtiene reduciendo el óxido del metal por la acción del aluminio. El aluminio reduce cualquier óxido, excepto el de magnesio, pero la soldadura con termita se afecta principalmente con hierro, acero y cobre. Se mezclan aluminio óxido de hierro magnético, finamente pulverizados, en la

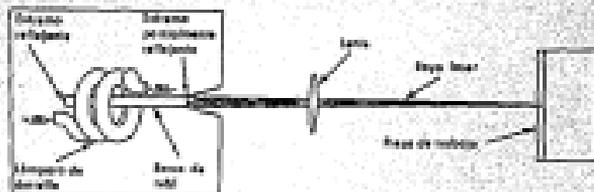


Fig. 1.8 Diagrama de un sistema con laser.

proporción de 1 a 3 kg, y se inflaman efectuándose la reacción siguiente:



La reacción eleva la temperatura a unos 2500 °C hasta 2775 °C. El metal producido así corresponde más o menos a la mitad de la mezcla original en peso, o a cerca de 1/2 en volumen.

El primer paso para hacer una soldadura con termita consiste en preparar un molde para el metal. Las piezas que se van a soldar se colocan y fijan en posición. En torno a la junta se hace una plantilla de cera con la forma deseada de la soldadura y se espigona un molde de arena alrededor de la cera que se va a soldar. En la fig. 1.9, se muestra un arreglo típico. Se inserta en el molde un soplete para fundir la cera y extraerla y, también, para calentar las piezas de trabajo hasta color rojo cerea.

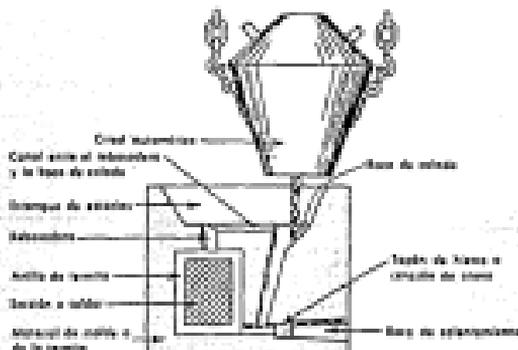


Fig. 1.9 El proceso con una soldadura con termita.

La mezcla de termita se coloca en un crisol y se incendia por medio de un soplete para soldar o por la adición de una cantidad pequeña de peróxido de bario y una cinta de magnesio. La reacción se desarrolla en unas treinta segundos para producir hasta una tonelada o más de metal que fluye penetrando en el

molde, rodeando a las partes que van a soldarse. El metal de soldadura sobrecalentado funde cantidades apreciables del metal original y todo se solidifica al enfriarse para formar una unión de soldadura fuerte y homogénea. Después se arranca el molde, se desprenden los respiraderos y compuertas y se arregla la soldadura con cincel y se limpia.

La soldadura con termita se usa principalmente, pero no enteramente, a la unión de secciones pesadas. Es capaz de aportar rápidamente una cantidad de calor grande a partes que tienen gran capacidad térmica. Entre los trabajos típicos que se desempeñan por este procedimiento mencionaremos la unión de cables, conductores, rieles, flechas y bastidores de maquinaria rotos y también la reconstrucción de angranas de dimensiones grandes. Los forjados y secciones cortadas a la flama pueden usarse de esta manera con el fin de construir partes muy grandes. A veces es este el único medio factible y, muchas veces, el más rápido para soldar piezas grandes. La composición del metal de soldadura puede regularse por la adición de la mezcla original de chatarra de acero o de diversas aleaciones en forma de óxido. Confinados se obtienen resistencias a la tracción desde 3515 kg/cm<sup>2</sup> hasta 7133 kg/cm<sup>2</sup> y alargamiento de 10 a 40 %, en secciones de 5.08 cm. La soldadura con termita se considera superior que el acero colado y las muestras de prueba pueden doblarse sobre sí mismas. Ocupe una desoxidación completa, la escoria tiene posibilidades amplias para salir, y se excluye el aire de la soldadura. La lentitud del enfriamiento alivia los esfuerzos internos.

#### 1.6 Soldadura con gas.

La soldadura con gas se efectúa quemando un gas combustible con aire u oxígeno en una flama concentrada que genera altas temperaturas. Lo mismo que los demás métodos de soldadura, la finalidad que se pretende con la flama es calentar y fundir el metal original y el de relleno de una junta. Muchos trabajos que se realizaban con soldadura con gas se han reemplazado con la soldadura con arco eléctrico y a resistencia pues estos métodos son más rápidos, pero la soldadura con gas aún tiene aplicaciones importantes. Sus temperaturas de operación son más bajas y regulables, característica que es necesaria para realizar trabajos delicados. Con ella puede soldarse la mayoría de los materiales comunes. El equipo es versátil, pero costoso y sirve de manera adecuada en muchos talleres de reparación y de reparaciones en general. Es probable que sea de más importancia el hecho que el calentamiento con gas sea el medio para cortar a la flama, calentar metales y soldar con soldadura fuerte y blanda.

El acetileno es el hidrocarburo más importante en la industria de la soldadura. Algunas mezclas estabilizadas más novedosas de metilacetileno y propadieno, conocida como MAPP, han estado ganando terreno entre los consumidores. Otros gases combustibles comerciales son hidrógeno, propano, butano y gas de iluminación natural y manufacturado así como cloro quemado con hidrógeno.

### 1.7. Soldadura a presión.

Los metales se mantienen unidos por ligaduras entre sus átomos y cristales. Por consiguiente, es necesario que los átomos y cristales de dos piezas establezcan contacto efectivo sobre toda el área que le es común para obtener una junta tan firme como el material original. Normalmente, aun las superficies más lisas y uniformes se tocan únicamente en algunos puntos relativamente altos, cuando se ponen en contacto. Las superficies metálicas están cubiertas asimismo con películas de óxidos y gases absorbidos y vapor de agua, y se mantienen separadas por distancias considerables aun en los puntos más próximos entre sí. La soldadura por fusión vence las barreras existentes entre las piezas porque los átomos de los metales fundidos fluyen y se unen. Si se presionan piezas de metal frías, aplicándose una presión suficiente, pedrán atenuarse las proyecciones para ensanchar el contacto sobre superficies amplias y pueden expulsarse los óxidos. Al aplicar un poco de calor se hace que los óxidos fluyan un poco mejor y el metal más plástico necesitándose entonces menos presión para efectuar la soldadura. Esta operación se realiza, hasta cierto punto, en el caso de la operación de soldadura por resistencia eléctrica y constituye la base para la soldadura a forjar que es una de las formas más antiguas empleadas para soldar practicada desde los tiempos antiguos por armeros y herreros. Consiste en calentar dos piezas al rojo vivo, aplicando un fundente como borax y completando la soldadura martillando el metal sobre un yunque para formar la unión por la presión de los golpes. La práctica del arte manual es una rareza en la actualidad pero algunas de los métodos mecánicos descritos en este sitio son las contrapartes de aquellos.

En la soldadura por fricción se oprimen los extremos de dos piezas mientras una de ellas se mantiene inmóvil y se hace girar a la otra. Frecuentemente se hace girar a la pieza en un huso impulsado por un volante del que toma la energía y por esta razón conocen algunas personas el procedimiento como soldadura por

inercia. La fuerza friccionante presente entre las superficies ensambladas fijas y deslizantes genera el calor suficiente para efectuar la soldadura y añade un componente de forjadura al factor presión, exclusivamente, que se encuentra en otras operaciones de soldar a tope.

Los metales y metaloides comunes y los poco usuales, presentes en peras similares y diábolos, pueden unirse mediante la soldadura por fricción cuando se trabaja en secciones esencialmente redondas, de 4.72 mm hasta 19.18 cm de diámetro. El tiempo de operación es corto, desde 0.2 hasta 2 segundos y el calentamiento y el resqueado afectan solo una zona pequeña. Por regla general se aprietan las piezas antes de 0.002 mm y hay poco desfilido y desperdicio. Siendo apropiado el control de la energía aplicada y de la energía, se trabaja el metal correctamente, la unión resultante es limpia y más fuerte que el metal base y el producto obtenido es uniforme de una pieza a la otra. La operación no emite luz intensa, chispas, humos o vapores ni sonidos fuertes.

Soldadura ultrasónica. Es posible unir dos piezas si se unen una contra la otra y se hacen vibrar a frecuencias ultrasónicas, en posición paralela a la interfase de contacto. Las vibraciones desmenujan las superficies y películas de óxidos y pueden actuar directamente a través de la suciedad y recubrimientos superficiales para establecer la mezcla íntima de los metales nascentes. Las superficies se calientan y plasticifican produciéndose así una ligadura metalúrgica sólida. Pueden hacerse soldaduras en puntos o en tornos e anillos en un segundo o menos, a lo largo de costuras a velocidades hasta de unos 133 m/min. El proceso es muy ventajoso para unir alambres delgados, laminillas y hojas de metales blandos porque no ocurre ninguna fusión. No existe zona afectada por el calor y es fácil unir metales diferentes. No se necesita la presencia de ningún metal llenador ni se aprietan ninguna contaminación. La soldadura es tan fuerte, o más, que el metal original.

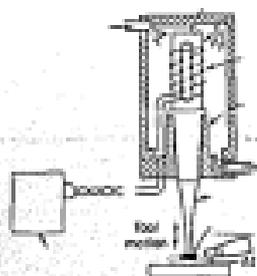


Fig. 1.11 Soldadura ultrasónica

Soldadura por explosión. Es posible unir superficies impulsando dos piezas una contra la otra mediante una explosión.

La aplicación principal de este método ha sido en el revestimiento de láminas y ferrado de tubos. Se han hecho revestimientos hasta de 2.134 X 6.1 m de superficie. Dos piezas que necesitan unirse se colocan a poca distancia una de la otra, ordinariamente formando un ángulo, de manera que choquen a lo largo de una línea de avance o una serie de puntos al ser golpeadas por la explosión. Cuando las condiciones son apropiadas, las altas presiones generadas obligan a que se aproximen rápidamente las superficies que establecen contacto violento, adelantándose al punto donde ocurre la colisión y se mezclan estrechamente para formar una ligadura uniforme. Se genera calor solo incidentalmente y no ocurre fusión. De esta manera es posible unir metales bastante diferentes, sin que haya ninguna interacción térmica. El equipo es de construcción sencilla pero las ondas de choque explosivas exigen que haya cierto aislamiento.

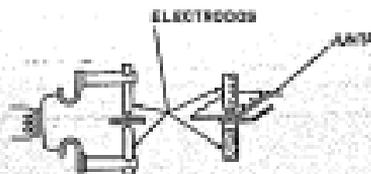


Fig. 1.12. Soldadura por explosión.

Unión por difusión. La unión por difusión, conocida también como soldadura en estado sólido, se lleva a cabo oprimiendo piezas entre sí mientras se calientan hasta un punto inferior al de fusión y aun a temperaturas inferiores a las de recristalización, en un vacío, o en medio gaseoso inerte. La formación de las ligaduras se efectúa al cabo de un tiempo porque los metales coalescen mediante la difusión interatómica. Las superficies destinadas a formar la unión tienen que maquinarse para que queden plans y se limpian perfectamente para asegurar que el contacto será estrecho sobre toda la superficie. En ocasiones se agregan capas metálicas intermedias como catalizador para acelerar la difusión y fortalecer las ligaduras y en otras instancias se aplican capas de detección para obtener la formación de ligaduras selectivas en áreas determinadas.

No se efectúa ninguna fusión y no se necesita la presencia de un metal de relleno en la formación de ligaduras por difusión. Por este motivo no se agrega peso y la unión queda tan fuerte y resistente a la temperatura como el metal original. Este proceso es aplicable a metales reactivos y refractarios, para unir

metales parecidos y muchos diferentes, así como para ligar entre sí tanto piezas gruesas como bastante delgadas. El proceso es relativamente costoso y no puede competir excepto en el caso de trabajos difíciles de unir por otras medias, como cuando se desea unir materiales sensibles al calor o quebradizos, así como piezas delgadas, o laminillas. Entre los usos importantes dados a este método se encuentra la soldadura de circonio y bariilo en la construcción de componentes para reactores nucleares, tungsteno para partes para uso aeroespacial y estructuras de panel de sheets delgadas.

### 1.8. Soldadura con latón, soldadura dura, y soldadura blanda.

La soldadura con bronce, o latón, es como la soldadura por fusión, consistiendo en la fusión y deposición de un llenador en una ranura, filete, tapón o muesca, entre dos piezas, para formar una unión. En este caso es el metal de relleno de una aleación de cobre con un punto de fusión inferior al del metal base, pero superior a  $473^{\circ}\text{C}$ . El metal de relleno se puñala en la junta y no se distribuye por capilaridad, como sucede en el caso de la soldadura fuerte o dura.

Los metales con alto punto de fusión, como el acero, hierro colado, cobre, latón y bronce, se sueldan con bronce. El metal base no se funde pero se forma una ligadura, en ocasiones más fuerte que el metal base sólo. Los estudios de las ligaduras existentes entre las aleaciones de cobre y el hierro colado han demostrado que existen tres fuentes de las fuerzas que ligan las uniones soldadas con bronce. Una se encuentra en las fuerzas atómicas entre los metales en sus interfaces en contacto estrecho. Una segunda fuente es la formación de aleaciones que surge de la difusión del metal en una zona adyacente en la interfase. La tercera es la penetración intergranular.

La soldadura con bronce o latón puede efectuarse mediante soldadura oxiacetilénica, con arco a metal, o con arco de carbón. El metal de relleno se aplica mediante una varilla o un electrodo en combinación con un fundente apropiado. La mayoría de los metales exigen poco calentamiento previo, o ninguno, con excepción del hierro colado en cuyo caso existe el riesgo que el calentamiento localizado establezca suficientes tensiones para originar estrechamientos.

Las principales ventajas de la soldadura con latón se derivan de la baja temperatura a que se efectúa la operación. Se necesita poco calor y puede hacerse una unión más rápidamente que por soldadura con fusión. El metal de relleno cede sustancialmente al enfriarse a  $360^{\circ}\text{C}$ , y aún un poco más abajo de esa temperatura, sin debilitarse, y los esfuerzos residuales son poco intensos. Los metales dúctiles no apropiados para la soldadura con fusión pueden unirse mediante la soldadura con latón.

Las uniones soldadas con bronce no rinden un servicio

satisfactorio a temperaturas superiores a una 260 °C ni al estar expuestas a cargas dinámicas de 1254.5 kg/cm<sup>2</sup>.

Soldadura fuerte o dura: Se da este nombre a un grupo de operaciones de soldadura en que un metal de relleno no ferroso se funde a una temperatura inferior a la del metal que se une, pero que se calienta arriba de 427 °C. El metal de relleno fundido fluye por capilaridad entre los miembros adyacentes o solapamientos calientes, pero no fundidos, o se funde en el sitio entre esos miembros.

Las aleaciones de cobre y las de plata son dos clases de metales de relleno para ejecutar la mayoría de los trabajos de soldadura fuerte. Una excepción es la del aluminio que se suelda con aleaciones de aluminio que funden inmediatamente antes que el metal original. Dentro de cada clase existe un número de aleaciones diferentes. Algunas se consideran como aleaciones para usos generales y son satisfactorias para una diversidad de tareas.

El cobre solo o aleado con zinc, estaño, níquel, fósforo o plata, separadamente o juntos se une con soldadura fuerte a temperaturas entre 394 °C y 1177°C. Algunas de estas aleaciones resisten en servicio temperaturas hasta de 427 °C pero la mayor parte de estas se consideran incapaces de dar servicio a más de 260 °C.

La soldadura que se efectúa con aleaciones de plata se llama soldadura de plata. La plata sola o con aleaciones con cobre, zinc, estaño, manganeso, níquel, fósforo, se suelda a temperaturas entre 616 °C y 843 °C. Algunos metales o partes, tienen que unirse a estas temperaturas más bajas para evitar sobrecalentamientos o ondulaciones. Las temperaturas de servicio no deberán sobrepasar, ordinariamente, 260 °C. Las uniones soldadas con plata son más o menos igual de fuertes, y en ocasiones más fuertes, que las uniones hechas con soldadura de cobre, pero las aleaciones de plata son relativamente costosas.

Las soldaduras con aleaciones de aluminio se efectúa a temperaturas entre 566 °C y 616 °C. La eficiencia de las juntas bajo tensión es adecuada hasta 180t. Para que la operación sea económica, comúnmente se fabrican las partes utilizando una hoja o lámina para soldadura fuerte que consiste en una capa de aleación para soldadura fuerte unida a una o a las dos de las superficies de una aleación de base.

La ligadura entre un metal de soldadura fuerte y el metal limpio de las partes unidas se debe a la difusión del metal de soldadura fuerte en dirección al metal base caliente y a cierto grado de aleación superficial de los metales. Una unión de buena calidad es, por lo menos, tan fuerte como el metal de relleno, ocurren las fallas en el exterior de la unión. Si el metal base es más fuerte falla la unión, pero este un esfuerzo muy superior a la resistencia a la tracción del metal de relleno. Una unión de buena calidad puede obtenerse solamente con un claro dimiuto entre las superficies que se unen y por la ejecución de las

técnicas apropiadas para la operación de la soldadura fuerte que garantice que el metal de relleno penetre completamente en la junta.

Es necesario limpiar las superficies perfectamente antes de aplicarles soldadura fuerte y luego se cubren, por lo general, con un fundante para descomponer e impedir la formación subsiguiente de óxidos. El bórax es un fundente muy usado pero se encuentran en el mercado muchas marcas registradas comercialmente. Las partes que hay que unir deben sujetarse firmemente durante la operación; pueden estar sujetas con ojillos o rebordeadas, o sujetas en un aparato, durante la producción. El metal de relleno puede alimentarse en forma de alambre, configuraciones preconformadas, o pasta de aliacón y se pueden aplicar antes o durante el calentamiento. El calentamiento mismo puede efectuarse de diversas maneras. La soldadura fuerte aplicada con soplete es muy usual porque es un método cómodo y aceptable. El calentamiento en horno, con resistencias eléctricas y por inducción sirven en la producción de varias maneras. Las partes pueden sumergirse en un baño de sal fundente en estado líquido para precalentar o para el calentamiento final. Pueden también sumergirse en un baño de metal de relleno fundido, con calentamiento previo, o sin él; esta posibilidad es especialmente conveniente cuando se está soldando simultánea y uniformemente un número de partes en un sólo ensamble.

El acero, cobre, latón, bronce, aluminio y muchos metales menos comunes se soldan con soldadura fuerte juntos y entre dos. No es posible aplicar soldadura fuerte con buenos resultados al acero endurecido ni a algunas aleaciones de aluminio. Las resistencias, temperaturas de operación y costo de las uniones hechas con soldadura fuerte son inferiores a las de la soldadura por fusión, pero superiores a los valores correspondientes a los de la soldadura blanda.

La soldadura común, soldadura, o soldadura blanda, es el proceso utilizado para unir metales por medio de aleaciones que funden entre 177 °C y 171 °C. Generalmente son aleaciones a base de plomo y estaño. Los metales que se unen son frecuentemente mediante la soldadura ordinaria con hierro, cobre, níquel, estaño, cinc y muchas de sus aleaciones. El aluminio puede soldarse por medios especiales.

La resistencia de una junta soldada depende del grado de aliacón superficial y de las ligaduras mecánicas formadas, como el entrecruzamiento, entre las partes unidas. La soldadura tiene por sí misma poca resistencia unitaria, poca resistencia a la fatiga y está limitada a temperaturas de servicio inferiores a 157 °C. Es necesaria la presencia de películas delgadas para obtener las uniones más fuertes. Es conveniente que los espesores sean en estos casos, de 0.0762 mm para cobre y 0.1270 mm para el acero.

Para trabajos de soldadura ordinaria se necesita generalmente un fundante para despojar la superficie de óxido y promover, de esta manera, la humectación y obtener un contacto

estrecho entre el metal de soldadura y el metal base. El cloruro de zinc es el fundente más eficaz pero a la vez es corrosivo. Existe un número de técnicas para efectuar la operación de soldadura siendo algunas de estas para algunos materiales en especial. Por lo general se aplica primero el fundente, se calientan las partes en la unión hasta una temperatura apenas superior al punto de fusión del material de soldadura y luego se toca la soldadura y se deja fluir hasta que penetra en la unión.

### 1.3. Ensayos no destructivos.

Gracias a los diversos adelantos tecnológicos que se han dado a últimas fechas, ha sido necesario establecer un control de calidad más estricto conforme a las necesidades de producción económica y seguridad que la expansión industrial ha ido exigiendo.

De esta manera se empezaron a crear diferentes asociaciones e institutos, y en base a experiencias empezaron a surgir e implantar especificaciones y normas para materiales de fabricación, procesos de fabricación y supervisión adecuadas para lograr una máxima calidad y seguridad en el producto.

Así poco a poco han surgido los diferentes códigos para controlar la calidad y seguridad de todo artículo manufacturado, estos códigos, se han especializado en determinados procesos como por ejemplo:

- American Society of Mechanical Engineering (ASME): regula especificaciones del material a usarse, normas para el proceso de fabricación e inspección necesarios que garantizan la calidad y seguridad de calderas y recipientes a presión.

- American Petroleum Institute (API): Norma la construcción de tanques, oleoductos y gasoductos. Dentro de este código la norma específica acerca de soldadura es el Std. 650 que trata acerca de tanques soldados de acero para almacenamiento de aceite.

- American Welding Society (AWS): Da normas generales para todo tipo de estructuras soldadas. Las normas más importantes referentes a soldadura en este código son:

  - AWS 2.4-76: Símbolos para soldadura y pruebas no destructivas.

  - AWS B3.9-77: Procedimientos de soldadura y calificación de trabajos.

  - AWS B4.0-77: Métodos estándar para pruebas mecánicas de soldadura.

  - AWS B1.1-77: Código de soldadura para estructuras.

AMS D14.3-77: Soldadura industrial.

AMS D2-4: Simbología de soldadura.

AMS D14.3-77: Soldadura en equipo de construcción y movimientos de tierra.

- American Water Works Association: Establece los lineamientos para la fabricación de acueductos.

- Society for Non-Destructive Testing (SNT): Marca la pauta para el uso de los métodos para pruebas no destructivas. La norma SNT-TC-1A trata de la calificación y certificación de personal para pruebas no destructivas.

Esto nos da una idea de la variedad de organismos que han sido creados para garantizar la confiabilidad de productos manufacturados.

Un aspecto de suma importancia que nos ha permitido disminuir el porcentaje de error en un gran número de procesos, a sido la creación y aplicación de los ensayos no destructivos y de los ensayos destructivos.

Los ensayos destructivos son aquellos métodos por los cuales se determinan las características o propiedades de los materiales mediante su destrucción parcial o total por la acción de combustión, esfuerzos de tensión, flexión, ataques químicos, etc..

Las pruebas no destructivas son aquellas que nos han dado una descripción más general del estado en que se encuentran los materiales sin destruirlos, por ésta razón los ensayos no destructivos son los que tienen un mayor uso en la actualidad.

Entre los métodos de ensayos no destructivos más importantes tenemos:

- Radiografía: Sin lugar a dudas es el más importante de todo este tipo de exámenes por que su campo de acción es extraordinariamente grande; además por ser de registro directo es objetivo y archivable. Gracias al mismo desarrollo que se ha tenido su uso se ha extendido enormemente a la industria del petróleo, de la construcción, eléctrica, aviación, etc..

- Ultrasonido: Nos sirve para determinar la calidad interna de un artículo mediante el uso de ondas generadas piezoeléctricamente. Muchas veces la prueba de ultrasonido no siempre indicará las fallas debido a discontinuidades metalúrgicas y geométricas.

- Líquidos penetrantes: Es un método efectivo para detectar defectos superficiales de materiales no porosos. En principio el líquido penetrante es aplicado en la superficie y posteriormente aplicar un revelador para localizar los defectos.

- Partículas magnéticas: Es utilizado para localizar roturas y otros defectos cerca o en la superficie de materiales ferromagnéticos. La sensibilidad para este tipo de ensayos es grande para defectos superficiales, pero disminuye considerablemente para defectos internos al material.

- Corrientes de Eddy.
- Emisión acústica.
- Prueba contra fugas (Leak Testing).
- Inspección visual.

#### 1.- Simbología en pruebas no destructivas:

Al igual que en soldadura los ensayos no destructivos pueden señalarse dentro de un plano y de esa forma combinarse con los símbolos de soldadura. Los símbolos más usuales son:

TIPO DE PRUEBA	ABREVIACION
Emisión acústica	AET
Corrientes de Eddy	ET
Pruebas contra fugas	Lt
Partículas magnéticas	Mt
Líquidos penetrantes	PI
Radiografía	Rt
Ultrasonido	Ut
Inspección visual	Vt

Tabla 1.3 Abreviaciones en ensayos no-destructivos.

Para tener un símbolo completo de ensayos no destructivos se deben tener todos los elementos que a continuación se describen, ordenados de la forma que indica la figura 1.13.

- 1.- Línea de referencia.
- 2.- Flecha.
- 3.- Símbolo de prueba básico.
- 4.- Símbolo de prueba todo alrededor.
- 5.- (N) número de pruebas.

6.- Prueba de campo.

7.- Cola.

8.- Especificación u otra referencia.



Fig. 1.13 Localización estándar de los elementos

**Flechas:** La flecha debe conectar la línea de referencia a la parte a ser probada. El lado de la parte a la cual la flecha apunta debe considerarse el lado de la parte de la misma. El lado opuesto del lado de la flecha de la parte debe considerarse con el otro lado. Además la pruebas a ser realizadas en la parte del lado de la flecha deben indicarse por el símbolo de prueba sobre el lado de la línea de referencia hacia el lector (fig 1.14).



Fig 1.14 Localización del lado de la flecha

Las pruebas han de ser hechas del otro lado de la pieza deben ser indicadas por el símbolo de prueba sobre el lado de la línea de referencia al lector (fig 1.15).



Fig 1.15 Localización del otro lado

En caso de que uno o varios ensayos no destructivos vayan a ser realizados por ambos lados del objeto deberán indicarse al

mismo tiempo sobre ambos lados de la línea de referencia (Fig 1.16).



Fig. 1.16 Símbolos en ambos lados

Otra forma común y corriente de localizar los símbolos de los ensayos no destructivos será centrados sobre la línea de referencia, lo que indica que este podrá realizarse indistintamente en cualquiera de los lados de la pieza a inspeccionar.

Es muy común que el alcance del ensayo no destructivo no abarque el 100% de la pieza o el total de su longitud indicada. El procedimiento a seguir en estos casos es indicar el porcentaje o longitud a examinar del lado derecho del símbolo de ensayo no destructivo. En un caso más específico en el que se desee un porcentaje de área determinada se acepta la utilización de las líneas de acotamiento, señalándose en ellas la longitud a ser examinada junto al cual se indicará el número de ensayos no destructivos que se llevarán a cabo.

En el caso que en un plano se desee localizar un área que vaya a ser inspeccionada ésta deberá cerrarse por líneas punteadas que tengan un círculo en cada cambio de dirección. Además deberá usar un símbolo de prueba especificado la clase de prueba no destructiva utilizada en el conjunto de líneas (Fig 1.17).

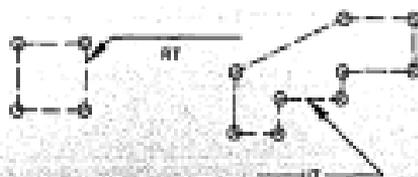


Fig 1.17 Especificación de partes (áreas) para inspección.

## 1.10 Código ASME.

El código ASME es importante porque regula la construcción y operación de recipientes a presión, calderas de potencia (generación de vapor) y calderas de calefacción (generación de agua caliente), además indica las bases por las cuales se ha de regir la aplicación de los ensayos no destructivos.

La aplicación de los ensayos no destructivos está indicada en la sección V del código, aunque no se mencionan los estándares de aceptación. Los criterios bajo los cuales se ha de calificar una soldadura o un material determinado están dados por la norma bajo la cual se esta calificando la norma. Estas normas pueden ser según la sección I, sección VIII, API, ASTM, AWS, etc.

El código ASME está dividido en 10 secciones, las cuales son las siguientes:

**Sección I. Calderas de potencia.** Las normas establecidas en esta sección son aplicadas a calderas de potencia, de alta presión, calderas de agua caliente (alta temperatura), y las parts o equipo complementario necesario para su operación como columnas de nivel, medidores de presión, válvulas de seguridad, etc.

Las normas de construcción de la sección I son aplicadas únicamente a calderas de potencia que cumplan con las siguientes características de operación:

- 1.- Calderas de potencia (generación de vapor) que tengan una presión máxima de trabajo mayor a 15 psig.
- 2.- Para calderas de agua caliente (alta temperatura) diseñadas para una presión de operación mayor de 140 psig y/o su temperatura mayor a 350°F.

**Sección II. Materiales.** La composición de los materiales que se ha de utilizar para alguna de las aplicaciones específicas de alguna de las secciones del código están dadas en esta sección del código. Dichas especificaciones abarcan los materiales ferrosos y no ferrosos dependiendo del caso que se trata.

**Sección III. Plantas nucleares.** Dicta las normas de construcción y operación para plantas nucleares.

**Sección IV. Calderas de calefacción.** Al igual que la sección I tenemos las normas para la fabricación de calderas de calefacción, calderas de generación de vapor de baja presión y sus partes.

Para que un equipo pueda construirse bajo esa sección del código se debe cumplir con las siguientes características.

- 1.- Calderas de generación de vapor en donde la presión

máxima de operación no sobrepase las 15 psig.

3.- Calderas de calefacción o de agua caliente cuya presión máxima de operación sea menor a 150 psig y/o su temperatura menor a 250<sup>o</sup>F a la salida de la caldera.

Sección V. Ensayos no destructivos. Esta sección del código ASME contiene las necesidades y métodos de aplicación de los ensayos no destructivos para encontrar defectos superficiales y discontinuidades internas en materiales y en soldaduras.

Estos ensayos incluyen el examen radiográfico, ultrasonido, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes de eddy y el examen contra fugas.

Sección VI y VII. Estas secciones proporcionan una descripción general, terminología, fundamentos básicos para calderas de potencia (sección VI) y calderas de calefacción (sección VII), además una descripción de sus controles y equipo de combustión que pueda utilizar.

Sección VIII. Recipientes a presión. Dista las reglas de construcción para recipientes sujetos a presión interna y externa. Esta presión puede aplicarse por medio de una fuerza externa, la aplicación de calor o una combinación de ambos. Estas normas se aplican exclusivamente para recipientes cuya presión de diseño no exceda las 3000 psig.

Sección IX. Soldadura. Esta sección trata las normas de aplicación de soldadura y calificación de soldadores.

Sección X. Recipientes plásticos. Norma la construcción de recipientes fabricados con fibra de vidrio y reforzados con poliuretano.

## CAPITULO II RADIOGRAFIA

### 2.1 Generalidades:

La radiografía es un método de ensayos no destructivos de materiales volumétricos el cual usa un haz de radiación penetrante. Esta radiación se genera ya sea por isótopos radioactivos o por máquinas de rayos "X". Los isótopos son frecuentemente utilizados en aplicaciones de construcción en campo debido a su portabilidad y a que no requieren de una fuente externa de poder.

La prueba radiográfica en esencia consiste en exponer una película a la radiación "X" o gamma que ha penetrado un material determinado, para posteriormente revelar y procesar la película y finalmente interpretar la imagen que se ha obtenido.

El producto final o registro del examen consiste de una película radiográfica y de un reporte con la interpretación asociada, los cuales definen la calidad del material examinado como aceptable o no aceptable. El criterio de aceptación o de rechazo del material radiografiado se determina de acuerdo con las normas específicas de aceptación del proyecto (ASME, ANSI API, AWS, etc.) las cuales gobiernan sobre el objeto que se esta examinando.

El desarrollo acelerado que ha tenido la radiografía industrial en años recientes puede explicarse por la necesidad de métodos de inspección no destructivos, los cuales, al determinar el estado interno del producto, sin dañarlo, aseguran al uso satisfactorio del material.

Así la complejidad de los productos actuales, y de la maquinaria que los produce y transporta requiere cada vez de mayor confiabilidad en cada parte.

Los rayos "X", son ondas electromagnéticas parecidas a las ondas de la luz, pero de longitud mucho más corta. Los rayos "X" se obtienen bombardeando la materia con electrones a gran velocidad o con otras partículas atómicas. La principal característica de estos rayos es la capacidad que poseen de atravesar los cuerpos opacos a la luz, característica que motivó su descubrimiento e hizo posible obtener fotografías del interior de los cuerpos opacos.

### 2.2 Fuentes de radiación:

El concepto de radioisótopo es fácil de comprender si consideramos primero los átomos normales. Un átomo está compuesto de un núcleo compacto, rodeado por uno o más electrones. En el caso del hidrógeno el núcleo consiste solamente de un protón, con una carga positiva y alrededor de su núcleo gira un electrón que

## CAPITULO II RADIOGRAFIA

### 2.1 Generalidades:

La Radiografía es un método de ensayos no destructivos de materiales volumétricos el cual usa un haz de radiación penetrante. Esta radiación se genera ya sea por isótopos radiactivos o por máquinas de rayos "X". Los isótopos son frecuentemente utilizados en aplicaciones de construcción en campo debido a su portabilidad y a que no requieren de una fuente externa de poder.

La prueba radiográfica en esencia consiste en exponer una película a la radiación "X" o gama que ha penetrado un material determinado, para posteriormente revelar y procesar la película y finalmente interpretar la imagen que se ha obtenido.

El producto final o registro del examen consiste de una película radiográfica y de un reporte con la interpretación asociada, los cuales definen la calidad del material examinado como aceptable o no aceptable. El criterio de aceptación o de rechazo del material radiografiado se determina de acuerdo con las normas específicas de aceptación del proyecto (AWS, ANSI API, AWS, etc.) las cuales gobiernan sobre el objeto que se está examinando.

El desarrollo acelerado que ha tenido la radiografía industrial en años recientes puede explicarse por la necesidad de métodos de inspección no destructivos, los cuales, al determinar el estado interno del producto, sin dañarlo, aseguran el uso satisfactorio del material.

Así la complejidad de los productos actuales, y de la maquinaria que los produce y transporta requiere cada vez de mayor confiabilidad en cada parte.

Los rayos "X", son ondas electromagnéticas parecidas a las ondas de la luz, pero de longitud mucho más corta. Los rayos "X" se obtienen bombardeando la materia con electrones a gran velocidad o con otras partículas atómicas. La principal característica de estos rayos es la capacidad que poseen de atravesar los cuerpos opacos a la luz, característica que motivó su descubrimiento e hizo posible obtener fotografías del interior de los cuerpos opacos.

### 2.2 Fuentes de radiación:

El concepto de radioisótopo es fácil de comprender si consideramos primero los átomos normales. Un átomo está compuesto de un núcleo compacto, rodeado por uno o más electrones. En el caso del hidrógeno el núcleo consiste solamente de un protón, con una carga positiva y alrededor de su núcleo gira un electrón que

lleve una unidad de carga negativa.

El deuterio, tiene una estructura similar, pero el núcleo contiene además un neutrón. El tritio contiene dos neutrones, y un protón en el núcleo. Estos elementos son llamados isótopos por que tienen las mismas propiedades químicas que son determinadas por el electrón orbital y el mismo número de protones en el núcleo. Por esta peso adicional de los neutrones en el deuterio y en el tritio, pueden ser separados del hidrógeno o de uno y otro en base a las diferencias en las propiedades físicas.

Los isótopos radiactivos son elementos inestables que emiten energías y se desintegran con tiempo escala, este es distintivo de cada isótopo, en este proceso de desintegración los isótopos tienen la tendencia a hacerse más estables. La velocidad de decadencia o desintegración sigue la ley exponencial y es conveniente expresarla en términos de período de semidesintegración o vida media. La vida media es el tiempo requerido para que una parte de un radioisótopo en particular se desintegre.

La vida media no afecta la calidad radiográfica directamente, pero sí influye en el costo y utilidad de la fuente y la técnica a utilizar. La vida media de los radioisótopos varía de microsegundos a miles de millones de años como se muestra en la tabla 2.1.

Uranio 238	4,500.0 mill. de años
Uranio 235	707.0 mill. de años
Uranio 234	232.0 mil años
Potasio 40	480.0 mill. de años.
Carbono 14	57.0 mil años
Radio 226	1,408.0 mill. de años
Cesio 137	30.0 años
Cobalto 60	5.3 años
Iridio 192	75.0 Días
Iridio 194	17.0 horas
Yodo 128	25.0 minutos
Plata 110	325.0 días
Berilio 8	$10^{10}$ microsegundos

Tabla 2.1 Vida media de algunos radioisótopos.

Para la radiografía industrial se ha considerado que existen alrededor de unos 200 isótopos radiactivos, sin embargo sólo unos cuantos se han llegado a conocer por llenar los requisitos para que sean comerciales tanto por su razonable vida media como por su factor peso, utilidad y seguridad. Destacando los siguientes isótopos que se pueden conseguir fácilmente:

ISÓTOPO	VIDA MEDIA	RHM. <sup>1</sup>	FACTORES GAMA <sup>2</sup>	ENERGIA MEV <sup>3</sup>
Cobalto 60	5.3 años	1.3500	2 gammas	1.170 y 1.330
Cesio 137	30.8 años	0.3900	1 gamma	0.660
Iridio 192	74.0 días	0.2500	24 gammas	0.310 a 0.610
Talio 208	127.0 días	0.0625	3 gammas	0.892 a 0.0984
Radio 226	1600.0 años	0.8400	11 gammas	0.240 a 2.000

Tabla 2.1 Radioisótopos comerciales

### 2.3 Materiales de radiografía:

2.3.1 Cobalto 60: El costo por RHM es el más barato y se utiliza para la terapéutica médica interna. Actualmente es factible producir una fuente radiográfica aceptable con una actividad de 10 mil curies<sup>4</sup> efectivos, su radioactividad es producto de la captura de un neutrón cuando aún tiene un peso de 30.

Este isótopo decae con un período de semidesintegración o vida media de 53 años, mediante la emisión de un rayo Beta de 0.31 Mev. y 2 gammas de 1.17 y 1.33 Mev. estabilizándose en Niquel 60. Su factor gamma es de 1.18 RHM por Curie.

Con esta fuente se pueden inspeccionar espesores hasta de 20 cm. comercialmente hablando.

2.3.2. Cesio 137: Es el más probable producto de la fisión nuclear y resulta del 64 de las fisiones aproximadamente por lo que se produce en abundancia en todos los reactores nucleares. La separación de éste elemento, del combustible del uranio, y de otros productos de la fisión presenta muchas dificultades.

Considerando que es un metal químicamente muy activo, debe usarse en forma de sal como el radio, por lo cual se tiene una actividad específica por unidades de volumen más baja y desde el punto de vista radiográfico, su punto focal de emisión es muy grande.

Su actividad específica sólo está limitada por la presencia de otros isótopos del cesio, principalmente el 133 y el 134 por lo que resulta un máximo de 25 curies por gramo de sal.

(1) Número de roentgen por hora medidas u observadas a un metro de la fuente. Röntgen es la cantidad de radiación que produce 1.610 billones de pares iónicos en 1cc de aire seco a 0° y 760 mm de presión.

(2) Cantidad de radiación electromagnética emitida por un núcleo

(3) Unidad de energía, millón de electrón volts.

(4) Unidad de radioactividad. Cantidad de cualquier sustancia en el cual el número de desintegraciones por segundo es  $3.7 \times 10^{10}$

Tomando en cuenta que la densidad de la sal es de 1.5, las fuentes se pueden fabricar hasta de 50 curies por cm: su propia absorción es muy baja. Siendo soluble el cloruro de cesio, deben tomarse las debidas precauciones, por lo que se recomienda la posible encapsulación, así como hacer pruebas de fuga cada 6 meses en la cápsula y en su recipiente para prever de posibles contaminaciones en el medio.

Este isótopo decae por una vida media de 16 años y su rayo monocromático de 0.66 MEV lo lleva a uno a suponer que los resultados radiográficos pudieran ser parecidos a los del Iridio 192 con su promedio de 0.46 MEV, sin embargo los resultados son más parecidos a los del cobalto 60.

3.3.3 Iridio 192: El Iridio natural es la mezcla de 184 del 191 y 62% del 193. Cuando es bombardeado por neutrones en las pilas atómicas, algo de Iridio 194 se forma del Iridio 192 que hay en el Iridio natural, aunque el 191 es más susceptible a los neutrones. El Iridio 194 no es detectable para radiografía, porque emite rayos gamma de una energía tan elevada que llega al 1.5 MEV, por lo cual requiere de mayor protección de plomo que el Iridio 192 con un promedio de energía gamma de 0.4 MEV. Sin embargo la vida media del Iridio 194 es de 15 hrs y 10 vidas medias son ligeramente más de 3 días. El Iridio irradiado es enfriado por este periodo de tiempo para despojarlo de la mayor parte del 194 antes de ser embarcado para fines radiográficos.

De sus 24 rayos gamma se pueden aprovechar 3 de ellos para eficiencia radiográfica, los cuales tienen energía de 0.32, 0.43 y 0.66 MEV su máxima actividad específica esta en 500 curies por gramo de Iridio.

Este isótopo pese a su poca atractiva vida media de 78 días, es con mucho la fuente gamma ideal para cierto tipo de trabajos radiográficos. Su baja energía produce efectos muy parecidos a los logrados con equipo de rayos X, es decir, mayor contraste y gran definición. Su mayor eficiencia radiográfica se logra en espesores de 1 cm a 6 cm en acero.

La escasa protección que requiere lo hace más maniable, pudiendo manipularse con mayor facilidad.

## 2.4 Radiaciones:

Las cargas eléctricas en reposo producen un campo eléctrico que disminuye en forma inversa al cuadrado de la distancia, pero cuando esta carga esta en movimiento relativo a una velocidad constante produce también un campo magnético, pero este campo no es irradiado al exterior. Si la carga eléctrica es acelerada, no puede quedar en reposo en un sistema dinámico de referencia y da como resultado pulsos de campos eléctricos y magnéticos, es decir para obtener radiación electromagnética se necesita que las cargas eléctricas estén aceleradas.

Existen diversos tipos de radiaciones, que dependen de la frecuencia con la que se emiten y su fuente, estas radiaciones se pueden ver en el espectro electromagnético (fig 3.1). El espectro consiste en una escala continua de radiación que se extiende desde los rayos gamma a las ondas de la radio. Los nombres descriptivos de las diferentes secciones del espectro son históricos; simplemente suponen una clasificación conveniente relacionada con la fuente de la radiación. La naturaleza física de la radiación es la misma en toda la escala. En todas las secciones posee la misma velocidad y la misma naturaleza electromagnética y la única diferencia de una parte del espectro a otra es su frecuencia y longitud de onda. Las regiones con nombres clásicos solapan unas con otras y dan una idea de las fuentes comunes: Las ondas de la radio y las microondas proceden de los electrones que se mueven en los conductores; el infrarrojo de los objetos calientes; la luz visible, de los objetos incandescentes; el ultravioleta, de las descargas gaseosas y de arco; los rayos "X", de los electrones que inciden sobre un blanco; los rayos gamma, de los núcleos de los átomos radioactivos.

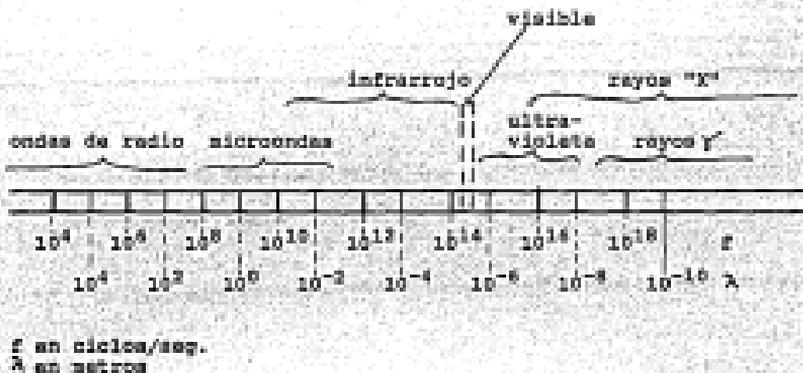


Fig. 3.1 Espectro electromagnético.

La energía emitida por radioisótopos generalmente toma la forma de radiación Alfa, Beta, Gamma y Captura K :

- Radiación Alfa: La decadencia Alfa es característica de los átomos más pesados como el uranio. Las partículas Alfa de un determinado isótopo son emitidas a cierto nivel de energía y en consecuencia se dice que son monoenergéticas.

Se conocen isótopos que emiten partículas Alfa con energía muy alta, pero el poder de penetración es muy bajo, pues bastan unas cuantas hojas de papel para pararlas completamente. No es útil para radiografía.

- Radiación Beta: La radiación Beta no es monoenergética, pero puede tener energías hasta del orden de 11 MeV. La energía promedio es del orden del 0.4 del máximo.

La radiación Beta es más penetrante que la radiación Alfa y puede atravesar hasta de 0.35" de plástico para detenerla completamente.

Las partículas Beta son de gran utilidad para cierto tipo de trabajo de investigación por autorografía o betagrafía para detectar en placa radiográfica tintas indelebles con la diferencia de que el resultado final se observa en la placa radiográfica en forma positiva y se negativa como en la radiografía común.

- Radiación Gamma: La radiación gamma es frecuentemente acompañada con la radiación Alfa o Beta. Los rayos son monoenergéticos para un isótopo en particular, pero puede emitir diferentes energías.

La radiación Gamma, la de mayor interés en radiografía fue conocido como ondas electromagnéticas de muy corta longitud de onda, hermana de los rayos "X" y de la luz visible. El adelanto de la teoría ha hecho más conveniente pensar de los rayos Gamma, rayos "X" y luz visible, como proyectiles de energía llamados fotones. Un fotón de luz visible es similar a un fotón de rayos Gamma, con la diferencia de que los fotones de luz visible son de aproximadamente 1.5 a 3 electrón-volt y los de rayos Gamma pueden fluctuar en energías de unas cuantas decenas de miles a varios millones de electrón-voltos.

- Rayos "X": Los rayos "X" y los rayos Gamma de la misma energía son idénticos en carácter y diferentes sólo en la forma en que son producidos. Cuando los rayos "X" son generados en una máquina ordinaria de rayos "X" se emite un espectro ancho. La distribución de energía varía, desde el pico de Kilo-Voltaje (KVP), donde se puede medir en el máximo voltaje, hasta valores muy bajos.

Los isótopos emiten rayos Gamma únicamente a discretos niveles de energía peculiares a ese isótopo en particular. Lo anterior explica la anomalía por la cual la radiación de Iridio 192 con un promedio de energía de cerca de 400 MeV, es ligeramente más penetrante que la radiación de una máquina de rayos "X" de 1,000,000.0 de electrón-voltos, y porque la radiación de cobalto 60 con un promedio de 1.25 MeV también es ligeramente más penetrante que la radiación de una máquina de 2 millones de electrón-voltos. La realidad que la mayor parte de rayos "X", están producidos a energías considerablemente bajas, probablemente del 60% del voltaje pico.

- Rayos Gamma o blando: Equipos especiales de rayos "X" pueden producir radiaciones "X" de larga longitud de onda, como los rayos Gamma. Energías tan bajas son de gran utilidad en el campo radiográfico industrial, para inspección de textiles,

cuero, madera, papel, etc., y en el laboratorio de investigación para exámenes de ejemplares botánicos y biológicos como escarabajos y moscos y seres tan pequeños que se puedan radiografiar sin que se sustran en el proceso.

2.4.1 Selección de la fuente de radiación: Dependiendo del tipo de fuente que se vaya a utilizar durante el radiografiado se tomarán en cuenta las siguientes recomendaciones:

- En el caso que la fuente sea de rayos "X" se tendrá el cuidado que el voltaje no exceda los valores mostrados en la tabla 2.3.

- Para el uso de fuentes de rayos gamma se recomienda que el espesor mínimo para isótopos radiactivos debiera ser lo indicado en la tabla 2.4..

Se debe tomar en cuenta que el espesor máximo a utilizarse con un isótopo radiactivo está dado por el tiempo de exposición al que se someta la pieza a inspeccionar.

MATERIAL	ESPESOR MÍNIMO	
	IRIDIO 192	COBALTO 60
Acero	0.75 in	1.50 in
Cobre	0.65 in	1.30 in
Aluminio	3.50 in	---

Tabla 2.4 Espesores mínimos para isótopos radiactivos, según el código ASME sección V artículo 2 t-242.

### 2.5 Factor de equivalencia radiográfica:

El factor de equivalencia radiográfica de un material es aquel factor por el cual será multiplicado el espesor del material para obtener el espesor de un material estándar que tenga el mismo grado de absorción que el material base a radiografiar. Se considera como material base o estándar al acero. Este factor se utiliza para:

1.- Para establecer el espesor práctico de otros materiales distintos al acero.

2.- Una vez determinado este espesor tipo se podrá fijar los tiempos de exposición para el material a inspeccionar

Este factor se muestra en la tabla 2.5.

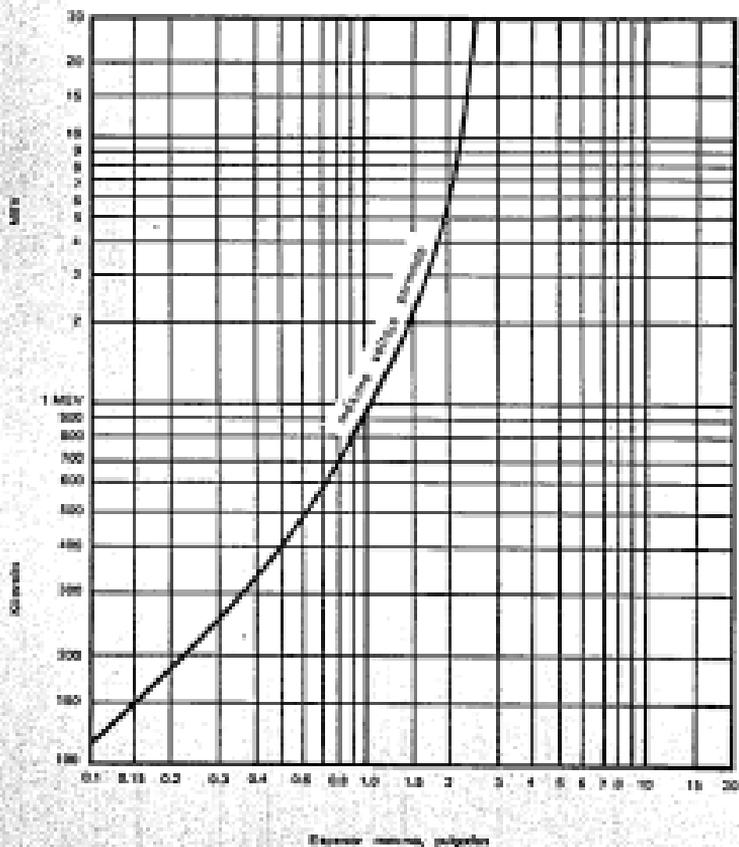


Tabla 2.1. Máximo voltaje permitido para el acero, según código ASME, sección V artículo 3, t-340(a)

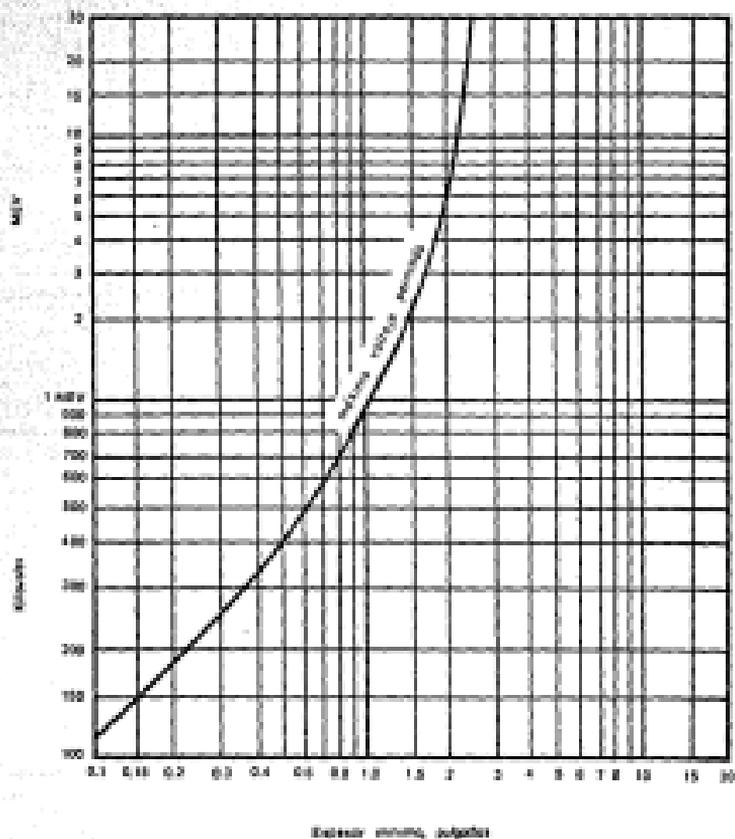


Tabla 2.3. Máximo voltaje permitido para el acero, según Código ASME, sección V artículo 3, t-340(a)

METAL	NIVEL DE ENERGIA						
	150KV	150KV	210KV	210KV	1 Hr	4-450W	Ir192
Hierro	0.05	0.05	0.08				
Aluminio	0.08	0.12	0.18				0.15
Aleaciones	0.10	0.14	0.18				0.15
Titanio		0.24	0.24		0.9	0.9	0.9
Acero	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
Cobre	1.5	1.6	1.4	1.4	1.1	1.2	1.1
Zinc		1.4	1.3			1.2	1.1
Bronce		1.4	1.3		1.2	1.0	1.1

Tabla 2.5 Factor de equivalencia radiográfica según código ASME sección V, artículo 32 SE 94

### 2.6 Componentes de una exposición radiográfica:

Una vez determinado el objeto a radiografiar es necesario colocar correctamente un determinado número de accesorios en una relación prescrita. La fig. 2.3 muestra la localización esquemática de los diferentes componentes que intervendrán durante el radiografiado. La radiografía resultante deberá definir claramente el área que se está radiografiando.

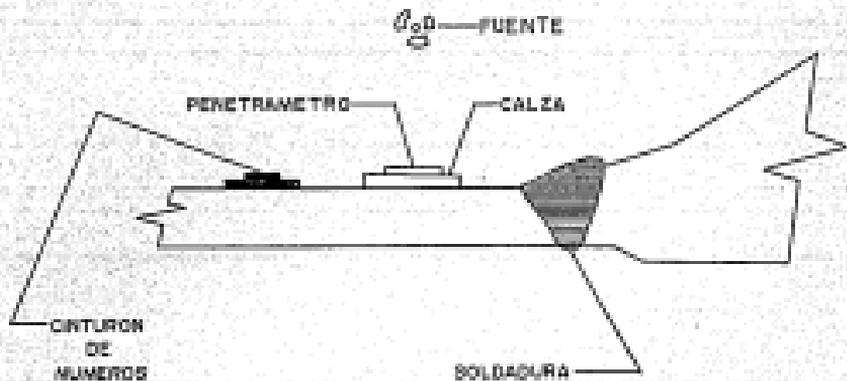


Fig. 2.3 Colocación geométrica de la identificación radiográfica

3.6.1 Penumbra geométrica: La sombra secundaria o penumbra geométrica alrededor de una imagen como resultado de la radiación angular emitida desde un punto de la fuente y que pasa a través de un punto del objeto. La penumbra o indefinición geométrica registrada en la película se incrementa si:

a) El tamaño físico de la fuente se aumenta cuando el objeto y la película están fijos.

b) El tamaño de la fuente es fija y se disminuye la distancia fuente-película.

c) La fuente y distancia fuente-película están fijos, pero aumenta la distancia objeto película.

Esta indefinición crea un desvanecimiento de las orillas de una imagen por lo que se puede concluir que la mayor indefinición marca real será la imagen. La penumbra geométrica no debe exceder los límites indicados en la tabla 3.6.

Espesor del material, in	$U_g$ max. in.
0-2	0.020
2-3 incl.	0.030
3-4 incl.	0.040
Mayor que 4	0.050

Tabla 3.6 Valores de la penumbra geométrica según código ASME, sección V, artículo 2 t-151

La penumbra geométrica se calcula de la siguiente forma:

$$U_g = F \cdot t / d$$

Donde:

$U_g$  = Valor de la penumbra geométrica  
 $F$  = Tamaño de la fuente de radiación  
 $t$  = Espesor del material a radiografiar  
 $d$  = Distancia fuente objeto

Otro método para calcular la penumbra geométrica es utilizando el nomograma de la tabla 3.7 como sigue:

a) Distancia fuente objeto= 40 in  
 Tamaño de la fuente= 500 mils  
 Espesor del objeto= 1.5

Se traza una línea recta entre los valores de 500 mils en la escala  $F$ , y 1.5 in. en la escala  $t$ , posteriormente se traza otra línea entre el punto de intersección de la línea anterior y la escala  $p$  y el punto de 40 in. de la escala  $d$  para así localizar el valor de la penumbra  $U_g$  en la escala apropiada.

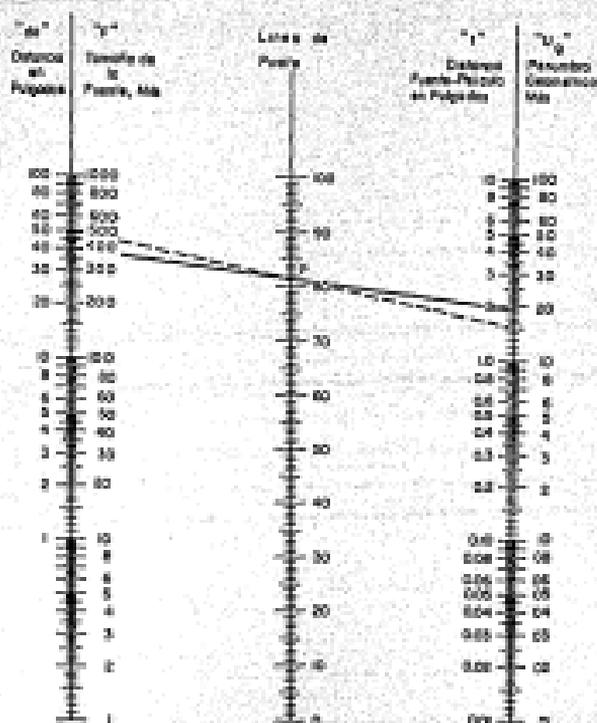


Tabla 2.7 Hologramas para el cálculo de la penumbra geométrica, según Código ASME, sección V, artículo 32, ss-34

Debido a que en los rayos "x" y gamma la radiación es divergente, la imagen radiográfica de un objeto o estructura cambiará de tamaño al que realmente es. El grado de alargamiento puede aumentar disminuyendo la distancia fuente objeto o incrementando la distancia objeto película (fig. 2.3b).

Si la película no se encuentra paralela al objeto, la imagen radiográfica se distorsiona por el alargamiento y aumento que existe entre la distancia película objeto. Una medida en el cambio de distorsión estará dado por el cambio de tamaño que hay entre la imagen y el objeto real (fig. 2.3c).

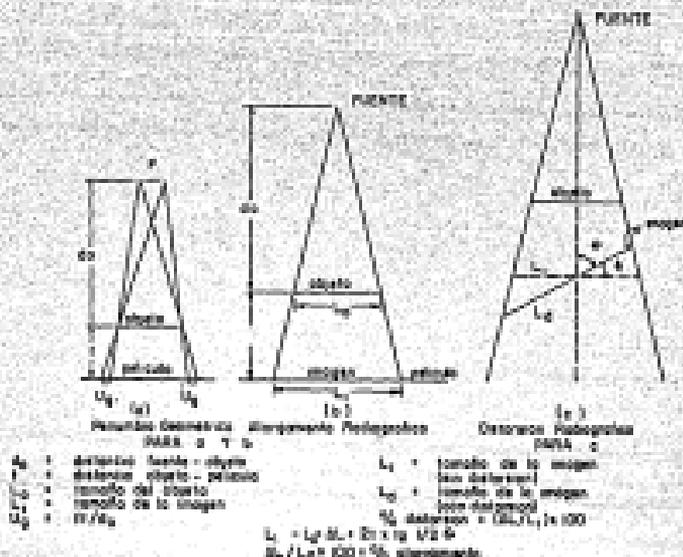


Fig 2.3 Efectos de la colocación del objeto película, según código ASME, sección V, artículo 23, ss-94

### 2.7 Indicadores de imagen (penetrámetros):

La radiografía deberá ser efectuada con una técnica, lo suficientemente buena para mostrar la imagen del penetrámetro y el barrenado especificado, el cual es un indicador esencial de la calidad de la imagen radiográfica.

Esto no quiere decir que el penetrámetro nos indique un criterio de aceptación o rechazo de los defectos, sólo nos muestra si el proceso de radiografía fue el correcto.

En la práctica el nivel de calidad de radiografía aceptable es del 24 (2-24), en donde el primer número de esta designación se refiere al espesor del penetrámetro expresado como porcentaje del espesor de la muestra a ser radiografiada, el segundo número se refiere al barrenado del penetrámetro que se debe observar en la radiografía. Esta designación está relacionada como múltiplo del espesor del penetrámetro (T).

Los penetrámetros típicos son los especificados por ASME ó ASTM. Cualquier tipo de penetrámetro tendrá tres barrenos. Los diámetros de estos barrenos, en el tipo ASME, será de 1,3 y 4 veces el espesor del penetrámetro y en el tipo ASTM sus diámetros serán de 2,3 y 4 veces el espesor del penetrámetro. En la tabla 2.8 se muestran los espesores típicos de los penetrámetros tipo ASME.

Designación	Espesor	Diámetro 1"	Diámetro 3"	Diámetro 4"
5	0.008	0.018	0.020	0.040
7	0.007	0.018	0.020	0.040
10	0.010	0.020	0.025	0.040
12	0.012	0.022	0.028	0.050
15	0.015	0.025	0.030	0.050
17	0.017	0.027	0.035	0.050
20	0.020	0.030	0.040	0.050
25	0.025	0.035	0.050	0.100
30	0.030	0.040	0.060	0.120
35	0.035	0.045	0.070	0.140
40	0.040	0.050	0.080	0.160
45	0.045	0.055	0.090	0.180
50	0.050	0.060	0.100	0.200
60	0.060	0.070	0.120	0.240
80	0.080	0.090	0.160	0.320
100	0.100	0.100	0.200	0.400
120	0.120	0.120	0.240	0.480
140	0.140	0.140	0.320	0.640
200	0.200	0.200	0.400	0.800

Tabla 2.8 Número de penetrámetro según código ASME, sección V, T-262.1

Los penetrámetros son fabricados de un material similar al del objeto radiografiado o en su defecto que tenga aproximadamente el mismo grado de absorción de radiación del material a radiografiar. Además debe cumplir con las normas de diseño mostradas en la figura 2.4..

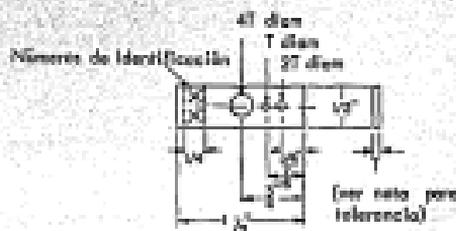
2.7.1. Materiales para penetrámetros: Los materiales a utilizar para la fabricación de penetrámetros se distinguen por los símbolos químicos del Magnesio (Mg), Aluminio (Al), y Titanio (Ti). Estos son llamados metales líquidos ligeros en donde el grado de absorción de radiación va aumentando del Magnesio al Titanio. Existen otros 5 grupos restantes que están identificados con los números del 1 al 5 y son los llamados metales pesados (Acero, materiales a base de cobre y sus aleaciones, Níquel y sus aleaciones, etc.). Esta designación se ha realizado en base a resultados obtenidos durante pruebas realizadas en probeta de 0.75" y con una fuente de 100 Kv.

Grupo Mg: Para distinguir un penetrámetro de este tipo se le pondrán dos muescas, una en cada lado del penetrámetro. Se utiliza para radiografiar Magnesio y todos aquellos materiales en los que el Magnesio sea su principal componente.

Grupo Al: Este penetrámetro se distingue por tener dos muescas en un lado del penetrámetro y una al final de este. Se utiliza en objetos de Aluminio o que su principal componente sea el Aluminio.

Espesor mínimo penetrámetro	0,005"
Diámetro mínimo barrenos IT	0,010"
Diámetro mínimo barrenos 3T	0,020"
Diámetro mínimo barrenos 4T	0,040"

El barrenado debe ser axial a la superficie del penetrámetro



Espesor para penetrámetros desde 0,005" hasta 0,050"

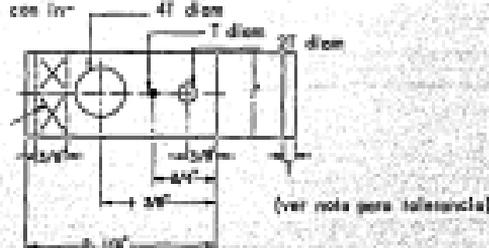
Desde 0,005" hasta 0,010", ver tabla

Desde 0,010" hasta 0,020", fabricarlos con incrementos de espesor de 0,0025"

Desde 0,020" hasta 0,050", fabricarlos con incrementos de espesor de 0,005"

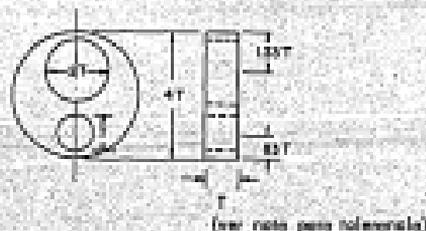
Los espesores indicados entre los incrementos están permitidos, pero el espesor no debe exceder el mínimo permitido.

Número de identificación



Para penetrámetros en espesores desde 0,060" hasta 0,160", fabricarlos con incrementos de espesor de 0,010"

Penetrámetros con espesores de 0,180" o más, fabricarlos con incrementos de espesor de 0,005"



NOTA 1: La tolerancia para el espesor y barrenado de penetrámetro debe ser la menor entre  $+10\%$  o la mitad del incremento de espesor entre dos tamaños distintos.

NOTA 2: 1" = 25,4mm

Fig. 2.4 Diseño de penetrámetros según código ASME, sección V, artículo 23, no-142

Grupo T1: Para distinguir un penetrámetro de este tipo tendrá tres muescas al lado del mismo. Se utiliza en materiales cuyo principal componente sea el Titanio.

Grupo 1: Este se presenta ninguna marca en especial y se fabrica de acero al carbón o acero inoxidable 304. Se utiliza para radiografiar todos los aceros al carbón, aceros inoxidables, aleaciones de Magnésio-Níquel-Aluminio.

Grupo 2: Se identifica con una muesca al final del penetrámetro, fabricándose de una aleación de Aluminio-Bronce o Níquel-Aluminio-Bronce para usarlo en aleaciones de Aluminio-Bronce y Níquel-Aluminio-Bronce.

Grupo 3: Se identifica por tener dos muescas al final del penetrámetro. Se fabrica de una aleación de Níquel-Cromo-Nítrógeno. Se aplica para radiografiar materiales de la misma composición química y además aquellas que tengan el 1.8% de Níquel.

Grupo 4: Debe tener una muesca al lado del penetrámetro y fabricarse de una aleación 70-30 Níquel-Cobre o una aleación 70-30 Cobre-Níquel. Se utiliza en todas las aleaciones de Níquel, Cobre y Bronces.

Grupo 5: Presenta dos muescas a un lado del penetrámetro, se fabrica de aleaciones de estaño-Bronce. Se utiliza para radiografiar todas las aleaciones de este tipo incluyendo válvulas de bronce, a excepción de aquellas que tengan un alto contenido de plomo. Se toma en cuenta que en el caso de los Bronces esta regla no se debe aplicar. (Ver Fig. 2.3)

2.7.2 Selección y ubicación del penetrámetro: El penetrámetro se debe colocar del lado de la fuente y normal al haz de radiaciones siempre y cuando se tenga acceso al lugar, en caso contrario se permite colocar el penetrámetro en el lado de la película siempre y cuando se identifique en la película este caso colocando una letra "f" a un lado del penetrámetro. El penetrámetro a utilizar se selecciona de acuerdo a la tabla 2.9.

En general cada exposición radiográfica debe tener un penetrámetro debidamente seleccionado, en caso de recipientes cilíndricos o componentes planos donde son usados uno o más portaplacas para una exposición, por lo menos la imagen de un penetrámetro debe aparecer en cada radiografía, excepto donde la fuente sea colocada en el eje de objeto y se radiografie una circunferencia completa o una porción de la circunferencia, en tal caso por lo menos tres penetrámetros se deben colocar a 120° entre ellos.

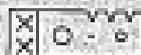
2.7.3 Calzas: Gracias a la naturaleza del proceso de soldadura es prácticamente imposible obtener una soldadura que tenga una fusión completa en la superficie sin tener alguna cantidad de refuerzo, por esto se debe colocar una calza por debajo del penetrámetro para compensar el refuerzo de soldadura.



Penetrómetro tipo 000, para materiales del grupo MG



Penetrómetro tipo 00, para materiales del grupo A1



Penetrómetro tipo 0, para materiales del grupo T1



Penetrómetro tipo 1, para materiales del grupo 1



Penetrómetro tipo 2, para materiales del grupo 2



Penetrómetro tipo 3, para materiales del grupo 3



Penetrómetro tipo 4, para materiales del grupo 4



Penetrómetro tipo 5, para materiales del grupo 5



Detalle de la muestra

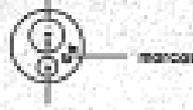


Fig 2.5 Marcas de identificación en penetrómetros, según código ASME, sección V, se-142

El material de la calza es radiográficamente similar a la soldadura. El espesor de la calza es elegido de tal forma que el espesor total que está siendo radiografiado bajo el penetrómetro sea el mismo que el espesor total de la soldadura, incluyendo cualquier refuerzo, placa de respaldo y otras variaciones del espesor como geometría de boquillas etc (fig 2.6).

### 2.6 Producción de la imagen radiográfica:

Primero debemos entender que durante el revelado, la radiación golpea la emulsión fotográfica afectando la película de tal forma que la emulsión aparece oscurecida después del revelado y sólo en aquellas zonas donde la radiación llega a la película. Esta radiación es la que determina el grado relativo de ennegrecimiento en la película radiográfica. La emulsión de la película se afecta en tanto de la misma forma que la película fotográfica, excepto que la última depende de las reflexiones de las diferentes longitudes de onda del objeto fotográfico, en

Tanto que la diferencia en la densidad de la película radiográfica depende de la absorción selectiva del haz de radiación conforme pasa al objeto radiografiado. Esto resulta en diferentes cantidades de radiación que emergen de las diferentes áreas de la superficie del objeto (fig 3.7).

#### PENETRANETRO

ESPESOR MATERIAL (in)	LADO DE LA FUENTE NUMERO	LADO DE LA FUENTE BARRIDO	LADO DE LA PELICULA NUMERO	LADO DE LA PELICULA BARRIDO
0-0.25	10	4T	7	4T
0.25-0.375	12	4T	10	4T
0.375-0.50	15	4T	12	4T
0.50-0.625	18	4T	15	4T
0.625-0.75	17	4T	15	4T
0.75-0.875	20	4T	17	4T
0.875-1.00	20	4T	17	4T
1.00-1.25	25	4T	20	4T
1.25-1.50	30	2T	25	2T
1.50-2.00	35	2T	30	2T
2.00-2.50	40	2T	35	2T
2.50-3.00	45	2T	40	2T
3.00-4.00	50	2T	45	2T
4.00-6.00	60	1T	50	2T
6.00-8.00	80	2T	60	2T
8.00-10.00	100	2T	80	2T
10.00-12.00	120	2T	100	2T
12.00-16.00	140	2T	120	2T
16.00-20.00	200	2T	160	2T

Tabla 3.9 Selección de penetranómetros

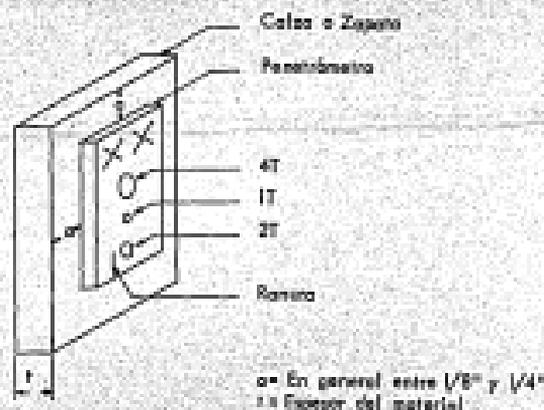


Fig. 3.4 Arreglo de la calza y el penetrómetro.

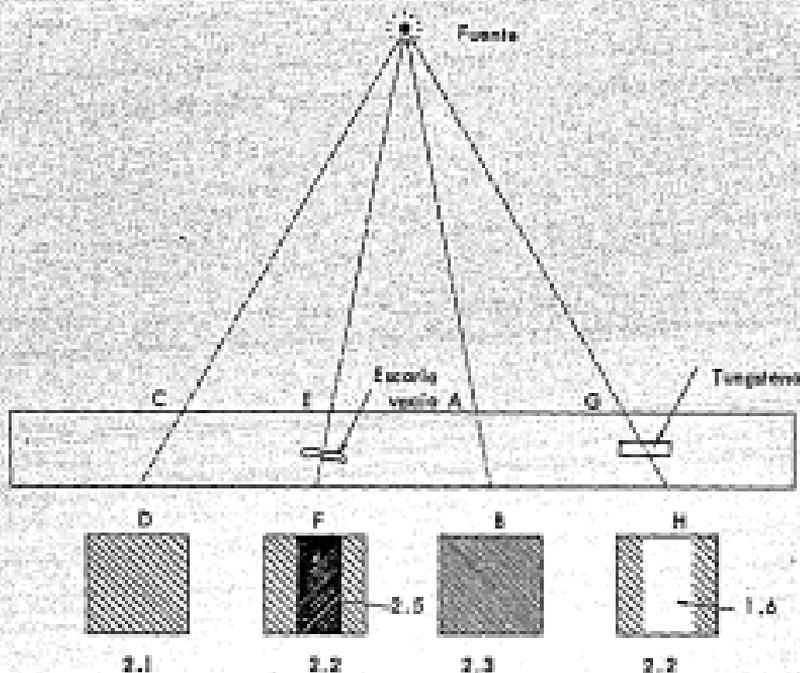


Fig. 2.7. Diferencia de densidades en película radiográfica.

Cuando la radiación golpea la emulsión de la película radiográfica compuesta de una gelatina, que contiene cristales de bromuro de plata uniformemente distribuidos, estos cristales son ionizados en iones de plata e iones de bromuro en una cantidad proporcional a la radiación que golpea a los cristales, creando así una imagen latente, la cual está presente pero no visible dentro de la emulsión y que aparece subsecuentemente después que la película ha sido sujeta a una solución química reveladora. Esta solución química reacciona rápidamente con los cristales de bromuro de plata para formar un depósito de plata metálica negra. Los iones de bromuro se liberan de la emulsión y reaccionan con los iones de potasio en el revelador para formar bromuro de potasio, el cual es posteriormente desechado. Los cristales remanentes de AgBr dentro de la emulsión que no ha sido ionizada por la radiación se remueven en el tratamiento químico de fijado. Este último paso produce una película con colores que van desde el gris al negro cuando todos los cristales blancos de bromuro de plata no ionizados se eliminan.

## 2.2 Interpretación de defectos radiográficos:

Según la fig. 2.7 la radiación que pasa perpendicular a la placa A-B, ennegrecerá la película bajo la placa a un valor de densidad, por ejemplo de 2.3.

La radiación que llega a la misma fuente, pero penetrando la placa de C-D, ennegrecerá la película a una cantidad menor debido a que el espesor de la placa al cual debe penetrar el haz de radiación en esa ángulo es mayor que el espesor A-B, por lo tanto, más de la energía de radiación es absorbida por la placa (C-D) y no alcanzará la película.

En el caso que exista un área vacía, siendo menos densa que que el área circundante, permitirá que pase más radiación a través de la placa (E-F), que el material adyacente a ésta. El área vacía se muestra en la radiografía como un área oscurecida, como se muestra en la fig. 2.7. Debido a una mayor cantidad de radiación esta golpeando la película. Si una inclusión de densidad mayor, tal como tungsteno se localiza, se muestra como una parte clara en la radiografía, dado que la inclusión absorbe más energía de radiación que el mismo volumen del material de la placa.

Aún cuando la presente descripción nos indica exclusivamente la forma esencial como aparecen los distintos cambios de densidad en una radiografía, se pueden mencionar los siguientes defectos y como se ven en la radiografía:

1.- Porosidad: La porosidad en la radiografía se muestra como puntos redondeados oscurecidos y pueden ser esparcidos aleatoriamente alineada, individual o agrupada. Esta puede ser causada por una falta de limpieza, electrodos impropriadamente seleccionados, control de corriente arco malo, pobre técnica de soldadura o metal base defectuoso. Cualquiera de éstos produce gases, los cuales son atrapados durante el proceso de soldadura. Generalmente la porosidad toma la forma de una esfera y aparece como círculos de diferentes medidas en las radiografías.



Porosidad dispersa



Porosidad agrupada

2.- Inclusiones de Tungsteno: La inclusión de Tungsteno aparece en la radiografía como una mancha clara debido a que su densidad es mayor que la del metal base. Las manchas generalmente son de forma definida irregular individual o agrupadas. Estas se originan por las puntas de tungsteno del soplete de soldadura que toca el material fundido durante el

proceso.



Porosidad alineada en el cordón de soldadura



Inclusiones de fundente

3.- Falta de penetración: La falta de penetración aparece en la raíz y generalmente se ve en la radiografía como una o dos líneas oscurecidas cerca del centro de la soldadura. La anchura de estas líneas pueden variar desde líneas oscuras delgadas definidas hasta líneas anchas difusas. La falta de penetración que ocurre en la raíz de la soldadura se debe a un espaciamiento inadecuado o insuficiente corriente de arco. También puede ocurrir debido a la preparación inadecuada del bisel de soldadura.



Falta de penetración



Falta de penetración por desalineamiento

4.- Falta de fusión: La falta de fusión puede ocurrir en las orillas de la soldadura a diferentes profundidades en donde, la soldadura se funde inadecuadamente en el metal base o en cualquier otra área en el espesor soldado. Esto generalmente es indicado como una sola línea oscurecida y puede o no ser continua. La falta de fusión puede ser causada por un precalentamiento inadecuado o metal base inadecuado y/o de aporte defectuoso.



Falta de fusión entre cordones



Falta de fusión

5.- Inclusiones de escoria: Las inclusiones de escoria son representadas en la radiografía por líneas oscurecidas y generalmente alargadas, las cuales algunas veces tienen extremos redondeados y puntagudos. La escoria puede presentarse sola, agrupada o en pedacos alineados. Se forma a partir del fundente utilizado en la operación de soldadura. Puede

atraparse durante la operación de soldadura debido a un tiempo insuficiente de fundición del metal en el cual la escoria puede desprenderse de la superficie, también puede quedar atrapada en las orillas de una pasada múltiple debido a una limpieza inadecuada antes de ejecutar la siguiente pasada, o por la penetración inadecuada del arco en la pasada anterior.



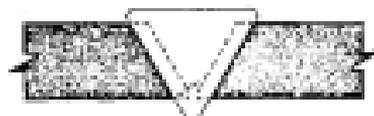
Doble línea de escoria



Escoria entre cordones

4.- Roturas: Una rotura vista en una radiografía se representa por una línea oscurecida. Cuando se le compara con la zona inmediatamente adyacente a ésta línea, las roturas pueden tomar una gran variedad de formas y configuraciones, pudiendo ser líneas rectas o líneas en zig-zag, paralelas o transversales a la dirección de soldadura o en algún otro ángulo. En algunos casos las roturas se pueden extender hacia el metal base. La rotura principal puede algunas veces tener numerosas roturas finas ramificadas.

Las roturas son los defectos más difíciles de detectar dado que el haz de radiación debe alinearse muy cuidadosamente con el plano de la rotura a fin de mostrar su imagen en la película radiográfica. Las roturas en caliente ocurren generalmente en soldaduras debido a las tensiones internas que son generadas durante la solidificación y que exceden la resistencia del metal de soldadura a una temperatura particular durante el enfriamiento de dicha soldadura. Las líneas cortas oscuras que ha primera vista parecen ser roturas, algunas veces se mal interpretan como tales, por ejemplo: Desalineamientos, falta de penetración, etc., pueden resultar en una indicación semejante a una rotura en la radiografía. Es importante chequear físicamente la soldadura a fin de determinar si la indicación es realmente un defecto o es simplemente una indicación la cual puede ser atribuible a otra causa, en tales casos la situación debe describirse con detalle en la documentación adecuada a la soldadura.



Grieta longitudinal en la raíz



Grieta longitudinal en la raíz

7.- Desalineamiento: El desalineamiento aparece en la radiografía como una sombra recta definida que ocurre donde la placa cambia abruptamente de espesor debido al juego o desalineamiento axial de la placa o tubo. Este tipo de indicación

es muy difícil de detectar a menos que se examine físicamente las superficies. La causa de este defecto puede ser el fijado o alineamiento impropio y variaciones en las dimensiones nominales que ocurren antes de soldar.



Grieta transversal

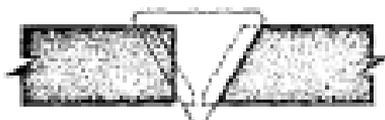


Desalineamiento de las placas

8.- Socavado: El socavado representa una ranura o canal continuo o intermitente fusionado a la orilla de la soldadura en el metal base y que ha quedado sin rellenar con metal de soldadura.

Las causas de socavado están directamente relacionadas con las técnicas empleadas por el soldador y no con la calidad de los materiales y equipo de soldadura específicamente, una elevada corriente, un arco demasiado largo y una velocidad de avance muy rápida tienden a la formación del socavado.

Los socavados se consideran como una discontinuidad externa que reduce la sección de la placa y tubo disminuyendo así su resistencia. Cuando el socavado presenta una forma aguda en forma de V, es muy perjudicial, pues causa concentración de esfuerzos pudiendo dar origen a una rotura.



Socavado interno



Socavado externo

9.- Concavidad en la raíz: La concavidad en la raíz se refiere a la situación provocada cuando el metal de soldadura ha penetrado y fusionado suficientemente todo el espesor de tubo o placa y durante la contracción se provoca una concavidad en el fondo de la soldadura.

El técnico no debe confundirla con la falta de penetración pues esta última deja los bordes de la raíz sin fusionar, mientras que en la concavidad ha fusionado completamente.

La concavidad en la raíz ocurre comúnmente cuando se suelda tubería en posición fija. La concavidad ocurre al soldar la parte inferior del tubo, o sea la posición sobrecabera. La gravedad y la tensión superficial hacen que el metal de soldadura forme una superficie cóncava en la parte interior del tubo. La

concauidad en la raíz se pueda extender a una longitud considerable y a menudo ocupa un cuadrante de la circunferencia del tubo.

En la radiografía, la concauidad en la raíz se muestra con una franja oscura en el centro de la soldadura, pero sin que se demuestre una definición precisa en los lados.

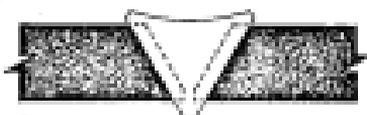


Concauidad en la raíz

10.- Corona baja: La corona baja es un defecto relacionado con el perfil especificado de la soldadura; se presenta cuando los cordones de vista han sido insuficientes para cubrir el espesor del metal base.

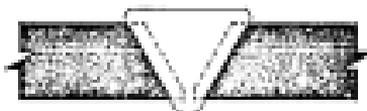
El técnico notará usualmente cuándo exista una corona baja, directamente sobre la soldadura además de que la observará en una radiografía cuándo la soldadura presente una imagen aun más oscurificada que la del metal base.

Cuándo exista la corona baja basta con agregar más soldadura hasta que se cubra totalmente la ranura, pero sin que el refuerzo exceda el valor permitido en la norma aplicada.



Corona baja

11.-Penetración excesiva: Se refiere a aquella en que el cordón de fondo se ha penetrado en forma excesiva, en comparación de lo necesario para cubrir la raíz de la unión. En la radiografía aparece como áreas de densidad sumamente baja.



Penetración excesiva

12.- Quemado: Una quemada es una discontinuidad externa producida cuando una porción de metal de soldadura ha sido soplada dentro del tubo debido a una penetración excesiva.

En términos prácticos, diremos que la quemada ocurre cuando el calor excesivo ha hecho que una porción de la soldadura se gotee, dejando una especie de cráter en forma ovalada. Sólo encontraremos quemadas cuando la ranura se prepara para soldarse por un solo lado y predominantemente, cuando se suelda en posición plana.

No se debe confundir la quemada con la concavidad en la raíz. La quemada es el cráter dejado al desprenderse un gota de metal líquido y es producido por el calor excesivo al detener el arco en un punto cuando se usa un proceso manual o semiautomático.

En una radiografía la quemada aparece como un área oscura más o menos bien definida y de forma ovalada; se localiza en el lugar correspondiente al cordón de fondo.



Soldadura quemada

### 2.10 Estándares de aceptación.

Todas las soldaduras por las cuales el examen radiográfico es requerido (parte ps-11.1 sección I) deben ser radiografiadas en toda su longitud con Rayos X o Rayos Gamma de acuerdo con el artículo 3 de la sección V del código ASME.

En las secciones de soldadura que muestran las radiografías, los siguientes defectos deberán considerarse inaceptables para repararse y radiografiarse nuevamente.

- a) Cualquier tipo de fracture o falta de fusión y/o penetración.
- b) Cualquier inclusión de escoria que tenga una longitud mayor de.

ESPESOR DE LA SOLDADURA		LONGITUD MÁXIMA	
(1/4)	6.35 ----	(3/4)	19.05
(13/16)	20.70 ----	(15/16)	23.80
(1")	25.40 ----	(11/8)	28.60
		(3/16)	6.00mm
		(1/4)	6.35mm
		(5/16)	8.00mm

Tabla 2.10 Longitudes máximas de longitudes de escoria.

c) Cualquier grupo de inclusiones de escoria en líneas que tengan en suma una longitud mayor que 0.8t en longitud 13t, excepto cuando la distancia entre defectos exceda 4 veces la longitud del defecto más grande del grupo.

d) Defectos de formas redondeada en exceso de lo indicado en el punto 2.10.1

2.10.1 Estándares de aceptación de defectos de forma redondeada en soldaduras.

Los defectos de forma redondeada son aquellos en los cuales su longitud no excede 1 veces su ancho. Estos defectos pueden ser circulares, elípticos, cónicos o de forma irregular y pueden llegar a tener coque. Cuando se está midiendo el tamaño de estos defectos la coque debe tomarse en cuenta.

Los defectos alineados en una secuencia de cuatro o más defectos de forma redondeada, deberán considerarse como alineados cuando tocan la línea paralela a la longitud de la soldadura que una al centro de los dos defectos exteriores

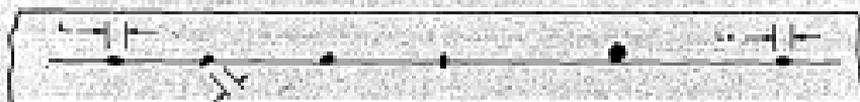
La densidad de los defectos puede variar y adic en los casos que se sospecha que pueda haber fuga deberá considerarse para rechazo. Esto no podría ocurrir si existe suete contraste entre el defecto y la placa.

El tamaño máximo de los defectos redondeados son los estipulados en la tabla 2.11 y se la debe considerar como defecto aislado si la separación del defecto inmediato es de 1" (25 mm).

ESPESOR in	TAMAÑO MAXIMO PERMISIBLE milímetros		TAMAÑO MAXIMO PERMISIBLE DE DEFECTOS QUE NO DEBE CONSIDERARSE milímetros
	al azar	aislada	
1/4 (6.3)	1.3	1.7	0.3
3/16 (7.6)	1.6	2.1	0.6
1/8 (9.5)	1.8	2.5	0.6
7/16 (11.1)	2.2	3.0	0.6
1/2 (12.7)	2.5	3.4	0.6
9/16 (14.3)	2.9	3.8	0.6
5/8 (15.9)	3.2	4.3	0.6
11/16 (17.5)	3.3	4.7	0.6
3/4-3 (19-21)	3.3	5.1	0.6

Tabla 2.11 Tamaño máximo permisible de defectos redondeados.

Los defectos alineados son aceptables cuando la suma de su tamaño sea menor de 0.8t en una longitud de 13t (fig. 2.8). La longitud de los grupos de defectos alineados y el espacio entre grupos deberá cumplir con lo que se indica en la figura 2.9.



La suma de  $L_1$  a  $L_n$  deberá ser menor de Q.M.T. en una long. de  $1/2"$

FIG. 2. ALINEAMIENTO DE DEFECTOS DE FORMA REDONDEADA



La suma de las long. de los grupos deberá ser menor de Q.M.T. en una long. de  $1/2"$

Long. mín. del grupo

$L_1 (1/4" (6.35mm))$  para  $1$  defecto de  $1/4"$

$L_1 (1/3"$  para  $1$  de  $3/4"$  o  $2 (1/2"$

Espaciamiento mínimo de grupos

$2 L_1$ , en donde  $L_1$  es la long.

del grupo siguiente mayor que es más alejado.

FIG. 3. GRUPOS DE DEFECTOS DE FORMA REDONDEADA, ALINEADOS

La distancia entre defectos redondeados no es un factor para determinar la aceptación o el rechazo, excepto como se indica para defectos aislados o grupos de defectos alineados.

Los defectos redondeados que muestran las radiografías no deben exceder de los que se indican en las ilustraciones. La figura 2.10 ilustra varios tipos de variedades, dispersas al azar y defectos agrupados para diferentes espesores de soldadura Nipones de 1/8 (3.2 mm). Estas representaciones ilustran la concentración máxima aceptable para defectos de forma redondeada.

Las figuras para cada rango de espesor representa 6" (152 mm) a escala real de radiografía y no debe agrandarse o reducirse.

La distribución que se muestra no es necesariamente el patrón que pueda aparecer en una radiografía, pero sí son típicos de la concentración y tamaño de los defectos permitidos.

Las ilustraciones para defectos agrupados muestran hasta cuatro veces el número de defectos en un área determinada, que los que se muestra en las ilustraciones de defectos al azar. La longitud de agrupamiento no debe exceder del menor de 3/4 (19.05 mm) o 1.5t.

El existe más de un agrupamiento la suma de las longitudes no deberán exceder a 3/4" en 6" (152 mm) de longitud de soldadura.

### 3.11 Normas de seguridad:

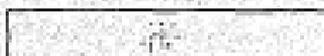
3.11.1 Riesgos: El manejo no adecuado de los materiales radiactivos provoca radiaciones excesivas que producen daños físicos y biológicos parciales o totales, en las células vivas de los organismos.

Es factible hacer una evaluación del nivel de riesgo la cuál está condicionada a la violación que se haya de las siguientes tipos de zonas:

a) Acceso libre	menor a 0.5 Rem/año
b) Vigilado	menor a 1.5 Rem/año
c) Controlada de permancia voluntaria para personal de trabajo	mayor a 1.5 Rem/año menor a 5.0 Rem/año
d) Permanencia limitada	5.0 Rem/año
e) Acceso prohibido	5.0 Rem/operación



Defectos redondeados al azar  
 Concentración típica y tamaños permitidos en 6" de longitud de  
 soldadura



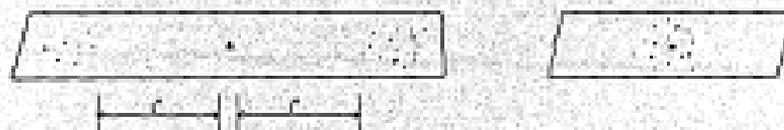
Defectos aislados  
 tamaño máximo de acuerdo  
 con la tabla 3.11

defectos agrupados

Fig. 3.10.1 Para espesores de 1/8 a 1/4 inclusive (3-6.3 mm)



Defectos redondeados al inicio  
 Concentración típica y tamaños permitidos en 6" de longitud de soldadura



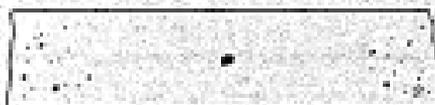
Defecto aislado  
 tamaño máximo de acuerdo a la  
 tabla 2.11

Defectos agrupados

Fig. 3.10.3 Para espesores mayores de 1/4" y hasta 3/8" inclusive  
 (6.3-9.5 mm)



Defectos redondeados al 80%  
 concentración típica y tamaños permitidos en 8" de longitud de  
 soldadura



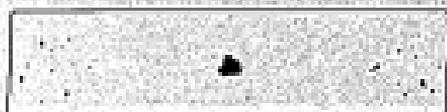
Defectos aislados  
 Tamaño máximo de acuerdo a la  
 tabla 3.11

Defectos agrupados

Fig. 2.10.3 Para espesores mayores de 3/8" y hasta 3/4" inclusive  
 (9.5-19 mm)



Defectos redondeados al azar  
 Concentración típica y tamaños permitidos en 4" de longitud de soldadura



Defecto alineado  
 Tamaño máximo de acuerdo a la  
 tabla 3.11

Defectos agrupados

Fig. 3.10.4 Para espesores mayores de 1/4" y hasta 3" inclusive  
 (19-81 mm)

En consecuencia, la violación a lo anterior ocasiona los daños que a continuación se detallan:

- Dosis agudas recibidas en poco espacio de tiempo de 25 rad. no tienen ningún efecto clínico.

- De 25 a 50 rad. ligeros cambios pasajeros en la sangre con efectos tardíos improbables.

- De 50 a 100 rad. náuseas y fatiga con posible vómitos, cambios marcados en la sangre con restablecimiento tardío y acortamiento de la esperanza de vida.

- De 100 a 200 rad. náuseas y vómitos en las primeras 24 horas, después de una semana caída de cabello, pérdida del apetito, debilidad general y pequeña probabilidad de muerte entre dos y seis semanas después.

- de 200 a 400 rad: náuseas y vómitos al cabo de unas dos horas, después de una semana caída del cabello, pérdida del apetito, fiebre, inflamación grave de la boca y garganta, a la cuarta semana diarrea y hemorragia nasal y probablemente muerte en 50% de los individuos.

- 400 rad en adelante. muerte del individuo a la semana.

Por el manejo no adecuado de los materiales radioactivos se entiende, por mencionar algunas causas, dejar la fuente radioactiva fuera del contenedor más tiempo del necesario para la impresión de la placa radiográfica, no cerrar el equipo adecuadamente con posible caída de la fuente dentro del contenedor, no verificar que la fuente se encuentre dentro del contenedor cada vez que ha sido tomada una placa radiográfica, o no demarcar la zona de riesgo.

## CAPITULO III ULTRASONICO

### 3.1 Generalidades:

El ultrasonido consiste en la aplicación de una serie de pulsos eléctricos al elemento piezoeléctrico (transductor) el cual convierte estos pulsos a energía mecánica en forma de ondas pulsadas con una frecuencia nominal. Este transductor es montado en un contenedor de tal manera que pueda transmitir las ondas dentro del material a través de una superficie preparada adecuadamente y un acoplante. La unidad rastreadora consta del ensamble del transductor, contenedor, superficie de trabajo y conector eléctrico.

El pulso de energía es transmitido dentro de la pieza de prueba, viajando en una dirección normal a la superficie de contacto y es reflejado posteriormente a la unidad rastreadora por la discontinuidades o límites de interfases que están paralelas o cercanamente paralelas a la superficie de contacto. Estos ecos regresan a la unidad rastreadora, donde son convertidos de energía mecánica a eléctrica y son amplificadas por un receptor. Los ecos amplificados (señales) se presentan normalmente en la pantalla de un tubo de rayos catódicos (TRC), en un barrido tipo A. Todo que todo el pulso de energía pasa dentro del sistema de resolución, puede indicarse a lo largo de la línea horizontal base del TRC por deflexiones verticales correspondientes a las amplitudes de los ecos de cada interfase, incluyendo aquellas que provienen de las discontinuidades. Ajustando los controles de barrido, la señal de la pantalla puede ampliarse o reducirse para obtener una relación determinada, entre las señales del TRC y el material que está inspeccionándose desde los cuales se originan las señales. Así una distancia a escala de una discontinuidad y su señal en la pantalla es una relación verdadera. Comparando las amplitudes de la señal de una discontinuidad en la pantalla con las de un patrón de referencia puede determinarse su localización y estimarse el tamaño de la discontinuidad. Las discontinuidades que exceden las dimensiones que tiene el haz de sonido también pueden estimarse determinando la cantidad de movimiento de la unidad rastreadora sobre la superficie de inspección donde se mantenga la señal de una discontinuidad.

Los componentes básicos de un detector ultrasónico de fallas consiste en:

- Fuente de voltaje
- Timer: Para iniciar y sincronizar las fallas.
- Pulsador: Para generar una descarga de corta duración de alto voltaje para excitar el cristal dentro de una vibración resonante.
- Transductor (cristal): Transmite un sonido, de alta

frecuencia dentro de una placa de prueba, recibe eco reflejado y lo convierte en un impulso eléctrico.

- Amplificador o Receptor: Para rectificar y preparar adecuadamente la señal de eco para ser vista.

- Generador de barrido: Traza una línea horizontal a través de la pantalla del tubo de rayos catódicos (TRC) al mismo tiempo que el pulso secuda al transductor.

- Generador marcador: Produce marcas de tiempo en forma de ondas cuadradas, para presentarse simultáneamente con el barrido horizontal y auxiliar en la medición de profundidad.

El ultrasonido es un método confiable y rápido el cual emplea ondas de sonido de alta frecuencia eléctricamente producidas, que penetran metales, líquidos, y muchos otros materiales a velocidades de varios cientos de m/s. Debido a que las técnicas son básicamente fenómenos mecánicos, son particularmente adaptables para la determinación de la integridad estructural de los materiales de ingeniería. Sus aplicaciones consisten en:

- Detección de discontinuidades.
- Medición de espesores.
- Determinación del módulo elástico.
- Evaluación de la influencia de las variables de proceso sobre el material.
- Estudio de la estructura metalúrgica.

Además se desea que el ultrasonido cumpla con las siguientes características:

- Versatilidad.
- Respuesta rápida.
- Exactitud en la medición de una posición del defecto y estimación de su tamaño.
- Gran poder de penetración permitiendo el examen de secciones extremadamente gruesas.
- Alta sensibilidad, permitiendo la detección de defectos pequeños.

3.1.1. Aplicaciones: La técnica ultrasónica se utiliza para detectar traslapos, laminaciones, inclusiones, roturas de soldado, y otros defectos en placas de acero de 0.43 cm a 10.48 cm de espesor. Las discontinuidades tan pequeñas como el 0.5% de espesor de la placa son detectables como lo son las laminaciones,

roturas, recubres, penetración insuficiente, falta de fusión y otras discontinuidades en soldadura.

3.1.2. Limitaciones: Son factores que limitan la prueba ultrasónica:

a) Sensitividad: Capacidad del instrumento para detectar una pequeña cantidad de energía reflejada por una discontinuidad,

b) Resolución: Capacidad del instrumento o equipo para detectar defectos muy cercanos a la superficie de prueba o para separar y distinguir las indicaciones debidas a defectos que se encuentren muy cercanos dentro del espécimen.

c) Discriminación de ruido: Es la capacidad del instrumento para diferenciar entre las señales de los defectos y el ruido indeseado, ya sea de naturaleza eléctrica o acústica.

A su vez las variables anteriores son afectadas por otras, tales como la energía y frecuencia de pulso. En suma, la geometría y condición de la prueba pueden limitar la aplicación de este proceso; por ejemplo, el tamaño, el contorno, complejidad, origen del defecto y estructura interna indeseable, contenido de inclusión y precipitados finos diversos.

### 1.3 Transductores:

Cuando a determinados materiales se les aplica una carga eléctrica alterna, el material se expande y contrae bajo la influencia de estas cargas, y al ser sujetos a compresión y tensión a su vez estos desprenderán cargas eléctricas de sus caras.

La generación de pulso ultrasónico se lleva a cabo usualmente al producir un tren de ondas de radiofrecuencia a la frecuencia deseada a un tiempo preciso y convertir este en vibraciones por medio de transductores piezoeléctricos. Algunos instrumentos no usan el tren de ondas mencionado, pero en cambio, usan un pulso sacudido que permite a la unidad de rastreo seleccionar la frecuencia de operación.

Los materiales más comunes son:

- Cuarzo: trae consigo estabilidad eléctrica y térmica, insoluble en la mayoría de los líquidos, alta resistencia mecánica, excelente uniformidad y resistencia a la vejez, pero a su vez tiene una eficiencia electromecánica comparativamente baja.

- Sulfato de litio: Tiene la facilidad de obtener un amortiguamiento acústico óptimo para una mejor resolución, eficiencia de conversión intermedia y despreciable modo de interacción, su uso se restringe para temperaturas en el rango de 0°C a 40.5°C.

- Cerámicos polarizados: sus ventajas son alta eficiencia de conversión la que da una alta sensibilidad a la unidad de rastreo, debido a su menor resistencia mecánica y relativamente alta capacitancia eléctrica, su uso se restringe a frecuencias a bajo de 15 megaciclos.

3.2.1. Tipo de transductores: La unidad de rastreo consiste de un revestimiento para la protección mecánica, un medio de manejo conveniente para la unidad; el elemento transductor, conexiones eléctricas y un material de respaldo para amortiguamiento de la energía de retrazo que es transmitido por el cristal (fig 3.1).

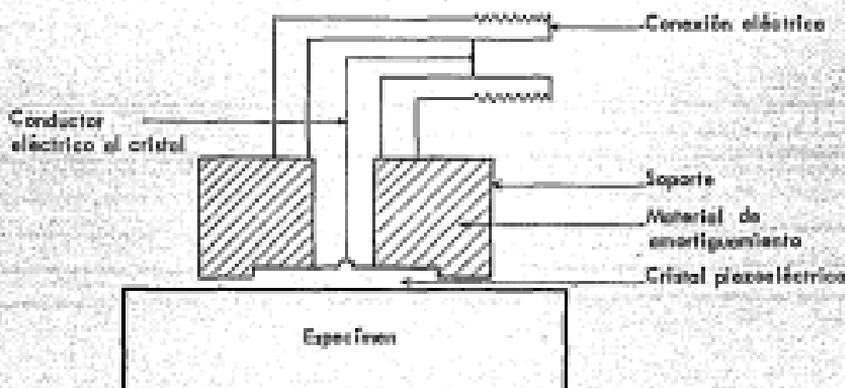


Fig. 3.1 Diagrama de una unidad de exploración ultrasónica

Los diferentes tipos de unidades de rastreo se dividen en contacto e inmersión. El grupo de contacto incluye unidades de rastreo de haz recto, las cuales transmiten ondas longitudinales dentro de un material de forma perpendicular a la superficie. Las unidades de haz angular transmite las ondas de sonido dentro de un material en un ángulo con respecto a la superficie; las unidades de rastreo utilizadas en este grupo se usan en contacto directo con el material, con tan sólo una película delgada de líquido por acoplar. El grupo de inmersión incluye todas las unidades que transmiten sonido dentro del espacio a través de una columna o trayectoria sonora.

3.2.2. Grupos de transductores: Existen tres grupos generales de unidades de rastreo-transmisor-receptor:

- a) Transmisor-receptor común (T-R): Estas unidades

de rastreo emplean un solo cristal y tienen conexiones comunes a las unidades de amplificación de transmisión y recepción.

Dado que la misma unidad actúa tanto de transmisor como de receptor, transmite un pulso de 1 a 4 microsegundos de duración; entonces actúa como un receptor durante un periodo de varios cientos de microsegundos. Este ciclo de transmisión y recepción se repite a razón de 30 a 5,000 veces por segundo o mayores si se requiere para rastreo automático de alta velocidad.

b) Transmisor-receptor combinado: Estas unidades de rastreo tienen dos transductores montados sobre una sola cabeza y aislado acústicamente uno de otro. Un transductor se conecta al pulsado y otro al amplificador. La unidad T-R combinada se usa para inspeccionar cerca de la superficie y para mediciones de espesores de 0.1 cm a 5.08 cm cuando el lado opuesto está rugoso o corroído. La unidad de rastreo transmisor proyecta un haz de vibraciones hacia el material, las vibraciones viajan en el material y son reflejadas hacia la unidad receptora desde cualquier discontinuidad o desde la frontera opuesta al estas paralelas a la superficie de entrada.

c) Transmisor-receptor separados: Se emplean dos cabezas que tienen conexiones eléctricas separadas para el transmisor y el receptor. Una cabeza se usa como unidad transmisora y la otra como unidad receptora.

Los materiales que son de línea granular tienden a dispersar el haz ultrasónico; estos materiales pueden inspeccionarse efectivamente usando unidades de rastreo separadas que están montadas en tapetas de un sólido elástico adecuado.

Cuando se usan tapetas separadas, el ángulo de incidencia puede variarse de acuerdo al espesor de la sección a inspeccionarse.

1.2.3. Propagación de ondas: Las ondas ultrasónicas se propagan en cualquier material elástico, esta propagación de ondas ocurre como un desplazamiento de los elementos sucesivos del material. Si una parte de un sólido se distribuye o desplaza de alguna manera, las moléculas en las otras partes se verán afectadas, pero no simultáneamente. Conforme las moléculas sucesivas en el medio son desplazadas, la perturbación se propaga desde su punto de origen. (Fig 3.3). Dado que la estructura cristalina de todos los materiales es elástica, existe una fuerza restauradora, la cual tiende a regresar cada molécula a su estado original. Debido a la inercia, estas partículas tenderán a oscilar sobre su posición original hasta que queden en reposo. Esta propagación molecular resulta en un tren continuo de perturbaciones llamadas onda de compresión- rarefacción. Si la frecuencia del movimiento es superior a 20,000 ciclos por segundo, las ondas se reflejan como ondas ultrasónicas de compresión. Un pequeño grupo de estas ondas, las cuales ocurren juntas y no están precedidas o seguidas por otras ondas, se denominan un tren de ondas o simplemente pulso. Un pulso puede

tener una de varias formas dependiendo de la amplitud de cada individual, y de la forma en que se acumulan y decaigan. Los modos de vibración más usados son longitudinal, de corte, de superficie y de placa.

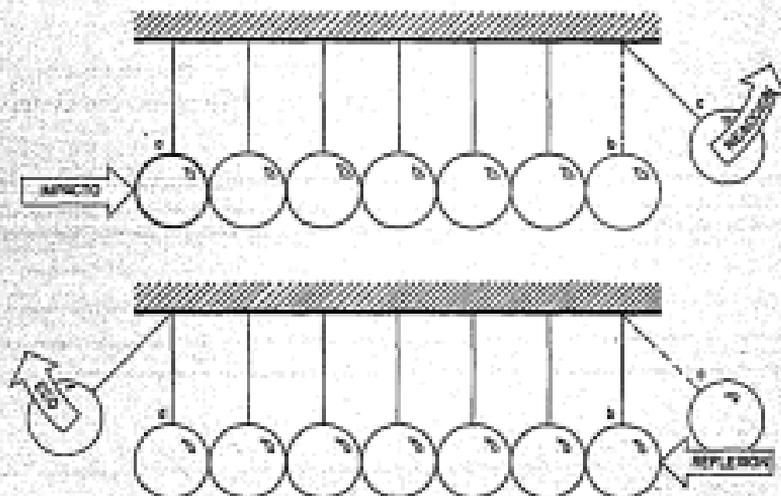


Fig. 1.2 Analogía mecánica de propagación de onda

a) Ondas longitudinales: La onda se dice que es longitudinal (de compresión) cuando el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección del movimiento de la onda, como se ve en la fig 1.3.

El modo longitudinal de transmisión de onda es probablemente el más ampliamente usado en inspección ultrasónica y es también el más fácil de ver con respecto al método de propagación. Esta onda es fácilmente generada y detectada, y tiene una alta velocidad de viaje en la mayoría de los medios. En muchos de los materiales comunes, este tipo de onda tiene una longitud de onda corta en comparación con la sección eficaz del área del transductor. Debido a esto, la energía de la onda se puede enfocar en un haz definido con solo una ligera divergencia. El

principal uso de las ondas longitudinales es el de detección y localización de defectos que presentan un área frontal razonablemente grande hacia la superficie sobre la cual se hace la prueba.

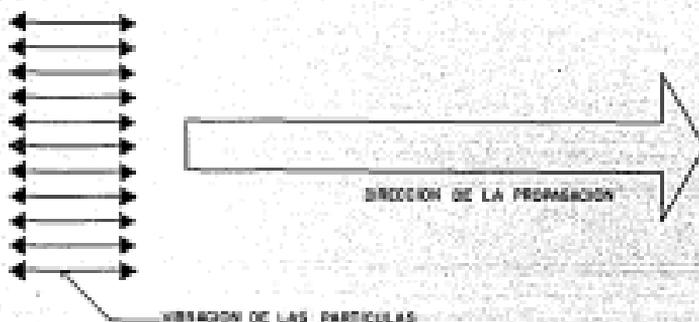


Fig. 3.3 Ondas longitudinales

b) Ondas de corte: La onda se dice de corte (transversal) cuando el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección del movimiento de la onda. Una onda de este tipo se muestra en la fig. 3.4.. Estas ondas tienen una velocidad menor que las longitudinales (en acero y otros metales, aproximadamente la mitad); debido a esta velocidad menor, las ondas de corte tienen longitudes de onda más cortas que las de las ondas longitudinales de la misma frecuencia. Esta longitud de onda más corta las hace más sensitivas a inclusiones pequeñas y consecuentemente, son más fácilmente dispersadas dentro de la pieza a ser examinada.

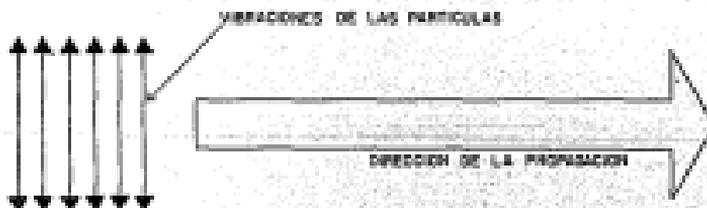


Fig. 3.4 Ondas de corte

La principal ventaja de estas ondas se encuentra en aplicaciones que requieren un haz ultrasónico para transmitirse al objeto en prueba a un pequeño ángulo de la superficie.

c) Ondas de superficie (Rayleigh): El principio de propagación de las ondas superficiales fue descrito matemáticamente por Lord Rayleigh, hacia 1873. Las ondas de superficie viajan con poca atenuación en la dirección de propagación, pero su energía se disminuye rápidamente conforme la onda penetra bajo la superficie. Evidentemente estas ondas se pueden relacionar con ondas de agua que viajan sobre un pequeño cuerpo de agua, dado que viajan en la superficie de una parte, penetrando sólo a una profundidad de aproximadamente una longitud de onda. El desplazamiento particular del movimiento de la onda sigue una órbita elíptica consistente de movimientos de onda longitudinal y de corte, como se muestra en la fig. 3.5.



Fig. 3.5 Ondas de superficie

La velocidad de las ondas de superficie depende del material y es aproximadamente nueve décimos de la velocidad de la onda de corte. Estas ondas son afectadas en su propagación, por variaciones en dureza, recubrimientos, picaduras o roturas superficiales, y son fácilmente amortiguadas por suciedad y grasa en la superficie de la pieza. Las ondas de superficie algunas veces se producen como un efecto indeseable, especialmente cuando la superficie de contacto es rugosa.

Las ondas no se limitan a superficies planas y lisas, ellas pueden viajar alrededor de curvas y contornos superficiales. Las esquinas agudas, tales como la fronteras de las placas o de grietas, reflejarán este tipo de ondas. De hecho, esta

característica de viajar en los contornos es lo que las hace útiles para detectar grietas superficiales

d) Ondas de placa ( $\lambda_{pb}$ ): Cuando las vibraciones ultrasónicas se introducen en una lámina relativamente delgada, la energía se propaga en forma de ondas de placa. Estas ondas algunas veces se refieren como ondas  $\lambda_{pb}$ , lo cual se considera incorrecto dado que, estrictamente hablando, las ondas de  $\lambda_{pb}$  nunca ocurren en la práctica.

A diferencia de los modos mencionados anteriormente, la velocidad de las ondas de placa depende tanto de la frecuencia como del espesor de la placa. Existe un movimiento complejo semejante a las órbitas elípticas para las ondas superficiales. Técnicamente existe la posibilidad de un número infinito de modos de onda. En forma simplificada, pueden dividirse en dos tipos básicos: Los tipos simétricos se conocen como ondas dilatacionales y los asimétricos como ondas de flexión.

El modo asimétrico puede describirse al relacionar su acción al mover un tapete, al secudir abruptamente una orilla de él, tal que al movimiento se conduce a través de su longitud.

El modo simétrico puede demostrarse al pulsar abruptamente y secudir una esquina de, por ejemplo, una delgada hoja de metal; la onda resultante viaja hacia abajo de la hoja por alargamiento y acortamiento sucesivo de la misma hoja, como se ve en la fig. 3.6.

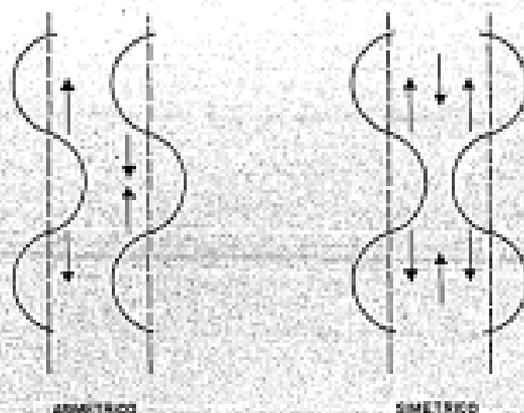


Fig. 3.6 Ondas de placa

Las ondas de placa son excelentes para detectar áreas no limitadas en estructuras laminadas tales como paneles o elementos combustibles. Las ondas de placa pueden usarse también para encontrar roturas radiales en tuberías en las que se extiendan tanto como 1/1000 bajo la superficie y con una sensibilidad mucho mayor que las ondas de corte.

### 3.2.4. Vibraciones ultrasónicas.

Todos los métodos mecánicos de prueba involucran muchos fenómenos descritos por las leyes fundamentales de la acústica y de la estática. Los diferentes métodos difieren principalmente en la frecuencia y magnitud de las tensiones desarrolladas en el material de prueba. El ultrasonido emplea esfuerzos de baja amplitud y los cuales no afectan permanentemente una pieza a prueba debido a las longitudes de onda corta y la relativamente baja energía de las vibraciones ultrasónicas que son transmitidas a través del material. Por otro lado, las pruebas mecánicas destructivas, tales como las pruebas físicas estáticas y de fatiga de vibración forzada involucra esfuerzos de alta amplitud. Estos esfuerzos de alta amplitud pueden causar calentamiento, efectos no-lineales, deformación permanente y la eventual ruptura del objeto sujeto a prueba.

Las ondas de sonido más allá del rango audible del oído humano son conocidas como vibraciones ultrasónicas. El término abarca todas las ondas de vibraciones de una frecuencia más grande que 16 KHz. Las vibraciones ultrasónicas de las frecuencias menores actúan esencialmente en la misma forma que las ondas audibles. La mayoría de la inspección ultrasónica se hace a frecuencias tan bajas como 15 KHz y tan altas como 200 KHz.

En la inspección práctica, la selección de la frecuencia depende de la sensibilidad deseada y penetración requerida del sonido; alta frecuencia para sensibilidad y baja frecuencia para penetración. En general, las ondas de sonido de todas las frecuencias penetran material de grano fino. Sin embargo, conforme la estructura del grano resulta más gruesa, se puede esperar que ocurra interferencia en forma de dispersión cuando se usen frecuencias más altas (menores longitudes de onda) y se obtendrán mayores profundidades de penetración al recurrir a menores frecuencias (mayores longitudes de onda).

La frecuencia de resonancia de un cristal está determinada principalmente por su espesor, mientras mayor frecuencia más delgado el cristal. Por esta razón los cristales con frecuencias superiores a los 10 MHz se consideran generalmente demasiado frágiles para las pruebas por contacto.

Todas las frecuencias de prueba, sin embargo, pueden usarse en pruebas de inserción. Las vibraciones ultrasónicas tienen ciertas características importantes, como las siguientes:

- a) Viajan relativamente grandes distancias en

materiales sólidos.

b) Viajan en haces de sonido bien definidos.

c) La velocidad de una onda vibracional específica es constante a través de un material homogéneo dado.

d) La mayoría de la energía contenida en un tren de ondas se disipa antes de que el pulso siguiente se genere para indicar indicaciones confusas.

e) Las ondas vibratorias serán reflejadas en las fronteras de materiales de diferentes propiedades elásticas.

f) Las ondas vibratorias pueden cambiar su modo de vibración cuando pasan a través de materiales que difieren en sus propiedades físicas y elásticas o cuando se reflejan en ciertos ángulos sobre las fronteras.

### 3.2.3 Reflexión de ondas ultrasónicas:

La reflexión de vibraciones ultrasónicas ocurrirá en las fronteras entre dos materiales diferentes, si se encuentra una diferencia de impedancia acústica. El haz ultrasónico se reflejará en la interfase exactamente como las ondas de luz. Por ejemplo, el plateado de un espejo tiene una gran diferencia de impedancia con el aire y así, la luz se refleja de él con una eficiencia muy alta, una pieza sencilla de cristal pulido tiene una diferencia de impedancia muy baja con el aire y consecuentemente refleja muy poco.

Cuando una onda ultrasónica choca en la interfase entre dos medios diferentes, parte será reflejada, y el resto pasará en el segundo medio, dependiendo de la razón de impedancia entre los dos materiales. También, la trayectoria recorrida por las vibraciones y su regreso a la fuente depende sobre todo de los ángulos a los cuales el haz choca sobre la superficie reflectora, así como del número de estas superficies, como se ve en la fig. 3.7.



Fig 3.7 Reflexión del rayo ultrasónico.

### 3.2.6. Refracción y conversión de modo de ondas ultrasónicas.

Los haces ultrasónicos introducidos a un ángulo de una pieza se refractan de acuerdo a la ley de Snell; simplemente, significa que las velocidades en la caña y el metal son diferentes, por lo tanto, las vibraciones longitudinales se refractarán cuando pasen dentro del metal. (fig 3.8). A ciertos ángulos ocurre la conversión a otros modos de vibración y ondas de superficie (Fig 3.9).



Fig. 3.8 Refracción del haz ultrasónico

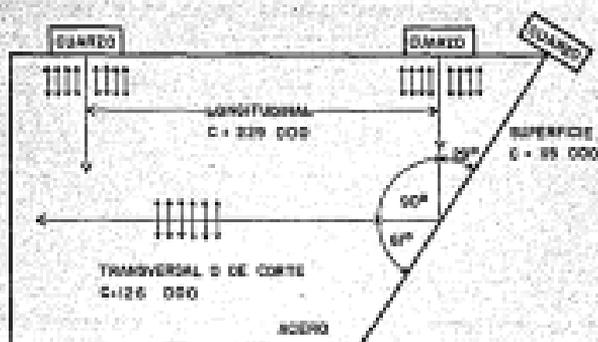


Fig. 3.4 Diagrama del sonido longitudinal

La siguiente fórmula puede usarse para calcular el ángulo de incidencia requerido para producir el ángulo y modo de inspección deseado para materiales tales como plásticos, acrílico u otros que se usan como espaldas.

$$\sin a / \sin b = V_1 / V_2$$

donde:

$a$  : Ángulo de incidencia

$b$  : Ángulo de refracción.

$V_1$ : Velocidad de las ondas en el medio 1 (velocidad longitudinal).

$V_2$ : Velocidad de las ondas en el medio 2 (velocidad en el modo de inspección).

La divergencia del haz varía con la frecuencia y diámetro del cristal; la mayor frecuencia da más dirección al haz. También un cristal de gran diámetro es más directo que uno de diámetro más pequeño para la misma frecuencia.

La distribución de la energía ultrasónica en un haz puede describirse mejor por una aproximación analógica suponiendo que el transductor no es un elemento aislado sino que consiste de miles de transductores diminutos independientes y cuando se excitan, cada uno envía su propio frente de ondas; resultando un frente de onda que abarca las muchas ondas, de traslape de cada punto radiante.

En el proceso de todos estos traslapes individuales y de crecimiento en diámetro conforme se alejan de la fuente, habrá

## ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

áreas donde dos o más se encontrarán moviéndose en la misma dirección a la misma velocidad o "en fase", y las energías de ambas se unirán, cerrando un área más fuerte, mientras que algunas se encontrarán fuera de fase y se cancelarán, creando áreas de energía mínima.

Conforme nos alejamos del transductor, las áreas de energía máxima convergen hacia el centro, y el efecto en esta distancia es de un solo frente de onda. Si una pequeña señal fuese regresada al transductor antes de que estos frentes de onda convergan a un punto central, podría perderse o ser severamente distorsionado por la comparativamente gran penetración en esta área. Por esta razón, y otras, los detectores de grietas se dicen que están ciegos cerca de la superficie. El que tanto se extienda este efecto, es función de la velocidad, frecuencia y diámetro del transductor.

### 1.3.7 Análisis matemático del perfil del haz del transisor ultrasónico.

Dado que la emisión de ondas ultrasónicas por el transisor tiene lugar en un haz divergente con un ángulo del haz gamma, este se determina por el diámetro del oscilador y de la longitud de onda empleada, de acuerdo a la relación:

$$\text{sen } \gamma = 1.22 \lambda / D = 1.22 v / Df$$

donde:

- v: velocidad acústica
- f: frecuencia del sonido.
- D: Diámetro del transductor.
- $\gamma$ : Ángulo de divergencia.

Pero esta ecuación sólo se aplica más allá de una cierta distancia N del transductor. La región gobernada por N es conocida como el campo cercano del transductor ultrasónico. Fig 1.10. Para determinar la longitud  $N_0$  del campo cercano, aplicamos la ecuación:

$$N = 0.25 D^2 / \lambda = 0.25 D^2 f / v$$

donde:

- $\lambda$ : Longitud de onda.
- D: Diámetro del transductor.
- v: velocidad en el material.
- f: Frecuencia del sonido.

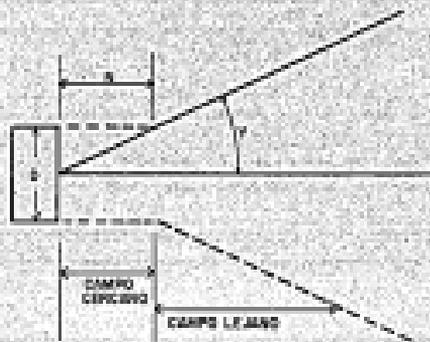


Fig. 3.10 Diagrama de los campos cercano y lejano de un transmisor ultrasónico.

La diferencia entre los campos cercano y lejano es importante en la práctica, dado que la interpretación visual y automática de un defecto requiere el reconocimiento del cambio contenido en un señal de eco por un defecto dado como función de su distancia desde la superficie de prueba. Este cambio es no-lineal y generalmente bidireccional, es decir, la respuesta se incrementa para una distancia corta (campo cercano), alcanza un pico (límite del campo cercano) y después continúa disminuyendo a través de la parte restante de la pieza, como se muestra en la fig. 3.11.

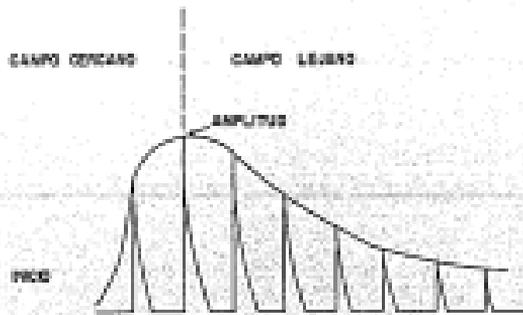


Fig. 3.11 Respuesta de la señal de eco.

El equipo de prueba ultrasónica está provisto para la corrección de la señal de respuesta en ambas zonas al controlar la relación entre ganancia y profundidad en un rango de profundidad seleccionado por un control de ganancia de barrido, para compensar la disminución natural en la altura del eco debido a la atenuación o divergencia del haz.

Para dar esencialmente una respuesta pareja sin considerar la distancia del defecto a la superficie, Sperry utiliza una unidad de corrección distancia amplitud (CDA); el uso de esta unidad es facilitado por la visión simultánea de ambas, las señales de video y la curva ADC.

### 3.3.8. Sistemas ultrasónicos.

Existen dos sistemas ultrasónicos básicos: Pulsado y de Resonancia:

a) Pulsado: Este a su vez puede ser de eco o de transmisión completa. El de eco es el más versátil de estos dos tipos de sistemas pulsados utilizados.

- Eco: Los defectos son detectados al medir la amplitud de las señales reflejadas y el tiempo requerido para que estas señales viajen entre superficies específicas y la discontinuidad.

El tiempo base, el cual es accionado simultáneamente con cada transmisión de pulso, causa una línea para barrer la pantalla del tubo de rayos catódicos (TRC). El barrido se hace de izquierda a derecha en la pantalla a 50-6000 veces por segundo o mayores si se requiere para equipo automatizado de rastreo, debido a la velocidad del ciclo de transmisión-recepción, la imagen sobre el osciloscopio aparece como estacionaria.

Unos pocos segundos después de que el barrido es iniciado, el generador de pulsos excita eléctricamente al pulsador y este a su vez emite un pulso eléctrico. El transductor convierte este pulso en un tren corto de ondas ultrasónicas. Si las interfaces del transductor y de la pieza están orientadas adecuadamente, la onda se reflejará hacia el transductor cuando esta llegue al defecto y/o a la superficie opuesta de la pieza. El intervalo de tiempo entre la transmisión del impulso inicial y la recepción de las señales desde el interior de la pieza es medido por los circuitos de conteo de tiempo. El pulso reflejado que es recibido por el transductor es amplificado, después transmitido hacia el osciloscopio, donde el pulso recibido desde el defecto es exhibido en la pantalla del tubo de rayos catódico (T.R.C.) en la misma relación al pulso frontal y posterior conforme el defecto este en relación frontal y posterior a la superficie a ser examinada.

Un indicador ultrasónico de espesores es básicamente un instrumento de pulso-eco en operación, un pulsador excita al transductor y la circuitería lógica, el transductor envía una onda ultrasónica y transforma la señal reflejada en señales

eléctricas para operar una puerta, siendo su periodo (de la puerta), función del espesor del material. Un oscilador de precisión, seleccionado para separar las propiedades acústicas del material, pasa un número de ciclos a través de la puerta mientras está abierta. Un contador registra estos ciclos e indica directamente el espesor del material.

Actualmente, las funciones de control se han reducido a un mínimo, facilitando un cambio una lectura iluminada.

- Transmisión total: Este sistema utiliza solamente la información de la amplitud y opera bajo el principio de que ciertos cambios específicos en la muestra producirán cambios significativos en la intensidad de un haz ultrasonido que viaja en el material. Este sistema requiere 2 transductores colocados en lados opuestos a la pieza. Un transductor transmite la onda a través de la pieza y el otro recoge la señal; si existe un defecto en la trayectoria de la onda, la indicación recibida se reduce en medida al grado de que la señal es bloqueada. Este sistema se usa ocasionalmente para examinación de soldadura y se usa con mayor frecuencia para pruebas de unión de bimetales y revestimiento de materiales, en donde el área de un defecto de tipo laminar es de interés y su profundidad probable es conocida e sin importancia.

Este sistema es también útil en la prueba para cambios metalúrgicos debido a calor, presión y fatiga. Para estos propósitos, se seleccionan frecuencias de 10MHz o mayores. La frontera de grano en estas frecuencias resulta un factor definitivo en la transmisión de energía. Cualquier cambio en la estructura cristalina es fácilmente discernible como un cambio de una condición normal de transferencia de energía.

#### b) Resonancia.

Este sistema difiere del método de pulso en que la frecuencia de transmisión es, o puede ser, variada continuamente. El método de resonancia se usa principalmente para mediciones de espesores cuando los dos lados del material bajo prueba son nuevos y paralelos. El punto al cual la frecuencia espereja el punto de resonancia del material bajo prueba es el factor que determina el espesor. Es necesario que la frecuencia de las ondas ultrasónicas, correspondiente a un valor determinado de sintonía, deba conocerse exactamente. Se deben hacer chequeos con el block normalizado para proveer una posible desviación de la frecuencia. Si la frecuencia de una onda ultrasónica es tal que su longitud de onda es sólo la mitad del espesor de la pieza, entonces la onda reflejada llegará al transductor en la misma fase que la transmisión original, reforzando la señal e obscureciendo una resonancia. Si la frecuencia se incrementa tal que tres veces la longitud de onda iguale cuatro veces el espesor, entonces la señal reflejada regresará completamente fuera de fase de la señal transmitida y ocurrirá una cancelación. Un mayor incremento de la frecuencia tal que la longitud de onda sea igual al espesor, da una señal en fase con la señal transmitida y la resonancia

ocurrirá una vez más. Al comenzar con la frecuencia fundamental, donde la longitud de onda es igual dos veces el espesor, y aumentar gradualmente la frecuencia, se podrán notar las sucesivas cancelaciones o resonancias y se pueden usar las lecturas para chequear la lectura de la frecuencia fundamental u original. Fig 3.12.

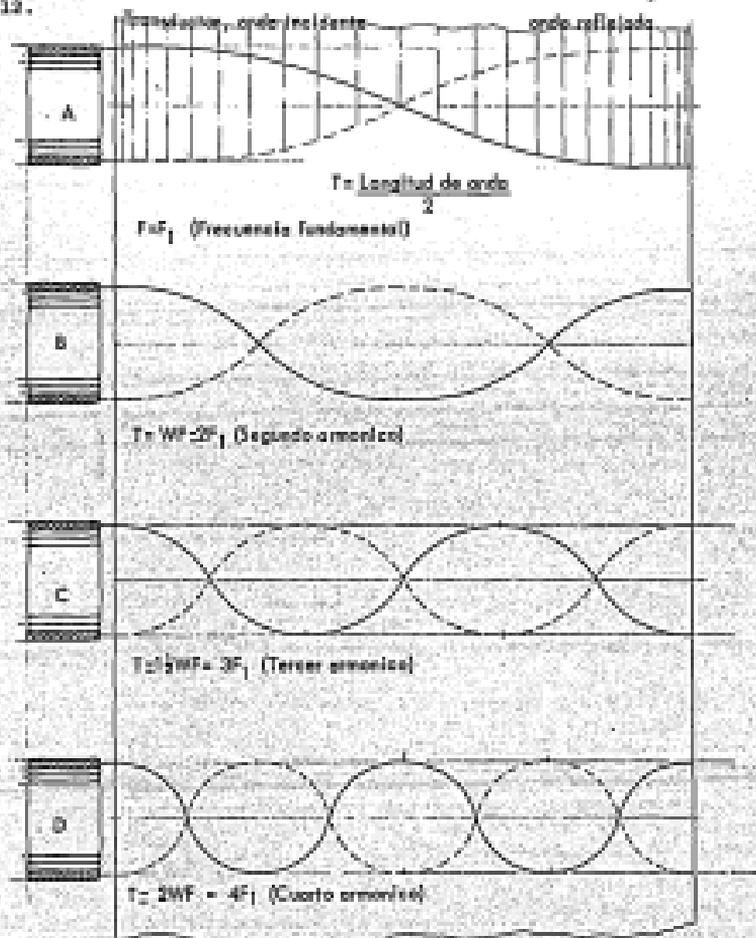


Fig. 3.12 Condiciones de resonancia ultrasónica en placa de metal

En algunos instrumentos, el circuito oscilador contiene un capacitor mecánico al cual cambia la frecuencia del oscilador; en otros, la frecuencia se varía por medios electrónicos.

El cambio en frecuencia se sincroniza con el barrido horizontal de un tubo de rayos catódicos (TRC); el eje horizontal representa así un rango de frecuencias. Si el rango de frecuencias contiene resonancias, la circuitería se dispone para presentarlas verticalmente, entonces escalas transparentes calibradas son puestas enfrente del tubo y el espesor puede leerse directamente. Los instrumentos se operan normalmente entre 5.25 MHz y 10 MHz en cuatro o cinco bandas.

El instrumento resonante puede usarse para probar espesores de metales tales como acero, hierro forjado, latón, cobre, níquel, plata, plomo, aluminio y magnesio; además áreas de corrosión o revestimiento sobre tanques, tuberías, cascos de naves, recubrimientos de aviones, y otras estructuras o productos, pueden evaluarse.

Unidades de lectura directa para medir espesores entre 0.06cm y 7.62cm con una exactitud mejor a  $\pm 1\%$ . El medidor de espesor de pared utiliza un circuito de resonancia conectado a un tren de ecos múltiples. Después de sintonizar el medidor, se pueden leer directamente en la escala espesores entre 4 y 60 mm de acero (la exactitud es sobre 1% para espesores más grandes a 10 mm, con tal que la superficie sea buena). Para materiales diferentes al acero, el medidor puede recalibrarse o determinar previamente factores de conversión (la razón de las velocidades del sonido respectiva al material y acero) para poder ser usado.

3.2.9. Representación: Existen ciertos métodos de observar y registrar los patrones de respuesta ultrasónicos tales como tubo de rayos catódicos (TRC); indicador de luces, aparatos de alarma (sonidos, luzes, etc.); marcadores gráficos, representaciones fotográficas, etc.

al TRC (tubo de rayos catódicos): La medida de la pantalla varía desde 7.62cm a 30.48cm, sin embargo, generalmente no es necesario a menos que se tenga una señal la cual tenga que ser presentada por un tubo mayor de 12.7cm. Las pantallas grandes no dan ninguna información gráfica más; usualmente un pequeño tubo tendrá mejor contraste y definición. El propósito primario para usar una pantalla grande se da en sistemas automatizados en donde el transductor de prueba debe colocarse a cierta distancia de la pantalla de video del instrumento de prueba.

Rango de los marcadores: para facilitar un medio para medir la profundidad de una indicación, ondas cuadradas están electrónicamente superpuestas, o bajo la línea de barrido regular de la presentación de prueba. Las longitudes de estas ondas pueden ajustarse para representarse en pulgadas o pies de material que está siendo examinado. Los marcadores de onda cuadrada son útiles para distinguir los señales de pulso eco y generalmente son los medios más precisos de medir la profundidad

del defecto. Los marcadores piramidales son esencialmente útiles en una prueba de haz angular donde la energía sónica se envía dentro de una pieza en un ángulo y lo hace rebotar entre las paredes de la parte bajo prueba. Estos marcadores simulan la trayectoria real del haz que pasa a través de la pieza, haciendo la más sencilla para determinar la profundidad de la falla con respecto a las superficies superior e inferior de la pieza.

b) Representaciones de rastreo: Los ecos ultrasonicos son trasladados electrónicamente hacia su representación visual al tubo de rayos catódico (TRC). Existen tres representaciones diferentes: Exploración A, exploración B y exploración C.

- Exploración A: En la representación de exploración A, la línea base horizontal sobre la pantalla indica el lapso (de izquierda a derecha) y presenta la profundidad de la pieza de prueba. La deflexión vertical muestra la respuesta de amplitud. La amplitud de la señal representa las intensidades de los haces transmitidos y reflejados. Esto puede relacionarse al tamaño del defecto, atenuación de la muestra o otros factores, como se ve en la fig. 3.13.

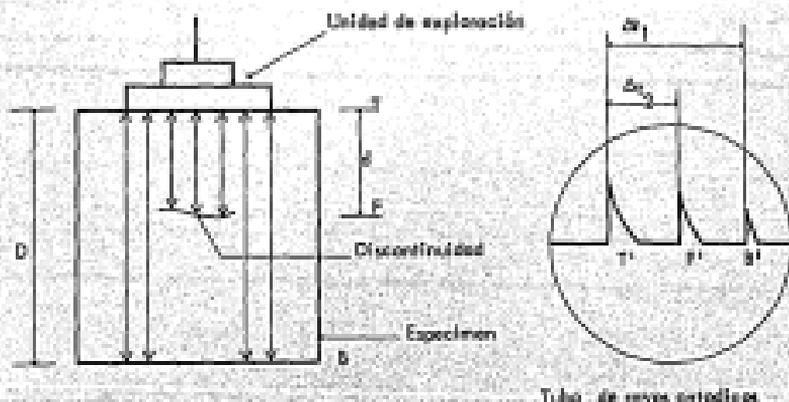


Fig. 3.13 Representación tipo "A"

T', F', B' son reflexiones en las fronteras T, F, y B. Si D es el espesor medio de la pieza y d la profundidad del defecto, entonces d se determina por la siguiente ecuación:

$$d = D(t_2/t_1)$$

- Exploración B: La exploración B toma las mismas señales recibidas por la exploración A pero las presenta en un patrón diferente. La ubicación y profundidad del defecto puede determinarse como en la exploración A, pero, en el caso de defectos pequeños, solamente se puede obtener una estimación burda de su tamaño. Esta representación se usa casi siempre en la prueba de placas para laminaciones, y se usa ahora sólo ocasionalmente, Fig 3.14.

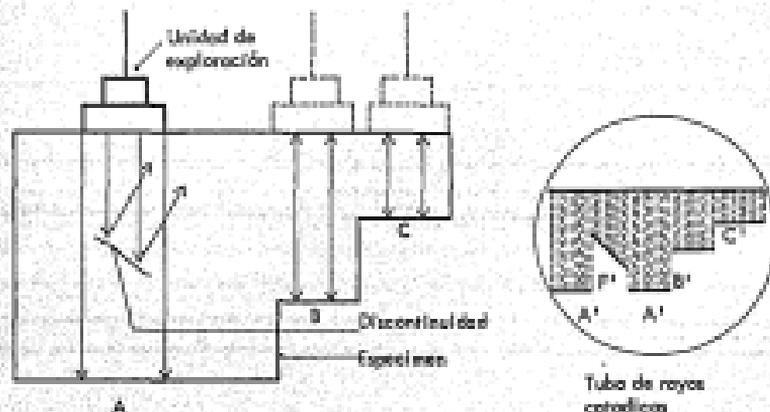


Fig. 3.14 Representación tipo "B"

- Exploración C: La representación de exploración C es una vista plana de la parte bajo prueba; un defecto se indica de una forma similar a la que se da con rayos X. El haz de electrones sigue el movimiento de rastreo y traza una reproducción a escala real sobre el tubo de rayos catódicos (TRC). Sin embargo la profundidad exacta del defecto no puede determinarse por esta representación, Fig. 3.15.

Dado que la representación de exploración C es una reproducción a escala real del defecto, el TRC se usa sólo para calibración, sintonía y monitoreo visual de la prueba. El uso de registradores de papel, son normalmente usados como complemento al TRC. Los graficadores dan un excelente resolución, un registro permanente, y están disponibles con hojas desde 91.4cm de ancho y varios pies de longitud. Al variar las intensidades, desde el negro hasta el gris claro, se puede aproximar la profundidad de un defecto en el graficador.

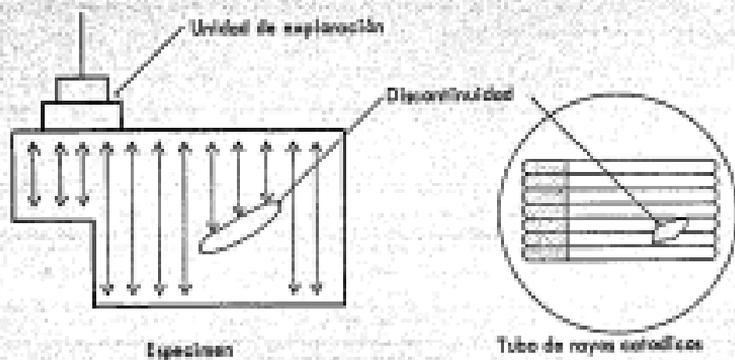


Fig. 3.15 Representación tipo "PC"

## CAPITULO 4 LIQUIDOS PENETRANTES

### 4.1. Antecedentes:

Aproximadamente hace 30 años, para la inspección de defectos en ejes y ganchos de ferrocarril, se empezó a utilizar el sistema entonces llamado del aceite y la tiza, que operaba así: Primero se limpiaba la pieza quitando las grasas, aceites, suciedad y óxidos, después se empapaba con petróleo o aceite, lo que constituía un líquido penetrante que se introducía en los defectos abiertos a la superficie. Después se volvía a limpiar la superficie y el único penetrante que quedaba era el que estaba atrapado o introducido en la grieta. A continuación se aplicaba polvo de tiza. El polvo de tiza absorbía el aceite que previamente había quedado en el defecto, produciendo una mancha que indicaba el lugar en el cual el defecto estaba alojado.

El principio y fundamento básico sigue siendo el mismo, pero hablando desde un punto de vista físico-químico, se ha avanzado de tal modo, que las formulaciones y técnicas utilizadas hoy por los líquidos penetrantes, permiten localizar y detectar defectos que por el método del aceite y la tiza eran absolutamente imposibles de identificar.

Por lo tanto la inspección con líquidos penetrantes debe considerarse hoy con una importancia muchísimo mayor que hace algunos años. Los líquidos penetrantes actualmente proporcionan un método relativamente económico, efectivo y fiable para detectar una gran variedad de defectos y discontinuidades abiertas a la superficie. En la gran gama de materiales ferreos, no ferreos, plásticos, gomas, cerámicos, etc. y en general en cualquier tipo de material no poroso.

### 4.2. Fundamentos, aplicaciones y limitaciones:

El método de ensayos no destructivos por líquidos penetrantes sirve para detectar discontinuidades que afloran a la superficie en sólidos no porosos. La inspección con líquidos penetrantes es una de las técnicas de ensayos no destructivos para detectar discontinuidades, defectos y grietas; pero debemos tener en cuenta algo muy importante: Los líquidos penetrantes sólo detectan defectos que están abiertos o tengan apertura a la superficie del material a inspeccionar.

Algunas discontinuidades o defectos producidos durante las operaciones de laminación, forja o fundición, tienen siempre apertura a la superficie, y se pueden detectar con líquidos penetrantes desde el momento que se han producido, por ejemplo hojas de pliegues de forja, grietas de secado, grietas de fisuración.

Sin embargo estas discontinuidades no tienen apertura a la

superficie, por ejemplo las inclusiones no metálicas que se forman cuando el lingote es colado; son defectos subsuperficiales y aunque se apliquen los líquidos penetrantes a toda la superficie del lingote no aparecerá indicación de la discontinuidad formada por la inclusión. Si se despueta el lingote y se quitan las partes superiores, sale al tocho o palanquilla. Si el corte se hace a través de las inclusiones estas quedan abiertas a la superficie y entonces estas pueden ser detectadas con líquidos penetrantes.

Las mismas circunstancias se pueden dar durante las operaciones de laminado, forja o fundición si la operación lleva las discontinuidades hasta la superficie del material. Los líquidos penetrantes detectaran el defecto y lo mismo puede ocurrir en las etapas posteriores de operaciones de acabado, como el mecanizado y el rectificado; defectos originalmente subsuperficiales pueden quedar abiertos a la superficie y ser detectados con líquidos penetrantes.

Se utiliza un líquido que al aplicarlo sobre la superficie de la muestra, penetra por capilaridad, en las discontinuidades o grietas. Posteriormente, y una vez eliminado el exceso de penetrante de la superficie de la pieza el líquido contenido sale y puede ser observado en la superficie, como se ve en la fig. 4.1.

En la tabla 4.1 se resumen las principales ventajas y limitaciones de los líquidos penetrantes: fluorescentes, autocolorables, postcolorables y colorados.

4.2.1 Etapas básicas del ensayo: Hay cinco etapas esenciales a cubrir en el ensayo que están esquematizadas en la tabla 4.2.

a) Limpieza y preparación previa: como etapa preliminar, la superficie de la pieza debe estar limpia y seca, y las posibles discontinuidades deben estar libres de agua, óxido o cualquier otro agente contaminante.

b) Penetración: Consiste en aplicar el penetrante sobre la superficie de la muestra, de manera que pueda alcanzar y entrar en la discontinuidad. Esto se hace por inmersión en un baño o extendiendo el líquido con una brocha.

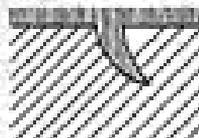
c) Eliminación del exceso de penetrante: Tiene por objeto dejar libre la superficie del material del líquido que no ha penetrado en las discontinuidades, de manera que en la observación final exista suficiente contraste de las posibles indicaciones sobre el fondo limpio.

d) Revelador: El revelador actúa como extractor del penetrante, acelerando su tendencia natural a salir de la discontinuidad y a extenderse ligeramente por los alrededores de los bordes de la misma.

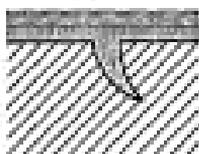
e) Observación.



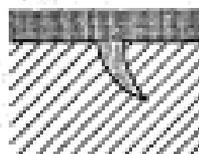
1.- Superficie preparada para el ensayo



2.- Aplicación del penetrante



3.- Aplicación del emulsificador



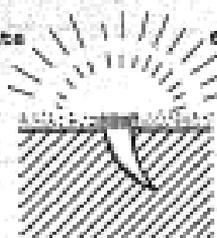
4.- Difusión del emulsificador en el penetrante



5.- Lavado del penetrante emulsionado



6.- Aplicación del revelador



7.- Inspección

Fig. 4.1 Fundamento del ensayo por líquidos penetrantes

### PENETRANTE FLUORESCENTE AUTOMOLDEABLE

Ventajas	Limitaciones
La fluorescencia le proporciona muy buena visibilidad.	El lavado excesivo puede disminuir la sensibilidad.
Se puede lavar directamente con agua.	El anodizado puede afectar su sensibilidad.
Se puede utilizar en superficies rugosas.	El cromado puede afectar su sensibilidad.
Gran economía de tiempo en el proceso.	No es adecuado para discontinuidades de poca profundidad.
Buena para una amplia gama de discontinuidades.	Precisa de cámara oscura, dotada de luz negra.

### PENETRANTE FLUORESCENTE POSTEMULSIONABLE

La fluorescencia le proporciona buena visibilidad.	No es lavable con agua.
Tiene alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.	La aplicación del emulsionador alarga el tiempo de ensayo.
Puede detectar discontinuidades abiertas y poco profundas.	Precisa de cámara oscura, dotada de luz negra.
Tiempo de penetración corto.	Suele ser inflamable.
Puede utilizarse en piezas anodizadas o cromadas.	A veces se hace difícil el lavado en zonas inaccesibles.

### PENETRANTE COLOREADO

Se puede emplear en equipos portátiles.	Las indicaciones son menos visibles que en otros penetrantes.
No es necesaria luz negra.	Suele ser inflamable.
Puede emplearse en piezas en las que no esté permitido el uso de agua para el lavado.	Difícil de aplicar en piezas rugosas.
Puede utilizarse sobre piezas anodizadas.	
Es muy sensible para pequeñas discontinuidades.	
Tabla 4.1 Ventajas y limitaciones en el empleo de líquidos penetrantes.	

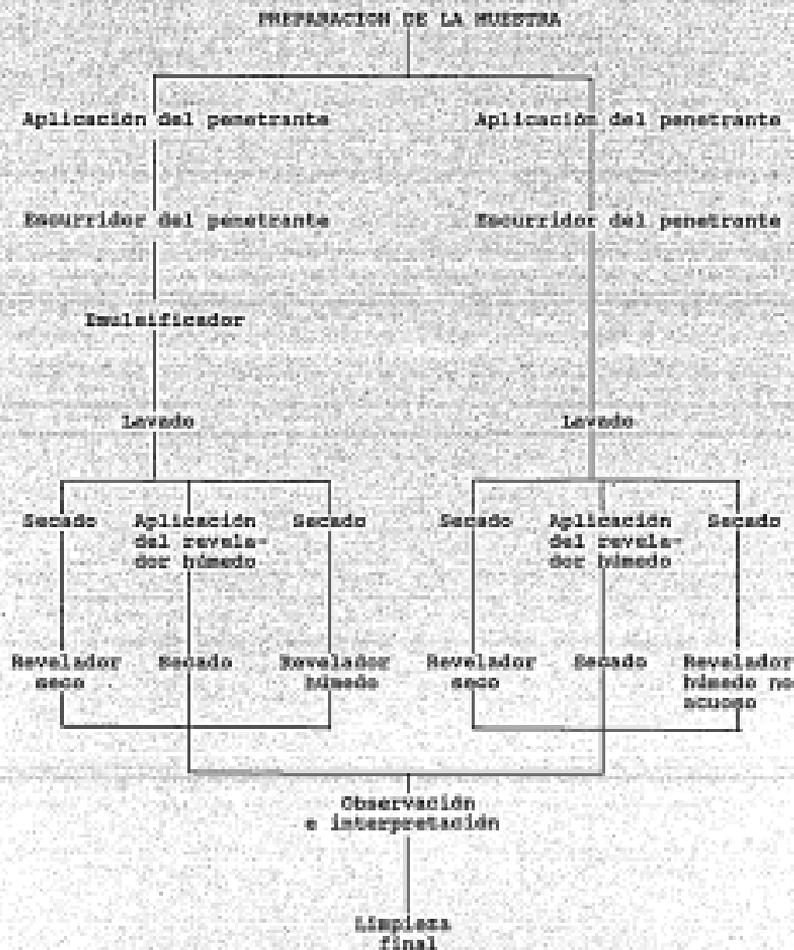


Tabla 4.2 Etapas en un examen de líquidos penetrantes.

La más amplia aplicación de los líquidos penetrantes se encuentra en el campo de los materiales no magnéticos tales como aluminio, magnesio, acero inoxidable, cobres, bronceas, latonas y otras aleaciones y metales. Sin embargo no da resultados en materiales ferrosos.

4.2.2 Limitaciones: El método por capilaridad, puede aplicarse a materiales ferromagnéticos, pero en ocasiones es mejor utilizar partículas magnéticas porque:

a) Las partículas magnéticas pueden detectar discontinuidades o impurezas no solo superficiales sino también sub-superficiales.

b) Se detectan grietas rellenas de óxido, o cualquier otro contaminante, y también inclusiones no metálicas.

c) Pueden detectarse grietas situadas bajo capas de pintura o plasmados.

d) El ensayo por partículas magnéticas es, en general, más rápido y económico que por líquidos penetrantes.

4.3 Naturaleza y propiedades de los líquidos penetrantes:

Si bien las características esenciales de los líquidos penetrantes es precisamente el poder penetrar en el interior de las discontinuidades, no basta este sólo requisito para examinar un producto, si no es necesario que reúna otras propiedades, tales como estabilidad frente a las temperaturas altas y bajas, no toxicidad, etc.. Las principales características deben ser:

a) Capilaridad: Se acepta y así esta reconocido que un líquido penetrante, penetra y se introduce en las grietas por la llamada acción capilar.

Un capilar es un tubo con un diámetro muy fino. La acción capilar es la capacidad que tiene un líquido de introducirse a través de un capilar.

b) Viscosidad: La viscosidad afecta de forma inversa a la penetración, esto es, a mayor viscosidad menor penetración tiene un penetrante en igualdad de tiempo.

c) Tensión superficial: Esta propiedad juega un papel muy importante en la efectividad del penetrante, ya que es la propiedad que más influye en la capilaridad, de forma que ha mayor tensión superficial, mayor capilaridad y mayor penetración tendrá el líquido penetrante.

d) Poder de humectación: Cuando se cambia la capacidad de mojar la superficie del metal con la tensión superficial, se consigue una de las más importantes propiedades de un penetrante, la capacidad de humectación o mojado se refiere al ángulo de

contacto con la superficie.

e) Volatilidad: Los penetrantes deben de ser líquidos, lo menos volátiles posibles. Si los disolventes son excesivamente volátiles, la evaporación rápida desequilibra la composición de las fórmulas con separación de fases y disminución de la extensibilidad del penetrante, debido a un aumento de la viscosidad, por lo que la sensibilidad de un penetrante que opera en tanque o baño abierto puede disminuir si se utilizan disolventes de alta volatilidad.

f) Punto de inflamación: Por razones de seguridad los penetrantes deben tener un punto de inflamación alto. Normalmente el punto de inflamación no tiene influencia en la eficiencia del penetrante.

g) Corrosión: Los penetrantes deben de ser no corrosivos para los materiales que van a ser inspeccionados por ellos.

Evidentemente el conjunto de todas estas propiedades no se puede reunir empleando una sustancia única, por lo que los líquidos penetrantes comerciales son mezcla de muy diversas materias que se aproximan más o menos a las propiedades descritas.

4.3.1 Tipos de líquidos penetrantes: En principio se agrupan en dos familias: los penetrantes fluorescentes y los penetrantes coloreados.

a) Penetrantes fluorescentes: Son los que incorporan en su composición un pigmento fluorescente claramente visible en cámara oscura bajo iluminación con la luz negra adecuada. A su vez se dividen en autemuulsionables y postemuulsionables.

- Penetrantes fluorescentes autemuulsionables: Son los que se eliminan directamente con agua debido a que incorporan en su composición productos emulsificadores. Son de uso muy cómodo y están bastante extendidos a pesar de su menor sensibilidad y los riesgos de manipulación.

El exceso de este tipo de penetrante se pueda retirar de la superficie por medio de un chorro de agua cuya presión no es menor a 1.5 kg/cm<sup>2</sup> y su temperatura menor a 43.3°C.

- Penetrantes fluorescentes postemuulsionables: Este tipo de penetrantes se desarrolló con el fin de conseguir un mayor nivel de sensibilidad en la detección de pequeñas discontinuidades, no llevan emulsificador incorporado y necesitan una etapa intermedia entre la penetración y el lavado con agua. El emulsificador se aplica en esta etapa y se consigue así la eliminación del penetrante. En algunos casos se recomienda un arrastre previo del penetrante con agua con el fin de no agotar demasiado pronto el emulsificador.

Para este tipo de penetrantes el emulsificador es aplicado por chorro. El tiempo de contacto del emulsificador-penetrante es importante y depende de muchas ocasiones de la aspereza del material y a las discontinuidades encontradas. El tiempo de contacto no excede a los 5 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, la mezcla se retira con agua, de la misma forma que los penetrantes autemulsificables.

Existen dos tipos de emulsificadores:

- Emulsificadores lipofílicos (base de aceites): Son una mezcla de agentes tensactivos en aceites que por difusión se mezclan y se disuelven con el penetrante, produciendo una emulsión al ser lavada con agua. Tienen alto poder de penetración y con ellos al tiempo de contacto penetrante-emulsificador tiene que ser el mínimo posible.

- Emulsificadores hidrofílicos (base con agua): Son una mezcla de agentes tensactivos e inhibidores de corrosión. Generalmente se preparan concentrados y para su uso se disuelven en agua hasta el 20% de concentración. Los agentes tensactivos que componen estos emulsificadores son del tipo hidrofílico, por lo que son insolubles en los penetrantes; esta mutua insolubilidad evita que se extraiga parte del penetrante que haya quedado introducido dentro de la grieta, al tener poca penetración.

Los penetrantes fluorescentes en medio acuoso se utilizan en algunas aplicaciones especiales, donde es necesario evitar cualquier riesgo. El exceso de este penetrante se retira fácilmente con un trapo o papel absorbente, hasta que la mayor parte del penetrante se ha retirado. Los últimos residuos de penetrante se eliminan con un solvente apropiado para dicha operación.

#### 4.4 Naturaleza y propiedades de los reveladores:

El revelador es el agente que pone de manifiesto los lugares donde ha tenido lugar una retención de penetrante. Las funciones del revelador son las siguientes:

1.- Actúa como un papel secante, ya que extrae el líquido de la discontinuidad.

1.- Proporciona una base sobre la cual el penetrante pueda extenderse, aumentando así la superficie visible.

1.- Constituye un fondo adecuado que aumenta el contraste.

4.- Cuando son por vía húmeda, ayuda a la extracción de penetrante.

4.4.1. Propiedades de los reveladores: Las principales características de los reveladores son:

1.- Debe ser absorbente para asegurar el secado.

2.- Debe estar finamente dividido para obtener una definición de la discontinuidad.

3.- De fácil aplicación y eliminación.

Los reveladores se clasifican:

- Reveladores de polvo seco: Son ligeros y esponjosos y deben adherirse fácilmente a las superficies metálicas formando una capa continua. No deben flotar en el aire. Se pueden aplicar por inmersión, extendiendo sobre la superficie con cualquier medio disponible.

Además de la contaminación del ambiente por el revelador hay que cuidar al problema inverso ya que en caso de contaminarse podría ocasionar indicaciones falsas durante el revelado.

- Reveladores húmedos: No provocan la formación de neblinas, cubriendo con facilidad superficies difícilmente accesibles al polvo seco. Aunque su sensibilidad disminuye, se debe cuidar la estabilidad de la suspensión.

El uso de reveladores húmedos está también limitado por la temperatura ocasionando una concentración en el caso de existir una evaporación, al mismo tiempo el revelador se inutiliza en caso de existir una temperatura de punto de congelación.

Otro inconveniente es que se necesita un cierto tiempo para que se evapore el agua de la capa del revelador. Este problema es menos acusado cuando como agente dispersante se emplea alcohol etílico.

La ventaja más importante es la facilidad con que se aplica, compensando así las dificultades que se presentan.

#### 4.3. Tiempo de penetración.

En todos los procesos, sea cual sea el líquido empleado, el tiempo necesario para una correcta penetración depende del tipo del material, del tipo de discontinuidad y de la temperatura de la pieza y el líquido.

Las tablas 4.3 y 4.4 nos indican algunos tiempos de penetración en función del tipo de penetrante y de la discontinuidad. Estos tiempos de penetración se entienden con la pieza y el líquido a la temperatura ambiente y posteriormente tener un calentamiento de las piezas a 50<sup>o</sup>-80<sup>o</sup> para acelerar el proceso por efecto de la dilatación de las discontinuidades.

4.4 Tiempo de eliminación, revelado. Formación de las indicaciones.

MATERIAL	ESTADO PROCESO	TIPO DE DISCONTINUIDAD	TIEMPO DE PENETRACION	
			auto	post
Aluminio	Moldeado	Porosidad	5-15	5
		Fragilidad en frio	5-15	5
	Forjado	Plegues	N/R	10
	Soldadura	Falta de fusion	30	5
	Todos los estados	Grietas	30	10
		Grietas de fatiga	N/R	30
Magnesio	Moldeado	Porosidad	15	5
		Fragilidad en frio	15	5
	Forjado	Plegues	N/R	10
	Soldadura	Falta de fusion	30	10
	Todos los estados	Grietas	30	10
		Grietas de fatiga	N/R	10
Acero	Moldeado	Porosidad	30	10
		Fragilidad en frio	30	10
	Forjado	Plegues	N/R	10
	Soldadura	Falta de fusion	40	20
	Todos los estados	Grietas	30	30
		Grietas de fatiga	N/R	30
Bronces	Moldeado	Porosidad	10	5
Latones		Fragilidad en frio	10	5
	Forjado	Plegues	N/R	10
	Soldadura	Falta de fusion	15	10
	Todos los estados	Porosidad	15	10
		Grietas	30	10
Plásticos	Todos los estados	Grietas	5-30	5
Vidrios	Todos los estados	Grietas	5-30	5
Herramienta de corte		Falta de fusion	30	5
		Porosidad	30	3
		Grietas	30	20
Titanio y aleaciones resistentes a la temperatura	Todos los estados	Cualquiera	N/R	20-30
Metales en general	Todos los estados	Corrosión bajo tensiones	N/R	340

Tabla 4.3 Tiempos penetración (liquido penetrante fluorescente) en minutos.

MATERIAL	ESTADO PROCESO	TIPO DE DISCONTINUIDAD	TIEMPO DE PENETRACION
			Penetrante coloreado postemulsificable
Aluminio	Moldeado	Porosidad	3-5
		Fragilidad en frío	3-5
	Forjado	Pliques	8-10
		Falta de fusión	3-5
	Soldadura	Porosidad	3-5
Todos los estados	Grietas Grietas de fatiga	8-10 25-30	
Magnesio	Moldeado	Porosidad	3-5
		Fragilidad en frío	3-5
	Forjado	Pliques	8-10
		Falta de fusión	18-20
	Soldadura	Porosidad	18-20
Todos los estados	Grietas Grietas de fatiga	18-20 25-30	
Bronce	Moldeado	Porosidad	3-5
Latón	Forjado	Fragilidad en frío	3-5
		Pliques	8-10
	Soldadura	Falta de fusión	8-10
		Porosidad	8-10
Todos los estados	Grietas	8-10	
Plásticos	Todos los estados	Grietas	3-5
Vidrio	Todos los estados	Grietas	3-5
Herramientas de corte		Falta de fusión	3-5
		Porosidad	3-5
		Grietas	18-20
Titanio y aleaciones resistentes a la tempe- ratura	Todos los estados	Cualquiera	18-20
Metales en general	Todos los estados	Corrosión bajo tensiones o intergranular	210

Tabla 4.4 Tiempos de penetración en minutos (líquido penetrante fluorescente)

Es evidente que sólo se toma este factor en cuenta en los penetrantes poste-emulsificables, variando mucho según el estado de la superficie.

No puede darse una norma general, ya que en principio el tiempo depende de la composición del eliminador y del penetrante.

Así para discontinuidades poco profundas o muy abiertas, será necesario ir a tiempos de emulsificación cortos para no arrastrar en el lavado el penetrante de estas zonas defectuosas.

Generalmente y gracias a sus características el tiempo de revelado oscila entre 30 segundos y 1 minuto, sobre todo cuando se trata de reveladores aplicados en forma de polvo seco o en suspensión en líquidos volátiles. En el caso de reveladores dispersos en agua, el tiempo puede alargarse tanto más cuanto más próximo y saturación se haya el ambiente.

En el caso particular de ensayos en fugas en los que se aplica el revelador por un lado y el penetrante por el otro lado el tiempo se alarga en función del tamaño de las discontinuidades pasantes que se puedan presentar.

Cualquier indicación de líquido penetrante es consecuencia de una discontinuidad que aflora a la superficie del objeto y señala fielmente su situación. Debe existir pues, una abertura. Los líquidos penetrantes no pueden detectar inclusiones, segregaciones, presencia de materiales extraños o cualquier otra heterogeneidad, a menos que exista tal abertura, así cualquier discontinuidad pasará desapercibida en un ensayo por líquidos penetrantes a menos que aflore a la superficie.

Un caso particular es el examen por líquidos penetrantes en la detección de fugas en tubos, bridas, soldaduras y otros elementos de recipientes a presión, donde la estanqueidad es problema fundamental. En estos casos el líquido penetrante se aplica por uno de los lados y el revelador por el otro y la aparición de indicaciones pone en evidencia discontinuidades pasantes.

Por la naturaleza del ensayo por líquidos penetrantes, no puede extraerse por sus resultados una información rigurosamente cuantitativa acerca del tipo y tamaño de la discontinuidad.

#### 4.7 Aspecto de las discontinuidades.

1.- Indicaciones lineales continuas: Son las indicaciones típicas procedentes de grietas (tales como grietas de fatiga, grietas de contracción en piezas soldadas o en uniones soldadas, grietas de temple, grietas de corrosión bajo tensiones, etc.), dientes fríos en piezas soldadas, pliegues de forja, faltas de pegado en uniones soldadas, etc. naturalmente, pueden presentar ramificaciones.

2.- Indicaciones lineales intermitentes: Suelen presentarse

en pliegues de forjas parcialmente soldadas, en faltas de pegado en uniones soldadas, algunos tipos de grietas, tales como las de contracción y las de corrosión bajo tensiones.

3.- Indicaciones redondeadas: Suelen aparecer en productos soldados como consecuencia de rechupes o soldaduras interiores más o menos grandes que afloran a la superficie a través de pequeñas aberturas. El ensayo por líquidos penetrantes pueda sustituir ventajosamente el ensayo radiográfico. También puede dar origen a este tipo de indicaciones los caracteres profundos que se forman en los extremos de algunas uniones soldadas.

4.- Indicaciones puntiformes agrupadas o dispersas: Suelen corresponder a porosidades del material, también a zonas con microrechupes o pequeñas cavidades de contracción en piezas soldadas, si en estos productos estas indicaciones aparecen homogéneamente distribuidas y puestas de manifiesto especialmente en las zonas mecanizadas, ello revela generalmente un estado de porosidad interna en todo el material. En este orden de ideas se puede llegar a establecer una correlación entre las indicaciones del ensayo por líquido penetrante y las de la imagen radiográfica. Las indicaciones de microporosidad suelen ser del tipo dispersas y se presentan preferentemente, en zonas de acordes o en cambios de sección de la pieza soldada.

5.- Indicaciones difusas: Se presentan como un fondo casi continuo y homogéneo que bajo la lupa, puede aparecer como formado por muchas indicaciones puntiformes y muy próximas. Pueden corresponder a microporosidad difusa o a microrechupes y, en zonas anodizadas a las aleaciones ligeras, a falta de un proceso correcto de sellado de este recubrimiento protector. No obstante es aconsejable cercionarse previamente de que las indicaciones no son consecuencia del estado de rugosidad superficial, en cuyo caso las indicaciones observadas bajo la lupa no son realmente puntiformes, sino más bien difusas, no apreciándose en el centro de los puntos o zonas de más alta intensidad de fluorescencia o color.

6.- Aspecto de los bordes de la indicación: Cuando la definición de los bordes de la indicación es muy nítida, puede asegurarse, en general que corresponde a una discontinuidad estrecha que retiene poco volumen de líquido penetrante. Tal es el caso de grietas de fatigas pequeñas muy cerradas las que corresponde a las indicaciones típicas del agrietamiento de un recubrimiento duro protector.

Otros aspectos importantes de juicio para interpretar correctamente las indicaciones por líquidos penetrantes son:

a) Brillo y extensión de la indicación: La intensidad de la fluorescencia o del color de una indicación está en relación directa con el volumen de la discontinuidad. Lo mismo puede decirse de la extensión de la indicación.

b) Tiempo necesario para que aparezca la indicación: Este

tiempo es inversamente proporcional al volumen de la discontinuidad. Así, las discontinuidades grandes aparecen rápidamente, mientras que habrá que dejar actuar el revelador un cierto tiempo que vayan apareciendo las más pequeñas. En este caso también influyen muchas condiciones ajenas a la discontinuidad en sí, tales como características del proceso, temperatura, etc..

c) Persistencia de la indicación: Es un buen indicio para estimar el tamaño de una discontinuidad. Si la indicación reaparece después de eliminar el revelador y volver a aplicarlo es evidente que existía una reserva de líquido penetrante. La intensidad y extensión de esta nueva indicación puede dar la medida del volumen de la discontinuidad.

d) Indicaciones falsas: Son aquellas indicaciones que no responden a discontinuidades reales de la pieza, la aparición puede estar originada por tres causas diferentes:

- Lavado defectuoso de la pieza.
- Manipulación poco cuidadosa.
- Geometría y construcción de la pieza.

## CAPITULO V EXAMEN DE PARTICULAS MAGNETICAS

### 5.1. Generalidades.

La inspección por partículas magnéticas es un medio de ensayo no-destructivo para detectar discontinuidades en materiales ferromagnéticos. Este ensayo consiste de tres operaciones básicas:

- 1.- Establecer un campo magnético adecuado a probar o a examinar.
- 2.- Aplicar partículas magnéticas a la superficie del objeto a prueba.
- 3.- Examinación de la prueba.

Se debe tomar en cuenta que para el examen de partículas magnéticas se debe contar con la siguiente información para asegurar la confiabilidad de la misma prueba:

- a) Materiales, tamaño y formas a ser examinadas.
- b) Tipo de magnetización utilizada.
- c) Equipo a utilizar.
- d) Preparación de la superficie.
- e) Partículas magnéticas utilizadas.
- f) Corrientes de magnetización.
- g) Tipo de demagnetización.

El método puede detectar todas las discontinuidades en las superficies y bajo ciertas condiciones, aquellas que se presentan inmediatamente abajo de ellas. Depende de las propiedades magnéticas de los objetos bajo la prueba y es conveniente sólo para materiales metálicos los cuales pueden ser intensamente magnetizados, con estos materiales el examen es altamente sensitivo y produce indicaciones fácilmente discernibles sobre la superficie de las partes de prueba.

Existen dos tipos de partículas magnéticas:

- 1.- Partículas por vía seca: En este caso las partículas se aplican o se suspenden en aire, y su color debe dar un contraste con la superficie a examinar en este tipo de examen. La temperatura no debe exceder a los 315.3°C.

1.- Partículas por vía húmeda: Son aquellas partículas que se encuentran suspendidas en un líquido tal como aceite ligero o agua, al igual que en el caso anterior, el color de las partículas debe ser contrastante con la superficie, la temperatura no debe exceder a 57.12°C. El óxido y las escamas pueden contaminar al medio de inspección o actuar como aislantes eléctricos para la magnetización de la parte, por lo que la pieza debe estar limpia de impurezas. Estas partículas son de óxido de hierro de menor densidad que las de hierro.

Las partículas por vía seca son excelentes para detectar defectos superficiales o cerca de la superficie, tienen las siguientes características:

- a) Su uso es sencillo con equipos portátiles y rudos.
- b) Su uso es ideal para aplicaciones en campo gracias a la facilidad de aplicarlas con corriente alterna monofásica.
- c) No es tan complicado como el método de partículas por vía húmeda.
- d) El equipo es económico.

Entre las principales desventajas encontramos las siguientes:

- a) No son tan precisas como las partículas por vía húmeda para defectos finos y superficiales.
- b) No cubren fácilmente cualquier superficie complicada.
- c) Es más lento para producciones en serie.

### 5.2 Características de los campos magnéticos.

1.- Campo magnético alrededor de un conductor: Se estableció que en el espacio que rodea a un conductor por el que circula una corriente crea a su alrededor un campo magnético circular cuyas líneas de fuerza son perpendiculares a la dirección de la corriente. (fig. 5.1).

Si se explora el campo magnético con una brújula la aguja se orientará normal a la línea radial formada con el eje del cable. La dirección del campo magnético se tomó en la dirección como norte en la brújula.

2.- Campo en una barra magnetizada: Los campos magnéticos existen alrededor de un objeto magnetizado. Fundamentalmente el campo longitudinal se puede considerar causado por circuitos de corriente de dimensiones atómicas.

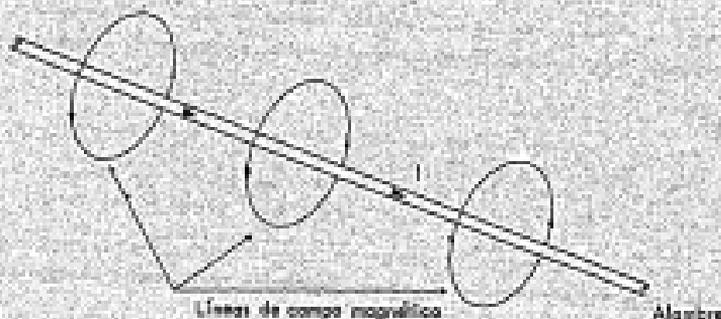


Fig. 3.1 Campo magnético alrededor de un conductor.

Un electrón moviéndose en su órbita alrededor de un núcleo de un átomo forma un diminuto circuito de corriente y por el principio básico del magnetismo cualquier sustancia exhibe efectos magnéticos.

3.- Fugas de campos en una rotura: Si se corta una barra magnetizada sus polos no se pueden aislar, por lo que aparecerán nuevos polos y tendremos dos imanes. Si en lugar de cortar la barra totalmente se hace un corte parcial, se establecerán polos locales en ambos lados del corte parcial, creando lo que se conoce como fuga de campo local (fig. 3.2). Si el corte se hace en la forma de una discontinuidad delgada, normal a la superficie del magnetito de barra, las partículas de hierro serán fácilmente atraídas hacia esta fuga de campo.

4.- Los factores relacionados en la inspección con partículas magnéticas son: Métodos de magnetización, distribuciones de campo, tipos de corriente, materiales de inspección, desmagnetización, diseño, defectos, etc..

- Tipos de campo magnético: Para obtener los mejores resultados de la inspección por partículas magnéticas, el defecto debe estar en ángulo recto a la dirección del campo, las indicaciones podrán obtenerse a ángulos menores pero serán de menor intensidad disminuyéndose hasta que sea paralela a la dirección del campo magnético, por lo que la inspección debe regularse en dos partes procurando que la segunda se realice a 90° de la dirección del campo de la primera inspección. Entre los campos magnéticos más importantes encontramos:

1.- Punta de contacto: En esta forma se colocan unas puntas de contacto eléctrico (calizas) en el objeto. Las puntas tienen arcos de retorno para que la corriente regrese en caso que los

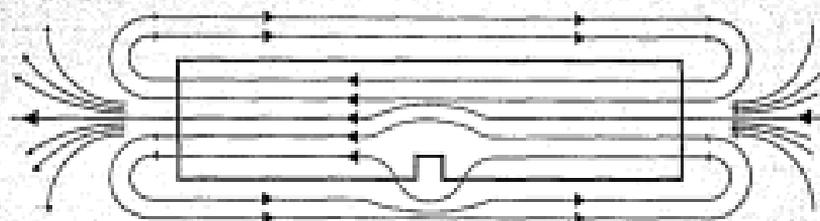


Fig. 5.2 Campo de un imán mostrando el patrón de fuga en la discontinuidad

cuando están mal colocados o conectados. En este tipo de campo sólo se acepta corriente directa o rectificadas cuyo valor se mantiene entre 39.37 y 49.81 amp/cm para puntas cuya sección sea de 1.9cm de espesor o mayor. En caso de existir espesores menores el valor de la corriente debe oscilar entre 39.43 y 43.2 amp/cm.

La separación de las puntas será de 20.32cm o menos. Este espacio es utilizado para que la pieza sea colocada con facilidad y aumentar la sensibilidad de la prueba, pero en espacios menores a 7.62cm no es conveniente debido al acomodo de las puntas alrededor de la pieza.

3.- Magnetización longitudinal: En este método se utiliza una bobina enrollada alrededor de la pieza a examinar, con esto se produce un campo magnético longitudinal paralelo al eje axial de la bobina. Otra bobina es colocada a un lado de la otra bobina durante la inspección. Esta es importante cuando la longitud total de la bobina es mayor que 10 veces la sección transversal de la pieza.

La fuerza del campo magnético está en función de la longitud y el diámetro de la pieza. La longitud total no es mayor a los 45.72cm, en caso contrario la pieza se secciona hasta cumplir con este requisito.

La fuerza del campo magnético es al  $\pm 10\%$  del valor de los

ampere-vuelta determinados por:

si  $L/D \leq 4$

$$\text{Ampere-vuelta} = 15,000 / (L/D) + 3$$

si  $L/D > 4$

$$\text{Ampere-vuelta} = 35,000 / (L/D)$$

y

$$\text{Ampere} = \text{Ampere-vuelta/vueltas}$$

3.- Magnetización circular: En este caso el paso de la corriente se hace a través de la pieza produciendo un campo magnético circular perpendicular al flujo de la corriente.

Se pueda utilizar corriente directa o rectificadas (monofásica o trifásica) bajo las siguientes condiciones:

a) En piezas hasta de 12.7cm Ø de 375.95 a 314.96 amp/cm.

b) De 12.7cm a 25.4cm Ø de 196.85 a 375.95 amp/cm.

c) De 25.4cm a 38.1cm Ø de 118.11 a 196.85 amp/cm.

d) Más de 38.1cm Ø de 38.37 a 118.11 amp/cm.

e) En piezas no circulares el valor de la sección transversal más grande determina el valor de la corriente.

4.- Yugo: Este método se aplica exclusivamente para detectar discontinuidades localizadas en la superficie de la pieza, acepta corriente directa y alterna.

5.- Magnetización multidireccional: El amperaje es de mayor intensidad, repartidos en tres circuitos activados al mismo tiempo. Con este efecto se logra la creación de varios campos magnéticos en distintas direcciones.

En general el método de conductor central es el mejor para partes huecas, cuando se buscan defectos longitudinales, gracias a la mejor distribución del campo dentro de la pieza. En grandes objetos la magnetización de puntos es usualmente mejor que el método total de pasar corriente a través de toda la pieza. Existe una tendencia hacia el uso de corriente muy alta de magnetización total y del método húmedo se aplica a grandes volados para inspección.

### 5.3 Efectos de las discontinuidades.

Los métodos de inspección por partículas magnéticas producen

Indicaciones visibles de discontinuidades las cuales pueden ser o no defectos. Estas discontinuidades pueden ser en realidad separaciones metálicas o únicamente alteraciones magnéticas.

Las separaciones metálicas pueden ser de la forma de roturas, inclusiones no metálicas, bolsas de gas o falta de fusión o penetración en soldadura. Estas no necesariamente son defectos.

Las discontinuidades magnéticas pueden deberse a cambios bruscos en la sección de la parte, cambios abruptos en la dureza, uniones latonadas o causas similares.

- Naturaleza y origen de los defectos: Un defecto puede tener su origen en la solidificación, fundición, proceso o servicio de una parte.

a) Defectos inherentes: Toman la forma de inclusiones no metálicas causadas por escoria, óxidos, etc. que quedan atrapados al solidificar el acero; las bolsas de gas o gases atrapados, las contracciones internas, resultados de contracciones térmicas o las roturas de superficie y fisuras debido al enfriamiento. Las contracciones internas conducen a laminaciones en forja final o rolado.

b) Defectos de proceso: Pueden ocurrir durante el procesamiento del material en bruto, como en el rolado forjado o soldado o pueden introducirse posteriormente durante el tratamiento térmico, maquinado, esmerilado, enchapado o desoxidado.

Durante la operación de rolado, se pueden introducir desgarros, grietas o cavidades internas en el material, además pueden ocurrir también roturas térmicas en aceros endurecidos en el aire. La forja puede producir traslapos, dobleces, revestidas internas y de superficie, escamas o rupturas térmicas internas.

En la soldadura pueden ocurrir roturas de enfriamiento, inclusiones de escoria y bolsas de gas, así como falta de fusión.

El tratamiento térmico puede producir roturas de temple, incluyendo roturas por endurecimiento a fines y por envejecimiento en las partes endurecidas. El esmerilado, enchapado y desoxidado pueden producir la rotura debido a las presiones locales indicadas en las partes endurecidas.

c) Roturas de servicio o fatiga: Son el resultado de repeticiones de presión o variaciones en el material. Generalmente se inician en un área altamente presionada, cambios abruptos de sección, juntas y muescas son los lugares apropiados para el inicio de fallas por fatiga.

- Defectos superficiales y subsuperficiales:

a) Defectos superficiales: Es el tipo de defecto más

fácilmente detectable, además que las roturas de superficie son más importantes para la vida útil de la pieza, que los defectos subsuperficiales. Incluyen roturas por fatiga, juntas, traslapos, roturas de esmerilado y de temple.

En partes pequeñas, el método húmedo es una generalmente ya sea con magnetización de corriente alterna o corriente directa. En volados grandes y soldadura el método seco con corriente alterna o media onda es el más utilizado.

b) Defectos subsuperficiales: Los defectos subsuperficiales son menos peligrosos ya que, la mayoría tiene una forma redondeada y no constituyen serios puntos de tensión. Se pueden dividir en dos clases: Inclusiones no metálicas bajo la superficie y defectos profundos más grandes.

1.- Inclusiones no metálicas subsuperficiales: consisten de finas hilos y se presentan en todos los productos rodados y en la mayoría de las forjas. Se localiza por el método húmedo por corriente directa. No son de gran significado a menos que estén en dirección transversal a un lugar sometido a grandes esfuerzos.

2.- Defectos profundos: Pueden consistir de falta de penetración, falta de fusión, roturas en soldadura gruesas o bien de contracciones internas, inclusiones de escoria o gas en placas y forjas.

La detectabilidad de los defectos profundos es difícil y depende primeramente de la altura de la rotura, su distancia o profundidad bajo la superficie, al diámetro de la parte, forma del defecto y su orientación.

La altura y longitud del defecto subsuperficial determinan el área de obstrucción presentada a un campo magnético, teniendo así un amortiguamiento directo en el campo de fuga resultante. Las discontinuidades planas son las más detectables. Los vacíos esféricos son casi indetectables por este método debido a que casi no presentan alteraciones en la trayectoria del campo magnético.

Los defectos profundos se pueden detectar mejor en materiales de alta permeabilidad, tales como aceros de bajo carbono y la mayoría de las soldaduras, volados y forjas.

#### 5.4 Características de las discontinuidades. (Fig 5.3).

a) Profundidad: Distancia de la superficie al punto más alejado del defecto medido en dirección normal a la superficie (defectos superficiales). Distancia de la superficie al punto más cercano de la discontinuidad a  $90^\circ$  de la superficie (defectos subsuperficiales) (Fig 5.4).

b) Longitud (L): Dimensión más larga, medida en la superficie en dirección paralela a ella.

c) Anchura (W): Dimensión más larga medida en la superficie en una dirección paralela a la superficie y a  $90^\circ$  de la longitud.

d) Forma: Plana, esférica, esquinada, etc.

e) Ángulo de contacto con respecto a la superficie (sólo en defectos superficiales).

f) Altura (H): Dimensión normal a la superficie (sólo en defectos subsuperficiales) (Fig. E.4).

g) Orientación: Se toma con respecto a la dimensión principal.

- Con respecto al eje longitudinal de la parte.

- Con respecto al eje transversal de la parte.

- Con respecto a la superficie (normal).

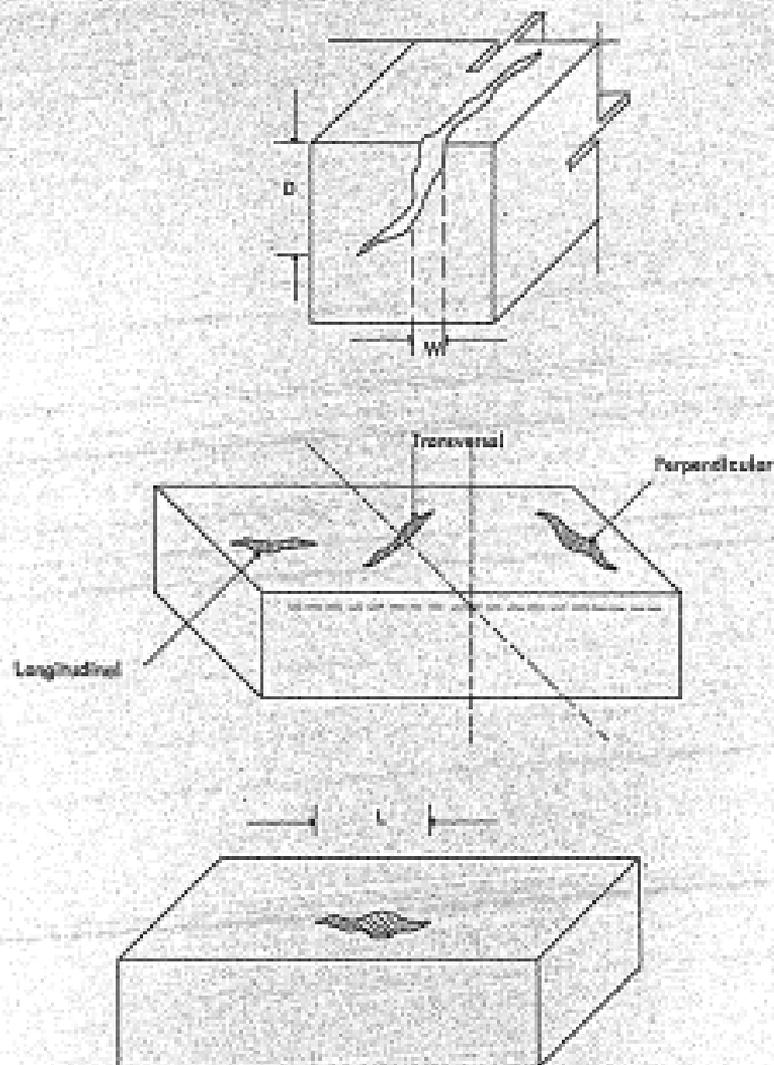


Fig. 8.3 Características de los defectos superficiales.

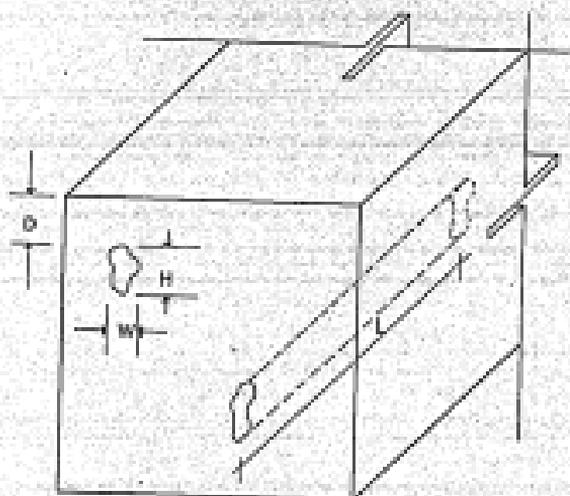


Fig 3.4 Características de los defectos subsuperficiales.

## CONCLUSIONES

La soldadura es un método para unir metales mediante la adición de calor, este proceso ha venido a sustituir a técnicas como el remachado. Actualmente tiene grandes y diversas aplicaciones en la Industria Manufacturera.

Gracias a que su uso se ha ido aumentando es necesario escoger el tipo de soldadura y proceso adecuado para el trabajo que se realiza y obtener de esta forma las características de calidad y bajo costo necesarios. Los elementos a seleccionar son: posición de la soldadura (horizontal, vertical, etc.), el tipo de soldadura (filleta, ranura, etc.), posición de la soldadura (horizontal, vertical, etc.) y el proceso adecuado (arco eléctrico, TIG, MIG, etc.).

Para identificar en un plano cualquiera de las características mencionadas en el párrafo anterior se ha establecido una simbología estándar para facilitar la interpretación de los mismos. Esta es utilizada prácticamente en todos los trabajos de Ingeniería.

El adelanto tecnológico ha hecho necesario el asegurar la calidad en los procesos de soldadura (procesos de manufactura y en los materiales también) para que se cumpla con las especificaciones de resistencia necesarias. Para lograr esto se han formado agrupaciones (ASME, ASTM, ENI, etc.), que en base a la experiencia establecen normas de calidad mismas. Así, entre otras cosas, se han instituido los ensayos no destructivos (radiografiado, ultrasonido, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, etc.) que nos dan una idea general del estado interno de los metales y los ensayos destructivos estos dirigidos a asegurar la confiabilidad de los materiales.

En estos ensayos, al igual que en soldadura, se ha establecido una simbología específica que permite la lectura de planos y facilita su aplicación.

Entre los ensayos no destructivos, la radiografía se ha convertido en uno de los más importantes debido a que se tiene una imagen impresa de los defectos que se puede archivar. En contrapartida, es necesario seguir determinadas normas para asegurar la calidad y confiabilidad de la radiografía así como evitar manejos peligrosos del equipo. Entre los puntos más importantes tenemos la selección de la fuente de radiación apropiada, selección de la norma contra la cual se va a calificar el resultado, selección y colocación apropiada de los elementos de radiografiado (penetrámetros, calcos, cinturón de números), distancia fuente-objeto, tamaño de la fuente, distancia película-objeto, penumbra geométrica así como el cuidado de las normas de seguridad adecuadas.

Una vez que se han obtenido los resultados en la película

radiográfica se procede a identificar los tipos de defectos encontrados en las mismas (porosidad, inclusión de escoria, returas, etc.) y al compararse con la norma de aceptación seleccionada (ej. ASME) determinar el estado bueno o malo del material seleccionado.

El ultrasonido es un método utilizado para la detección de discontinuidades así como para determinar espesores de materiales. Este consiste en la transmisión de ondas mecánicas a través del cuerpo. Estas son originadas por impulsos eléctricos que son convertidos en ondas mecánicas. Una limitante de este método lo constituye la geometría del material a inspeccionar, a formas complicadas este método se dificulta. Una desventaja es que sólo se obtiene un reporte con los resultados y no una muestra física de los mismos como en radiografiado. Existen varios métodos y equipos para aplicar la prueba, por lo que es necesario su conocimiento para la adecuada selección de los mismos según las necesidades del material a inspeccionar.

Los líquidos penetrantes sirven para la detección de defectos superficiales en materiales no porosos y principalmente no magnéticos a bajo costo, rapidez y eficacia. El método consiste en un líquido que penetra en las discontinuidades del material para que después se aplique un revelador y se tengan los resultados de la prueba y evaluarlos según el criterio de la persona indicada. Una de las principales limitaciones es que no sirve para materiales porosos y defectos subsuperficiales.

Las partículas magnéticas se pueden utilizar en materiales ferromagnéticos únicamente y sirven para defectos superficiales y subsuperficiales dependiendo de las características magnéticas del material a inspeccionar. En este tipo de exámenes es muy importante la localización del defecto, ya que si este se encuentra perpendicular al flujo del campo magnético este se podrá detectar fácilmente, en caso contrario no se localiza, por esto esta prueba se recordará haberla dos veces en dirección perpendicular.

Con los conocimientos básicos en estos exámenes se podrá saber si son bien aplicados o no y por lo tanto determinar la confiabilidad de los mismos. Así también tenemos otro criterio para interpretar los resultados y no exclusivamente la del técnico que llevó a cabo la prueba.

También es importante seleccionar el tipo de prueba adecuada para el trabajo específico, y de esta forma saber qué además de confiable se puede obtener un examen económico.

## BIBLIOGRAFIA

- **Procesos de manufactura y materiales para Ingeniería**  
Lawrence E. Doyle  
Carla A. Meyer  
James L. Leach  
George F. Schrader  
Morris S. Singer  
Edit. Diana
- **Manual universal de la técnica mecánica**  
Erik Öberg  
F.O. Jones  
Edit. Labor
- **Código ASME**  
ASME 1993
- **Manual de soldadura**  
Champion Hobart
- **Norma Mexicana N-464**  
Inspección ultrasónica por el método de  
contacto pulso-eco-haz recto
- **Norma mexicana N-111-1986**  
Símbolos para soldadura y pruebas no  
destruktivas
- **Radiación**  
Hartman Francis  
Edit. Univ-France
- **Apuntes de electricidad y magnetismo**  
A. Alvarado  
UNAM

- Waves

Frank S. Crawford  
Edit. McGraw Hill

- Radiation and optics

John M. Stone  
Edit. McGraw Hill

- The theory of the electromagnetic field

David H. Cook  
Edit. Prentice Hall