

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1972

04.72.04

PMM/A-103

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

OCTAVO CURSO PANAMERICANO DE METALURGIA

Dentro del Programa Multinacional de Metalurgia
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico-OEA)

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

- 1- Introducción - Ing. Juan N. Baez
- 2- Inspección Visual - Ing. Amilcar Castellá
- 3- Método electromagnético de Ensayos no Destructivo -
Ing. Luis I. Barman

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

OCTAVO CURSO PANAMERICANO DE METALURGIA

Dentro del Programa Multinacional de Metalurgia
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico-OEA)

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

- 1- Introducción - Ing. Juan N. Baez
- 2- Inspección Visual - Ing. Amilcar Castellá
- 3- Método electromagnético de Ensayos no Destructivo -
Ing. Luis I. Barman

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

1 - INTRODUCCION

Los ensayos no destructivos constituyen una disciplina tecnológica que comprende una amplia variedad de métodos reunidos en torno a una filosofía de aplicación determinada por el concepto fundamental de asegurar la calidad tecnológica de materiales, piezas o productos y condicionada por los factores económicos inherentes a toda actividad industrial y por aquellos que hacen a la seguridad humana.

Si bien desde épocas remotas se conocen algunos métodos para ensayar materiales o productos sin modificar sus condiciones de uso el desarrollo de las END como disciplina tecnológica es muy reciente. Se inicia a principios de siglo con la incorporación de métodos basados en la aplicación elaborada de conocimientos fundamentales de la física. Al uso exitoso y rentable de los rayos X y de las partículas magnéticas se suma luego la aplicación de la energía ultrasónica. Durante la segunda guerra mundial, ante los requerimientos de una producción masiva se aumentan las necesidades de control de calidad produciéndose una acentuada aceleración en el desarrollo de los métodos de END. Hasta ese entonces y a pesar de su ya amplia aplicación, los END son considerados simplemente como un conjunto de técnicas auxiliares de la inspección.

En las dos últimas décadas la aceleración del desarrollo tecnológico: automatización industrial, transporte aéreo masivo, industria nuclear, navegación espacial, modifican dramáticamente los conceptos de rentabilidad, seguridad y confiabilidad planteando una infinidad de nuevos problemas en torno de los ensayos no destructivos transformados entonces en una verdadera disciplina con una filosofía definida que la ubica como el principal elemento para asegurar el control de la calidad tecnológica. El END se constituye también en un auxiliar importante en la investigación de los materiales. Son principalmente la industria nuclear y la navegación espacial, las que al plantear nuevos y sofisticados problemas provocan el desarrollo de nuevas técnicas y métodos. Pero la industria convencional a su vez recibe el aporte de la experiencia recogida en el desarrollo de aquellos métodos cada vez más complejos y puede incorporar así ensayos no destructivos y nuevos métodos de control de calidad cuyo estudio y desarrollo no podría financiar por sí sola. END constituye uno de los ejemplos más claros del "Fall-out" de investigaciones de avanzada sobre la industria tradicional.

En las actuales circunstancias el campo de aplicación de los ensayos no destructivos aparece tan sorprendentemente amplio y su influencia en el control de calidad tecnológica tan decisiva que asistimos a un verdadero desarrollo explosivo de los mismos.

2 - DEFINICION Y OBJETIVOS DEL END

El END como disciplina tecnológica comprende todos los métodos que permiten la inspección o ensayo de materiales, piezas, equipos o productos sin modificar sus condiciones de uso o capacidad de servicio. Una característica distintiva del END es que usualmente determina las condiciones de aptitud del material o pieza ensayada mediante la evaluación de características o propiedades que no están relacionadas en forma directa a aquellas que determinan su aptitud de servicio. Por ejemplo la distribución del campo magnético en una barra de acero no condicionan su aptitud para resistir esfuerzo de fatiga pero la observación de una distorsión localizada del campo magnético puede revelar la presencia de una grieta superficial que sí resulta decisiva para un esfuerzo de fatiga.

Desde un punto de vista general los objetivos perseguidos por el END se pueden agrupar en la siguiente forma:

- Asegurar la calidad tecnológica de los productos, materiales o equipos aumentando su confiabilidad.
- Prevenir accidentes y asegurar vida humanas.
- Producir beneficios económicos a sus usuarios.
- Contribuir en la investigación y desarrollos tecnológicos

2.1 - Asegurar Calidad Tecnológica

En relación directa con el uso a que está destinado y con el valor de inversión que presupone, a cualquier producto o equipo se le exige una determinada confiabilidad de uso. Dada la complejidad creciente de equipos y accesorios de la vida diaria una moderada exigencia de confiabilidad en un equipo, puede significar una elevada exigencia para sus componentes críticos. En efecto, por ejemplo, para asegurar una probabilidad de falla menor que 1 en 10 en un equipo con 100 componentes críticos será necesario asegurar que en dichos componentes, la probabilidad de falla sea menor que 1 en 1000 por cuanto la confiabilidad del conjunto será el producto de las confiabilidades de cada componente.

Si nos detenemos a pensar en los elementos de uso diario (automóvil, radio, TV, etc.) y la presencia de fallas que observamos en relación con su complejidad y costo, tendremos un buen cuadro del significado del desarrollo tecnológico en general y de la importancia del control de calidad. El END es la principal herramienta con que cuenta el control de calidad para cumplir su cometido.

Toda industria moderna aplica el END para cumplir con el objetivo fundamental de asegurar la calidad tecnológica de lo que compra y de lo que produce.

2.2- Prevención de Accidentes y Asegurar Vidas Humanas

Para ejemplificar sobre la importancia de este objetivo basta con referirnos a las consecuencias que para un avión en vuelo tendría una falla en el comando de los timones o en el sistema de inyección de combustible. De estos elementos puede depender la vida de un centenar de personas. El END cumple en este caso una función doble, en primer lugar debe asegurar que cada pieza crítica en cuestión tenga la confiabilidad de uso requerida por el diseñador, en segundo lugar debe permitir la verificación periódica de que dicha confiabilidad no ha variado con el uso, es decir que la pieza mantiene su integridad original. Este ejemplo citado lleva implícita una premisa de orden general para el correcto mantenimiento no sólo de equipos y plantas industriales o de uso público, sino también para equipos de uso particular: la seguridad personal está supeditada en la mayoría de los casos, a una inspección correcta y periódica de los equipos y maquinarias en uso. En estos casos el END es irremplazable e inexcusable.

2.3 - Producir Beneficios Económicos

Si bien la razón más importante del uso del END es la seguridad, no es menos cierto que la causa más común de dicho uso reside en la obtención de un beneficio económico.

La fuente de éste beneficio no siempre es un hecho tangible, sino que puede residir también en un hecho tan abstracto como la satisfacción del cliente.

Una industria que hace un buen uso del END en su control de calidad, introducirá en su producción un valor adicional medido por un "crédito de calidad" que su clientela o el mercado le reconoce. El usuario siempre discrimina entre diferentes niveles de calidad.

El END aplicado inteligentemente al control de un proceso de fabricación no sólo ahorra dinero evitando el procesamiento de partes defectuosas, sino también aumentando la capacidad de fabricación, al eliminar de la línea a aquellas piezas que luego serían rechazadas al final del proceso. Si en una etapa de fabricación se rechazan por ejemplo un 10% de piezas por defectos introducidos en la etapa previa, el efecto real es que dicha etapa está trabajando a sólo un 90% de su producción normal.

Lógicamente que al introducir el END en las distintas etapas hay que tener en cuenta el costo de aplicación de dichos ensayos para efectivamente justificar su uso.

El END puede ser también una fuente importante de información para la corrección de procesos de fabricación o para el mejoramiento de diseños.

2.4 - Contribución en la Investigación y Desarrollo Tecnológico

Un objetivo de gran interés para el END lo constituye su contribución cada vez mayor en el estudio y desarrollo de la ciencia de los materiales.

Por sus características propias el END es un medio ideal para seguir el comportamiento de piezas o especímenes sometidos a las más variadas condiciones de trabajo. Una de las contribuciones más interesantes en la actualidad es el uso de los métodos ultrasónicos y de emisión acústica para el estudio de la fatiga y mecanismos de rotura en los metales.

3 - EL END EN LA TECNOLOGIA DE CALIDAD

La Tecnología de Calidad comprende un amplio conjunto de actividades y factores, entre los cuales se cuentan el Control de Calidad y el Ensayo no Destructivo, que deben interaccionar para determinar como resultado final la Calidad Tecnológica de los productos.

Dentro de la Tecnología de Calidad el END es un instrumento de gran importancia siempre que sea aplicado en íntima relación con los demás factores. El END debe estar vinculado al conocimiento del comportamiento de los materiales en servicio y a la interpretación del significado de los defectos y otras variaciones en las propiedades. Esto significa que deben existir medios adecuados de comunicación entre los especialistas en diseño, en tecnología de los materiales y en ensayos. Es necesario además que los responsables de END reciban en forma adecuada la información ganada en otros sectores del Control de Calidad (Ensayos físicos, Inspección en línea de fabricación, etc.). Esta realimentación de información asegurará la correcta orientación y aplicación de los END. Es de hacer notar que en la actualidad la falta de aplicación generalizada de este principio constituye un factor de atraso en el desarrollo de las posibilidades y beneficios del END.

Una esquematización que facilita la comprensión de estas relaciones se puede observar en la Fig.1. Vemos que la utilidad del END no depende solo de sus condiciones operativas (equipos, técnicas, operadores, standards de referencia, etc.) sino también del conocimiento de los materiales y de la interpretación del significado de las fallas. El producto final de todas estas actividades desarrolladas en armónica interrelación es el seguro de una calidad tecnológica y el diseño del standard correspondiente.

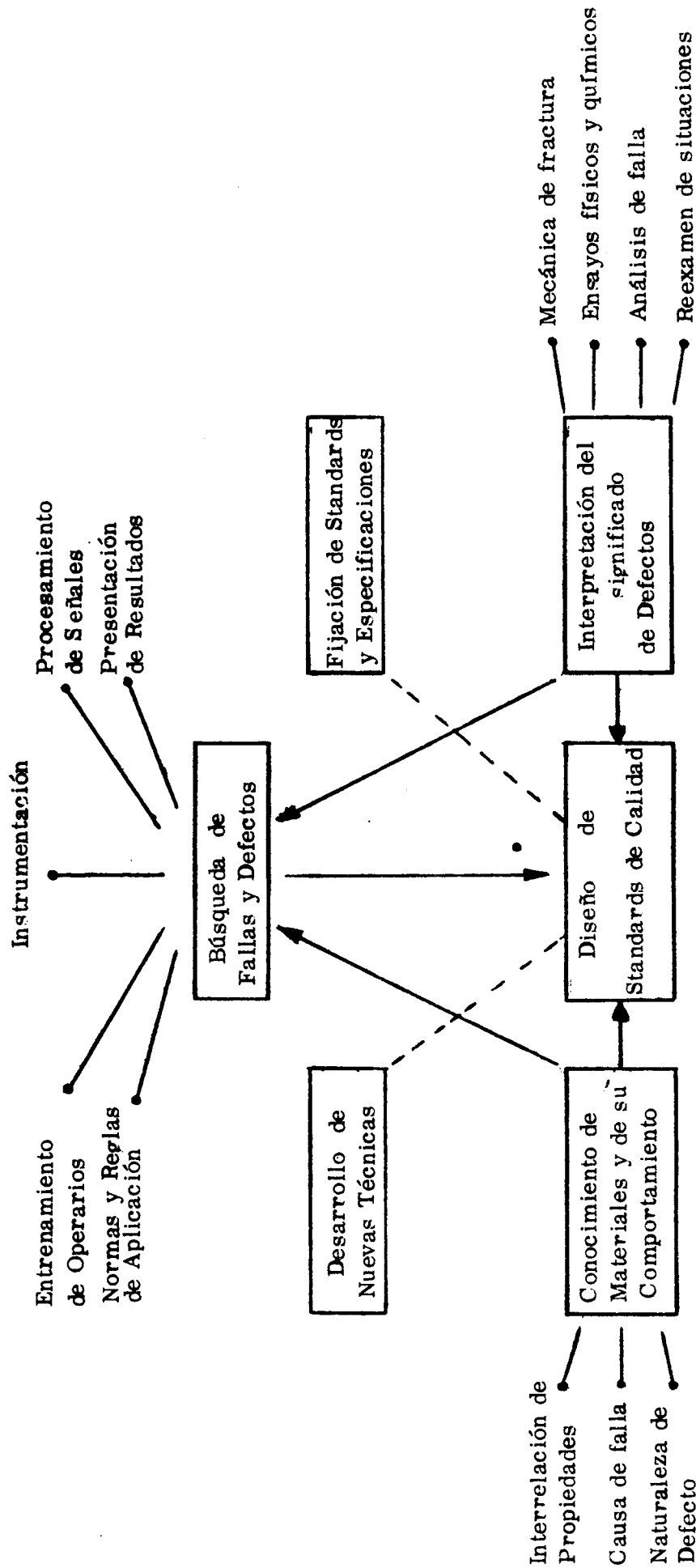


Fig. 1 - R.S.Sharpe · Non Destructive Testing Research and Practice - Vol. 5 No. 5-Sep. 1972

4 - EL END EN MANTENIMIENTO DE PLANTA

Un área de interés especial para el END lo constituye el mantenimiento de planta. La magnitud, complejidad y costo de las grandes plantas industriales, la cantidad de vidas humanas involucradas en los medios de transportes, exige de ingeniería de mantenimiento una especialización y un celo desconocido hasta hace pocos años. El END por definición resulta la herramienta más eficaz.

En mantenimiento de planta son de aplicación directa prácticamente todos los métodos usuales de END (radiografía, i. visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, electromagnéticos, etc.) pero en muchos casos resulta necesaria una adaptación o el desarrollo de técnicas específicas.

Tenemos por ejemplo:

- Inspección en servicio de recipientes de presión en reactores nucleares.
- Metalografía no destructiva en calderas.
- Desgaste de refractarios en altos hornos.
- Fisuras en motores de turbinas.

El END en mantenimiento debe cumplir dos funciones:

- a) Detección de fallas.
- b) Evaluación de fallas detectadas y su incidencia en servicio.

5 - CRITERIOS ECONOMICOS EN END

El END no es una tarea improductiva ni de menos valor que el "trabajo directo".

El END no es una operación de laboratorio como sería por ejemplo el ensayo de tracción para determinar propiedades mecánicas. El END es un trabajo de planta.

Estas afirmaciones son correctas en la mayor parte de los casos especialmente cuando el END está constantemente integrado dentro del proceso productivo y sirve al control y mantenimiento de los standards de calidad fijados. El valor agregado puede estar dado como ya vimos por la confiabilidad de uso que asegura a la pieza o producto, o por la disminución de costos de producción.

La confiabilidad de un producto para su uso específico debe ser asegurada y difundida por el fabricante. Alternativamente el fabricante debe responsabilizarse ante el cliente por el cumplimiento de las especificaciones y tolerancias a las que contractualmente se haya comprometido.

La obtención de calidad cuesta dinero y por lo tanto debemos esforzarnos para lograr el correcto nivel de calidad con el menor costo.

5.1 - Relación entre Calidad y Costos

Para analizar la influencia de la calidad en los costos podemos recurrir al esquema propuesto por Sharpe y que damos en la Fig. 2. Se puede observar que directa o indirectamente las exigencias de calidad influyen en todas las etapas de formación de costos. Esta influencia no puede ser obviada aunque si disminuida su incidencia cuando se programa un adecuado control de calidad y correcto uso del END. Efectivamente si se pretende disminuir su incidencia en el costo de materia prima ocurrirá que en la etapa de fabricación por ejemplo aumentarán los costos en proporciones mayores que los correspondientes ahorros obtenidos previamente por cuanto se tendrá que procesar material que luego debe ser rechazado.

Los costos necesarios para asegurar calidad varían de un producto a otro pero oscilan normalmente entre el 5 y 20% del costo total. Esta incidencia para un mismo producto dependerá lógicamente de una correcta aplicación del control de calidad. Esto último significa que se debe lograr un equilibrio entre lo que se gana mediante el control de calidad (los ensayos aplicados en el momento oportuno salvan costos de fabricación) y el incremento de costos debido a ello. Si consideramos las curvas de la Fig. 3 se puede observar que la curva de costos totales de manufactura tiene un mínimo que corresponde a un determinado nivel de calidad y que es función de diversas variables: costo de materiales defectuosos, reparaciones, reemplazos, costos de servicio, etc., por una parte y costos de control de calidad por la otra.

Finalmente si analizamos el criterio económico para fijar el nivel de calidad óptimo tendremos que referirnos a la relación entre el costo de calidad y el valor del producto. Si asimilamos el nivel de calidad con las tolerancias de la pieza producida con respecto a una pieza de calidad ideal, se observa (Fig. 4) que los costos de producción aumentan en forma exponencial a medida que las tolerancias se hacen menores mientras que si consideramos el valor de la pieza ésta tiene un valor cero por debajo de una cierta tolerancia mínima. Al disminuir las tolerancias su valor aumenta rápidamente hasta llegar a un cierto límite que está dado por el destino y condiciones de uso de la pieza. Si se disminuye las tolerancias por encima de dicho límite el valor de la pieza se mantiene constante y solo podrá aumentar en el mercado por razones subjetivas. Este valor límite de tolerancias está dado generalmente por el diseñador que ha previsto el destino y condiciones de uso. El fabricante tiende por razones de orden práctico y económico a trabajar con tolerancias mayores de manera de situarse en el punto donde la diferencia entre costo y valor es máximo. Pero debe tener en cuenta que dentro de su fábrica por razones que hacen a la condición humana, el Depto. de Control de Calidad tratará de fijar las tolerancias en los valores fijados por

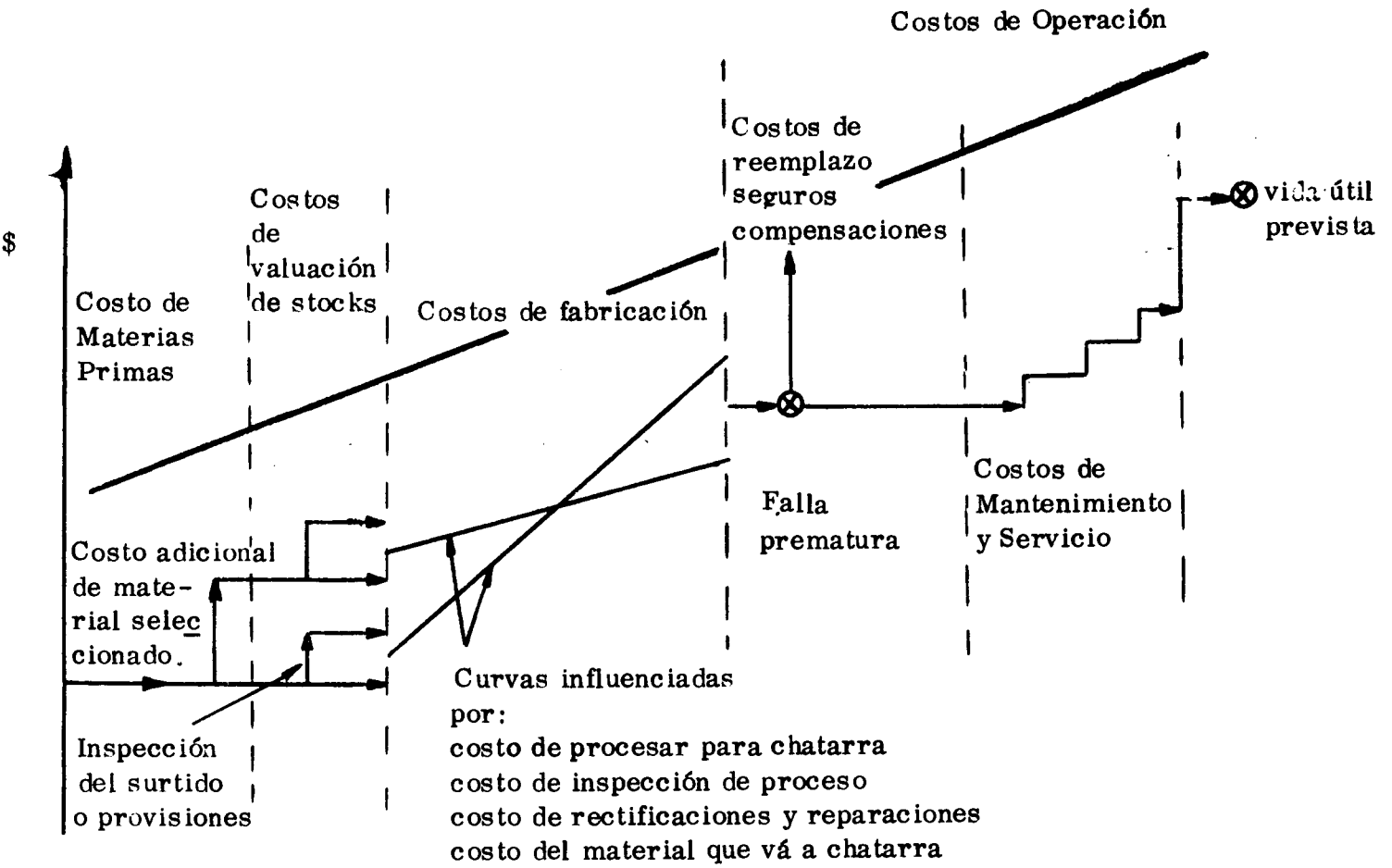


Fig. 2

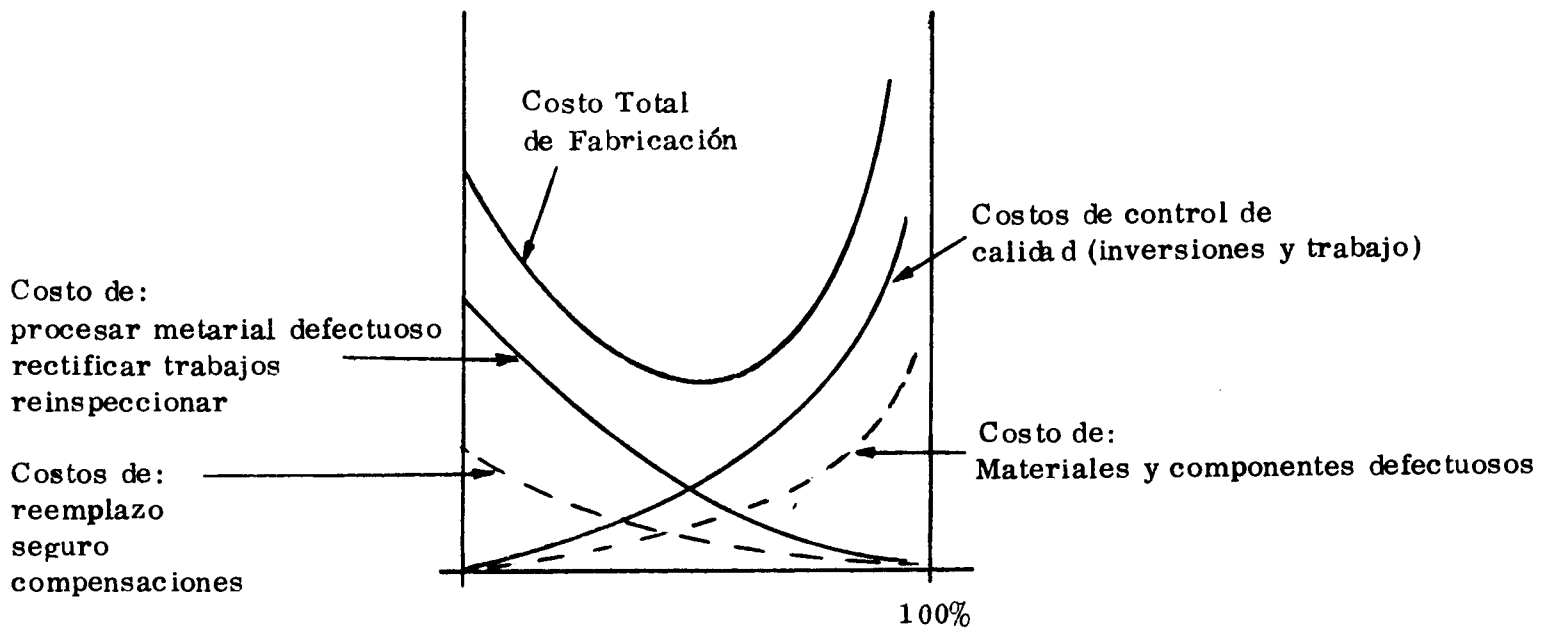


Fig. 3

el diseñador mientras que los responsables de producción tratarán de que sean aceptadas tolerancias mayores ubicándose por debajo de lo previsto por el diseñador.

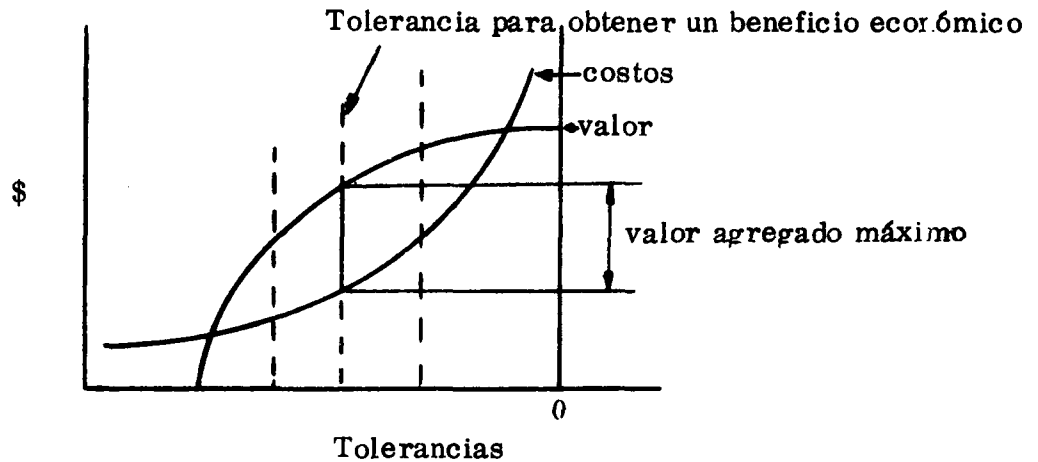


Fig.4 en relación a una calidad ideal

No obstante, cuando hacemos estas consideraciones económicas sobre el costo del control de calidad debemos tener presente que las mismas no son válidas cuando una falla en el material o componente o pieza considerado puede producir consecuencias catastróficas o afectar la seguridad de las personas.

5.2 - Costo del Ensayo no Destructivo (Mac, Master-Vol-I Pg.7-14)

En la ecuación económica del END tenemos dos factores principales: por una parte la disminución de costos de producción y aumento del valor del producto y por la otra el costo propio de la realización de los ensayos. La rentabilidad económica directa estará dada por el balance de los factores enunciados.

Los principales factores de costo del END son los siguientes:

1. Costos de operarios
2. Costos de materiales (película radiográfica, partículas magnéticas, etc.)
3. Costo de operación (electricidad, agua, repuestos, etc.)
4. Costos fijos (espacio en la fábrica, amortización de equipos, seguros, etc.)

La incidencia relativa o absoluta de estos costos presenta importantes variaciones de un caso a otro. El costo de un END es diferente en cada caso considerado influyendo en el mismo variaciones como las siguientes:

1. Cantidad de partes inspeccionadas
2. El movimiento de las partes hasta y desde el equipo
3. El manejo de las partes durante el ensayo

4. La automatización del método
5. La sensibilidad requerida
6. La tolerancia permitida en la interpretación de la información
7. El porcentaje de piezas defectuosas halladas
8. El nivel del personal requerido

6 - LOS METODOS DE END (Lamble - NDT Principles and Pract.Pg.18)

A fin de lograr una visión panorámica se puede hacer un agrupamiento de los métodos de END teniendo en cuenta los principios físicoquímicos involucrados. Tendríamos así los ocho grupos siguientes:

1. Radiaciones penetrantes
 - a) Radiografía (RX, gama , neutrones: producción de imágenes fotográficas)
 - b) Fluoroscopia y fluorografía (producción de imagen visual en pantallas fluorescentes)
 - c) Xerografía (producción de imagen visual en dieléctricos)
 - d) Difracción de rayos X
 - e) Trazadores radioactivos
 - f) Transmisión y retrodispersión de radiaciones
 - g) Microsondas electrónicas y de Laser
2. Ondas elásticas
 - a) métodos sónicos
 - b) ultrasonido
 - c) mediciones de fricción interna
 - d) ensayos de vibración
3. Electricidad y magnetismo
 - a) Resistencia eléctrica c.c.
 - b) Corrientes parásitas
 - c) métodos capacitivos
 - d) mediciones de campo magnético (sorting, dureza)
 - e) partículas magnéticas
 - f) bobinas de inducción
4. Optica
 - a) Examen visual
 - b) Observación remota (Endoscopios, TV, etc.)
 - c) Reflexión (periscopios)
 - d) Proyección
 - e) Photoelasticidad

- f) Interferometría
- g) Metalografía por réplica

5. Radiaciones térmicas

- a) Pinturas térmicas
- b) Radiación infrarroja
- c) conductividad térmica
- d) Termoelectricidad

6. Fluidos penetrantes

- a) Tintas penetrantes
- b) Exudación de gases (Espec. de He, ensayos de burbujas, etc.)

7. Mecánica

- a) Dureza por indentación
- b) Metrología mecánica
- c) Extensímetros eléctricos
- d) Triboelectricidad
- e) Lacas frágiles

8. Atómicos y nucleares

- a) Análisis por activación
- b) Espectroscopía y espectrografía de masa
- c) Resonancia magnética nuclear
- d) Resonancia paramagnética

Esta lista a pesar de su extensión no es tal vez exhaustiva, por cuanto según distintos criterios podrían ser incluidos otros ensayos. No obstante da una idea bastante aproximada de los principios fundamentales usados en los distintos métodos.

En cuanto a los problemas que son objeto de la aplicación de estos métodos pueden ser agrupados en la siguiente forma:

1. Detección de defectos

- a) Defectos superficiales
- b) Defectos subsuperficiales
- c) Defectos interiores
- d) Falta de unión
- e) Hendiduras o huecos

2. Composición

- a) Inhomogeneidad y segregación
- b) composición química (variaciones)
- c) Identificación de estructuras
- d) Clasificación de materiales

3. Tamaño y ubicación de componentes

- a) Medición de espesores
- b) Identificación dimensional
- c) Metrología de componentes
- d) Ubicación de materiales o componentes
- e) Tamaño de defectos
- f) Clasificación

4. Estado físico

- a) Tamaño de grano
- b) Detección de trabajado en frío
- c) Detección de transformaciones de fase, soluciones sólidas, etc.)
- d) Acabado superficial
- e) Determinación de textura
- f) Constantes elásticas
- g) Tensiones residuales
- h) Dureza
- i) Estructura metalográfica

7 - LA SELECCION DE LOS METODOS DE END

Este tipo de clasificación nos facilita la selección de los métodos apropiados para cada caso en particular pero solamente un análisis de los fenómenos físico y/o químicos involucrados en cada caso y el conocimiento profundo de los diferentes métodos pueden definir la solución conveniente para cada caso.

En el Mac.Master, Vol.1 pág.1-24 se da un amplio cuadro que conviene repasar para ir facilitando la introducción en esta disciplina tecnológica tan amplia y compleja.

8 - ORIENTACION FUTURA EN END

Al hacer un análisis prospectivo del END debemos considerar separadamente dos aspectos bien diferentes:

- a) Investigación y desarrollo de las técnicas de END en función de la ciencia de los materiales e industrias de avanzada tecnológica.

b) Desarrollo y adecuación del END para implementación de la tecnología de calidad en el conjunto de la actividad industrial.

Con referencia al primer aspecto está claro que el problema central del END es la relación entre las propiedades físicas y el comportamiento en servicio de los materiales, por lo tanto será necesario poner un esfuerzo considerable en la investigación básica. Al decir de Mullins hasta ahora solamente se ha rascado la superficie de la ciencia en la búsqueda de nuevos métodos de ensayo.

Se espera que gradualmente se incorporen a esta disciplina investigadores científicos principalmente del área de la ciencia de los materiales y físicos. Para que ello ocurra los académicos deben comprender que el END no es simplemente el examen radiográfico de soldaduras o la inspección ultrasónica buscando defectos sino que está interesado también, en la naturaleza fundamental y el comportamiento de la materia. Los estudios que se conducen en la física del estado sólido son de principal interés para el desarrollo de nuevos métodos de END y a su vez estos métodos pueden contribuir en la realización de experiencias relacionadas con dichos estudios.

Las líneas principales según las cuales se desplaza actualmente el interés del END están referidas al desarrollo de métodos que no sólo informen sobre la presencia de defectos sino que además permitan su evaluación. Manejo y procesamiento de la información.

En el terreno de los métodos de mayor interés actualmente en desarrollo debemos citar como ejemplos:

- Los ensayos de emisión acústica
- La holografía acústica y óptica
- Los métodos basados en radiación infrarroja
- La radiografía de alta definición
- La neutronradiografía

Si consideramos el END dentro del Sector industrial convencional, debemos tener presente que el END ha tenido mala reputación en muchas industrias a causa de confusiones respecto a su función así como también por falta de adecuación de técnicas actuales y de calificación de personal. No obstante el uso indiscriminado de técnicas más sensibles, no es la respuesta a las actuales dificultades. La simple habilidad o capacidad para detectar fallas cada vez menores solamente agravará la resistencia del empresario a aplicar END.

Tal vez un camino adecuado para abreviar las actuales dificultades y ofrecer mejoras se encuentra desde el punto de vista del personal de investigación y desarrollo, responsable de la provisión de las herramientas que permitan al empresario obtener los apropiados niveles de calidad. En este

sentido nosotros podemos extrapolar las tendencias en la investigación relevante para compararlos con los requerimientos futuros.

Dentro de una amplia perspectiva se pueden identificar, como lo expresó Sharpe en una reciente conferencia (1) tres necesidades básicas a satisfacer en el futuro próximo.

- Mejor confiabilidad en las técnicas corrientes de inspección.
- Mejorar las condiciones de entorno para el uso de END.
- Mejores métodos para la aplicación de END.

Confiabilidad

El END debe ser seguro si desea cumplir su función de control de calidad. La tendencia actual es mejorar el diseño de los sistemas de manera de asegurar su confiabilidad principalmente haciendo que la interpretación de los resultados sea menos subjetiva. Para ello los instrumentos o equipos únicos se deben reemplazar por sistemas complejos que además de obtener la información, la registran y analizan.

La solución de los problemas del ruido de fondo, ya sea en Ultrasonido, o en radiografía (radiación dispersa) es otra de las metas que se trata de alcanzar.

Finalmente se espera obtener un mayor aumento en la confiabilidad mediante la mejora de diseño y standardización de instrumentos y equipos.

Condiciones de entorno

Como se dijo anteriormente el END constituye una parte fundamental en el control de calidad, pero su utilidad depende de sus interacciones con los otros factores que hacen a la tecnología de calidad. Esto indica que debe existir una correcta comunicación entre especialistas en diseño, en materiales y en ensayos. Dado que esto no se cumple normalmente en la práctica industrial, existe una tendencia actual a suplir esta falta mediante la acción de centros de investigación y desarrollo especializados en END que acuden en forma directa al estudio de problemas industriales.

Aplicaciones de END

Existe un marcado interés en el desarrollo de métodos automáticos de control que a su vez permitan la automatización de líneas de producción, con realimentación de la información ganada en etapas de inspección.

B I B L I O G R A F I A

- 1 - "Non destructive Testing Handbook"- Mc MASTER - 1963
- 2 - "Principles and Practice of Non-Destructive Testing"- J.H. LAMBLE
Londres 1962
- 3 - "Ensaiōs Nāo -Destructivos dos Metais"- P.G.de PAULA LEITE -
Ass. Brasileira de Metais - 1966
- 4 - "The Future development of NDT" -R.S.SHARPE- Non Destructive
Testing Research and Practice -Vol.5 No.5 -Sep.1972
- 5 - "Progress in NDT" - E.G.STANFORD, J.M.FEARSON - Londres 1961
- 6 - "Research Techniques in NDT" - R.S.SHARPE - Londres 1970
- 7 - "NDT, views, reviews, previews" - MARWELL Post-Graduate Series -
Londres 1969

1. PRINCIPIOS BÁSICOS

Supongamos dos bobinas, 1 y 2; a la bobina 1 se aplica un voltaje alterno y en la bobina 2 se aplica un voltímetro



Fig. 1

Si las bobinas se encuentran cerca, de manera que los campos magnéticos interaccionen, el voltímetro indicará que en la bobina 2 se ha inducido una corriente alterna, de acuerdo a las leyes de la inducción electromagnética. Si ahora se acerca un objeto metálico a las bobinas de manera que intercepte líneas de campo magnético la indicación del voltímetro se reducirá y esto se debe a que el campo magnético se ha debilitado; parte de su energía se ha gastado en producir corrientes parásitas o de Foucault en el objeto metálico y como estas corrientes a su vez producen campos que se oponen al que los causó, el campo original queda debilitado y de allí la menor indicación del voltímetro

Cuando el objeto se aleja de las bobinas el efecto se debilita y lo contrario si se acerca; para una posición fija si el objeto aumentara de tamaño o aumentara su conductividad eléctrica, el efecto se acentuaría. Esto se debe a que nuevamente aumentan las corrientes inducidas y por lo tanto se debilita más el campo magnético original.

De esto se concluye que si se desea utilizar este efecto para algún tipo de ensayo, el método será sensible a:

- 1) Distancia objeto-bobinas
- 2) Cambios dimensionales del objeto
- 3) Cambios en la conductividad eléctrica del objeto

Lo que todo sistema o instrumento de ensayos no destructivos por el método electromagnético trata de lograr, es establecer la dependencia exacta entre los cambios de tensión en la bobina secundaria y las causas de estos cambios que como se ha visto, deberán ser o estar relacionados con variaciones dimensionales, con la distancia bobinas-objeto o con la conductividad del espécimen a ensayar.

La tensión de la bobina secundaria o captora tiene una componente reactiva y una componente resistiva, ninguna de las cuales dependen linealmente de las variables que

METODO ELECTROMAGNETICO DE ENSAYO

NO DESTRUCTIVO

I N D I C E

- 1 - Principios Básicos**
- 2 - Plano de impedancia**
- 3 - Geometrías cilíndricas**
- 4 - Tubos**
- 5 - Geometrías planas**
- 6 - Configuración de bobinas y separación de variables**
- 7 - Tipos de equipos**
- 8 - Bibliografía**

afectan su magnitud, pero el adecuado análisis de estas componentes rinden información útil del espécimen.

2 PLANO DE IMPEDANCIA

Eléctricamente, una bobina está definida por su inductancia L y su resistencia R ; si se le aplica una corriente alterna de pulsación $\omega = 2\pi f$ la reactancia indicará la magnitud de la energía reactiva contenida en la bobina, que depende del campo magnético y la resistencia R la magnitud de la energía activa gastada en mantener ese campo y en suplir las pérdidas en el núcleo.

Estas magnitudes son vectoriales y su suma vectorial Z se denomina impedancia de la bobina (ver fig. 2).

COMPONENTE REACTIVA

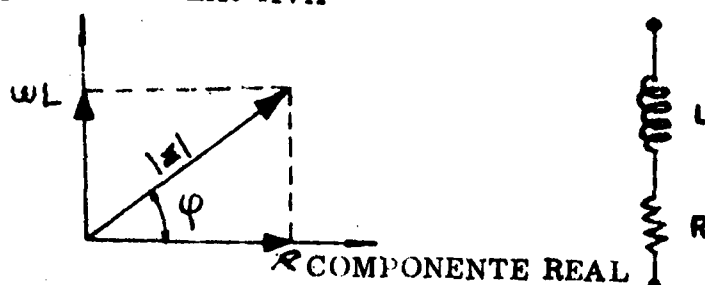


Fig. 2

La impedancia Z tiene como toda magnitud vectorial, módulo $|Z|$ y ángulo de fase φ . La reactancia y la resistencia se corresponden con la componente reactiva y la componente real o activa de la tensión en la bobina secundaria de que hablamos antes y así vemos que el análisis de la tensión secundaria se puede hacer en términos de la componente activa y reactiva de esa misma bobina.

Así, el estudio de las variaciones de la impedancia de la bobina debido a las condiciones del espécimen o del ensayo, denominado análisis de impedancia se puede realizar estudiando las variaciones del módulo y la fase del vector impedancia representado en el llamado plano de impedancia.

Este plano se define llevando en el eje horizontal la componente resistiva de la impedancia (R) o de la tensión del II^o (E real) y en un eje a 90^o la componente reactiva de la impedancia (ωL) o de la tensión (E reactiva). Para una frecuencia y condiciones del espécimen determinados, la magnitud y la fase de la impedancia tendrán un valor dado, valores que definen un punto en el plano de impedancia; si las condiciones del espécimen o la frecuencia o ambas cosas cambian, al cambiar la fase y la magnitud de Z se definen sucesivos puntos en el plano que forman lugares geométricos para cada variable del ensayo.

3. CASO DE GEOMETRIAS CILINDRICAS

Trataremos ahora el caso de una pieza cilíndrica de gran longitud respecto a la sección, definida por:

- a) diámetro - d
- b) conductividad eléctrica - σ
- c) permeabilidad magnética relativa - μ rel.

y un par de bobinas: primario y secundario de diámetro interior D (fig. 3).

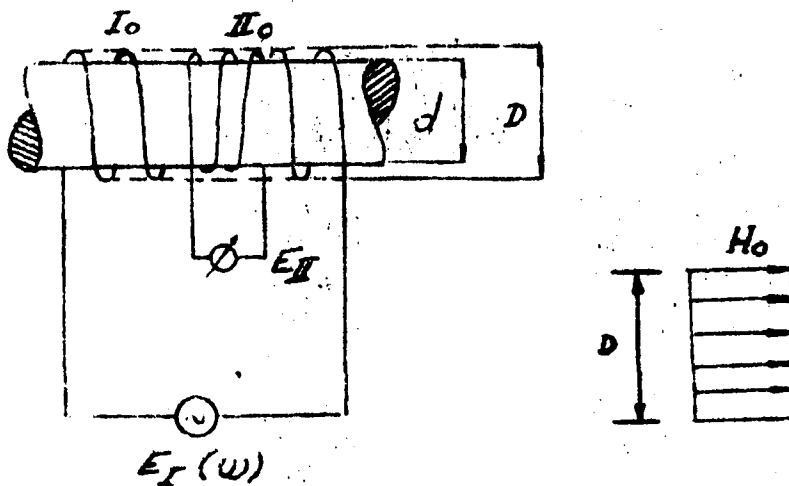


Fig. 3.

Supongamos que se retira la barra y se aplica al primario una tensión E_I (sen ωt) en el secundario aparecerá una tensión :

$$E_{II} = \omega N \frac{\pi D^2}{4} \mu \text{ rel. } H_0 \cdot 10^{-9} \text{ volts.}$$

donde

- μ rel = 1 (núcleo de aire)
- $\omega = 2\pi f$ - pulsación
- N - número de espiras
- H_0 - intensidad del campo magnético creado por la corriente circulante por el primario.

Como el núcleo es de aire $\mu_{rel} = 1$ y la conductividad es nula no hay efecto de corrientes parásitas y la distribución de H_0 en la sección es uniforme. Si ahora se introduce una barra metálica con $\sigma \neq 0$ y $\mu_{rel} = 1$ (no ferromagnética) el campo H_0 producirá corrientes parásitas que a su vez producirán campos que se oponen a H_0 con el resultado de que el campo neto resultante irá disminuyendo desde un máximo en la superficie hasta un mínimo en el centro de la barra como se ve en la fig. 4a

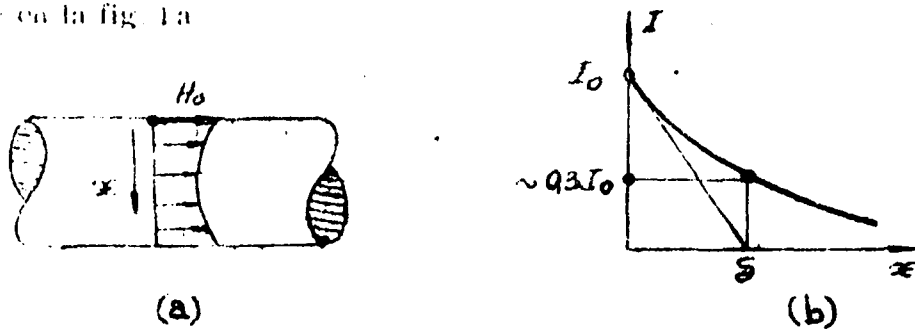


Fig. 4

Esta variación está relacionada con la penetración de las corrientes parásitas desde la superficie hacia el interior (dimensión x figura 4b); si la intensidad de la corriente en la superficie es I_0 la intensidad I a una distancia x está dada por

$$I = I_0 e^{-x \sqrt{\sigma \mu_{rel} \omega}}$$

Cuando $x = \delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma \omega \mu_{rel}}}$, $I = \frac{I_0}{e} \approx 0.3 I_0$

esta distancia δ , donde las corrientes alcanzan un valor de aproximadamente un 30% de las de la superficie se define como la profundidad de penetración. Al aumentar la frecuencia, la penetración disminuye, pero lo mismo sucede si aumenta la conductividad o la permeabilidad. Es evidente que si la conductividad y/o la frecuencia y/o la permeabilidad son muy altas, las corrientes cerca de la superficie son tan grandes que generan campos opuestos al original H_0 de magnitud tal que el campo neto hacia el interior de la barra tiende a anularse.

Está claro que en este caso el análisis de la tensión que se obtiene en el bobinado H_0 no puede ser sencillo ya que es necesario determinar y tener en cuenta la distribución de campo en el interior de la barra, para luego obtener las componentes activa y reactiva de la tensión o de la impedancia presentada por la bobina.

Un análisis cualitativo de lo que sucede al variar la conductividad del espécimen se puede hacer de la siguiente manera:

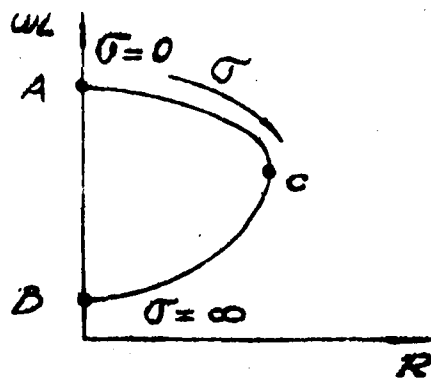


Fig. 5

Si la barra tiene $\sigma = 0$ no pueden inducirse corrientes parásitas en ella y la tensión E_{II} estaría dada por la expresión anterior; la impedancia de la bobina sería puramente reactiva y estaría representada por el punto A Fig. 5.

Si $\sigma = \infty$ el campo resultante es prácticamente nulo, ya que las corrientes parásitas, al tener una penetración nula hacen prácticamente nulo el campo neto dentro de la barra y luego la inductancia resultante se hace mínima, punto B, fig 5.

Si la σ varía entre cero e infinito la representación es de la forma indicada, que muestra los sucesivos puntos representativos de la Z a medida que varía σ , a medida que la conductividad aumenta, la inductancia neta (y con ella la reactancia inductiva) disminuye, mientras que la resistencia aparente aumenta, indicando que mayor energía va gastándose en producir corrientes parásitas; se llega a un punto (punto C) en que la inductancia es tal que las pérdidas por corrientes parásitas son máximas. Para conductancias aún mayores el aumento de las corrientes por un lado y la disminución de penetración por otro son tan grandes que la disminución de inductancia (por pérdida de campo neto) y la disminución de sección efectiva para la circulación de las corrientes (por decrecimiento de penetración) hacen que la impedancia tienda al punto B.

El tipo de curvas que dan el lugar geométrico del vector impedancia cuando uno de los parámetros que definen la pieza varía y los otros permanecen constantes se denominan lugares o trayectorias; en el caso que hemos visto se trataría de la trayectoria de conductividad, también existirán las de diámetro, posición bobina-pieza (lift-off o fill-factor) etc.

El análisis teórico, que solo vamos a delinear, implica resolver las ecuaciones de Maxwell para una geometría cilíndrica; esta resolución da la distribución de campo magnético en función de los parámetros del espécimen y del ensayo, o sea:

$$H = H_0 f(\omega, \sigma, d, D, \mu \text{ rel.})$$

como B (Inducción magnética) = $\mu \text{ rel } H$

se obtiene así la distribución de la Inducción, y como:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad ds: \text{diferencial de superficie}$$

se obtiene el flujo, si la bobina captora tiene N espiras y concatena el flujo Φ , la tensión en sus bornos será:

$$E_{II} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

esta tensión es compleja (componentes en fase y a 90°) y llevadas al plano de impedancia, dan las respectivas trayectorias para cada parámetro.

La solución matemática queda dada en términos de funciones de Bessel complejas, de las cuales interesa el módulo que llamaremos A ; entonces:

$$E_{II} = \text{función de } (A)$$

siendo
$$A = \frac{f \mu \text{ rel } \sigma d^2}{5066}$$

- f : frecuencia (c/s).
- $\mu \text{ rel}$: permeabilidad relativa
- σ : conductividad (metros/ohm-mm²)
- d : diámetro de la barra (cm)

La frecuencia a la cual $A = 1$ se denomina frecuencia límite o crítica f_g :

$$f_g = \frac{5066}{\mu \text{ rel } \sigma d^2}$$

luego es:
$$A = \frac{f}{5066 / \mu \text{ rel } d^2} = \frac{f}{f_g}$$

y finalmente
$$E_{II} = f (f / f_g)$$

Esto indica que E_{II} puede darse en forma universal como una cierta función de la frecuencia de trabajo y la frecuencia límite; si por ejemplo se trata de la trayectoria de conductividad, se verá como en la fig. 6.

Estos gráficos del plano de impedancia se normalizan respecto a ωL_0 , reactancia de la bobina sin espécimen o sea con núcleo de aire, haciéndose así independientes del valor de inductancia de la misma. Se representa entonces $\frac{\omega L}{\omega L_0}$ y $R / \omega L_0$ respectivamente.

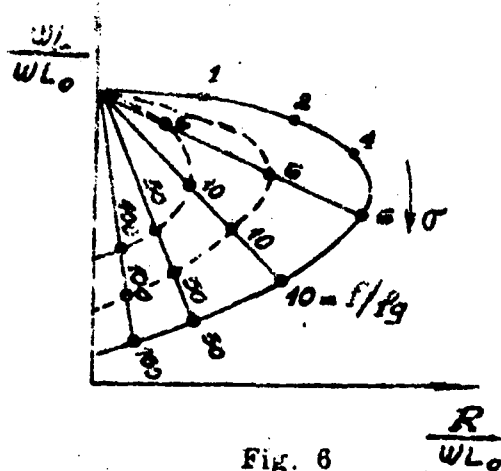


Fig. 6

Si la barra tiene un diámetro menor que el de la bobina, las trayectorias serían como las de líneas de punto.

La variación de diámetro se puede representar según las trayectorias de la fig. 7; supongamos que elegimos la frecuencia de trabajo de tal manera que el vector Z quedara representado por 1, es decir el punto representativo de su extremo sería el 1; si ahora el diámetro de la barra disminuye, el vector se desplaza hasta ocupar la posición OP cuando el diámetro sea cero (o no esté colocado en la barra); si ahora aplicamos otra frecuencia $f_2 > f_1$, con la barra colocada, Z estará representada por 2 y su trayectoria al variar el diámetro será 2P; se ve que utilizando distintas frecuencias, cambia la trayectoria de variación de diámetro y el ángulo θ que éstas forman con la trayectoria de σ .

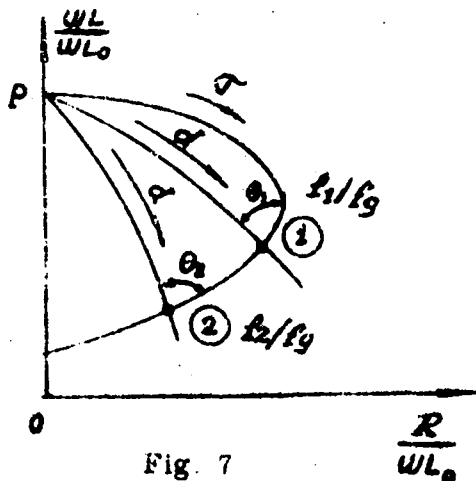


Fig. 7

Las trayectorias descritas son para materiales con $\mu_{rel} \approx 1$ o sea materiales no ferromagnéticos; en el caso de materiales magnéticos las trayectorias de diámetro son distintas, pero el concepto básico no cambia. Cuando se ensayan materiales ferromagnéticos y no interesan las variaciones de μ_{rel} , lo que se hace es situar...

el material con fuertes campos continuos de manera que la permeabilidad ≈ 1 . De ahí que en adelante nos referiremos a materiales con $\mu_{rel} = 1$.

Volviendo a la figura 7, si deseáramos por ejemplo medir variaciones de conductividad sin que influyan las variaciones de diámetro o viceversa, vemos que (fig. 8):

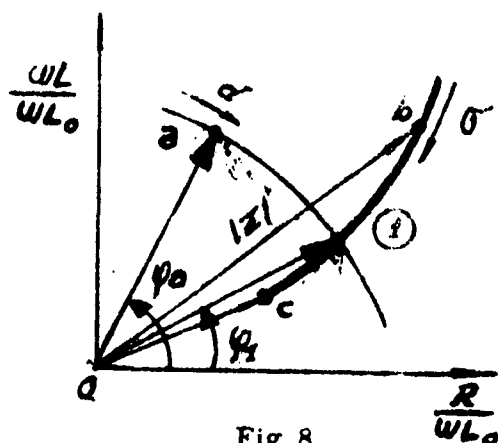


Fig. 8

- 1) Si varía d con $\sigma = \text{cte}$, p. ej. desde a hasta 1 vemos que el módulo de Z se mantiene prácticamente constante mientras que su fase varía de φ_a hasta φ_1 .
- 2) Si varía σ con $d = \text{cte}$, el módulo de Z varía de $|Z_b|$ hasta $|Z_c|$ mientras que la fase permanece prácticamente constante.

Es obvio que la información de diámetro estará dada por la variación de fase del vector impedancia mientras que la variación de conductividad estará dada por la variación de amplitud del mismo vector.

De aquí concluimos que en el caso de querer separar un efecto de otro lo que se debe conseguir es separar eléctricamente las variaciones de amplitud de las variaciones de fase en la tensión del bobinado H^0 , o lo que es lo mismo en la impedancia aparente.

En lo que hace a la detección de fisuras, la impedancia varía en forma similar aunque no igual a las que provocan las variaciones de conductividad. Si tenemos dos fallas S_1 y S_2 con S_2 a mayor profundidad que S_1 , en el plano de impedancia aparecerían como se ve en la fig. 9; S_2 produce tensiones defasadas en atraso respecto de S_1 . En la bibliografía (McMaster) existen curvas detalladas para distintos tipos y posiciones relativas de fisuras.

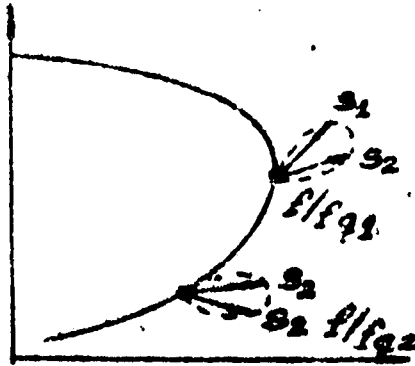


Fig. 9

4. TUBOS

En este caso se debe diferenciar entre tubos de paredes delgadas y tubos de paredes gruesas; este último caso se trata como barra; las frecuencias críticas en cada caso son:

1) Pared delgada $W \leq 5\% \text{ de } d_e$

$$f_g = \frac{5066}{\mu \sigma d_i W}$$

2) Pared gruesa

$$f_g = \frac{5066}{\mu \sigma d_e^2}$$

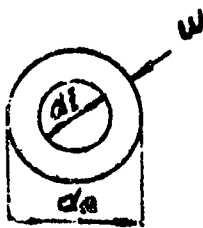


Fig. 10

En la figura 11 se indican las relaciones entre los distintos parámetros. Para varias relaciones $f/f_g = \text{cte.}$ se dan las variaciones cuando el diámetro interior o el espesor disminuye; si se desea medir conductividad separando los efectos de variación de diámetro interno, se ve que habría que elegir una frecuencia tal que la relación f/f_g para $d_i/d_e = \text{cte.}$ no dé un punto sobre la curva de conductividad; p.ej. si $d_i/d_e = 80\%$ vemos que la mejor relación es $f/f_g = 100$.

En la bibliografía aparece una expresión para la relación f/f_g óptima en tubos :

$$f/f_g = \frac{2}{(1 - W/r_e) \left(\frac{W}{r_e} \right)}$$

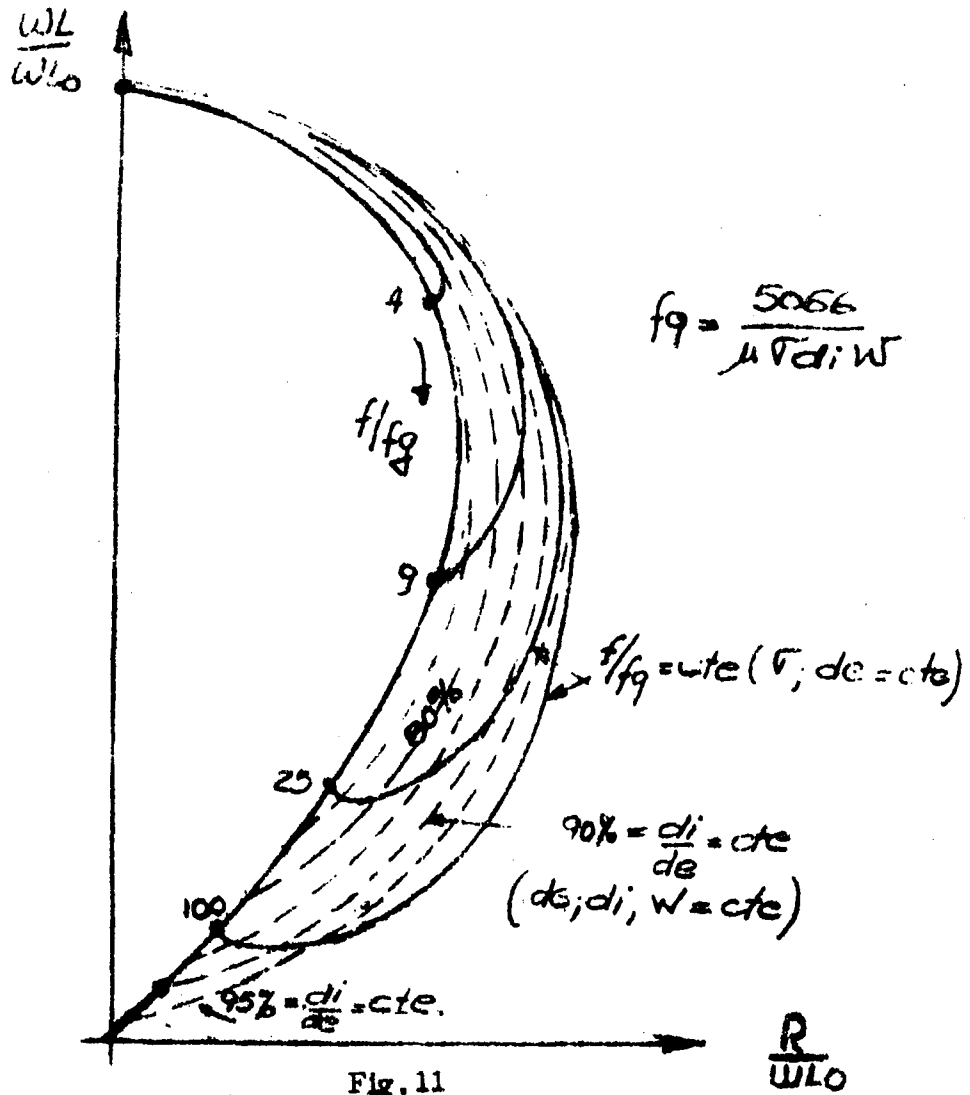


Fig. 11

5. GEOMETRIAS PLANAS

En estos casos también los conceptos básicos son válidos y el sistema queda definido como en la fig. 12; la bobina produce campo magnético en la dirección de su

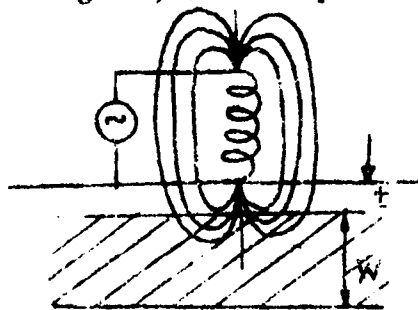


Fig. 12

eje magnético; t es la distancia bobina-superficie ("lift-off") y W es el espesor de la pieza. De la misma manera que en el caso de las geometrías cilíndricas, los parámetros t , W , σ , μ rel producen lugares geométricos definidos en el plano complejo de impedancias; en estos casos es difícil definir una frecuencia límite f_g , aunque en la bibliografía aparecen tratadas algunas configuraciones de bobinas-material dadas (ver N.D. Testing Handbook); de todas maneras, las trayectorias son del tipo de la figura 13, para una dada frecuencia.

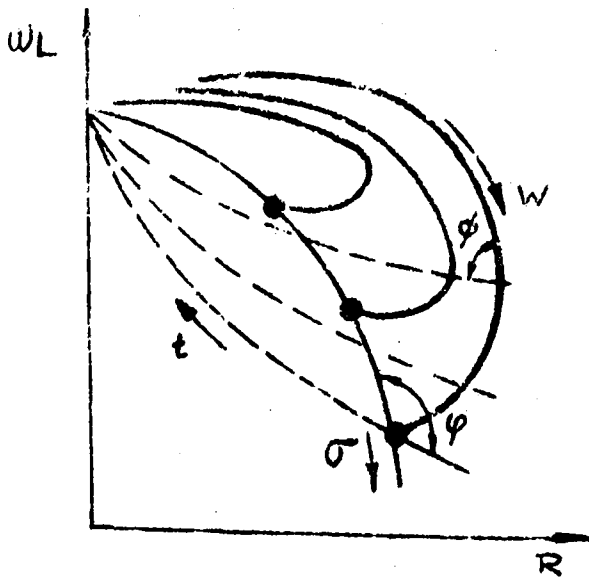


Fig. 13

A medida que aumenta la conductividad, la profundidad de penetración se hace cada vez menor y así las trayectorias de espesor se unen con la trayectoria de conductividad para espesores cada vez mayores; las trayectorias de lift-off (línea de puntos) forman ángulos ψ con los de espesor, mientras que sobre la intersección con la curva de σ tiende a formar ángulos ϕ del orden de 180° . Como regla general se pueden identificar dos condiciones generales de ensayos:

1) Determinación de variaciones de σ o relacionados con ella (fisuras), minimizando los efectos de t y W ; la mejor condición de ensayo está determinada por una frecuencia tal que el espesor de la pieza sea del orden de 1,5 veces la profundidad de penetración. El punto representativo estaría sobre la curva de conductividad y sería la condición más favorable para discriminar contra variaciones de t y W .

2) Determinación de W minimizando el efecto de t ; una frecuencia tal que para el espesor a medir el ángulo ϕ sea lo más aproximadamente posible 90° .

6. CONFIGURACION DE BOBINAS Y SEPARACION DE VARIABLES

Hasta ahora, hemos visto bobinas secundarias sencillas, es decir solenoides de N espiras que concatenan el flujo producido por la bobina primaria (nos ocuparemos en lo que sigue de bobinas para configuraciones cilíndricas aunque las conclusiones son válidas para otras geometrías); hemos visto que se puede representar la impedancia de esta bobina en el plano de impedancias. Por ejemplo, si el diámetro de la barra es d para una relación t/fg dada la impedancia de la bobina II se puede representar por el vector OP ; hemos visto que si el diámetro varía, la impedancia sigue la trayectoria d y que si aparece una fisura S iría a ocupar la posición OS , (Fig. 14).

donde: fg = frecuencia crítica para banas o tubos gruesos
 r_e = radio exterior ($de/2$)
 W = espesor

que da excelentes resultados en la práctica.

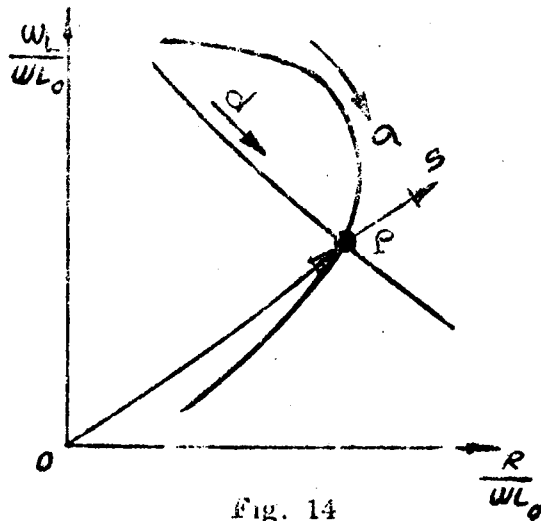


Fig. 14

Vemos que las variaciones alrededor del punto de trabajo son las que importan y no la magnitud absoluta del vector impedancia OP ; además el equipo electrónico debe ser capaz de analizar variaciones pequeñas sobre una magnitud grande, por lo que para aumentar la sensibilidad del sistema es conveniente eliminar la magnitud OP , que en realidad no presenta ninguna información; esto se conseguiría sumando a la salida de la bobina una impedancia fija de magnitud (OP) y 180° de fase respecto a ésta de manera que la impedancia neta resulte nula. Esto se consigue con configuraciones diferenciales del tipo genérico de la figura 15.

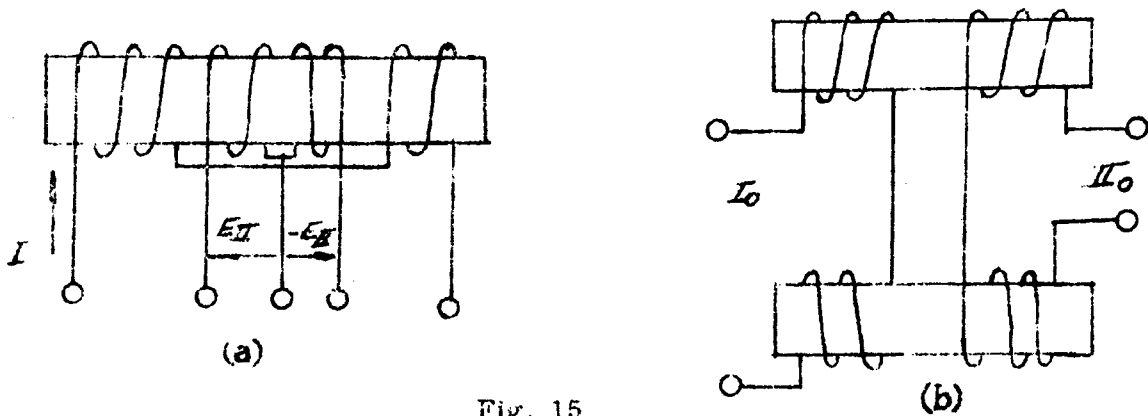


Fig. 15

En la Fig. 15a tenemos el I^0 bobinado en un sentido determinado mientras que el II^0 está dividido en dos secciones, una bobinada en el mismo sentido que el I^0 mientras que la otra lo está en sentido contrario. En la Fig. 15b tenemos que el I^0 y el II^0 están divididos en dos secciones, una abraza la barra en prueba y la otra una barra patrón de características iguales a la ensayada. En cualquiera de las dos configuraciones si la barra ensayada no tiene defectos ni variaciones dimensionales la salida neta es nula mientras que si aparece alguna variación habrá salida.

En el caso de la Fig. 15a los secundarios analizan secciones contiguas de la barra de manera que si bajo una de las secciones hay una variación respecto de la otra habrá salida, si la variación (por ejemplo de diámetro) se extiende hasta abarcar ambas bobinas la salida también será nula. Esto no sucede con la configuración 15b, aunque en este caso la compensación no es tan efectiva, por lo que para detección de fisuras pequeñas es preferible el otro tipo.

En el caso de tubos, las bobinas pueden ser interiores o exteriores y casi siempre son del tipo 15a; en equipos modernos se consiguen sensibilidades casi iguales para fisuras interiores o exteriores, ya sea para bobinas interiores o exteriores.

Si usamos bobinas diferenciales, podemos pensar que el origen del plano de inductancias se traslada de O hasta P (fig. 16).

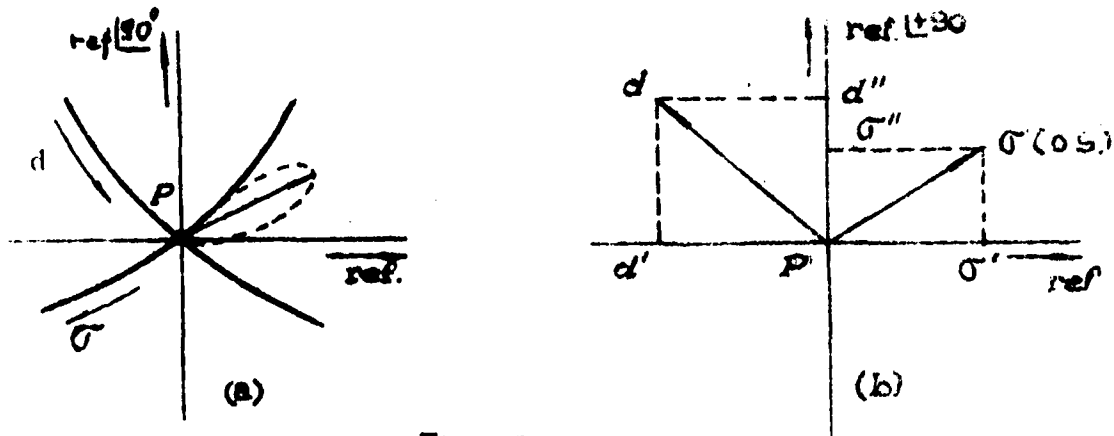


Fig. 16

Para detectar fisuras (que para simplificar suponemos que siguen direcciones similares a las de σ) vemos que si se proyectan los vectores sobre un eje de referencia se tienen las proyecciones d' y σ' ; si también se proyecta sobre un eje a 90° de fase del de referencia se obtendrán las proyecciones σ'' y d'' . Si ahora disponemos el análisis de señal de tal manera que el eje de referencia sea coincidente con la tangente a la trayectoria de diámetros y hacemos que la señal analizada sea la que aparece en el eje a 90° , sólo la contribución de las fisuras será analizada o detectada como indicación del sistema. La separación será óptima si las direcciones respectivas de d y σ (o fisuras) es de 90° y esto es lo que se trata de lograr al seleccionar la frecuencia del ensayo. Lógicamente si lo que se desea es determinar variaciones de diámetro, la señal a analizar sería la proyección sobre el eje de referencia coincidente con la trayectoria de diámetro.

Un sistema básico de análisis de señal sería como el de la figura 17:

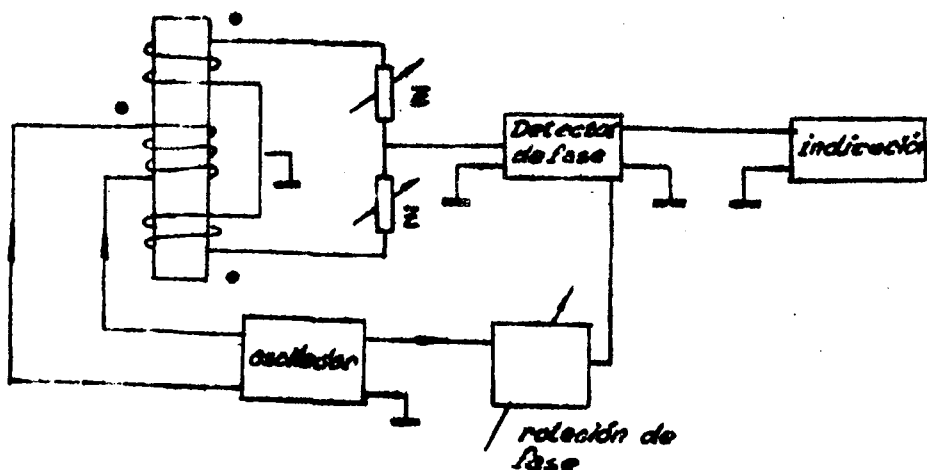


Fig. 17

El oscilador produce la frecuencia de excitación que alimenta el primario y a la vez entrega una tensión al sistema de rotación de fase, cuya salida es la entrada de referencia al detector de fase. En este bloque se produce una salida proporcional a la proyección de la señal producida por los secundarios (ya sea en fase o en cuadratura con la señal de referencia) que a su vez pasa al sistema de presentación de la información, que puede ser registrador, pantalla osciloscópica, instrumento a aguja, etc. La señal de entrada al detector de fase es la que se produce en la diagonal del puente formado por las bobinas secundarias y dos impedancias variables, cuyo fin es balancear las bobinas de manera que la tensión sea nula cuando no hay defectos o variaciones en la barra.

El ajuste consiste en pasar una barra patrón donde haya variaciones de los parámetros que se desean detectar y rechazar y se varía el control de fase de manera que sólo haya indicación cuando se pasa por las bobinas el defecto a detectar; el ajuste es óptimo cuando la indicación del parámetro a discriminar es la menor posible. Previamente a esto se varían las impedancias Z hasta que se obtenga indicación nula con una barra patrón en condiciones óptimas. La operación de variación de las Z equivale, en la figura 16 a llevar el punto Q hasta P , eliminando cualquier diferencia física en las bobinas, mientras que la rotación de fase equivale a orientar el eje de referencia de manera de obtener la mejor proyección posible de la señal de interés, eliminando en lo posible las señales de variaciones que si bien existen en las piezas, son irrelevantes al ensayo.

7. TIPOS DE EQUIPOS

Los equipos existentes aplican en todo o en parte los conceptos desarrollados hasta aquí, en razón de que en general están diseñados para aplicaciones específicas; se podrían dividir en:

a) Según el tipo de bobinas

- a.1 Bobinas anulares exteriores para geometrías cilíndricas.
- a.2 Bobinas interiores tipo sonda para tubos.
- a.3 Bobinas tipo cabezal para superficies planas.
- a.4 Bobinas tipo "tenedor" para chapas con bobinas por encima y debajo de la chapa.

Las bobinas pueden ser diferenciales o simples y, en caso de ser diferenciales pueden ser de autocomparación con piezas patrón externas.

b) Según el tipo de salida de la señal

b.1 De magnitud de impedancia:

Solo operan con la magnitud del vector de impedancia; sólo se pueden usar cuando las variaciones no relevantes se mantienen en límites estrechos.

b.2 De magnitud de reactancia:

En general varían la frecuencia del oscilador y la medida se obtiene variando un control hasta obtener la frecuencia original; la variación del control es proporcional a la magnitud indicada. Se usan en conductímetros y aparatos similares, donde la medición se hace sobre probetas de dimensión standard.

b.3 De magnitud y fase del vector impedancia

Son los basados en los conceptos discutidos en las secciones anteriores y prácticamente los únicos que permiten control, sino total, relativo de las condiciones del ensayo.

c) De acuerdo a la forma de indicación de la información

c.1 Indicación a instrumento de aguja.

c.2 Con puntos luminosos en una pantalla de rayos catódicos que permite visualizar el plano de impedancia.

c.3 Métodos de las elipses: en las placas de deflexión horizontal de un T.R.C. Se aplica la tensión de referencia y en las verticales la señal; en la pantalla aparecen líneas inclinadas, círculos o elipses cuyo eje mayor varía de acuerdo a la relación de fase entre la señal y la referencia.

c.4 Por barrido lineal: en las placas verticales se aplica la señal y en las horizontales una tensión "diente de sierra" de fase controlada y variable. De esa manera en el centro de la pantalla se puede observar la onda de señal a cualquier fase seleccionada y controlar los cambios de amplitud de señal en esa fase.

INSPECCION VISUAL

INDICE

- 1. GENERALIDADES**
- 2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS**
- 3. INSPECCION VISUAL**
- 4. EL OJO**
- 5. EL OJO COMO INSTRUMENTO OPTICO**
- 6. AYUDAS OPTICAS DE LA VISION**
- 7. LUPA**
- 8. MICROSCOPIO**
- 9. TELESCOPIO O ANTEJO DE DISTANCIA**
- 10. BINOCULAR O PRISMATICO**
- 11. PERISCOPIOS**
- 12. ENDOSCOPIOS**
- 13. PROYECTORES DE PERFILES**
- 14. TELEVISION**
- 15. FOTOGRAFIA**
- 16. RUGOSIDAD. TERMINACION SUPERFICIAL**

INSPECCION VISUAL

1) GENERALIDADES

A qué se debe que los usuarios den tanto énfasis a la calidad de casi todas las adquisiciones que hacen? La respuesta es muy simple, los productos complejos que se comercializan en la actualidad requieren mucha más confiabilidad en cada componente para asegurar que por mucho tiempo no haya que hacer mantenimiento del conjunto.

Es imprescindible alta calidad del producto puesto que toda la atención y expectativa del usuario está concentrada en el rendimiento del equipo adquirido. Este aspecto se vé desde la vida diaria, incluso del hogar, hasta sistemas complejos y de usos muy específicos.

El ama de casa espera que su heladera le brinde servicio ininterrumpido por muchos años. El esposo, que su automóvil funcione todas las mañanas, lo lleve y lo traiga de su trabajo sin inconvenientes.

Cada uno de estos artículos tiene muchas piezas componentes y cada una de ellas si fallara sería motivo de que tanto la heladera como el automóvil no funcionaran.

Consideremos todos los componentes que tiene un televisor, un grabador, una fotocopiadora, un tractor, etc. cada componente debe ser de muy buena calidad para que el equipo pueda funcionar mucho tiempo sin inconvenientes.

Es evidente que todo el mundo desea productos menos costosos, pero eso sí, nadie quiere productos baratos pero que siempre funcionen mal o no lo hagan. Así se hace muy cierto que "lo barato sale caro". Generalmente un producto de bajo costo tiene su calidad muy limitada si bien ello no quiere decir que todos los productos baratos sean malos, ni que los productos costosos sean siempre buenos.

La relación entre costo y calidad del producto depende en mucho de la seriedad y honestidad del fabricante. El comprador masivo busca que a un precio razonable se pueda adquirir un artículo que tenga un tiempo de servicio también razonable. En términos más simples "el comprador" y en especial el comprador "masivo" requiere un producto confiable.

Este problema de confiabilidad se multiplica muchas veces en la industria aérea y en especial en la aeroespacial.

El fabricante de modernos aviones está constantemente acosado por un producto que cuesta más de 5 millones de dólares (aproximadamente 23 millones de pesos) y la responsabilidad por tener prácticamente en sus manos las vidas de 100 o más pasajeros cada vez que vuela uno de sus aviones. Es claro entonces por qué cuando una compañía de transportes aéreos compra sus aviones demanda ante todo un alto índice de confiabilidad. Si consideramos los cientos de miles de piezas que tiene un avión es fácil comprender que obtener una confiabilidad alta es una tarea monumental.

Todas estas consideraciones se hacen mucho más críticas cuando se trata de vuelos espaciales. Se puede entender fácilmente que el programa de vuelos que tiene la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los EE. UU. (NASA) es la empresa más grande llevada a cabo en el aspecto técnico científico.

Para la obtención de datos y la seguridad de toda la misión se utilizan satélites meteorológicos, de comunicaciones, sondas de profundidad espacial, observatorios orbitales, etc. Los sistemas de comunicaciones en tierra se encuentran todos duplicados y muchos de ellos triplicados y hasta cuadruplicados.

Cuando aumenta la distancia entre el astronauta y la tierra la confiabilidad de los equipos aumenta en progresión geométrica. La industria e investigación nuclear también requieren un alto grado de confiabilidad. Para grandes empresas nucleares la confiabilidad se acerca mucho a la necesidad en la industria aeroespacial si bien esta última siempre va un poco adelante en las normas de seguridad.

Hasta ahora se discutió el problema de alta calidad en términos del costo y en términos de vidas.

Veremos ahora las formas de obtener calidad y confiabilidad a través o con la ayuda del "Ensayo no Destructivo" (END).

El END es exactamente lo que su nombre indica, probar un material o una pieza sin dañarla para el uso destinado. Lo más importante del END no es ver una falla, sino prever las fallas que pueden causar un fracaso. Es decir es en una medida predecir el futuro, por supuesto en un ámbito de probabilidades dado.

Los métodos generales del END son los que se mencionan a continuación, si bien algunos de ellos dan origen a nuevas técnicas que se basan en el principio fundamental de cada uno de ellos.

Los métodos fundamentales de END son :

- | | | |
|---|---|--|
| a) Inspección visual | } | Inspección visual |
| b) Líquidos penetrantes | | |
| c) partículas magnéticas | | |
| d) radiografía-gammagrafía | | |
| e) método de corrientes parásitas (Eddy currents) | } | Inspección visual
mediante instrumentos |
| f) método de ultrasonido | | |

Cada método no destructivo está diseñado para proveer evidencia de fallas en artículos en los cuales no son normalmente visibles a un ojo desnudo. La evidencia dejada por cada método se denomina indicación.

Es así que las indicaciones pueden ser acumulación de partículas magnéticas, indicación en un tubo de rayos catódicos, indicación en un instrumento de aguja, indicación en un film radiográfico, etc.

Ensayos destructivos y no destructivos :

Se considera ensayo destructivo a todo aquel ensayo que inutilice al espécimen para su uso normal; mientras que el ensayo no destructivo no modifica las condiciones de uso de la pieza o elemento ensayado. Una pieza sometida a ensayos no destructivos, sea o no defectuosa, puede ser usada para su fin específico.

Generalmente el ensayo destructivo requiere una inversión básica o primera relativamente baja, pero a pesar de ello es el más costoso pues destruye piezas o componentes.

El ensayo no destructivo por el contrario requiere una primera inversión más costosa pero al no inutilizar componentes, resulta de bajo costo en un plazo no muy prolongado.

El ensayo destructivo generalmente dobla, tuerce, flexiona, torciona, estira, o rompe el espécimen bajo prueba. Se aplica casi siempre a pocas piezas o especímenes. Por otra parte el END se puede aplicar a todos los especímenes aun más de una vez y es absolutamente necesario para asegurar un nivel de calidad determinada y que el espécimen se comportará como se exige.

2. DEFECTOS EN PIEZAS Y MATERIALES

Aparte de los defectos dimensionales, los defectos de los especímenes pueden ser roturas, grietas, agujeros, burbujas y todo esto puede resumirse en una sola palabra que es "discontinuidad". Así una discontinuidad significa una brecha o interrupción en la estructura física normal de una pieza. El defecto puede ser también una modificación no deseada en composición o en la estructura del material, ya sea parcial o total. Evidentemente hay un nivel por debajo del cual no pueden detectarse fallas sobre todo si se trabaja a ojo desnudo.

Cada método de END da una indicación visual de defectos que no son normalmente visibles a ojo desnudo.

Muchas veces conociendo el proceso de fabricación, o la forma de maquinado puede descubrirse más fácilmente los defectos que pueden producirse.

Proceso de forja :

En este proceso pueden producirse plegados del material si las matrices no están bien alineadas o si es excesivo el material. Cuando el forjado se realiza a baja temperatura pueden producirse grietas debido a que el material no fluye debidamente.

Estas grietas pueden aparecer tanto en forma interna como en forma externa.

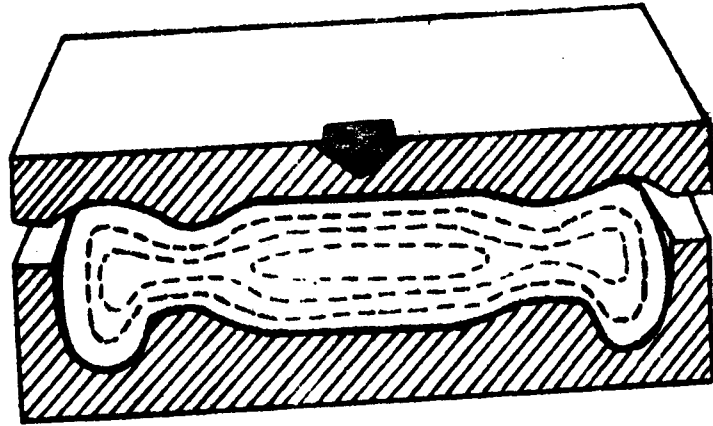


Figura 1

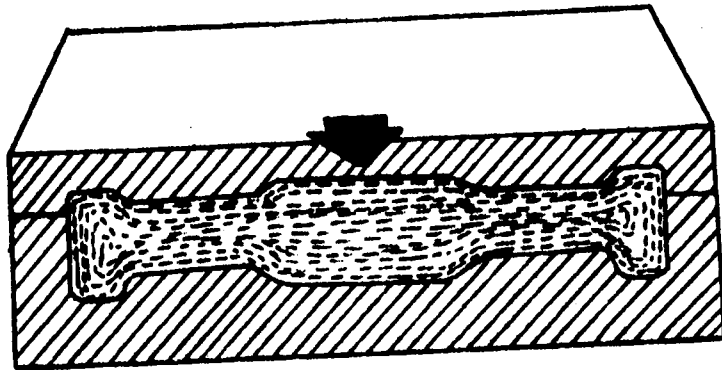


Figura 2

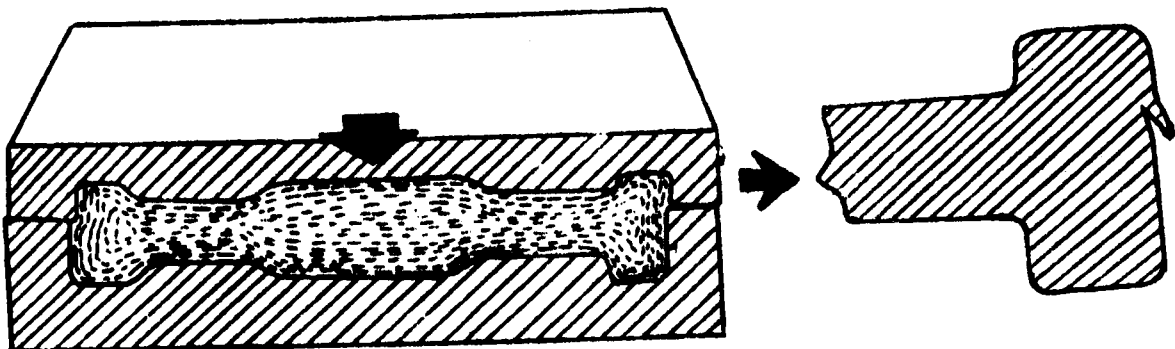


Figura 3

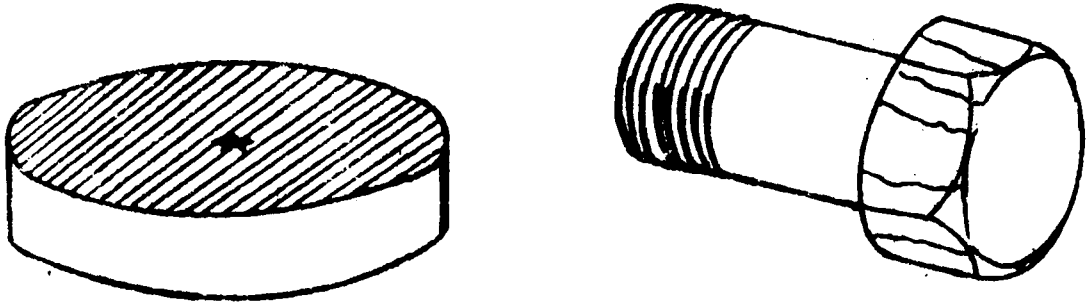


Figura 4

Proceso de fundición - colada :

Quando al hacer la colada se interrumpe y luego se sigue colando se produce una superficie de separación del metal sólido y a esto se le llama superficies de enfriamiento.

A veces sucede que el metal fundido salpica en el molde, se enfría y cae nuevamente en la masa fundida, si no vuelve a homogenizarse la solución, ello puede causar fallas internas.

Quando la pieza fundida tiene secciones grandes y secciones pequeñas hay contracciones desiguales y se pueden producir grietas. Cavidades por contracción se producen cuando el material es insuficiente para alimentar las contracciones. Hay inclusiones gaseosas que se producen en la superficie y es debido a gases que provienen del molde, pueden ocurrir en cualquier lugar. Pueden ocurrir porosidades debido a gases atrapados y su ubicación depende de la forma del molde.

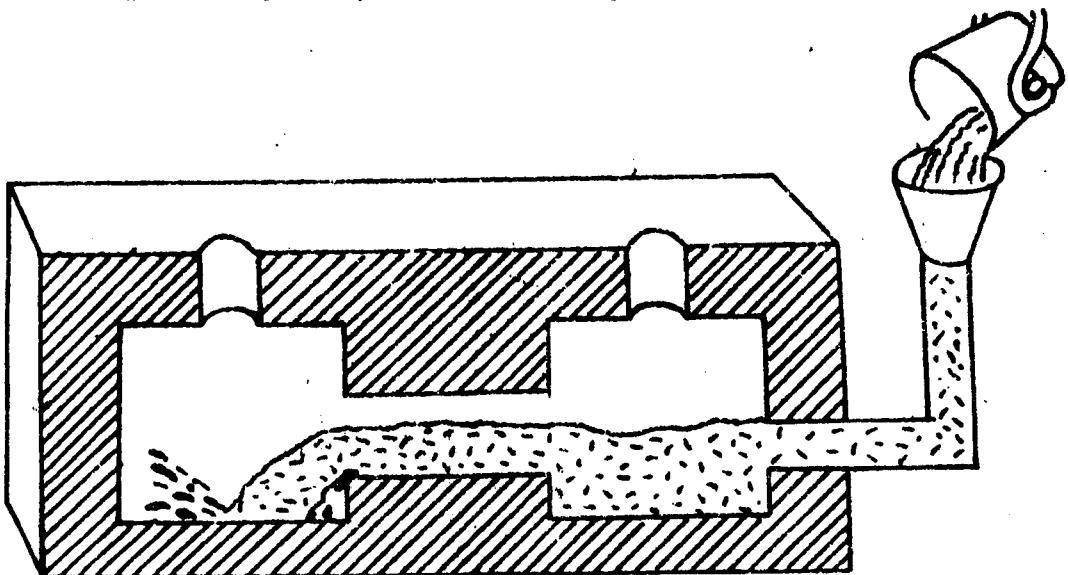


Figura 5

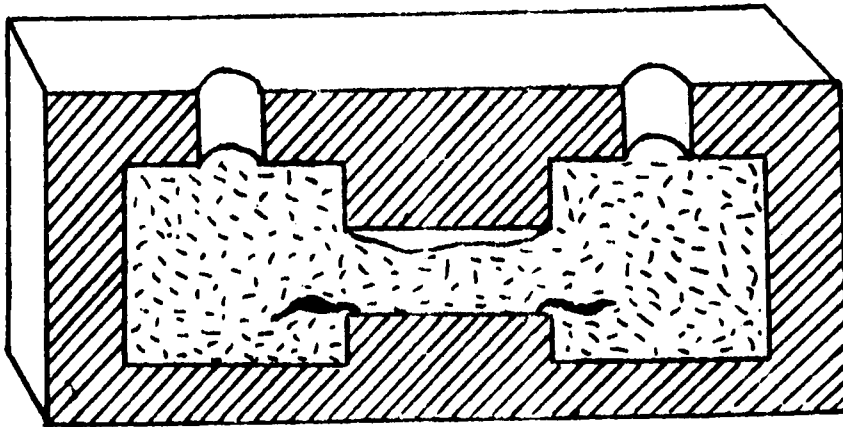


Figura 6

Proceso de conformación de tubos. Extrusión :

En tubos soldados (tanto soldadura axial como helicoidal) pueden aparecer discontinuidades en la soldadura que pueden estar tanto dentro como fuera del caño. En el método paso de peregrino pueden aparecer descamaciones debido al roce del mandril.

En extrusión pueden aparecer porosidades, cracs o sino discontinuidades debido a enfriamiento del metal.

Referirse a figs. 30 y 31

Maquinado y procesamiento :

Cuando se hacen desvastados con amoladoras se produce calentamiento de la superficie que al enfriarse se agrieta en forma siempre transversal, al sentido de giro de la piedra.

En tratamientos térmicos también pueden producirse grietas que pueden tener cualquier dirección.

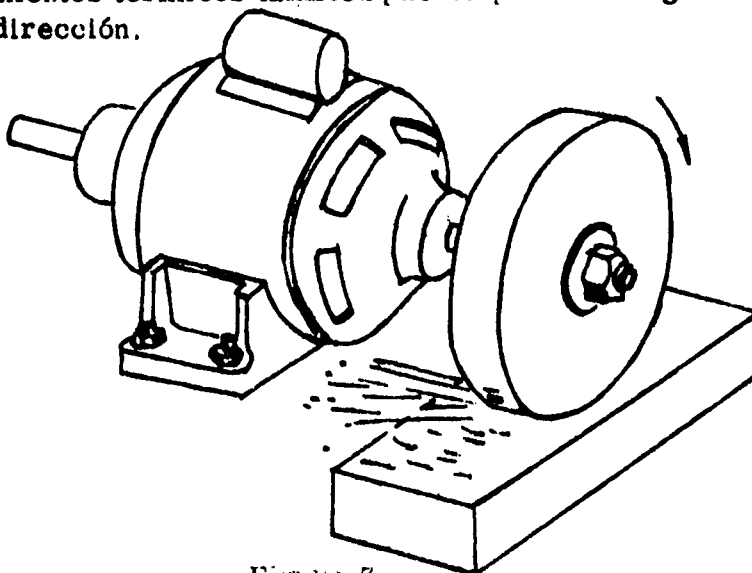


Figura 7

Proceso de soldadura :

Las grietas del proceso de soldadura pueden aparecer en cualquier lugar del cordón, pueden ser internas o salir a la superficie, pueden ser transversales o longitudinales y pueden ser debidas a que las piezas estaban fuertemente retenidas o constreñidas en sus movimientos.

Igual que en lingotes se puede producir porosidad debido a que el gas atrapado tiende a ir a la superficie. Estas porosidades tienen forma esférica y pueden ser superficiales o sub-superficiales.

Puede suceder que en la soldadura haya falta de penetración o también falta de fusión existiendo así una falta de continuidad física.

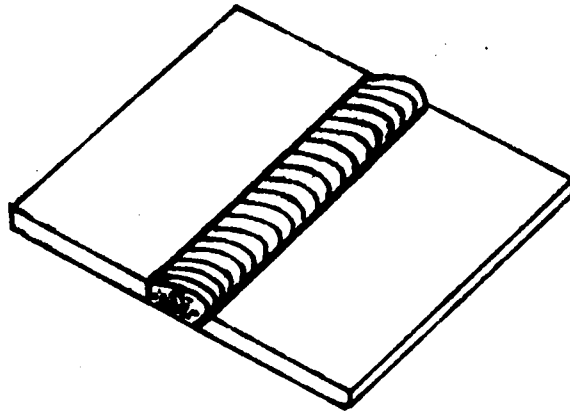


Figura 8

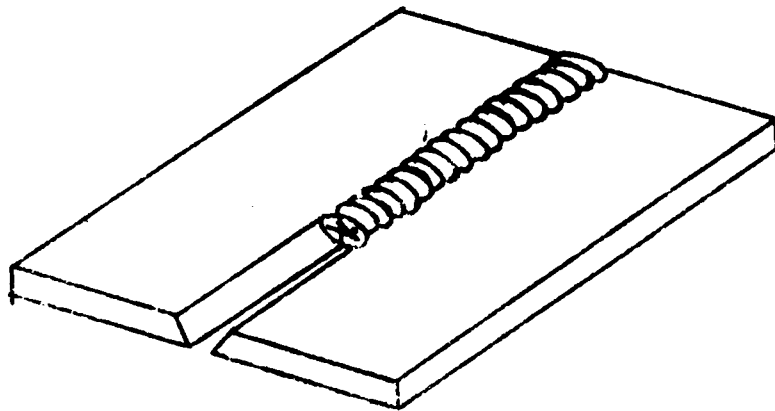


Figura 9

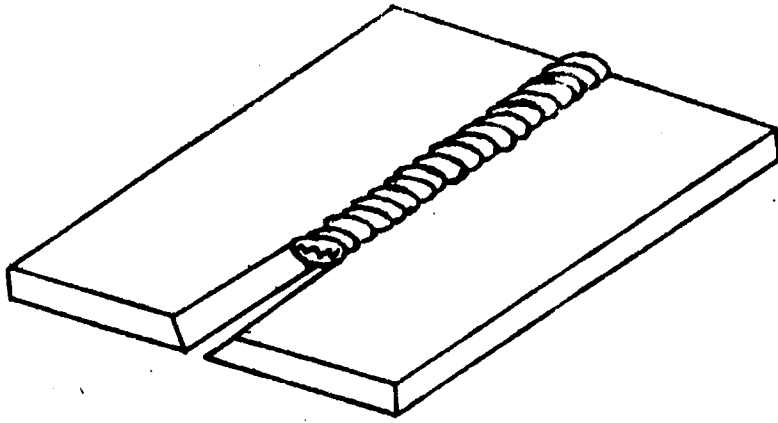


Figura 10

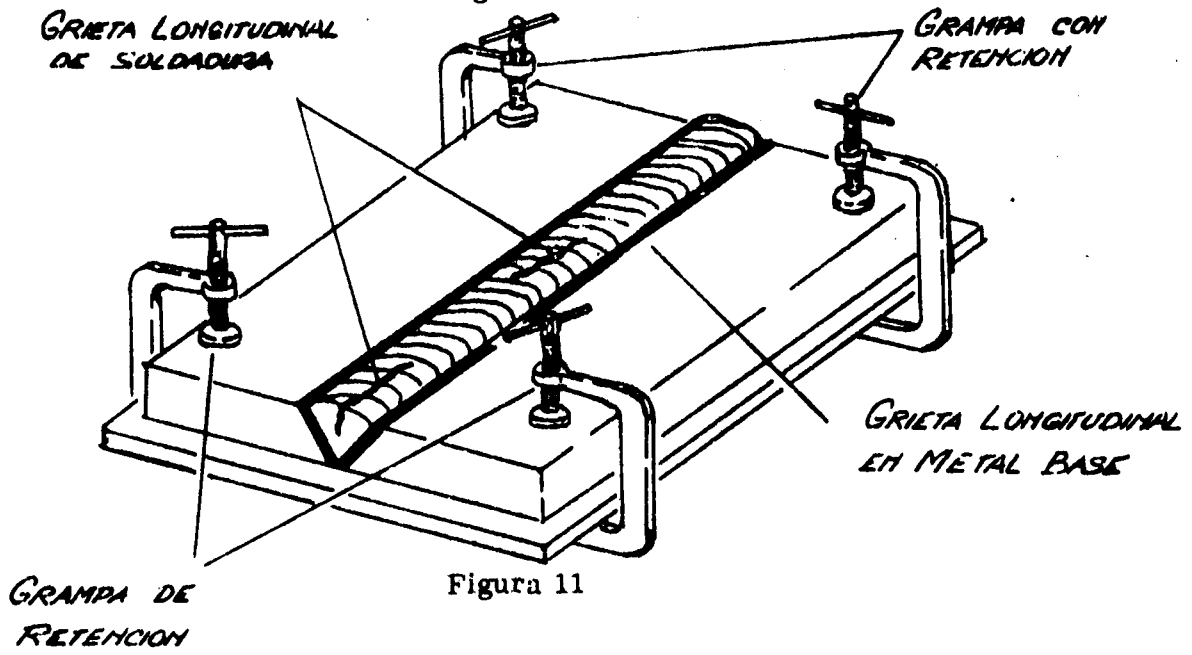


Figura 11



Figura 12



Figura 13

Fatiga :

Es sabido que los seres inanimados también sufren fatiga, es decir los materiales evidencian muchas veces signos de fatiga. Suponemos que una pieza ha pasado todas las pruebas del END y que se instala para su funcionamiento. Es necesario saber ahora que sucede en el proceso de fatiga. La mayoría de las grietas por fatiga ocurren o tienen su iniciación en inclusiones o pequeñas discontinuidades. Estas discontinuidades son lugares de concentración de tensiones o esfuerzos y puntos de partida de microgrietas.

Vemos así que una pieza puede fracasar en servicio si los END no son lo suficientemente ajustados y rigurosos.

Las inspecciones **olfativas** y/o auditivas muy rara vez se usan pues aquellos fenómenos que proporcionan excitación a esos órganos son muy escasos y aún existiendo proporcionan poca información al ser humano.

Es sabido que los animales tienen mucho más desarrollado los sentidos olfativo y auditivo y aún el visual que el hombre. Salvo casos muy especiales el tipo de inspección usada por el hombre para obtener mayor información es la inspección visual.

3. INSPECCION VISUAL

Como se vio anteriormente casi toda la inspección se reduce en último grado a una inspección visual, pero es necesario delimitar los ámbitos de la inspección visual.

Normalmente se entiende por inspección visual a la observación que puede hacer un individuo a ojo desnudo o con aditamento ópticos que hagan mejorar el alcance y definición de su sentido de la vista.

La inspección visual es probablemente el END más usado. Es simple, fácil de aplicar, y rápido para efectuar (en la mayoría de los casos) y normalmente de bajo costo (salvo cuando las condiciones son muy críticas) como puede presentarse en materiales activados o debajo de fluido.

Por más que las piezas deban ser inspeccionadas usando otros métodos la inspección visual es sumamente importante. Así por ejemplo la inspección visual por un experto en ella puede dar una información muy valiosa. En una soldadura la visión por un experto puede revelar cracs, orientación y posición de las grietas distintas zonas de soldadura, porosidad superficial, cráteres no llenados y posiblemente la orientación de la interfase entre la zona de fusión de la soldadura y la unión con el metal base. Otras observaciones pueden revelar penetración, presencia o no de films de óxidos, superficies potenciales de debilidad, como indentaciones agudas. El examen visual de la soldadura puede ayudar para decidir el ángulo de incidencia de rayos X en una radiografía para ver grietas. El uso de la inspección **visual** previa a otro ensayo puede decidir el éxito o fracaso del segundo.

En una inspección visual el instrumental requerido "generalmente" es de poco costo pero eso sí deberá tenerse una iluminación muy buena. Que la ilumina-

ción sea buena no quiere decir en ningún momento que debe ser de mucha intensidad, sino que para cada espécimen y cada superficie debe ser la adecuada. Para especímenes opacos y oscuros conviene una iluminación puntual y brillante. Por el contrario, si el espécimen es brillante y claro conviene que la iluminación sea menos intensa y como condición casi siempre muy útil, que sea difusa.

Hay que tener asimismo muy en cuenta el tiempo que se le permite a un observador o inspector visual trabajar sin interrupciones. Es bien sabido que cuando se produce cansancio en la vista ello puede conducir a errores de apreciación. De acuerdo a la iluminación que sea necesaria para el caso y cuando deba fijarse la vista así será el tiempo de trabajo del inspector. Deberán considerarse descansos periódicos durante la jornada de trabajo. Asimismo la experiencia que tenga una persona es un antecedente de mucho valor para que la inspección sea realmente eficaz.

Asimismo la superficie a ser analizada debe estar limpia, desengrasada y muchas veces es conveniente un arenado previo.

Dado que el elemento fundamental de la inspección visual es el ojo, lo más lógico es comenzar el estudio del mismo para poder luego comprender la ayuda que al mismo pueden prestar todos los instrumentos ópticos.

4. EL OJO

Como elemento de registro el ojo es notablemente malo o falto de precisión. La visión es algo muy variable y depende para un mismo individuo del lugar de observación y para varios individuos varía también en forma subjetiva.

Todo esto se debe tanto a variaciones en el ojo del observador como así también en su sistema nervio óptico y cerebro. Hay que tener en cuenta que influye mucho la experiencia anterior del individuo. El ojo es realmente muy poco confiable cuando es necesario reconocer cambios de iluminación. El brillo relativo de dos fuentes luminosas puede ser juzgado solamente en forma aproximada y tal aproximación solo puede hacerse cuando ambas fuentes tienen el mismo orden de brillo.

El ojo como sistema óptico se ve esquematizado en la figura 14. Su forma es aproximadamente esférica con unos 2.5 cm de diámetro. La parte frontal tiene una curvatura mayor y está recubierta por una membrana transparente y resistente llamada Córnea. Detrás de la misma existe un líquido llamado humor acuoso. Trás del humor acuoso se encuentra el "cristalino" que es un cuerpo más rígido en el centro y más blando en la periferia. Este cristalino es una lente convergente de distancia focal variable y es el principal responsable de la formación de la imagen sobre la retina.

Este cristalino está sujeto en su lugar por tejido que lo unen al músculo ciliar. Detrás del cristalino se encuentra una gelatina cristalina llamada humor vítreo. Los índices de refracción del humor acuoso y del humor vítreo son aproximadamente 1,336. El cristalino tiene un índice medio de 1,437.

Una gran parte interna del ojo, especialmente en la parte diametralmente opuesta al iris, está recubierta por una película de fibras nerviosas llamada re-

tina que unen al nervio óptico con la parte fotosensible. Estas fibras nerviosas se denominan bastones y conos. Entre estos conos y bastones existe un líquido azulado llamado púpura visual. Figura 15

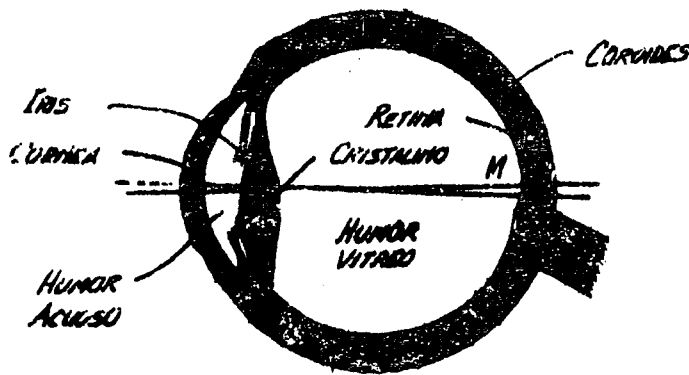


Figura 14

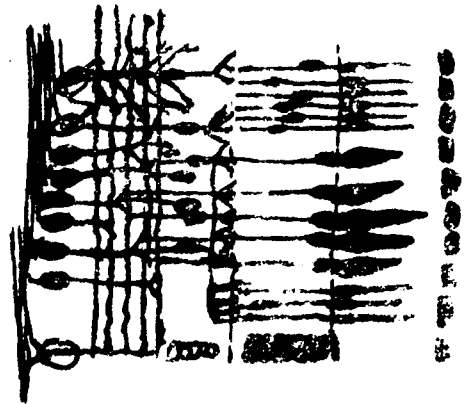


Figura 15

En la retina existe una pequeña depresión llamada "mácula" o "mancha amarilla." En su centro hay una región de unos 0,25 mm de diámetro llamado "fórea centralis" que tiene como exclusividad y que posee la virtud de dar una zona de visión más clara y allí se centraliza la visión cuando se observa un cuadro o escena. En el punto por el cual entra el nervio óptico al ojo no existen conos ni bastones y allí hay por ende una zona ciega que se denomina "punto ciego".

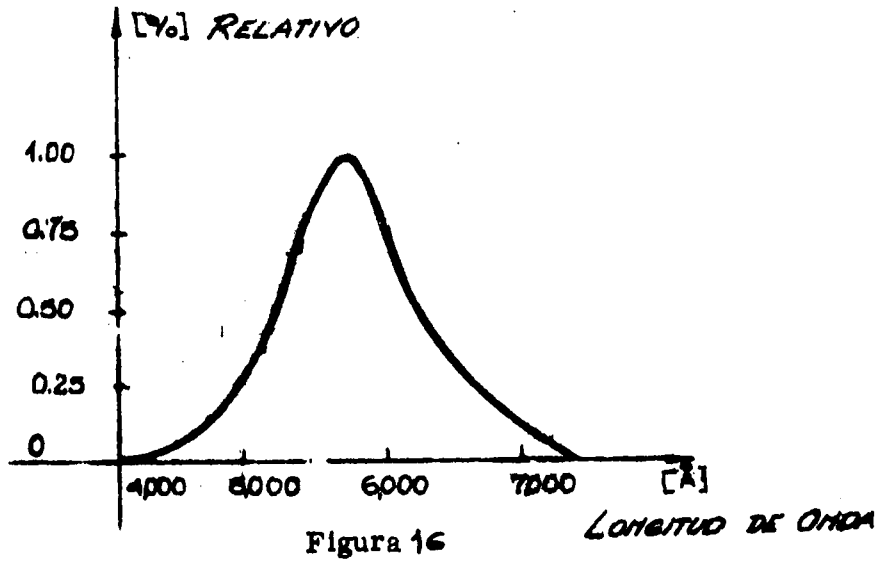
Delante del cristalino se encuentra el iris en cuyo centro está la pupila. La función de la pupila es regular la cantidad de luz que entra en el ojo.

El brillo o iluminación de la retina depende del diámetro de la pupila. El diámetro de la pupila varía entre 1 y 6 mm es decir que el área de la pupila tiene una variación dada por un factor de 36. El diámetro de la pupila para una luz de 5500 Å es de 2,5 mm. La mínima separación angular para ver resueltos dos puntos objetos es aproximadamente de 1' de arco.

De esta forma el mínimo tamaño de defectos que puede verse depende de este ángulo y de la superficie que se observa del nivel de brillo y del contraste entre el espécimen y el fondo circundante. El brillo de la imagen en la retina es de mayor importancia que el brillo de la pieza a examinar.

Asimismo el ojo puede adaptarse a variaciones de luz entre 1 y 100.000 veces. No solamente regula la sensibilidad la pupila sino que también se adapta al nivel de iluminación toda la parte receptora sensible.

La sensibilidad del ojo varía con la longitud de onda de la luz incidente. El pico de sensibilidad como se ve en la figura 16, se encuentra en el color amarillo verdoso aproximadamente 5500 Å. Dado que el ojo humano da una visión satisfactoria en un amplio ámbito de condiciones no es apropiado para juzgar niveles de iluminación.



5. EL OJO COMO INSTRUMENTO OPTICO

Si no se toma en cuenta el aspecto fisiológico del ojo sino que se lo considera desde el punto de vista de instrumento óptico, el ojo es una cámara oscura.

En la parte frontal posee un orificio de entrada de luz delante del cual se encuentra una lente convergente "cristalino" que es la que forma la imagen sobre la parte posterior fotosensible llamada retina. Delante del cristalino se encuentra un diafragma que limita la cantidad de luz y que se llama pupila.

El ángulo de aceptación del ojo θ es de aproximadamente 85° es decir que un objeto a $42,5^\circ$ a cada lado del eje óptico forma imagen en la retina. El ángulo total de visión o aceptación de ambos ojos normales es entre 160° y 170° . La distancia focal del cristalino es de aproximadamente 20 a 22 mm, además variable para poder enfocar o sea dar imágenes nítidas desde unos 25 cm hasta el infinito.

Con estos datos podemos catalogar al ojo como instrumento óptico de la siguiente forma:

$$\text{Luminosidad} = \frac{\text{Distancia focal}}{\text{Apertura del diafragma}}$$

Para el caso de una apertura máxima de la pupila que es aproximadamente 6 mm se tiene :

$$L = \frac{21}{6} = 3,5$$

Luminosidad L = 1:3,5
 Distancia focal f = 21
 Angulo aceptación = 85°

Hay que tener en cuenta que estas tres características del ojo son variables de acuerdo a: edad, intensidad luminosa, distancia del objeto y área de interés de

visión.

Si el ojo tuviera todas sus dimensiones físicas rígidas podría enfocarse solamente a una distancia determinada, mientras que el ojo normal puede enfocar como ya se dijo desde 25 cm hasta ∞ . Casi todo el proceso de enfoque está a cargo del cristalino quien al variar su distancia focal logra que las imágenes en la retina sean siempre nítidas. A este fenómeno se lo llama proceso de acomodación o capacidad de acomodación. Es de hacer notar que en los niños y en los jóvenes este proceso de acomodación se realiza en pocas centésimas de segundo mientras que en las personas mayores demora varias décimas y en algunos casos llega al segundo.

De esto puede deducirse que si bien no es el instrumento óptico más perfecto, es de cualidades sobresalientes y aún hoy en día aventaja en ciertos aspectos a los creados por el hombre.

6. AYUDAS OPTICAS DE LA VISION

Los espejos, lentes, prismas, microscopios, periscopios, telescopios, anteojos prismáticos, anteojos estereoscópicos, etc. son formas de agrandar el campo de visión del ojo humano.

Los proyectores de perfiles dan una forma rápida de inspeccionar contornos de piezas. Los endoscopios permiten ver dentro de agujeros y tubos pequeños. Algunas veces es útil usar elementos fotosensibles para realizar ensayos rutinarios en los cuales el juicio subjetivo es muy simple.

Espejos :

Los espejos se usan normalmente cuando se desea ver en lugares inaccesibles o cuando es necesario intensificar la iluminación en lugares incómodos. Comúnmente se utilizan los espejos para hacer más cómoda la visión o para invertir imágenes dadas por otros dispositivos ópticos.

La condición fundamental para un buen espejo es su reflectividad y el hecho que sea bien plano, salvo para espejos que ya de por sí deben tener curvatura. Normalmente el poder reflector de un espejo es de 0,75 y decrece cuando el espejo envejece. Para casos especiales se utilizan recubrimientos especiales y además la placa de vidrio es de muy buena calidad y de un espesor mínimo compatible con las otras medidas, así se llega a aumentar el poder reflectivo a algo más de 0,90.

Cuando se usan varios espejos es conveniente tener presente que hay que usar un número tal que la imagen final no esté invertida en ningún sentido.

Prismas :

Cuando un haz de luz incide desde un medio más denso a uno menos denso, el ángulo de luz refractado es mayor que el ángulo de luz incidente. Hay un ángulo de incidencia para el cual el ángulo de luz refractado es 90° es decir sale tan-

gente a la superficie. A ese ángulo de incidencia se lo denomina "ángulo límite". A partir del mismo todos los rayos incidentes salen reflejados por la superficie de separación de ambos medios.

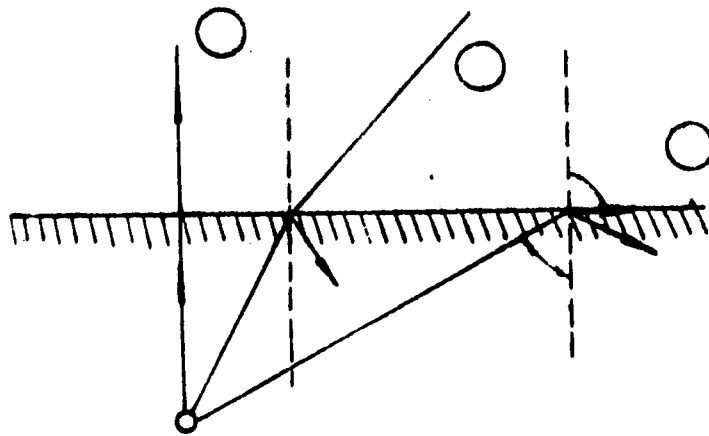


Figura 17

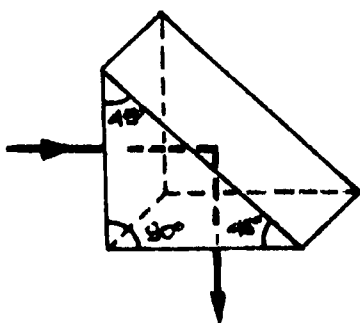
Según se sabe por la ley de Snell $n \cdot \sin \varphi = n' \cdot \sin \varphi'$
 es decir $\sin \varphi' = \frac{n}{n'} \sin \varphi$

Como φ' es el ángulo de refracción y para el ángulo límite $\varphi' = 90^\circ$, $\sin \varphi' = 1$
 resulta que : $\sin \varphi_c = \frac{n'}{n}$

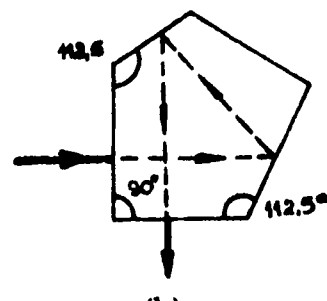
Si se toma como índice de refracción para el vidrio 1,5 para una superficie de separación vidrio aire será

$$\sin \varphi_c = \frac{1}{1,5} = 0,67 \quad \therefore \varphi_c = 42^\circ$$

Este ángulo es afortunadamente inferior a 45° lo que permite el uso muy valioso de prismas $45^\circ-90^\circ-45^\circ$ en muchos instrumentos de óptica.



(a)
Prisma de reflexión total



(b)
Penta-Prisma

Figura 18

Las ventajas de los prismas de reflexión total sobre las superficies metálicas usadas como reflectores son: primero, que la luz es reflejada totalmente

mientras que ninguna superficie metálica refleja el 100% de la luz incidente. Las propiedades reflectantes son permanentes y no se alteran por deslustrado de las superficies.

Como contrapartida tiene que siempre hay algo de pérdidas por reflexiones en las superficies por las cuales entra y sale la luz aunque recientemente se descubrieron procedimientos para recubrir esas superficies con películas anti reflectantes.

Estos prismas de reflexión total son muy usados en los instrumentos de óptica.

Lentes :

Se considera que una lente es delgada cuando su espesor es despreciable respecto a su diámetro. En la realidad las lentes delgadas no existen pero a veces se aproximan mucho.

La distancia focal de una lente es la distancia entre el centro de la lente y cada foco.

Existen dos tipos fundamentales de lentes que son:

- a) Convergentes en las cuales por lo menos una cara es convexa.
- b) Divergentes en las cuales por lo menos una cara es cóncava.

Las lentes que son cóncavo convexas pueden ser convergentes o no depende de las curvaturas de las caras.

Haremos a continuación la deducción de la fórmula fundamental de las lentes que puede aplicarse a las convergentes y a las divergentes considerando las diferencias que existen entre ambas. Las reglas fundamentales para la construcción de imágenes en las lentes es que :

Todo rayo que incide paralelo al eje óptico sale pasando por el foco de la lente.

Todo rayo que incide pasando por el foco sale paralelo al eje óptico.

Todo rayo que pasa por el centro óptico de la lente no se desvía.

En la realidad puede considerarse para fines prácticos un lente como delgado cuando su relación espesor a diámetro no supera 0,08.

Hasta una relación de 0,2 puede trabajarse con algunos errores y con relaciones mayores ya es necesario considerar lentes gruesas y hacer un estudio distinto.

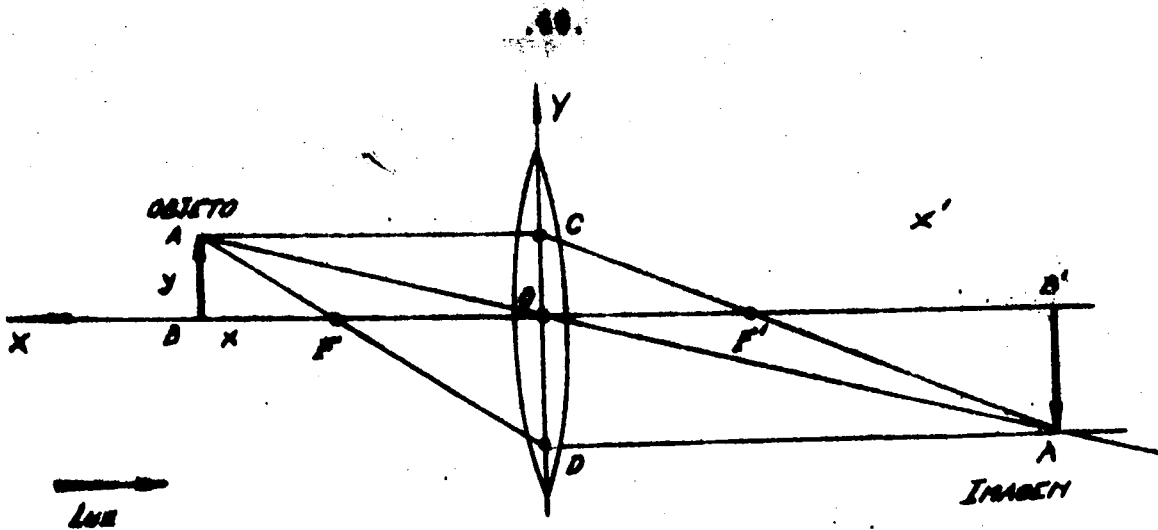


Figura 18

El objeto es el punto A y su imagen el punto A'

Se consideran los triángulos $\triangle ABF$ y $\triangle FOD \therefore \frac{OD}{AB} = \frac{FO}{FB}$ [1]

Si consideramos los triángulos $\triangle COF'$ y $\triangle B'F'$ $\therefore \frac{AB'}{CO} = \frac{F'B'}{OF'}$ [2]

$$\left. \begin{aligned}
 OD &= AB' = y \\
 AB &= CO = y \\
 FO &= f \\
 FB &= x - f \\
 F'B' &= -(x' - f') = f' - x' \\
 OF' &= -f'
 \end{aligned} \right\} \text{reemplazando en}$$

$$[1] \text{ y } [2] \text{ se tiene } \frac{-y'}{y} = \frac{f}{x-f} \quad [3]$$

$$\frac{-y'}{y} = \frac{f' - x'}{-f'} \quad [4]$$

igualando los segundos miembros de [3] y [4] se tiene

$$\frac{f}{x-f} = \frac{f' - x'}{-f'} \quad [5]$$

multiplicando medios por extremos se tiene

$$-ff' = x f' - x x' - f f' + f x' \therefore 1 = x f' - x x' + f x'$$

$$\therefore x x' = x f' + f x' \text{ si dividimos por } x x' \text{ queda}$$

$$1 = \frac{f}{x} + \frac{f'}{x'} \text{ fórmula de Gauss [6]}$$

como $f' = -f$ se tiene $\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'}$ fórmula de Descartes [7]

Tamaño de imagen - Aumento lateral

Se llama aumento lateral a $A = \frac{y'}{y}$

Considerando los triángulos ABO y $A'B'O'$ se tiene

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB} \therefore \frac{y'}{y} = \frac{x'}{x} \quad [8]$$

Es decir que conociendo la distancia objeto y la distancia imagen será

$$A = \frac{x'}{x} \quad [9]$$

Esta fórmula es aplicable en la realidad con las salvedades antes mencionadas.

7. LUPA

La lupa es el instrumento óptico de ayuda a la visión, más simple y que permite ver detalles que a simple vista pasan desapercibidos o es difícil de definir. Aumenta notablemente el poder separador del ojo.

Cuando se desea examinar con detalle un objeto pequeño o un detalle pequeño en un objeto grande, se acerca el mismo al ojo para que el ángulo subtendido y la imagen retiniana sean lo más grande posible. El ojo no puede ver perfectamente un objeto situado a una distancia menor que el punto próximo que es aproximadamente 25 cm. Colocando una lente convergente delante del ojo se aumenta la acomodación dado que el objeto puede acercarse al ojo a una distancia menor que el punto próximo y en consecuencia subtendrá un ángulo mayor. Una lente usada así se denomina "lente de aumento", "microscopio simple" o "lupa". La lupa forma una imagen virtual de ese objeto y ella es la que mira el ojo.

En la figura 20 a) el objeto está a 25 cm del ojo y el ángulo subtendido será θ . En b) vemos la lente intercalada entre el objeto y el ojo y en este caso el ángulo que subtiende el ojo será θ' . En este caso el aumento angular será $\gamma = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta}$

Normalmente el aumento se da como $\gamma = \frac{25}{f}$ (estando f en cm). Es decir que si se tiene una lupa con distancia focal $f = 10$ cm el aumento será $\gamma = \frac{25}{10} = 2,5$

El tamaño de la imagen retiniana de un objeto visto a través de esa lupa será 2,5 veces mayor que cuando se mira a simple vista. Esto es lo que se denomina comúnmente aumento 2,5 x. El aumento no puede hacerse tan grande como se desee pues intervienen las observaciones de la lente y comienza a verse deformado.

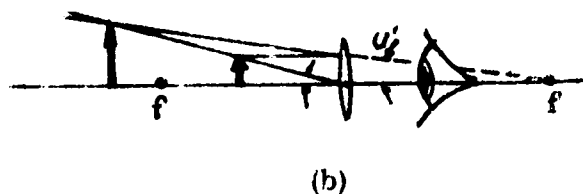
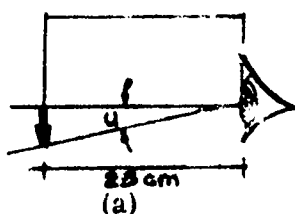


figura 20

Combinando lentes se pueden obtener aumentos mayores pero entonces ya se trata de oculares compuestos.

8. MICROSCOPIO

Cuando es necesario tener una imagen mayor de un objeto o defecto muy pequeño se recurre al microscopio o microscopio compuesto. En el mismo hay fundamentalmente dos lentes. Una lente "objetivo" cuya distancia focal es pequeña y da una imagen real del objeto y otra lente "ocular" de gran distancia focal que da para el ojo una imagen virtual de la imagen real anterior. Se consiguen así aumentos grandes que fácilmente superan 10 x y en buenos microscopios se obtienen de 500x y 1000 x. En los microscopios comerciales todo el sistema óptico es mucho más complejo pues es necesario no tener distorsión de imagen y en muchos casos interesa también no tener distorsión de color. Los microscopios modernos tienen todas las correcciones necesarias para tener una imagen de buena calidad. En cada caso es muy aconsejable leer detenidamente el manual del equipo para tener información de toda su óptica y poder aprovechar bien las posibilidades del instrumento.

9. TELESCOPIO O ANTEOJO DE DISTANCIA

En el telescopio generalmente se observan objetos grandes a grandes distancias del observador. No solamente ni siempre, se lo utiliza para observaciones astronómicas. Modernamente se lo usa en muchas aplicaciones y mucho para realizar observaciones detalladas de objetos que no están al alcance de la mano ya sea por su distancia o porque se encuentran en lugares inaccesibles o porque están irradiados.

A diferencia del microscopio este anteojo se compone de un "objetivo" de gran distancia focal y de un "ocular" de pequeña distancia focal. En este tipo de anteojos se define el aumento como :

$$\gamma = - \frac{f_1}{f_2}$$

siendo f_1 la distancia focal del objetivo y f_2 la distancia focal del ocular. El signo menos indica que la imagen está invertida. En anteojos de este tipo para uso terrestre es deseable que la imagen sea derecha y para ello se intercalan pares de lentes que invierten la imagen. Normalmente este tipo de anteojo es de un solo tubo por ende deberá mirarse con un solo ojo.

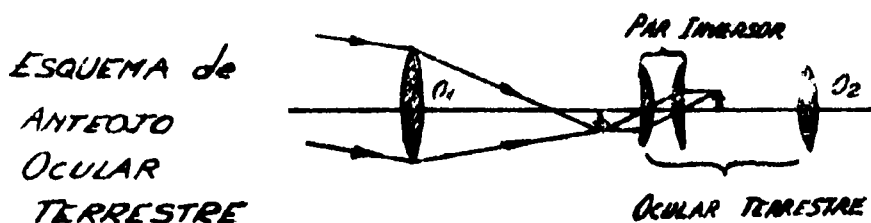


Figura 21

10. BINOCULAR O PRISMÁTICO

Para obviar el problema del uso del telescopio dado que éste está compuesto por un tubo muy largo y que además tiene un campo de visual muy restringido, se inventaron los binoculares o prismáticos.

En este tipo de anteojo se logra acortar la longitud del tubo usando dos juegos de prismas. Además se utilizan dos tubos de manera tal que cada ojo mira por uno y el campo que abarca es mucho mayor. El juego de prismas que hay dentro del tubo además de acortar considerablemente el tubo da una imagen final derecha.

Este tipo de anteojos se utilizan también en inspección de elementos que se encuentran a distancias inaccesibles o que se hayan activado. Para estos casos estos anteojos tienen un ajuste fino de foco y un sistema de retículo para poder estimar dimensiones. Además tienen todo un sistema de sujeción pues normalmente no se los sostiene con la mano. Generalmente tienen la posibilidad de acoplar una cámara fotográfica para tener de esa forma un registro fotográfico.

En caso de usar este tipo de prismáticos para conocer tanto aumento como distancia siempre es aconsejable consultar el manual de instrucciones.

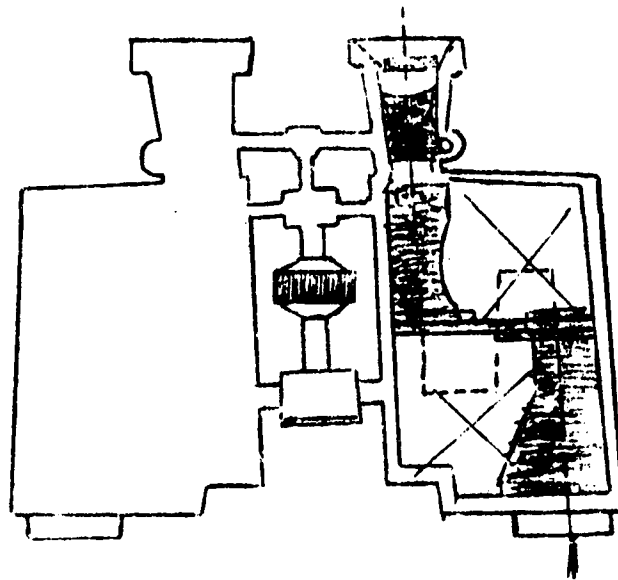


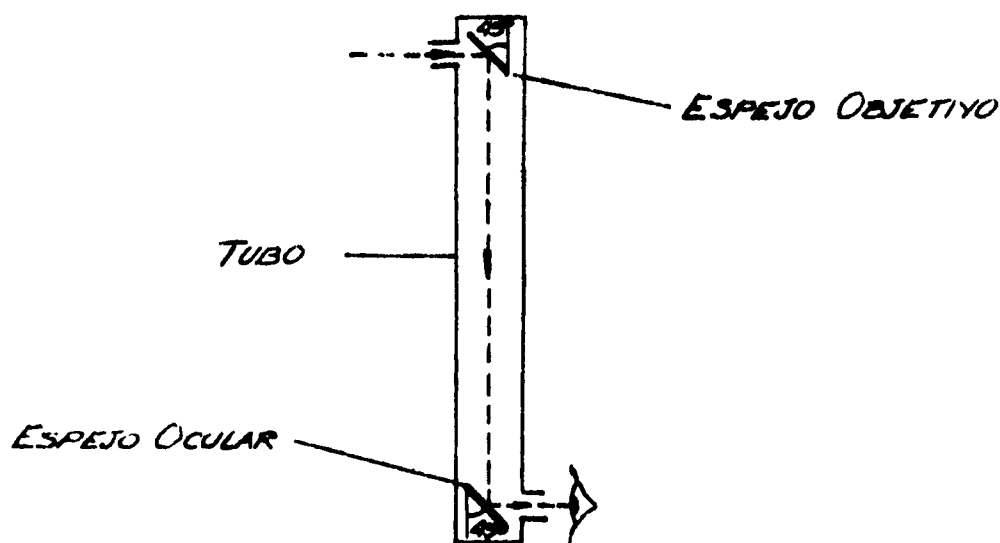
Figura 22

11. PERISCOPIO

Además del clásico instrumento tan conocido que utilizaron y utilizan aún hoy en día los buques y submarinos se denomina así a casi todo sistema óptico que permite ver objetos que a lo cual es necesario que el camino óptico sea quebrado

en ángulos de aproximadamente 90° . En los trabajos científicos y tecnológicos también se usan estos tipos de instrumentos ópticos. Así en equipos de mucha altura se utilizan sistemas periscopios para controlar la posición de ciertas piezas o controles que son movidos desde otro lugar. Posiblemente en la ciencia y tecnología que mayor aplicación tienen sea en la referente a elementos radiactivos. En este campo de la tecnología es necesario trabajar a través de paredes de blindaje normalmente de gran espesor. Debido a que las radiaciones emitidas por los elementos que se encuentran activados tienen trayectorias rectilíneas es sumamente peligroso usar instrumentos ópticos en los cuales el camino óptico es recto pues el mismo camino harían las radiaciones y de esa forma perjudican al observador. Es así como se usan en estos casos los "periscopios".

El sistema periscopio más simple es el mostrado en la figura 25 en el cual se usan 2 espejos a 45° con la vertical y fijos. Normalmente el espejito ocular es mucho más pequeño que el espejo objetivo. En este periscopio para cambiar el campo de visión es necesario mover todo el tubo, en los periscopios comerciales para cambiar el campo de visión no es necesario mover el tubo sino que con un sistema mecánico se mueven ángulos pequeños en ambos espejos y además dichos espejos son reemplazados por prismas. Cuando se necesita tener al mismo tiempo aumento, delante tanto del primer ocular como del objetivo hay un sistema de lentes.



PERISCOPIO SIMPLE

Figura 25

Para trabajos detrás de paredes de blindaje el periscopio es normalmente de doble codo, es decir como el ilustrado en la figura 26. En este caso en el punto A la visión puede ser recta o a 90° como la que se muestra. Para variar el campo de visión el sistema mecánico es muy complicado y generalmente la mayor parte

del costo del equipo es justamente la parte mecánica. A pesar de ello para algunos casos es muy útil y más económico que un sistema de televisión con circuito cerrado. Para la industria nuclear hay una gran variedad de periscopios de diversos tipos que permiten observación en distintos lugares y con ángulos diversos. Actualmente hay periscopios binoculares estereoscópicos, es decir que permiten una visión con relieve y además equipados con amplificación óptica de varios aumentos.

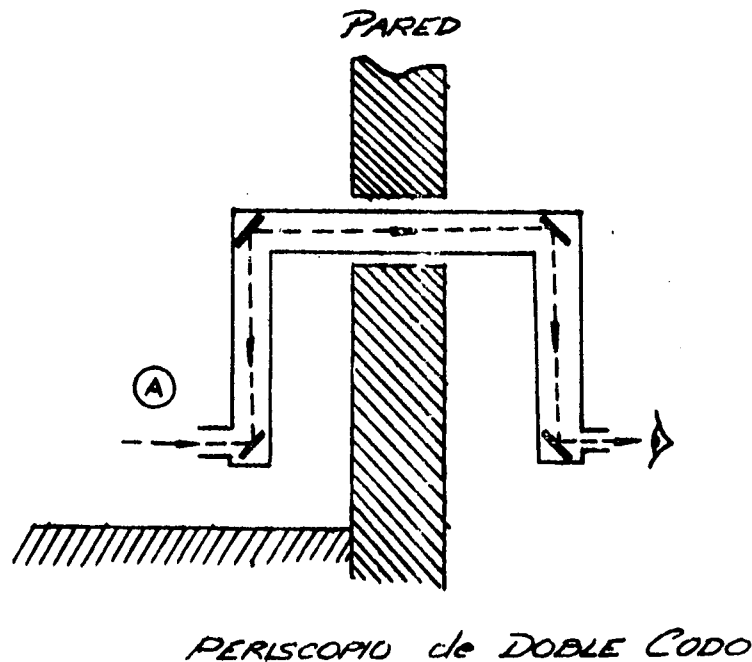


Figura 24

12. ENDOSCOPIOS

Los endoscopios son instrumentos ópticos que permiten la visión dentro de lugares ocultos como son agujeros, cavidades con una entrada pequeña, caños, etc. Hay dos tipos fundamentales de endoscopios cuyos principios de funcionamiento son totalmente distintos.

a) Endoscopios rígidos: datan de muchos años y su principio de funcionamiento es simplemente una serie de lentes que convierten la imagen. Normalmente constan de un tubo de 10 a 15 mm de diámetro de latón cromado y modernamente de acero inoxidable, dentro del cual hay una serie de lentes que amplían la imagen y la ubican en posición derecha, tal como se muestra en la figura 27. En el extremo objetivo se coloca un cabezal que permite visión directa, visión a 90° o visión retrospectiva. Normalmente este cabezal está equipado con una lamparita eléctrica que suministra la iluminación correspondiente. (Figura 25) Por dentro del mismo tubo van los conductores para alimentar la lamparita. Modernamente hay endoscopios estancos que permiten ser usados bajo agua o en atmósferas controladas. El inconveniente de estos endoscopios es que cuando la curvatura del tubo, ya sea por propio peso o porque se lo fuerza, es algo menor que el diámetro del tubo, ya la visión se

hace dificultosa. Asimismo los golpes pueden causar la rotura de las lentes que se encuentran dentro del tubo. Se pueden acoplar sistemas de aumento cuando es necesario.

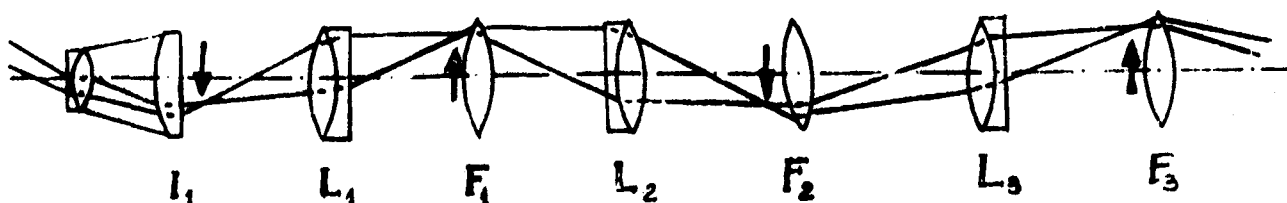


Figura 25

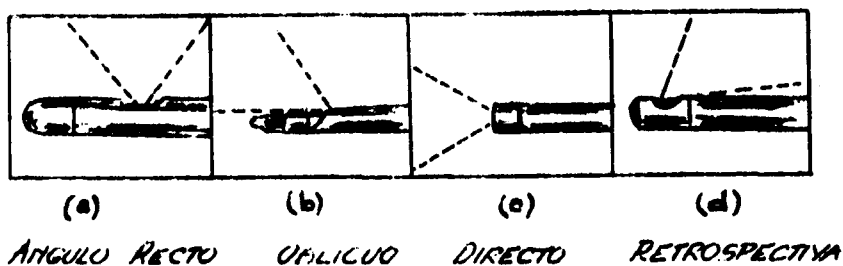


Figura 26

b) Endoscopios flexibles: Su principio de funcionamiento está basado en la conducción de la luz por las llamadas fibras ópticas. Dichas fibras ópticas son muy finos hilos de vidrio de alta pureza. Por ser muy finos dichos hilos son totalmente flexibles. La superficie exterior de estos hilos está tratada para aumentar su reflectividad, es así como la luz que penetró por el extremo de uno de estos hilos sufre n reflexiones en sus paredes y así viaja hasta el otro extremo, figura 26. Estos endoscopios están contruados con miles de finas fibras ópticas que en conjunto forman un diámetro suficientemente grande como para proporcionar buen camino óptico para observaciones. Estos endoscopios pueden curvarse mucho sin que por ello se interrumpa la visión. El límite de la curvatura de estos endoscopios está dada por la rigidez mecánica del manajo de fibras ópticas. Al igual que en el otro tipo de endoscopio se utilizan sistemas de iluminación y aumento como así también distintos ángulos de visión.

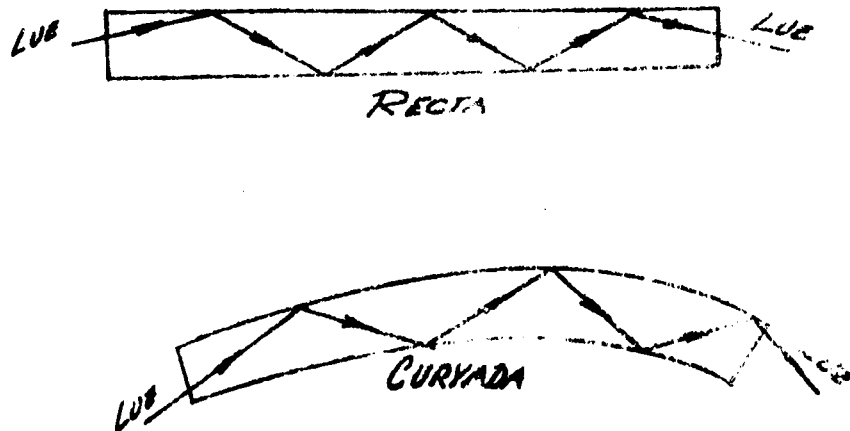


Figura 27

13. PROYECTORES DE PERFILES

Muchas veces es necesario controlar formas y medidas de piezas pequeñas o de piezas que por su forma es complicado contrastar con un patrón. En estos casos se usan equipos ópticos de proyección que se denominan "proyector de perfiles". Básicamente es un sistema óptico de gran aumento que da una imagen de la pieza en una pantalla despulida. En los equipos modernos no se pueden ver piezas por iluminación al través o por reflexión.

Estos equipos constan de un sistema de iluminación de gran potencia, normalmente usan lámparas de 200 W o más, tal como se muestra en la figura 30, indicado con A. En un sistema de mordazas indicado con B se sujeta la pieza a observar. El sistema C da una ampliación de la imagen de la pieza. El espejo D hace que sea más cómoda la observación y acorta la longitud del equipo.

Sobre la pantalla despulida E se proyecta la imagen que puede observarse a simple vista. Cuando el equipo es de buena calidad sobre esta pantalla hay un retículo que previa calibración permite hacer mediciones y eventualmente control de piezas en producción. Normalmente dichas pantallas son circulares de unos 40 cm de diámetro o rectangulares de unas 19 pulgadas. El equipo completo normalmente es voluminoso.

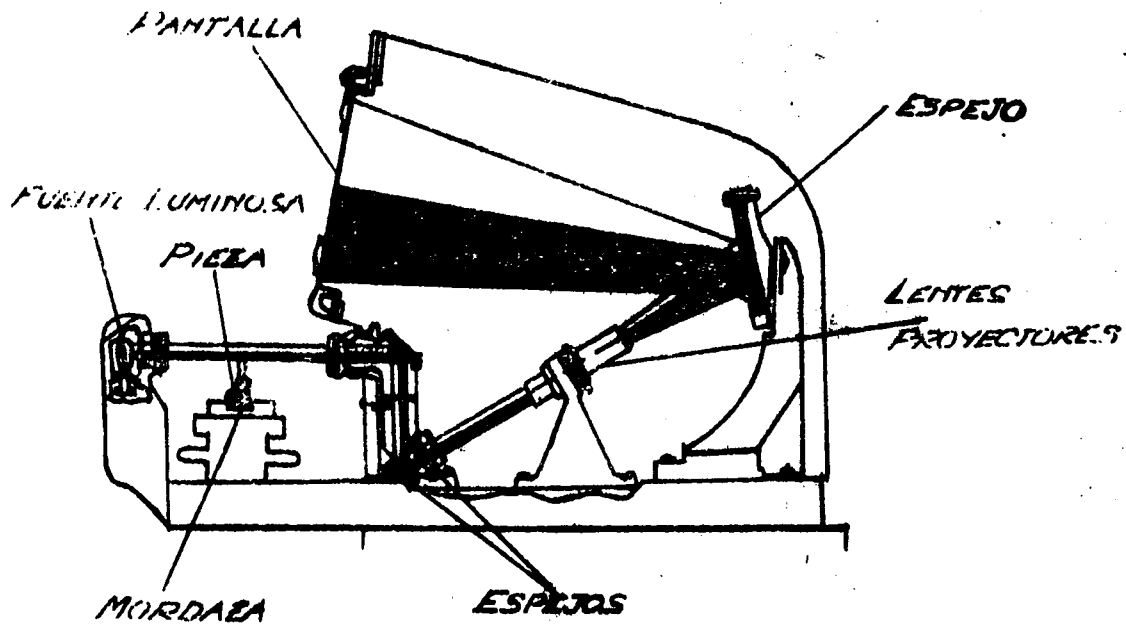


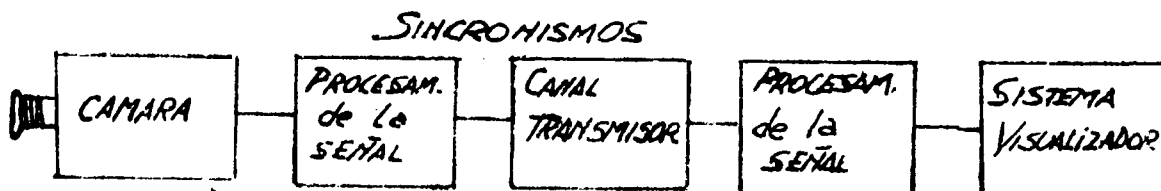
Figura 28

14. TELEVISION

Los sistemas de televisión industriales de circuito cerrado son mucho más simples y de costo mucho menor que los sistemas de televisión de broadcasting, o sea los sistemas comerciales para el público normal televidente.

Todo sistema de televisión se compone de las partes básicas indicadas en la figura 31.

Se hará a continuación una descripción breve de cada una de las partes principales y se comparará también en forma breve un sistema de broadcasting con uno de circuito cerrado.



SISTEMA de CONVERSION
de IMAGEN OPTICA
EN SEÑAL ELECTRICA

Figura 29

Cámara :

Normalmente el dispositivo que convierte la imagen óptica en señal eléctrica recibe el nombre de "cámara".

El alma de la cámara de televisión es el tubo de imagen. Normalmente dicho tubo en las cámaras de broadcasting es el denominado "ortión de imagen" u "orthión de imagen". Generalmente en las cámaras para circuito cerrado se utiliza el llamado "vidión de imagen". Si bien en cuanto a su funcionamiento paramente electrónico difiere uno del otro, el resultado final del tubo de imagen es el mismo. Ambos poseen un frente fotosensible sobre el cual se proyecta la imagen de la escena mediante la óptica convencional. Dicha imagen de la escena es recorrida en zig-zag de trama muy cerrada por un haz de electrones. Dicha corriente electrónica queda "modulada" por las distintas zonas claras y oscuras de la imagen de la escena y es así como ya se tiene la imagen en forma de una señal eléctrica que por medios electrónicos se amplifica lo necesario.

Circuitos de sincronismo :

La misión fundamental de estos circuitos es generar los denominados "pulsos de sincronismo", y "dientes de sierra". Dichos pulsos de sincronismo y dientes de sierra sirven para que tanto en la cámara como en el "monitor" o "televisor" el haz de electrones haga el mismo camino y en cada instante en ambos lugares se encuentre en el mismo punto de la escena. Tanto en los sistemas de broadcasting como en los de circuito cerrado los circuitos de sincronismo tienen otros circuitos auxiliares para mejorar la calidad de la imagen.

Normalmente la cantidad de líneas horizontales de exploración de imagen en los sistemas de televisión oscilan entre 500 y 2000 líneas por cuadro. Asimismo se proyectan entre 25 y 32 cuadros por segundo, generalmente cada cuadro dos veces para eliminar el efecto pantalleo o flickering tan molesto para la visión. La cantidad de líneas depende de la definición que se desee obtener.

Canal de transmisión de información :

Estos son los circuitos que varían más de un sistema de broadcasting a un sistema de circuito cerrado.

En un sistema de broadcasting estos circuitos son todos los sistemas de conformación de la señal, modulación de la onda portadora, generación de la onda portadora, amplificadores de potencia, antenas transmisoras, espacio.

Mientras que en un circuito cerrado dicho canal de transmisión es normalmente un cable o un conjunto de cables de los llamados coaxiales.

Procesamiento de la señal recibida :

Este es otra porción de la cadena que difiere bastante de un sistema de broadcasting a un sistema de circuito cerrado.

En un sistema de broadcasting, todos estos circuitos los tenemos dentro del televisor que normalmente poseemos en nuestros hogares. En el sintonizador hay circuitos capaces de seleccionar la onda modulada que deseamos recibir. Hay circuitos que filtran de alguna forma el "ruido eléctrico" que modula también la información que se desea ver. Hay circuitos que deodifican la señal y separan los pulsos de sincronismo que envía la estación transmisora, separan la información de "video" (imagen) de la información de "audio" (sonido) y las elaboran como para ser visualizadas en la pantalla y oídas en el parlante.

En un circuito cerrado de televisión toda esta porción está muy simplificada pues solamente basta separar los pulsos de sincronismo de la información de video, y con ambas separadas excitar los circuitos finales que comandan al tubo de imagen del televisor o "cinescopio".

Sistema visualizador :

El sistema visualizador tanto para receptores de broadcasting como para los de circuito cerrado es común y es el tan conocido tubo de imagen de televisión y sus circuitos conexos. El tamaño del tubo o cinescopio depende del uso que se dé al sistema. Si el tubo va a ser usado como monitor generalmente es pequeño entre 2 y 5 pulgadas, mientras que cuando va a ser usado para un auditorio generalmente es de 20 a 23 pulgadas.

Con lo que se vió hasta ahora se puede tener una idea esueta de lo que es un sistema de televisión.

Es evidente que para dominar el tema deben leerse muchos libros específicos, pero con estos conocimientos básicos se podrán leer especificaciones de los sistemas comerciales sin tener una ignorancia total de los términos que se usen. Se podrá juzgar aproximadamente las características de uno u otro equipo comercial para las necesidades que se tengan.

En algunos sistemas de circuito cerrado las cámaras tienen servomecanismos que permiten enfocar distintas escenas, siendo todo ello comandado desde la consola de control. En la industria nuclear dichas cámaras de televisión tienen blindajes especiales para protegerlas de las radiaciones.

Normalmente la televisión científica tiene mayor definición que la TV de broadcasting es decir mayor número de líneas por unidad de longitud (pulgada o cm).

15. FOTOGRAFIA

Es bien conocido que un registro gráfico de un fenómeno, evento o estado de una cosa ayuda enormemente luego que dicho fenómeno no se tiene disponible. Si bien en el aspecto puramente fotográfico este tipo de fotografía tiene poca diferencia con la artística hay una serie de consideraciones y aditamentos que deben tenerse en cuenta en la fotografía científica.

Primero, la fotografía en blanco y negro y más tarde, la fotografía en colores, permiten tener un registro gráfico permanente de un evento.

En la fotografía científica hay que tener en cuenta que en muchos casos las condiciones pueden no ser las más favorables y entonces hay que disponer de una cámara que tenga las más amplias posibilidades de variación tanto de diafragmas como velocidades. Es necesario que se tenga la posibilidad de combinar lentes, filtros, protectores de luz, etc.

En algunos casos los eventos son de muy corta duración y hay que tener disponible un sistema de iluminación adecuada. Cuando hay que hacer fotografía bajo agua o a través de ventanas de gran espesor, se complica notablemente la obtención de imágenes con buena definición.

Para ciertos eventos es notablemente útil el cine tanto monocromo como en color. Modernamente hay sistemas de televisión de circuito cerrado que incluyen una grabadora de video. De esta forma se puede ver el evento cuantas veces sea necesario.

16. RUGOSIDAD. TERMINACION SUPERFICIAL

El acabado superficial y la planicidad de las piezas son en muchos casos factores de gran importancia puesto que tienen mucha influencia en fricción y en fatiga de materiales especialmente en metales. En muchos casos el rendimiento de una pieza o dispositivo depende mucho de su terminación superficial como por ejemplo, cojinetes de velocidad, arandelas de sello, dientes de engranajes hélices, etc.

En algunos casos una superficie muy lisa o plana se comporta peor que una superficie rugosa. Es así como puede y en algunos casos debe especificarse la rugosidad, de esta forma se pueden obtener resultados mucho más satisfactorios.

En una primera aproximación se puede juzgar la superficie haciendo deslizar la uña sobre la misma o simplemente mirándola. En cualquier superficie el ojo humano solo verá las partes que reflejen la luz incidente. Es decir que la apariencia de una superficie depende mucho de cómo incida la luz sobre la misma. Depende de la forma de las irregularidades y más precisamente del número de facetas que tienen el ángulo apropiado para reflejar la luz. La inspección de la superficie con un microscopio solo dará la visión plana de la misma salvo en microscopio

plos muy especiales.

Existen en forma comercial patrones de planicidad como así también patrones de rugosidad que se los usa para comparar con superficies de rugosidad desconocida.

El patrón de planicidad es la superficie especular plana. Si bien se venden como tales, puede conseguirse fácilmente con muy buena aproximación con vidrio común, pyrex, o sinó cuarzo.

El cuarzo es el que mejor planicidad tiene y ésta se mantiene frente a cambios térmicos dentro de 0,0002 y 0,00002 mm. La rugosidad de una superficie puede observarse y medirse de varias formas.

La falta de planicidad puede verse contrastada con un bloque patrón, en la producción de líneas de interferencia luminosa. Modernamente hay equipos y métodos que permiten determinar y evaluar la superficie en forma muy sencilla, práctica y que abarca varios grados de rugosidad.

Disponiendo de un equipo que reproduzca en forma amplificada el perfil de la superficie que se desea medir se pueden establecer todas las relaciones que se desee en la onda resultante a saber, valor pico, valor pico a pico, valor medio, valor eficaz o RMS. Modernamente los equipos que se utilizan para medir la rugosidad de superficies constan de un palpador que es un estilo de extremo muy agudo, un sistema conversión de movimiento mecánico a señal eléctrica, un amplificador electrónico de dicha señal eléctrica, y un sistema de medición y registro.

Se ha comprobado que para alcanzar el fondo de la mayoría de las imperfecciones de superficies hace falta un palpador cuya punta no tenga un diámetro mayor de 500 pulgadas.

La American Standards Association (ASA) ha determinado una norma en la cual se fijan todas las características que debe tener el estilo que hay que usar en este tipo de mediciones. Debe considerarse como "normal" un estilo de punta cónica con una terminación de casquete esférico tangente al cono, salvo que se especifique lo contrario.

Debe considerarse como punta "normal" la de 500 pulgadas de diámetro si bien para otros propósitos especiales se pueden usar diámetros que estén comprendidos dentro de la siguiente serie: 5, 50, 500, 5000, 50000 pulgadas.

El ángulo del cono debe ser de 90°. El soporte del estilo debe ser tal que no tenga movimientos laterales que perturben la medición. La máxima fuerza del estilo sobre la superficie nunca debe exceder la dada por la siguiente fórmula :

$$\text{Fuerza Max (gr)} = 0,00001 \text{ (radio del estilo } [\mu \text{ pulgadas}] \text{)}$$

La fuerza debe ser tal que en la condición de máxima rugosidad y con la máxima velocidad que se desplace el estilo debe copiar exactamente la superficie.

En casos especiales pueden usarse estilos con punta de forma de diamante o con radios mayores o menores, pero en esos casos deberá especificarse el estilo usado.

Se han diseñado muchos sistemas para medir la rugosidad pero los más usuales y los que existen en mayor cantidad convierten el movimiento mecánico del estilo, mediante cristales piezo - eléctricos o sistemas electrodinámicos, en una señal eléctrica que luego convenientemente amplificada es medida y registrada.

Para especificar las superficies se determinaron ciertos valores que son: La media aritmética y la raíz media cuadrática o valor RMS.

La media aritmética se define como la línea central alrededor de la cual se mide la rugosidad en una línea paralela a la dirección de la sección. Se toma una longitud llamada cutt-off, como periodo de la onda y dicha longitud puede variar. Hay tomados valores de 0,1mm, 0,25mm, 0,5mm, 0,75mm y ∞ . La desviación aritmética de la línea central se define como:

$$Y = \frac{1}{L} \int_0^L (y) dx \quad \text{siendo}$$

- Y = desviación media aritmética
- y = ordenada de la curva del perfil
- L = periodo o cutt-off

Se puede hacer una aproximación que es $Y = \frac{y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$

esta aproximación será tanto mayor cuanto menor sean los intervalos de

La raíz media cuadrática se define como :

$$Y = \left[\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx \right]^{1/2}$$

Los símbolos tienen igual significado que para la expresión anterior salvo y que significa el valor RMS de la onda.

Puede hacerse una aproximación mediante la siguiente fórmula :

$$Y = \left(\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n} \right)^{1/2}$$

Aquellos equipos calibrados en valor RMS indicarán un 11% más que los calibrados en media aritmética para una misma superficie. Hay dispositivos comerciales que permiten medir rugosidad dando valor pico, valor de media aritmética y valor de media geométrica. Generalmente son una mezcla de equipo mecánico elec-

trónico de manera que eléctricamente se amplifica la señal, se mide la media aritmética y la media geométrica. Básicamente el equipo consiste de un trazador mecánico, un amplificador electrónico y un medidor de amplitud.

Hay equipos que utilizan el principio piezo-eléctrico para hacer la conversión de movimiento mecánico a señal eléctrica y otros utilizan un transformador diferencial. De todas formas siempre hay una tensión eléctrica que está relacionada con la superficie que se mide. El proceso de medición y determinación del valor medio o valor RMS es continua y el instrumento lo va leyendo en forma permanente. Normalmente estos equipos tienen incorporado un sistema registrador que inscribe sobre un papel el perfil de la superficie medida.

La firma Bausch y Lomb ha desarrollado un instrumento que permite hacer esta medición ópticamente. El operador compara la superficie a medir con un patrón de rugosidad conocida. Ópticamente ambas superficies se amplían de 10 a 20 veces.

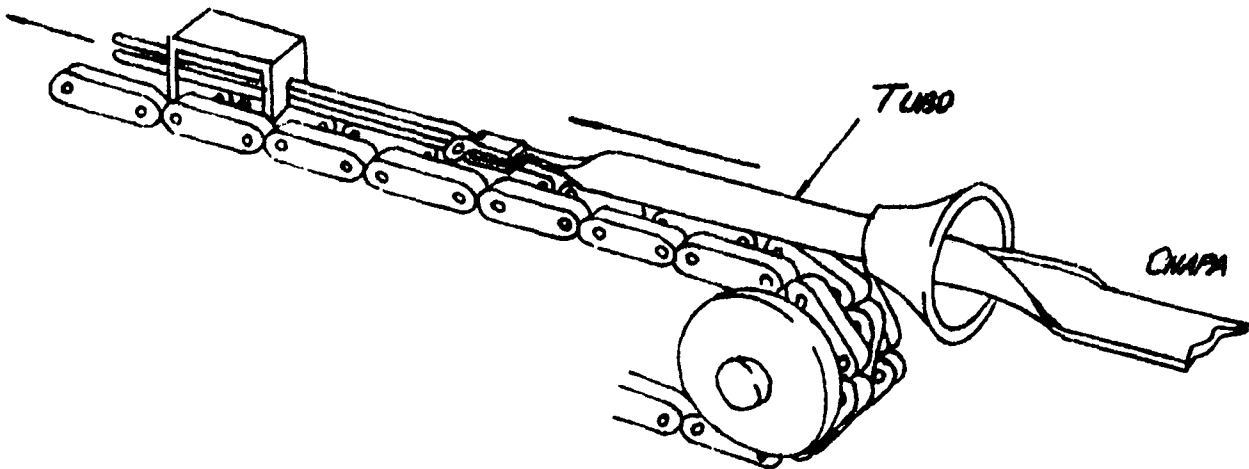


Figura 30

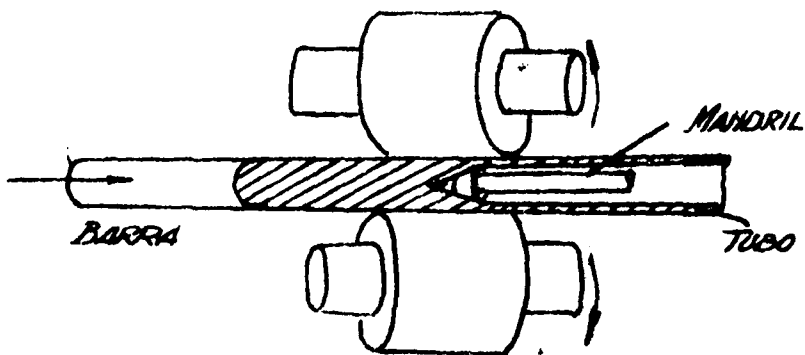


Figura 31