

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO	AÑO
1	1989

04.82.23

- 121 -

AVANCE EN LAS TECNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Alberto M. MENDER

Raul TACHE

C.N.E.A. - INEND

ARGENTINA

RESUMEN:

Se analiza la evolución e importancia de los END para los esquemas de producción industrial, para investigación y desarrollo, como así también su incidencia en la confiabilidad y seguridad de las instalaciones, en la prevención de accidentes, en el desarrollo industrial y en el aspecto económico asociado.

Se efectúa una revisión general de las principales técnicas de END aplicadas a materiales, sistemas e instalaciones, señalándose algunos logros y aplicaciones especiales alcanzados en los últimos años tanto en nuestro país como a nivel internacional.

INTRODUCCION:

Es indudable que la idea del "Ensayo no Destructivo" (END) estaba ya presente en el hombre primitivo cuando, por ejemplo, reconocía el grado de madurez de una calabaza sin necesidad de cortarla, aplicando simplemente ligeros golpes sobre su superficie para obtener la información sobre su "calidad" o índice de madurez, dada una amortiguación del sonido tal, que es característica de un cierto grado de madurez. Tenía vigencia ya esta idea, aunque en forma más elaborada, en Arquímedes, cuando con su balanza hidrostática diferenciaba metales con distinto peso específico.

Si bien los END nacen como resultado del conocimiento empírico, su evolución y desarrollo se basa en la aplicación del conocimiento científico, principalmente de las leyes de la física y de las propiedades de los materiales.

Esta evolución y desarrollo, que continúa hoy en forma acelerada, responde a necesidades concretas de la tecnología de la calidad y fiabilidad de los materiales para la cual constituyen una herramienta fundamental.

Los END constituyen una disciplina tecnológica "per se" y reúnen todos aquellos métodos de ensayo que permiten detectar y evaluar discontinuidades, estructuras y propiedades en los materiales y/o componentes sin modificar su aptitud para el servicio.

Estos métodos enmarcados en una filosofía de aplicación, determinada por los requerimientos de la tecnología de la calidad está condicionada por los factores económicos que hacen a la actividad productiva. Los elementos básicos de esta filosofía pueden ser resumidos en los siguientes puntos:

- Aplicación del ensayo sin producir modificaciones que alteren la aptitud de servicio prevista para el material o componente.
- Aplicación de una técnica que permita definir un nivel de sensibilidad o límite de detección.
- Obtención de la información generalmente, a través de propiedades distintas de las que determinan la capacidad de servicio.
- Obtención de la información en forma objetiva y en lo posible registrable..

- Utilización de métodos de END específicos para cada tipo de problema y material bajo examen, y no de aplicación general.

La metodología que distingue la aplicación de los END es la siguiente:

- Aplicación de una fuente de energía determinada.
- Interacción entre esa fuente de energía y el material bajo ensayo.
- Detección de las modificaciones energéticas ocurridas mediante el uso de un transductor apropiado al tipo de energía aplicada.
- Procesamiento y registro de la información.
- Evaluación de la información.
- Interpretación de los resultados en relación con los requerimientos de la especificación correspondiente al material ensayado.

Esta secuencia, que corresponde a la metodología propia de los END, puede ser fácilmente reconocida, tanto en un simple ensayo visual como en el más complejo ensayo automatizado (por ejemplo, el examen de tubos de ~~generadores de vapor por corrientes parásitas~~). *(Eddy current)*

En el primer caso tenemos como fuente de energía la radiación luminosa, su interacción con el material (reflexión, absorción, dispersión etc.), la detección de estas interacciones mediante un transductor (el ojo) que convierte la energía luminosa en sensaciones lumínicas, el procesamiento de la información en el cerebro y las subsecuentes etapas de evaluación (por comparación con otras imágenes por ejemplo), y de aceptación o rechazo del material de acuerdo a la especificación.

En el segundo caso la fuente de energía es electro-magnética y en su interacción con el material da origen a las corrientes parásitas; el transductor está constituido por una bobina eléctrica que acusa las modificaciones de las corrientes parásitas debidas a distintos parámetros del material (dimensiones, permeabilidad, resistividad) y produce una señal que contiene una compleja información que es analizada (en fase, amplitud y frecuencia) y procesada en sistemas de computación que permiten identificar las modificaciones de los parámetros de interés, luego evalúa dichas modificaciones y produce las decisiones de aceptación o rechazo de acuerdo a las tolerancias fijadas

por las especificaciones.

Con la filosofía y metodología descrita, los END constituyen entonces, una disciplina impulsada por los requerimientos de los más exigentes patrones de calidad y confiabilidad propuestos por el desarrollo tecnológico en su permanente evolución.

EVOLUCION E IMPORTANCIA DE LOS END:

Su utilización data de las primeras etapas de la actividad artesanal e industrial, incluyendo su uso en la vida diaria, y su reconocimiento como disciplina tecnológica recién puede observarse a partir de la década del '50 con la aplicación extensiva de los desarrollos efectuados en las industrias militares, especialmente naval y aeronáutica.

En forma sintética describiremos la evolución de esta disciplina tecnológica mediante la caracterización de tres etapas:

- a) Etapa de aplicación intuitiva (sin reconocimiento de métodos de ensayo), que constituye la prehistoria de los END y en ella tenemos los siguientes ejemplos:
 - amortiguación del sonido (madurez de frutos, integridad de piezas de barro o cerámica etc.)
 - transparencia a la luz (estado de incubación de huevos, examen de vidrios y cristales, etc.)
 - ataque químico para reconocer trabajado de metales (damasquinado)
 - dureza (mordedura para reconocer monedas, rayado con materiales de referencia etc.)
- b) Etapa de aplicación sistemática (con reconocimiento de una etapa de ensayo en el proceso artesanal o industrial), con el objeto de detectar defectos. Se caracteriza por el diseño de métodos de ensayo específicos tales como:
 - ensayos con líquidos penetrantes (aceite y blanqueo)
 - amortiguación del sonido
 - partículas magnéticas

- radiografía
 - ultrasonidos
 - corrientes parásitas
- c) Etapa de aplicación sistemática con el objeto de reconocer y evaluar las condiciones de integridad y propiedades de materiales y componentes.

Esta etapa que llega hasta el momento actual, se caracteriza por:

- la aplicación complementaria de distintos métodos para asegurar el examen total de un material o componente
- la automatización de métodos de ensayo para su aplicación en líneas de producción
- el desarrollo de métodos complejos con sofisticación del equipamiento utilizado (termografía infrarroja, emisión acústica, holografía óptica y acústica etc.)
- reconocimiento de la necesidad de formación de personal especializado y consecuentemente la calificación y certificación de operadores dedicados a cada una de las técnicas

En esta apretada síntesis hemos querido reflejar la evolución sufrida por los END a lo largo del tiempo. Como comentario final sobre este proceso debemos agregar que en las dos últimas décadas la aceleración del desarrollo tecnológico (automatización industrial, transporte aéreo masivo, industria nuclear, navegación espacial) modifican los conceptos de rentabilidad, seguridad y confiabilidad planteando 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 han provocado el desarrollo de nuevas técnicas y métodos. La industria convencional a su vez ha recibido el aporte de la experiencia recogida en el desarrollo de aquellos métodos cada vez más complejos y pudo incorporar así ensayos no destructivos y nuevos métodos de control de calidad cuyo estudio y desarrollo no podría financiar por sí sola. Los END constituyen uno de los ejemplos más claros de la contribu-

ción de los desarrollos de las industrias de avanzada sobre las industrias convencionales.

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.

Es así como los END han entrado a formar parte de la Ciencia de los Materiales en cuanto son utilizados para ayudar a conocer el comportamiento y propiedades de los mismos. Participan del Control de Procesos, cuando sus métodos son aplicados para medir variables a fin de realimentar información al proceso y mantener la producción dentro de especificaciones. Se integran como parte importante no sólo en el control de calidad de productos sino en los programas de garantía de calidad en las más complejas construcciones. Es herramienta fundamental para asegurar la fiabilidad de materiales y componentes durante el servicio de los mismos.

Dentro de ~~estas~~ áreas podemos individualizar una serie de problemas en los cuales la aplicación de los END es característica, a saber: discontinuidades, composición, propiedades físicas y mecánicas, estado físico, dimensiones y ubicación.

En la investigación y desarrollo que se realiza en laboratorios e institutos, el objetivo fundamental en la aplicación de los END es el estudio del comportamiento de los materiales en distintas condiciones de sollicitación y de sus correlaciones con el diseño y técnicas de fabricación. Se aprovecha especialmente la posibilidad que brindan estos métodos de ensayo para seguir el comportamiento del material o componente durante toda la experiencia programada sin producir interferencias.

En la industria los objetivos perseguidos por los END se pueden agrupar en la siguiente forma:

a) Asegurar la calidad del producto y aumentar su confiabilidad.

El aseguramiento de la calidad comienza con el conocimiento de las propiedades y comportamiento de los materiales. Se continúa con las complejas tareas de compatibilizar las correlaciones entre el diseño, las propiedades inherentes de los materiales y los procesos de fabricación, tratamientos y montajes. Finaliza con la certificación final de que el producto cumple con las especificaciones de calidad que aseguran la confiabilidad prevista. En la actualidad las tradicionales tareas de "inspección",

"control de calidad", "ensayos mecánicos", "ensayos no destructivos" sólo tienen un significado productivo si se encuadran como parte integrada al contexto global de un sistema de calidad que sintéticamente hemos descripto.

Para cumplir con este objetivo los END son aplicados en: el control de las materias primas especialmente en la verificación de especificaciones referidas a dimensiones, terminación superficial, defectos internos, estructura metalúrgica, etc., el control del proceso de fabricación con el fin de evitar que se continúe la elaboración de piezas defectuosas y detectar además fallas de proceso que en ciertos casos pueden servir para corregir directamente la desviación detectada. El control en esta etapa puede incluir también, un control final de proceso de fabricación.

La industria moderna logra elevados factores de confiabilidad en sus productos como consecuencia de su capacidad para desarrollar correctos diseños, producir materiales apropiados, conducir correctamente los procesos de fabricación, ejecutar con precisión los procesos de maquinado y de ensamblado. Y también, y esto no es menos importante, como consecuencia de una capacidad para establecer un programa de garantía de calidad que comprenda una serie de medidas y acciones que involucren el control de calidad y la inspección mediante la aplicación de ensayos no destructivos.

Es conveniente mencionar que la idea de "cero defecto" ha sido superada por la de "aptitud para el servicio". Aquí aparece bien claro el concepto moderno de la aplicación de los END, éstos no constituyen una herramienta solo para detectar defectos, ya que los materiales y componentes los tienen, sino que permiten evaluarlos, con lo cual se puede llegar a determinar la aptitud de la pieza ensayada, a pesar de la presencia de defectos.

La aplicación de los END por sí mismos, no mejora la calidad de un producto, sino que contribuye a asegurar un nivel de calidad, y como consecuencia la confiabilidad del mismo para el fin previsto.

b) Prevenir accidentes.

En la vida contemporánea las personas ven expuesta su integridad física en forma directa o indirecta, por el uso diario de innumerables artefactos y equipos y el concepto de confiabilidad sobre dichos elementos se torna un problema de seguridad. El objetivo primordial de los END es, en muchos casos, la pre-

vención 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. Los END cumplen en estos casos una función doble, en primer lugar deben asegurar que cada pieza crítica en cuestión tenga la confiabilidad de uso requerida por el diseñador; en segundo lugar deben permitir la verificación periódica de que dicha confiabilidad no ha variado con el uso, es decir que la pieza mantiene su integridad original.

El 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 esta supeditada en la mayoría de los casos, a una inspección correcta y periódica de los equipos y maquinarias en uso. En estos casos los END son irremplazables e inexcusables. Un simple examen periódico del gancho de un puente grúa, mediante partículas magnéticas o líquidos penetrantes puede detectar fisuras de fatiga antes de que su propagación pueda producir rotura en servicio, con el consiguiente peligro para el personal de la planta. Lamentablemente por desconocimiento de las posibilidades de uso de los END este tipo de examen preventivo no es común en las plantas industriales.

c) Producir beneficios económicos y aumentar la productividad.

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 este 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 conoce. El usuario siempre discrimina entre diferentes niveles de calidad. El END puede entonces producir un valor agregado al producto, que el usuario esta dispuesto a pagar. Pero sin duda son los beneficios económicos directos y tangibles que el correcto uso de los END producen durante el proceso productivo los que determinan la expansión constante de sus aplicaciones.

Los END aplicados al control de los insumos de una plan-

ta industrial, permitirán que sólo ingresen a las líneas de producción aquellos que están dentro de los límites fijados por los patrones de aceptación. Aplicados en las etapas intermedias de la producción permitirán eliminar aquéllos componentes semielaborados que han recibido un procesado defectuoso. En ambos casos si los métodos o técnicas aplicadas son los adecuados, se habrá producido un beneficio económico directo derivado de dos circunstancias: disminución de costos de elaboración de material defectuoso y aumento de la capacidad de producción de la línea.

Otra fuente de beneficios originados en el uso de los END residen en la posibilidad de modificar diseños, reduciendo secciones de material o reemplazando procesos, si se usan métodos de END que permitan aplicar mejores coeficientes de seguridad.

Es importante su incidencia en la reducción de los costos de puesta a punto de la fabricación de nuevos productos, mediante la detección, localización y evaluación de fallas inherentes al proceso o al diseño sin necesidad de destruir la producción.

Un análisis que incluya una correcta estimación de costos y beneficios de las operaciones de inspección representa una ayuda necesaria para establecer el alcance, oportunidad y extensión de las mismas, aunque no siempre se le presta la debida atención. Generalmente se limita a evaluar el costo de las operaciones de inspección, y raras veces se hace un atento análisis estadístico de los beneficios, es decir del valor de dichas operaciones. Sin embargo, la relación costo-valor obtenido es la clave del beneficio neto determinante de las decisiones sobre la aplicación de las inspecciones según un criterio económico adecuado.

El costo de inspección debe significar un porcentaje del costo de producción del componente, inferior al porcentaje de componentes que se rechazarían sin dicha inspección. Cuando el costo de inspección es superior a dicho porcentaje, solo se justifica mantenerla si el balance global de costos y beneficios indica otro tipo de beneficios compensatorios producidos por la inspección, tales como aumento de la capacidad real de producción.

En el análisis precedente sobre aspectos económicos de la aplicación de los END, los mismos han sido tratados como parte integrante de las operaciones de inspección. Cuando nos ocupamos del costo referido a la aplicación de los END, exclusivamente, los principales factores son los siguientes:

- Costos de operarios
- Costos de materiales (película radiográfica, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, etc)

- Costo de operación (electricidad, agua, repuestos, etc.)
- 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:

- La cantidad de partes inspeccionadas.
- El traslado de las partes hasta o desde el equipo.
- El manejo de las partes durante el ensayo.
- La automatización del método.
- La sensibilidad requerida.
- La tolerancia permitida en la interpretación de la información.
- El porcentaje de piezas defectuosas halladas; ya que la aparición de una señal de indicación de defecto implica en el operador un tiempo adicional para su evaluación y comparación con el standard de aceptación, antes de efectuar su rechazo.
- El nivel del personal requerido.
- La complejidad del equipo requerido.
- El tiempo intrínseco para realizar el ensayo; ya que puede variar notablemente por la eficacia del procedimiento o de la técnica utilizados.

Mediante el análisis y evaluación de estos factores podemos deducir el beneficio económico resultante de la aplicación de los END en la inspección, desde la selección de los métodos y técnicas de ensayo, hasta la forma de presentación y evaluación de los resultados. Tanto para el planeamiento de una nueva instalación, como para la modificación de instalaciones existentes.

d) Ejecutar mantenimiento de plantas industriales.

La magnitud, complejidad y costo de las grandes plantas industriales y la cantidad de vidas humanas involucradas en los medios de transportes, exige del mantenimiento, una especialización y un celo desconocido hasta hace pocos años. El END por definición resulta la herramienta más eficaz para obtener informa-

ción sobre el estado y confiabilidad de equipos y componentes en servicio.

El grado de aplicación de los END en el mantenimiento de plantas industriales es muy variable dependiendo no sólo de condiciones técnicas tales como complejidad de equipos, costo de paradas imprevistas, factores de seguridad requeridos, exigencias ambientales y de procesos impuestos a los materiales, sino también de la capacidad y organización de la empresa, de su política de seguridad laboral ya sea por propia iniciativa o por imposición de las autoridades.

Los END en mantenimiento de planta son especialmente aplicados en Centrales Nucleares, Talleres Aeronáuticos, Destilerías y Plantas Petroquímicas, Centrales Térmicas, Ferrocarriles; donde además de su uso se promueve el desarrollo de nuevas técnicas para atender los problemas específicos que en cada una de ellas se plantean.

e) Contribuir al desarrollo de nuevas técnicas, productos industriales y procesos de fabricación.

Por sus propias características los END son una herramienta importante en el desarrollo de nuevos productos facilitando o haciendo posible la evaluación de la influencia de distintos parámetros y niveles de defecto que definen el patrón de calidad para la producción. Por ejemplo, al encarar la producción de una nueva pieza en fundición, se puede ensayar el comportamiento en servicio de piezas, en las cuales se conozca la ubicación, forma y tamaño de distintos defectos; evaluar la frecuencia y magnitud de tales defectos en relación con las variables de las distintas coladas para luego, mediante la aplicación del análisis de diseño y procesos, definir los patrones de defectos aceptables.

METODOS DE END:

Los métodos de END se basan en la aplicación práctica de los conocimientos científicos logrados en el terreno de la física y de las demás ciencias naturales. Hasta el momento sólo utiliza, en forma habitual, una fracción de dichos conocimientos, tiene en desarrollo y experimentación una serie de métodos basados en principios no aplicados anteriormente y todavía dispone de una vasta reserva de conocimiento científico por aprovechar no solo en el desarrollo de nuevos métodos sino también para perfeccionarlos en sus técnicas de aplicación.

Estos métodos pueden ser agrupados en función del tipo de energía o medio de prueba utilizado. A su vez, cada método que resulta seleccionado, puede ser aplicado de forma diferente según las condiciones que se deben enfrentar. Esto da lugar a las distintas técnicas de aplicación de END. Un método como la radiografía puede ser aplicado según distintas técnicas como por ejemplo "radiografía gamma", "radiografía de alta energía", etc. Finalmente el detalle de los pasos o etapas de aplicación de la técnica y de interpretación y evaluación de los resultados constituye lo que se conoce como "procedimiento de ensayo".

Ateniéndonos a la intención de dar una visión panorámica de los principales métodos de END, de sus aplicaciones generales y sus adelantos más recientes a la fecha, los reseñaremos en la forma siguiente:

- Métodos ultrasónicos.
- Métodos con radiaciones penetrantes.
- Métodos con campos magnéticos y eléctricos.
- Métodos con radiaciones infrarrojas (termografía).
- Métodos con líquidos penetrantes.
- Métodos visuales.

MÉTODOS ULTRASONICOS:

A partir del descubrimiento del efecto piezoeléctrico por los hermanos Curie en 1880, como generador de ondas ultrasónicas por algunos cristales (por ejemplo el cuarzo) convenientemente tallados y de su efecto inverso de recepción de esas ondas por Lippman en 1881, su campo de aplicación se ha extendido notablemente y continúa ampliándose.

Si observamos su evolución fuera del espectro de los END, vemos que abarca diversas áreas como ser:

- procesos de limpieza
- procesos de maquinado
- procesos de soldadura
- preparación de emulsiones
- activación de electrolitos
- atomización de combustible
- diagnóstico, terapia e investigación en medicina y veterinaria.

Por razones de seguridad y de costo, como ya hemos dicho anteriormente se hace necesario controlar grandes cantidades de piezas para establecer si reúnen las características necesarias para su utilización específica. Allí donde se deba realizar estos

controles se aplican muy frecuentemente los ultrasonidos como integrantes más que representativo de los END. Este método de ensayo se generaliza tanto en forma manual como automática para:

- caracterización de defectos
- medición de espesores
- despegues de recubrimientos metálicos

Y sus aplicaciones más corrientes se efectúan en los siguientes campos:

- En medios de transportes, , para la inspección de elementos aeronáuticos, de material rodante y de vías de comunicación, (por ejemplo de rieles de ferrocarril).
- En la industria metalúrgica, para el control de productos fundidos, forjados y laminados, como ser chapas, tubos, alambres, etc.
- En las construcciones navales y metálicas, para el control de productos semielaborados y de uniones soldadas.
- En la construcción de maquinaria y en la industria eléctrica, para el control de productos semielaborados, de uniones soldadas y pegadas, así como para el control de las tolerancias finales.
- En las instalaciones de potencia, para la inspección de recipientes solicitados por presión y temperatura elevadas y para el control de turbinas y generadores.
- En la industria química, para el control de productos y de partes de la instalación susceptibles de ser atacados por sustancias químicas.
- En la ciencia y la investigación, para la determinación de las propiedades de sólidos y de las estructuras atómicas de los mismos.

A raíz de que el ultrasonido se propaga fácilmente en la mayoría de los materiales y que su aplicación no presenta problemas en lo que hace a distorsión de condiciones ambientales o de las propiedades físicas de los materiales involucrados, es que se sigue desarrollando su utilización, como por ejemplo en:

- Predicción de tensiones mecánicas o de ductilidad en relación con la retro dispersión de la señal ultrasónica (back-scattering) desde defectos artificiales introducidos en metales y su influencia en las propiedades mecánicas: En base a la teoría de la dispersión, se llega a una expresión empírica que correlaciona la ductilidad de la muestra que contiene la discontinuidad con la potencia de la retro dispersión ultrasónica. Los resul-

tados obtenidos sobre muestras de recubrimientos de aleaciones de titanio difundido están de acuerdo con las predicciones. Estas experiencias abren las puertas a la determinación de la ductilidad a partir de las medidas ultrasónicas.

- Soldaduras de acero inoxidable austenítico. La inspección ultrasónica en las mismas, constituye hasta hoy un impedimento por la muy baja relación señal-ruido que surge de la escasa discriminación entre señales reales de defecto y otras que aparecen como espúreas, debido a las estructuras dendríticas que permanecen luego del proceso de soldadura.
- Clasificación de defectos en soldaduras de chapas de acero usando un detector de defectos ultrasónico en conexión con un micro procesador: Dicho sistema se muestra efectivo para controlar con confiabilidad, velocidad suficiente y costos dentro de marcos reales, este proceso de inspección ultrasónica. Su desarrollo enfoca particularmente la evaluación y clasificación de defectos en chapas de acero, aunque el mismo se puede hacer extensivo, con los estudios pertinentes, a áreas como la industria nuclear para el caso de corrosión intergranular bajo tensión, así como para la automotriz o la del acero. Es de fundamental interés para este sistema detector de defectos-micro-procesador, la excelencia de los especímenes de prueba ya que de otra forma, los datos computados carecen de consistencia suficiente, pudiéndose obtener resultados irreales o incompletos.
- Inspección ultrasónica de productos de acero de gran espesor en caliente: Un tipo especial de transductor blindado y protegido térmicamente, al cual se aplica periódicamente una presión de acoplamiento en seco, puede ser lo suficientemente versátil como para permitir su aplicación en los más variados productos de acero en espesores de hasta 600 mm y temperaturas entre 950 y 1200°C con una resolución tal que detecta un defecto artificial de 5 mm de \emptyset hasta una profundidad de 500mm sin excesivos requerimientos técnicos y no sin dificultades económicas.
- Inspección ultrasónica de juntas soldadas de tuberías de PVC: Está siendo realizada dicha inspección con palpador angular y el equipamiento utilizado es el mismo que para la inspección de polietileno rígido, con la salvedad que la mayor atenuación en el PVC implica que para espesores de 10 mm o más, los exámenes deben ser hechos desde ambos lados de las piezas a ser ensayadas.
- Medición de espesor de pared de containers de nylon: Los resultados obtenidos son satisfactorios en paredes de 2 a 6 mm de

espesor.

- Prueba de madurez de quesos duros comestibles: El método usual de chequeo del proceso de maduración, el cual se efectúa por control de temperatura y humedad, es tomar muestras de la forma de queso. Actualmente se está utilizando el ultrasonido para este propósito con frecuencias bajas, con la ventaja de que el chequeo puede llevarse a cabo sin dañar el queso.

El rol de los palpadores en el ensayo ultrasónico es de fundamental importancia para la confiabilidad de los resultados. Por tal motivo es necesario una elección adecuada de las dimensiones de los transductores, de la frecuencia, del método de control y del conjunto formado por equipos y accesorios.

El grado de compatibilidad de los parámetros enunciados influyen decisivamente en la sensibilidad y en el poder resolutivo de los ensayos. De ahí que los palpadores, como elemento esencial sobre el conjunto de características de un equipo de control y como factor determinante de la calidad de los resultados de ensayo, hayan experimentado notables avances tanto en lo que hace a su versatilidad como a su desarrollo para casos específicos. Los tipos de transductores más ampliamente utilizados en las aplicaciones corrientes, no han sido modificados en cuanto a su tecnología básica en los últimos tiempos, salvo el caso específico de ensayos sobre soldadura de acero inoxidable austenítico para lo cual existen actualmente palpadores angulares que utilizan ondas ultrasónicas longitudinales, o las investigaciones efectuadas recientemente sobre la idea de obtener palpadores sin contacto aunque muy próximos con el material a ensayar, basándose en la transformación de energía electromagnética en acústica mediante un solenoide de diseño especial al cual se aplica una señal de radiofrecuencia. La fuerza motriz que genera el campo electromagnético aplicado, produce un efecto de compresión - expansión que da lugar a la excitación de ondas ultrasónicas de superficie o volumétricas según el diseño de dicho solenoide, cuyas espiras están separadas en media longitud de onda de la onda ultrasónica a obtener. Estos palpadores son aplicables a materiales metálicos ferromagnéticos y no ferromagnéticos y prometen mejoras en la detección de grietas superficiales pequeñas y cerradas.

Si estas modificaciones tecnológicas a las cuales nos referíamos anteriormente no han sido tan amplias, lo que sí se han producido son modificaciones en cuanto a la estructura o la forma de los palpadores, por ejemplo: la experimentación de cristales que puedan ser utilizados sobre piezas a altas temperaturas

o la aparición de palpadores más adaptables a la anatomía de la mano o piezas de geometría complicada o el estudio de filtros encapsulados que mejoran la calidad de los palpadores piezoeléctricos.

A través de la multiplicación de aplicaciones del ultrasonido se fue generando una mayor demanda que condujo a una creciente sofisticación en su tecnología. Hoy existe una extensa línea de equipos en mercado que van desde los básicos portátiles para fallas/espesores, que son los más usuales en obras y en aplicaciones que exijan la movilidad del equipo de control, hasta sistemas extremadamente complejos para inspección integrada de alta velocidad en forma automática, teniendo en cuenta además los equipos en los que sus funciones claves son implementadas mediante accesorios modulares enchufables que eliminan costos extra de diseño exclusivo y evitan la obsolescencia del mismo, ya que se van agregando dichos módulos según se necesiten. Las salidas se obtienen tanto en forma digital como analógica. Existen diversas posibilidades de representación de los defectos según la técnica de barrido automática que más se adecúe a una utilización dada, para ello la electrónica actual permite su caracterización, ya sea en forma gráfica o a través de una pantalla de video. Mediante sistemas computarizados se puede lograr una aproximación tridimensional de los defectos, atacando la pieza en cuestión con múltiples palpadores desde distintos ángulos, almacenando a su vez esos registros en cintas o discos magnéticos si fuese necesario.

Existen técnicas especiales que utilizan el ultrasonido de forma distinta a la empleada en los END corrientes, para las cuales su tecnología está en pleno desarrollo y sus aplicaciones no pasan en algunos casos de la fase experimental para evaluar la técnica estudiada. Así es que entre los más recientes desarrollos están:

- Tomografía ultrasónica asistida por computador para la determinación de concentración de tensiones, teniendo en cuenta como principio la alteración de la velocidad del sonido al propagarse a través de una región tensionada.
- Difracción ultrasónica para clasificación de tamaño de defecto. Ha sido evaluada sobre especímenes fisurados por fatiga, comprobándose que pueden lograrse exactitudes en clasificación de tamaño de fisura del orden de $\frac{1}{2}$ mm. La base de esta técnica de clasificación de tamaño es el reconocimiento de la periodicidad de varios pulsos ultrasónicos discretos.
- Espectroscopía ultrasónica: Es un método que se está integrando al conjunto de los END actuales por la potencialidad de sus aplicaciones y porque puede ser utilizado tanto en metales,

como en plásticos, u objetos cerámicos y en uniones de iguales o diferentes materiales, que posean incluso partes en contacto mecánico en buen estado. La espectroscopía ultrasónica analiza el espectro de frecuencias de una señal ultrasónica y la alteración de la distribución de esa energía espectral cuando atraviesa el material ensayado. Mediante esa alteración se pueden conocer las características de dicho material y su defectología. Las limitaciones que existen actualmente están relacionadas con la discriminación de los espectros ultrasónicos correspondientes a las características y heterogeneidades de los materiales ensayados. La tendencia apunta hacia la computarización de los datos obtenidos sobre muestras a las cuales se les practicaron ensayos destructivos, y para normalizar la información acerca de espectros de materiales cuyas características y/o heterogeneidades son desconocidas, y en cuanto a los equipos la tendencia es la de extender el rango de frecuencias y de eliminar los ruidos de fondo.

- Holografía ultrasónica: Este método está en pleno desarrollo y difiere con la holografía óptica en la forma de obtención del holograma, ya que el mismo se obtiene a partir de haces ultrasónicos que atraviesan el objeto en cuestión. La reconstrucción de la imagen virtual del objeto desde dicho holograma es similar al obtenido por holografía óptica, sólo que el holograma ultrasónico provee un efecto tridimensional menos aparente aunque es de suponer que su perfeccionamiento contribuirá a la mejora de los sistemas de imagen de las señales ultrasónicas.
- Emisión acústica: hemos hecho hincapié hasta aquí, solamente en una franja del espectro acústico, muy importante por cierto dentro de los END, que es la del ultrasonido. Cabe señalar que esta franja es la más corrientemente aprovechada actualmente a nivel industrial y que así mismo la emisión acústica abarca un rango de frecuencias no solamente sónicas sino también ultrasónicas, con el objeto de eliminar los ruidos parásitos procedentes de las zonas próximas al lugar de ensayo. Actualmente los equipos comerciales de emisión acústica son fabricados para trabajar únicamente en el rango ultrasónico, en aplicaciones tales como: mecánica de la fractura y comportamiento de los materiales en investigación y evaluación de integridad de estructuras en la industria. El método de emisión acústica difiere de los END convencionales en el aspecto de ser un ensayo de tipo dinámico, donde la detección de una alteración de las condiciones existentes requiere que la estructura ensayada esté sometida a la sollicitación propia de su servicio o a sobrecargas programadas y en consecuencia poder determinar el crecimiento de una fisura. A través de técnicas de triangulación, similares a las utilizadas en localización de terremotos, es como se obtiene la ubicación de los defectos.

La emisión acústica ha llegado a un punto de su desarrollo en que su crecimiento es más lento, a raíz de las dificultades que presenta la discriminación de la correlación entre las señales acústicas que provienen de una determinada discontinuidad o fenómeno y la causa de gestación del mismo, aunque existen ya una serie de aplicaciones rutinarias que tienden a incrementarse.

METODOS CON RADIACIONES PENETRANTES:

Desde que Röntgen descubrió una forma de radiación que puede penetrar en la materia los rayos X adquirieron una extraordinaria dimensión, como herramienta de conocimiento en distintas áreas, fundamentalmente en la ingeniería y la medicina, sin dejar de mencionar también su uso en la investigación básica en beneficio del saber. Pero es en el área de la tecnología el tema que nos interesa. En este mundo, como herramienta de inspección le cabería el título de heraldo de una nueva era, ya que nació y se desarrolló junto a la disciplina de los END.

Veamos en estos últimos años el estado de la técnica con RX. Para un mejor ordenamiento dividimos en: a) desarrollo de la técnica y sus aplicaciones y b) instrumentación.

a) Por definición la radiografía es una imagen visible permanente causada por el pasaje de una radiación penetrante, (en este caso) Rayos X, a través de una pieza.

El desarrollo de la técnica básicamente no ha sufrido grandes cambios es decir la técnica de aplicación de los RX a la pieza a ensayar y su registro se mantuvo prácticamente igual. El desarrollo positivo tuvo lugar en el aspecto de instrumentación y técnica de registro. Es justo decir, que no obstante de mantenerse la técnica con sus principios básicos sin grandes modificaciones, los desarrollos que hace mas de una década parecían demasiado ambiciosos desde el punto de vista tecnológico o de dudosa aceptación, en el momento actual son de uso corriente y masivo. Nos referimos precisamente a técnicas de avanzada como los equipos de Rayos X capaces de detectar defectos muy pequeños, produciendo diámetros focales de aproximadamente 0,040 mm y ofreciendo además la posibilidad de obtener radiografías panorámicas de soldaduras en componentes tubulares u otras piezas de acceso limitado o el método del flash radiográfico que se utiliza para estudiar fenómenos de corta duración.

Sin duda las aplicaciones siguen orientadas a determinar el grado de calidad alcanzado en el producto que se inspecciona. Paralelamente no solo es utilizada para asegurar la calidad funcional, sino también a prevenir accidentes y proporcionar beneficios económicos directos o indirectos. Obviamente, los benefi-

cios directos son orientados a disminuir los costos de fabricación y los beneficios indirectos a contribuir en la mejora de los diseños y control de los procesos de fabricación.

Bajo estos objetivos la técnica radiográfica continúa en la búsqueda de heterogeneidades. Estas heterogeneidades se suponen detectables radiográficamente y se pueden clasificar en dos grandes grupos: Discontinuidades o imperfecciones planares y discontinuidades • imperfecciones volumétricas que a su vez ambas se pueden subdividir en superficiales e internas.

Ultimamente, con el desarrollo de la mecánica de la fractura, se demostró por su medio, que los defectos más significativos son los del tipo de fisuras superficiales u otros tipos de defectos planares de manera que la conclusión obvia es que otras técnicas como tintas penetrantes o partículas magnéticas pueden reemplazar a la radiografía. Esto naturalmente en nuestros días conduce a algunas dudas sobre el uso de la radiografía. Con esto no se pretende darle preferencias a otras técnicas sino considerarlas como complementarias. Concretamente la mecánica de la fractura aplicada como es en soldadura de aceros ha clarificado la importancia relativa de los diferentes tipos de defectos desde el punto de vista de la fatiga incidiendo en la vida del material. Todas las evidencias parecen sugerir que los defectos "volumétricos" como porosidad, huecos, inclusiones de escoria etc, tienen menos importancia que los defectos planares como falta de fusión, fisuras etc. La necesidad de detectar estos defectos es lo que ha conducido, como se dijo antes, a replantear la eficiencia de la radiografía. Si nos referimos ahora a defectos internos en aceros comunes o en aleaciones de Aluminio, tanto en un caso como en el otro es posible usar radiografía como ultrasonido. Por supuesto que en todo ensayo, previamente se juzgará que método usar.

b) Desde el punto de vista de la instrumentación y técnicas de procesamiento de la información es donde se hicieron los mayores avances. Dentro de los equipos tradicionales con el avance de la ciencia de los materiales y de la electrónica se logró reducir el peso y volumen y se mejoró el rendimiento térmico de los tubos productores de RX. Estos serían los aspectos más significativos en equipos tradicionales de radiografía. Sin embargo el film radiográfico no ha sufrido mayores cambios, pero como contraparte otras técnicas alternativas se desarrollaron rápidamente para el tratamiento de la información contenida en la imagen radiante. Estos sistemas que usan como detector otros materiales distinto del film, pueden ser vistos a continuación donde incluimos técnicas radiográficas tradicionales y otras técnicas mas especiales como la neutrografía, por ejemplo.

Comencemos con los sistemas llamados intensificadores de imágenes. Estos tratan de convertir los rayos X en luz visible con el uso de una pantalla fluorescente. En algunos diseños estas pantallas son películas policristalinas de ZnS o CaS. En

los tubos intensificadores de imágenes, la luz de la pantalla fluorescente, por medio de una pantalla convertidora, generan electrones que son acelerados para reconvertirlos en imagen visible en una cámara del tipo de TV. Con esto se logra reducir el tamaño de la imagen y aumentar el brillo. Como segunda forma de intensificador de imágenes, la imagen se ve directamente en la pantalla fluorescente primaria con una cámara muy sensible de baja intensidad de luz como puede ser el ISOCON o el SITCON. Estos intensificadores de imágenes son más usados en la **URSS** que en Europa Occidental especialmente para inspeccionar soldaduras. Tienen la ventaja de evitar el costo del film pero están limitados en la eficiencia como consecuencia de la conversión característica de los Rayos X primarios sobre la pantalla. Estos normalmente dan una estructura granular gruesa que limita el detalle en la imagen y además es relativamente pobre la conversión de Rayos X a luz de manera que al final la imagen presenta manchas.

Generalmente los sistemas intensificadores de imágenes no han logrado mejorar la representación de la imagen en comparación con el film radiográfico en términos de sensibilidad a los detalles. La ventaja de estos intensificadores es de **costo** además de que pueden ser usados para inspecciones dinámicas.

Originariamente otros métodos de registro distintos del film tradicional fueron desarrollados para la radiografía médica usando detectores de gran superficie y baratos frente al film. Los tres métodos más conocidos son la Xero-radiografía, Ionografía y Xonics pero ninguno de ellos ha encontrado muchas aplicaciones industriales. Sin embargo potencialmente estos métodos son capaces de brindar una mejor imagen en términos de detalles que el film radiográfico.

Los métodos de barrido del rayo de radiación transmitido a través del espécimen con un detector pequeño tales como un contador de centelleo o un cristal, y luego del registro el procesado de la señal resultante se encuentra en alguna literatura Rusa, pero no obstante esto se le ha encontrado poca aplicación. Otra vez podemos decir que el beneficio aparece en los costos además de ser posible la automatización del método, pero su atractivo parece ser más teórico que práctico. Si la sección eficaz del detector se construye tan pequeño como para recoger los detalles finos, aparece como limitación del método la baja velocidad de barrido que debe realizarse para reducir problemas asociados a la relación señal-ruido. También los procesos de computación pueden ser aplicados a estos métodos prometiendo un considerable desarrollo. Sobre fuentes de radiación, los nuevos desarrollos fueron graduales más que una aparición fundamentalmente nueva. Los tubos de Rayos X de cerámica y con aislación de gas, como dijimos, permitió construir equipos más pequeños y más livianos entre rangos de 100 a 400 Kv. También hay en mercado tubos de microfoco cuyo punto focal tiene menos de 100 micrones de diámetro

efectivo.

Dentro del área de otras fuentes generadoras de Rayos X se encuentran los aceleradores lineales, utilizados para generar Rayos X de alta energía. Estos equipos pueden producir rayos en 1 a 25 Mev. y muestran actualmente una tendencia a desplazar a otros sistemas que generan también altas energías. Estos aceleradores son robustos y con un sistema de control simple, particularmente son usados en la industria dentro del rango de los 8 Mev. Para inspección de soldaduras de grandes espesores en aceros austeníticos e inoxidables, no hay en este momento otra alternativa que usar radiografía de alta energía. Una ventaja importante es el corto tiempo de exposición, y se puede aplicar en radiografía de soldaduras calientes después de una soldadura parcial en grandes espesores.

Con rayos gamma la industria casi en su totalidad usa Ir-192 y Co 60, sin embargo otras dos fuentes de gamma han encontrado aplicaciones un tanto limitadas, en piezas delgadas. Estas fuentes son el Thulium 170 y el ~~ytterbium~~ - 169, pero ambos tienen desventajas prácticas. El Tm 170 tiene un muy bajo nivel de salida de la radiación de manera que aún siendo corta la distancia de la fuente al film son largos los tiempos de exposición. Su vida media es de 127 días. El Yb 169 tiene una vida media de 31 días de manera que la fuente debe ser usada inmediatamente después de su activación, esta sería su principal desventaja pero tiene otras mas.

Ambas fuentes son capaces de producir radiografías de mejor calidad de imagen en comparación con el Ir 192 sobre espesores de aceros por encima de los 15 mm y por el hecho de tener baja energía pueden ser manipulados en un contenedor de bajo peso y además mas pequeños que los usuales. Estas técnicas que usan tales fuentes no ha sido todavía ampliamente conocidas pero se espera que vencida la predisposición a no usar fuentes de vida corta, su uso se hará mas frecuente.

La radiografía con neutrones y un tanto menos la radiografía con protones ha logrado despertar mucho interés en estos ultimos años, pero ambos métodos están limitados porque necesitan fuentes de radiación muy caras, Casi toda la radiografía con neutrones se hace con neutrones térmicos que salen a través de una ventana de un reactor atómico. La radiografía con protones también requiere un gran generador de partículas, de manera que para ambos métodos la aplicación industrial aparece al presente como un ensayo severamente limitado o bien de laboratorio. Por último diremos que está en desarrollo la radiografía de alta energía pero de tiempo de duración muy corto (flash).

METODOS CON CAMPOS MAGNETICOS Y ELECTRICOS:

Hace poco mas de 50 años, la práctica normal para ensayos de materiales, era tomar unas pocas muestras al azar de un gran número de piezas y romperlas o cortarlas para realizar un ensayo visual de inspección. Esta destrucción de partes, por supuesto, si el defecto no era encontrado, conducía a caminos que no eran satisfactorios de ningún punto de vista. El método no era científico, ni seguro y además costoso. Esto llevó alrededor de 1929 a crear un nuevo camino de los Ensayos No Destructivos. Las ideas se unieron para crear un método que posibilite la detección de defectos invisibles sin dañar ni alterar la propiedad del material, basándose en la dependencia de las propiedades magnéticas y eléctricas por la presencia y características de las heterogeneidades y de las dimensiones de la pieza.

Esto permitió el posterior desarrollo de un gran número de equipos de END, de aplicación a problemas de caracterización, defectología y metodología de los materiales.

Se puede presentar, como clasificación, un método relativo al campo magnético y otro al campo eléctrico. El primer grupo comprende los ensayos con campos magnéticos estáticos y dinámicos y el segundo grupo comprende ensayos con partículas electrificadas y por conducción de corriente eléctrica, respectivamente.

De igual manera que otras técnicas, en los métodos con campos eléctricos y magnéticos, su técnica básica se mantuvo sin variaciones espectaculares. No obstante en los últimos años se apuntó a perfeccionar los componentes, materiales y los equipamientos intervinientes. Con la idea de respetar la importancia en las aplicaciones, comencemos con el método de las partículas magnéticas.

a) Poco tiempo después de la Primera Guerra Mundial se descubrió el principio del empleo de los campos magnéticos y de las partículas magnéticas para la detección de grietas superficiales en metales magnéticos. Sin embargo pasaron 15 años hasta que apareció un estudio sistemático que estableció las bases del método. El método al igual que otros muchos ensayos y técnicas, recibió el impulso definitivo como consecuencia de las necesidades creadas por causa de la Segunda Guerra Mundial. A partir de esa época hasta el presente el aprovechamiento se hizo masivo.

El beneficio que el ensayo ofrece es una consecuencia directa del fenómeno en el cual las partículas magnéticas actúan como detectores del "campo de fuga", cuya imagen aparece en la superficie de la pieza, y se corresponde exactamente con la ubi-

cación de la discontinuidad.

Los desarrollos posteriores a la década del 40 se dirigieron a optimizar el efecto del tamaño y forma de las partículas magnéticas como así también su visibilidad, contraste y movilidad. Con respecto al tamaño se puede decir que se lograron valores comprendidos entre el límite superior de 40 a 60 micrones y un límite inferior de orden práctico. En principio no existe límite inferior, sin embargo en la práctica, partículas de tamaño inferior a 0,1 micrón pierden validez como detectores de grietas. En el caso de la forma se hicieron varios intentos de optimizarla pero la experiencia demostró que los resultados son suficientemente aceptables aún empleando partículas cuya forma está lejos de ser la ideal.

En relación a las dos propiedades importantes de las partículas, como son la visibilidad y contraste, hoy en día existen en el mercado partículas grises, blancas, amarillas, negras o rojas asegurando un buen contraste con el resto de la superficie. También se lograron partículas fluorescentes, aunque magnéticamente menos sensibles que las otras, pero poseen la ventaja de que al ser iluminadas con luz negra, unas pocas partículas permiten visualizar perfectamente el defecto en la superficie.

Con referencia al tema movilidad de las partículas, podemos decir que la movilidad lograda hasta el presente está lejos de ser ideal, por el compromiso entre la propiedad que llamamos movilidad y las demás propiedades de las partículas y del líquido que las contienen (tamaño, densidad y viscosidad del medio líquido).

En el método seco se lograron partículas cuyo tamaño les permite permanecer por un breve tiempo flotando en el aire, que juntamente con su pequeña viscosidad les facilita el desplazamiento y dar una óptima respuesta.

Dentro de las instalaciones y equipamiento existen actualmente unidades portátiles y unidades fijas para la creación del campo magnético en la pieza. En las primeras, éstas van desde el simple imán permanente hasta unidades que trabajan con intensidades de corrientes de 8.000 Amperes. También existen unidades portátiles de diseño más complejo que permiten trabajar con corriente semirectificada (en general) o alterna con intensidades de corriente de salida desde 500 Amp hasta 8.000 Amp en los equipos más grandes.

En las unidades fijas, además de existir una gran varie-

dad de marcas, los equipos poseen las siguientes características: a) posibilidad de trabajar con corriente alterna o semirectificada, b) tanque para almacenar el baño de partículas magnéticas con circuito de recuperación, agitación y demagnetización de las partículas, c) Control de la intensidad de corriente d) posibilidad de variar la distancia entre cabezales de contacto para piezas de tamaño variado (dentro de ciertos límites); e) bobina incorporada para demagnetización longitudinal o bien cabezales de electroimán. Estos equipos son construidos para dar intensidades de corriente de hasta 20.000 A para ensayos de grandes piezas, pero normalmente son suficientes con 8.000 o 10.000 Amperes para la mayor parte de los ensayos.

También existen instalaciones automáticas construidas para realizar controles del 100% de la producción. Se adopta este sistema de automatización por que a la larga resulta más económico; seguro y más rápido. Las características más importantes de estas instalaciones es que las piezas se ensayan en condiciones óptimas y todas reciben el mismo procedimiento de ensayo.

Existen otros grupos de ensayos aparte del ya descrito, que usan como elemento de información el campo magnético estático o dinámico. La mayor diferencia con el método de partículas magnéticas reside en que con estos ensayos se puede estudiar los contenidos de materiales ferromagnéticos en el seno de otros que no lo son, o cambios metalúrgicos tales como conversión de fases, precipitación de constituyentes, dureza, resistencia a la tracción, contenido de aleantes, estado de maduración etc. Los equipos que permiten determinar estos cambios metalúrgicos están basados en la medición de la fuerza coercitiva o en la magnetización remanente. Para mediciones de espesores se utiliza también el campo magnético estático basado en las variaciones de densidad del flujo.

El método del campo magnético dinámico se basa en la aplicación a la muestra de un campo magnético variable con el tiempo: esta variación suele ser cíclica y generada mediante una corriente eléctrica alterna a través de un solenoide preparado al efecto.

Aunque los campos magnéticos dinámicos se utilizan ampliamente en los ensayos no destructivos, existe un método que analiza la representación del ciclo magnético de histéresis permitiendo ser usado para seleccionar materiales.

Estos ensayos con campos magnéticos estáticos o dinámicos exceptuando las partículas magnéticas y las corrientes indu-

cidas, no son recientes sino que fueron desarrolladas a principio de siglo durante y después de la Segunda Guerra Mundial, no obstante se siguen usando como métodos únicos o alternativos para ciertos casos y en forma no masiva.

Por su importante papel dentro de estos últimos años le daremos ahora una especial atención al método de las corrientes inducidas o corrientes parásitas. Este ensayo con aplicaciones metalúrgicas se desarrolló por el año 1939. Luego en la década de 1950 a 1960 con el aporte de investigadores de varios países se logró el desarrollo de una amplia gama de instrumentos de ensayo. Posteriormente al desarrollo del método de análisis por control de fase, aparecieron otros métodos, tales como la técnica de la frecuencia múltiple.

Paralelamente al avance de la electrónica del estado sólido, el método de corrientes inducidas se vio fuertemente impulsado, obteniéndose equipos de elevada complejidad y fiabilidad. Esto permitió también la construcción de instrumentos miniaturizados muy portátiles.

Se puede decir sin temor a dudas que el método ha sido desarrollado hasta nuestros días a un nivel tal que permite asegurar ensayos rápidos, seguros y reproducibles. La urgente necesidad de la industria en gran medida impulsó el desarrollo y aparición de un gran número de instrumentos comerciales capaces de resolver problemas relacionados con la detección de grietas, determinación de composición, de dureza y control dimensional de los productos. La fundamental ventaja reside en la posibilidad de su aplicación automática en las líneas de producción, sustituyendo ventajosamente a otros ensayos que se realizan normalmente en forma manual. Además posibilita la inspección no destructiva al 100 por 100 de las piezas como es el caso de grandes partidas de barras, tubos y perfiles.

Es importante decir que este método experimentó en su comienzo un particular escepticismo en su capacidad de detección de fallas, sin embargo este hecho no retardó su desarrollo y prontamente ganó la confianza de la industria ocupando en este momento un lugar tan importante como la radiografía o el ultrasonido.

En la utilización del campo eléctrico diremos brevemente que es utilizado actualmente en forma general para el examen y control de calidad de materiales no conductores y no porosos como el vidrio, cerámicas vitrificadas, plásticos y ciertos tipos de pinturas. En estos casos este ensayo da mejores resulta-

dos que cualquier tipo de líquido penetrante.

De los métodos llamados electromagnéticos, donde intervienen ambos campos eléctricos y magnéticos, ya hablamos del más importante que es el de corrientes parásitas, sin embargo existen otros métodos. Uno de ellos es el método por microondas, estas ondas se encuentran entre longitudes comprendidas entre 1m y 1mm y responden a las leyes que rigen el electromagnetismo, es decir se propagan en líneas recta, se difractan, se interfieren y se refractan o se dispersan. Estas ondas se utilizan generalmente por su fácil propagación, en materiales no metálicos, reflejándose y dispersándose en discontinuidades internas y en superficies. Entre muchos materiales a examinar figuran principalmente: los plásticos, cerámicas, resinas, caucho, maderas, espuma de poliuretano, productos químicos, etc. La técnica operatoria se basa en la transmisión, reflexión o dispersión de las ondas. Actualmente se está desarrollando sistemas de conversión a imagen del campo del haz de microondas y se vislumbra también la posibilidad del empleo de técnicas holográficas. Podemos predecir que en un futuro próximo las microondas al igual que otras técnicas recientes ocuparán un puesto equiparable a las técnicas más divulgadas.

MÉTODOS CON INFRARROJOS (TERMOGRAFIA):

En el universo tecnológico existen componentes de instalaciones y productos que desde su aparición tuvo la exigencia o necesidad de ser controlada su condición para la cual fue construida. En la mayoría estos componentes son susceptibles de ser inspeccionados por los métodos o ensayos no destructivos llamados tradicionales, pero por razones de costo o por naturaleza misma muchos componentes tecnológicos deben ser inspeccionados por otros ensayos que entran en la categoría de técnicas especiales. No debe creerse que esto implica siempre y en todo los casos un uso restringido en horas de trabajo de estas técnicas frente a las convencionales como el ultrasonido. Un ejemplo concreto es la termografía cuyo uso cada vez es más amplio y masivo, pudiéndose decir que casi es considerada en este momento como una técnica tradicional.

La termografía es una conversión a imagen de la radiación infrarroja emitida por el cuerpo que se observa. Para este fin actualmente los equipos son de gran complejidad desde el punto de vista óptico, mecánico y electrónico. Sin embargo la mayoría de estos instrumentos son portátiles y suficientemente cómodos en el transporte.

Dentro de los ensayos no destructivos el uso del infrarrojo se ha incrementado en los últimos años, siendo los campos que abarca desde el médico hasta la localización de pérdidas en construcciones edilicias.

Hasta no hace mucho los equipos que funcionaban con infrarrojo se limitaban a medir temperaturas, pero de tipo puntual en comparación con el tamaño del objeto. Pero una nueva herramienta como es la termografía permite ver simultáneamente el objeto a ser inspeccionado y mostrar todo el mapa de distribución de temperatura. Esto es porque tiene la capacidad de medir miles de veces en fracciones de segundo los puntos calientes por muchos que estos sean.

Con esa eficiencia, el sistema de conversión a imagen del infrarrojo no sólo puede ser usado para medir temperaturas a distancia y sin interacción con el cuerpo, sino que puede resolver problemas utilizando la radiación natural emitida por ese cuerpo, para indicar el estado físico en que se encuentra. Entonces la energía infrarroja llega a ser un medio más que un fin para obtener información acerca de las condiciones físicas del objeto. Por ejemplo, información relacionada con corrosión, fractura, adelgazamiento, erosión, deposición, pérdidas, bloqueo, sobrecalentamiento en líneas de alta tensión, etc. Todos estos están relacionados con cambios en las propiedades físicas y por lo tanto cambios en la emisión de energía térmica. Entonces se quiere decir con esto que en los casos de inspección no sólo es necesario y fundamental conocer la temperatura, sino que también es importante la condición física de emisión del objeto.

Veamos algunas de las principales aplicaciones de la termografía como técnica de mantenimiento y prevención de accidentes en la industria:

I) Industria Siderúrgica:

Dentro de las industrias del acero, en muchos países, se ha recogido experiencia en la inspección y observación de las condiciones de funcionamiento de altos hornos, lingoteras, palanquillas, etc. El caso más importante de mantenimiento y prevención se orienta generalmente a los altos hornos, donde la alta velocidad de los gases junto con el polvo erosiona las paredes internas, entonces en estos casos un monitoreo a las paredes externas con un equipo de termografía dará información de las condiciones de funcionamiento, ya que la zona erosionada presentará mayor transmisión de calor al exterior. En este tipo de industria, donde el calor juega un rol importante, es donde la termografía resulta de mucha utilidad. Pero existen otras aplicaciones

en las plantas siderúrgicas, se prefiere detallarlo en el punto siguiente por la similitud de la forma en que surgen estos problemas.

II) Industria Petroquímica:

El Flujo de Productos es una de las áreas donde este ensayo es muy útil; aquí la inspección está orientada a detectar problemas de erosión, corrosión, bloqueo y pérdida. Muchas veces los defectos que se presentan son causados por el flujo mismo del producto, pero a menudo son producidos por agentes externos. En cualquiera de los casos el infrarrojo es útil. Como ejemplo se puede dar el caso de un intercambiador de calor, donde suele presentar condiciones defectuosas, bloqueo, adelgazamiento, corrosiones internas o deposiciones anormales. Entonces, cuando se realiza una inspección con infrarrojos, las capas externas del intercambiador en estado normal presentarán una variación gradual de temperaturas. Si, por el contrario, algún defecto estuviese presente, se verán alteraciones del mapa natural de temperaturas. Estos problemas se presentan en muchas otras industrias y no son exclusivas de una planta petroquímica. Se puede decir, entonces, que donde haya tuberías que conducen fluidos calientes las fallas mencionadas serán detectadas en un corto tiempo bajo la hipótesis que los defectos provoquen alteraciones en la conductividad del material observado.

En Refractarios y Aislantes puede ser apreciado más fácilmente el valor de la conversión a imagen del infrarrojo. Si se parte de la hipótesis de que el horno tiene una temperatura uniforme dentro del mismo, la temperatura externa será entonces función de la conducción del calor a través del medio aislante y de la pared externa. Un recipiente debería tener una temperatura uniforme en su superficie externa si fuera perfecto y no estuviera afectado por defectos. Entonces en el caso de una fractura o agrietamiento u otro estado defectuoso que exista en ese medio aislante, la superficie de la pared externa se incrementará en su temperatura en una forma proporcional a la magnitud del defecto y en el lugar que se encuentra. Dicho de otra forma, el defecto será visible sujeto a la no uniformidad de la conducción del calor desde el interior a la superficie externa.

Pueden existir en una práctica normal otros tipos de defectos en la estructura que causarán no uniformidad en la conducción del calor: huecos, diferentes tipos de refractarios, etc, sin embargo éstos también son susceptibles de ser detectados y no consumen más tiempo que visualizar agrietamientos.

En hornos, dentro de la industria petroquímica, es posi-

ble hacer inspecciones a los tubos para ver deposiciones. Esto se hace observando la superficie externa de los tubos igual que los casos anteriores. Los hornos son generalmente construídos para dar calor en forma uniforme y continúa a los productos del petróleo que va desde los líquidos livianos a los pesados. Por lo tanto, en estos procesos si el tubo fue calentado uniformemente, un gradiente uniforme de temperatura deberá aparecer desde la entrada más fría a la salida más caliente. Entonces si una deposición de carbón aparece en las paredes internas de estos tubos, tal deposición actuará como aislante, llevando a un incremento de temperatura localizado. Este estado de sobrecalentamiento produce dos efectos. Primero que la temperatura del tubo se incrementa y segundo la vida del tubo se acorta (la que puede terminar en ruptura).

Con un programa previo de inspecciones usando este tipo de ensayo proveerá información sobre la durabilidad del tubo y servirá además para prevenir posibles fallas.

Se debe señalar también que en la industria petroquímica, como en otras industrias, se puede usar la herramienta de los infrarrojos en problemas relacionados con la conservación de la energía. De lo anterior se desprende que toda fuga térmica es una pérdida de energía y de dinero, por lo tanto así como se detectan fallas de instalaciones se pueden detectar pérdidas de energía.

III) Instalaciones de Energía Eléctrica:

En el caso de instalaciones eléctricas, esta se reduce generalmente al caso de prevención de fallas. Brevemente se verá como es posible detectar estados defectuosos en dichas instalaciones.

La resistencia eléctrica y el calor están estrechamente vinculados. Este vínculo se conoce como efecto Joule y se refiere a la disipación de potencia en forma de calor cuando pasa una corriente por un conductor. Si la resistencia se reduce, la cantidad de calor creada se incrementará en forma proporcional al incremento de corriente. Entonces, en el caso de un aislante el cual se supone de resistencia infinita, un cambio en su estado físico reducirá la resistencia incrementando la corriente y así incrementando el calor disipado. Esta condición defectuosa es detectada por la cámara de infrarrojos.

Otros estados también pueden ser detectados, como es la formación de arcos, por ejemplo. Esta condición es similar a los cambios de resistencia eléctrica, pero con la diferencia que en los arcos el medio aislante es el aire que, junto a la hume-

dad provocan variaciones de corriente y resistencia. Estos arcos en la mayoría de los casos son invisibles al ojo humano, pero no lo son a la cámara infrarroja cuando detecta el calor emitido.

Se puede decir como conclusión que los sobre calentamientos se producen a menudo en diversos sistemas que emplean voltajes elevados y si se pudieran advertir los defectos que se presentan en clavijas, conectores, conmutadores, empalmes, aisladores, etc. se evitarían costosas interrupciones de mantenimiento.

Damos a continuación una tabla donde se muestran algunas aplicaciones de la termografía en la industria. (Ver Tabla I).

Ventajas y Desventajas:

Se puede distinguir dentro de las ventajas y desventajas dos aspectos, uno referido al método del uso del infrarrojo frente a los otros métodos de medición de temperaturas, y el otro aspecto referido a los beneficios de una inspección a plantas industriales .

Las mayores ventajas del sistema de conversión a imagen son: observación remota, observación en tiempo real, registro permanente y observación de isoterms.

En el caso de mediciones de temperaturas de grandes estructuras este sistema es de difícil competición frente a otros métodos. Casi todo reside en la capacidad de observación remota, ya que otro método de medición de temperatura por contacto sería costoso y además se consumiría tiempo en el montaje e implementación de este tipo de mediciones por contacto directo. Las mediciones además se pueden hacer a distancias muy seguras de las estructuras y este es especialmente importante cuando las altas temperaturas están involucradas.

La observación en tiempo real permite variar los parámetros a ser estudiados y registrarlos sin la necesidad de alterar el proceso involucrado, por ejemplo, se puede medir la temperatura mientras se está laminando en caliente.

El registro permanente puede ser recogido en filmes del tipo de revelado instantáneo o de 35 mm standard en colores o en blanco y negro. De esta forma el registro se usará como estudio comparativo de la vida útil del elemento en juego y también se podrán sugerir cambios en futuros diseños o formular pautas para incrementar la producción.

La visualización de las áreas isotérmicas, permite ubi-

A P L I C A C I O N E S					
	Condiciones de línea	Depósitos	Pérdidas de calor y eficiencia térmica	Electricidad	Otros
Industria del Acero	Altos hornos y chimeneas de altos hornos, cañerías	Cañerías de gases sucios y limpios, bloqueos de válvulas	Calderas y hornos	Conectores sobrecalentados en líneas de alta tensión subestaciones, bancos de conversiones	
Industria Petroquímica	Chimeneas, reactores, líneas de transferencia de fluidos calientes, recipientes enfriados	Idem arriba	Almacenamiento de líquidos y gases en tanques, calderas, hornos	Idem arriba	
Plantas eléctricas				Idem arriba	
Otras áreas	Hornos	Niveles de líquidos	Aislaciones de construcciones para la vivienda, intercambiadores de calor		Estudio de superficies de vidrios y perfiles térmicos

carlas especialmente y medirle su temperatura rápidamente. Esto es muy importante, como en el caso de las lingoteras donde el calor es no uniforme y cambia rápidamente.

En el caso de mediciones de espesores, naturalmente siempre se debe hacer un análisis comparativo con otros métodos, de acuerdo a la naturaleza del material, al costo, y al tiempo consumido en la inspección. Es fácil darse cuenta que habrá casos en que será más sencilla la inspección por otros métodos que ofrecen menos costo y menos tiempo. Pero en el caso de mediciones de temperaturas el equipo de infrarrojos es de difícil competencia.

Otra ventaja que no deja de ser importante, aunque se trate de un orden menor, se refiere a la capacidad de ser portátil y apto para trabajar tanto en interiores como en exteriores.

En cuanto a los beneficios directos a plantas industriales, en gran medida ya fueron mencionados, pero se puede añadir algunos más: a) extender la vida útil del material, b) incrementar la capacidad de la planta, c) reducir costos de mantenimiento, d) incrementar la seguridad de operación y por último e) usar la información registrada para mejorar diseños.

En referencia a las desventajas es preferible comentarlas como problemas de aplicación y no como desventajas.

Uno de los problemas más importantes que se presenta cuando se realiza una medición de temperatura, es que el valor obtenido del sistema será dependiente de la precisión de la temperatura de referencia en el campo de visión. Pero si se opera en exteriores se puede, en la mayoría de los casos, tomar como temperatura de referencia a la temperatura ambiente.

Otro problema aparece cuando en el campo de visión se presentan objetos con emisividades muy distintas y algunas desconocidas. Esto conduce a realizar cálculos por separado hasta obtener la temperatura de cada sección particular, o tomar una emisividad promedio.

Por último, se puede mencionar que la única desventaja como tal es el precio del equipo. Se piensa que el tema referido al costo es importante, ya que el precio inicial de los equipos de termografía ha retardado su uso en el campo de la industria por muchos años. Se piensa que dentro de pocos años con el avance de la tecnología será posible comprar estos equipos por un costo mucho menor.

METODOS CON LIQUIDOS PENETRANTES:

La expansión generada en el método de líquidos penetrantes ha sido poco considerable en los últimos tiempos, salvo en lo que hace a su aplicación. Esta ha crecido notablemente, y en la actualidad se utiliza en la mayor parte de la actividad industrial. El creciente uso del acero inoxidable austenítico y su imposibilidad de ser inspeccionado mediante partículas magnéticas, pudo haber influido en un aumento cuantitativo de su utilización.

Desde su primera aplicación industrial, hace más de cuarenta años a la fecha, lo que se ha modificado fundamentalmente, ha sido:

- a) la aptitud de los elementos necesarios para el ensayo en lo que hace a sus propiedades químicas y su forma de utilización.
- b) el perfeccionamiento de cada una de las etapas de las técnicas existentes. Por ejemplo: para el lavado de las piezas hay actualmente una serie de procedimientos distintos, que constituyen por sí mismos casi una especialidad.

En algunos casos resulta importante la obtención y registro de las indicaciones en forma automática; para ello hay sistemas electrónicos que se ocupan de su cómputo, mediante barridos de un haz de laser sobre la superficie ensayada. Esto conduce a completar el proceso de automatización total, que puede disminuir costos en ensayos rutinarios de grandes producciones. En cuanto a métodos distintos de los más habituales utilizados, está el de líquido para aplicación en materiales a alta temperatura o aquellos para pulverización electrostática, de utilidad en piezas de gran tamaño. Para la obtención de réplicas como registro de la indicación, existen reveladores que forman una película pelable.

Una preocupación actual, es la determinación de los umbrales de detección (sensibilidad), especialmente en cuanto a la mención de escalas y asignación de relaciones de "sensibilidad" que efectúan las firmas proveedoras para los distintos productos que fabrican, comprándolos entre sí sin existir un patrón preestablecido al respecto.

Los líquidos penetrantes hoy día, se muestran como un END de bajo costo, de rápida aplicación, confiable, efectivo para múltiples usos y su futuro próximo no presenta modificaciones intrínsecas a las ya anteriormente señaladas.

METODOS VISUALES:

Los endoscopios, tanto los de fibra óptica como los rígidos son ampliamente conocidos, y su adelanto aunque limitado,

se ha producido principalmente en el plano tecnológico, al aumentar su sensibilidad de detección.

En relación a años anteriores, existen actualmente diferencias en cuanto a las exigencias en los ensayos visuales realizados en la industria. En los códigos de aplicación, los requerimientos son más acotados para cada caso, así como las exigencias durante la inspección que también se han incrementado, y para lo cual se redactan habitualmente procedimientos escritos delimitando claramente los parámetros para una aplicación dada.

Entre los métodos visuales se incluye también la interferometría holográfica la cual ha tenido gran auge ultimamente aunque su costo es demasiado elevado para que se generalice su uso plenamente.

CONCLUSION:

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 ejemplo:

- Los ensayos de emisión acústica.
- La holografía acústica y óptica.
- Los métodos basados en radiación infrarroja.
- La radiografía de alta definición.
- La neutronradiografía.
- Métodos automáticos por corrientes parásitas y ultrasonidos. (para ensayo de tubos de generadores de vapor en servicio, etc.)

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.

Al hacer un análisis prospectivo de los 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 tecnología.

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

Con referencia al primer aspecto está claro que el problema central de los 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.

Si consideramos ahora el segundo aspecto, o sea los END dentro del Sector industrial convencional, debemos tener presente que los END han 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, por las exigencias contractuales a que se verá expuesto.

Tal vez un camino adecuado para abreviar las actuales dificultades y ofrecer mejoras, se encuentra en la investigación y desarrollo, responsable de la provisión de las herramientas que permitan al empresario obtener los apropiados niveles de calidad.

Dentro de una amplia perspectiva se pueden identificar las siguientes necesidades básicas a satisfacer en un futuro próximo.

- Mejorar cualitativamente y cuantitativamente el conocimiento de los END como la disciplina tecnológica a nivel gerencial.
- Mejorar cualitativamente y cuantitativamente el entrenamiento de personal en END, introduciendo su enseñanza sistemática a nivel técnico y universitario.
- Aumentar la precisión del límite de detección de las técnicas aplicadas, mejorando los sistemas de calibración.
- Perfeccionar los sistemas de procesamiento de la información a fin de independizarla de factores subjetivos inherentes al operador.