

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Plan de formación en Volkswagen Navarra-
Ensayos no destructivos para
localización de grietas en piezas
estampadas



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Alicia Goñi Córdoba

Javier Fernandez Carrasquilla

Pamplona, 30 de mayo 2014



Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Prácticas curriculares	1
1.2.	El consorcio Volkswagen	1
1.2.1.	Historia	1
1.2.2.	Situación actual	2
1.3.	Volkswagen Navarra.....	3
1.3.1.	Historia de la fábrica	3
1.3.1.1.	Era AUTHI	3
1.3.1.2.	Era SEAT.....	5
1.3.1.3.	Era Volkswagen	7
1.3.2.	Sistema productivo.....	9
1.3.2.1.	Revisión final	9
1.3.2.2.	Montaje.....	10
1.3.2.3.	Motores.....	11
1.3.2.4.	Pintura.....	13
1.3.2.5.	Chapistería.....	14
1.3.2.6.	Prensas	15
2.	Proceso de estampación	18
2.1.	Introducción	18
2.2.1.	Juego	32
2.2.2.	Fuerza de corte.....	34
2.3.	Doblado y/o curvado.....	36
2.3.1.	Factores doblado.....	37
2.3.2.	Fuerza doblado.....	40
2.4.	Embutido	41

2.4.1.	Introducción	41
2.4.2.	Fuerza embutición.....	43
2.4.3.	Embutición en varias etapas	44
2.4.4.	Problemas.....	46
2.4.5.	Otras operaciones de conformado de láminas en prensas.....	47
2.5.	Troqueles.....	50
2.5.1.	Troqueles Volkswagen	51
3.	Problema a resolver: Detección de grietas	55
4.	Ensayos no destructivos (END).....	68
4.1.	Conceptos generales	68
4.2.	Calidad en los END	71
4.3.	Técnicas de inspección superficial	73
4.3.1.	Inspección visual	73
4.3.2.	Líquidos penetrantes.....	74
4.3.3.	Partículas magnéticas.....	77
4.3.4.	Corrientes inducidas.....	81
4.3.5.	Termografía infrarroja.....	85
4.4.	Técnicas de inspección volumétrica.....	89
4.4.1.	Radiografía industrial	89
4.4.2.	Ultrasonidos	92
4.4.3.	Emisión acústica	97
4.4.4.	Resonancia acústica	100
4.5.	Análisis END.....	102
5.	Grupo I: Termografía Infrarroja y Resonancia Acústica	104
5.1.	Termografía Infrarroja (TIR)	104
5.1.1.	Introducción	104
5.1.2.	Termografía activa.....	106

5.1.2.1.	Introducción	106
5.1.2.2.	Técnicas de estimulación	108
5.1.2.2.1.	Introducción	108
5.1.2.2.2.	Termografía pulsada	109
5.1.2.2.3.	Lock-in	112
5.1.2.2.3.1.	Termografía con excitación láser	113
5.1.2.2.3.2.	Termografía ultrasónica o vibro termografía	114
5.1.2.2.3.3.	Termografía por inducción	116
5.1.2.3.	Procesamiento de imágenes termográficas.....	117
5.1.2.3.1.	Método de procesamiento por contraste térmico	117
5.1.2.3.2.	Filtrado 3D	120
5.1.2.3.3.	Termografía de fase pulsada (PPT, Pulsed Phase Thermography).....	121
5.1.2.3.4.	Reconstrucción de señales termográficas (TSR, Thermographic Signal Reconstruction)	122
5.1.2.3.5.	Termografía de componentes principales	124
5.1.2.3.6.	Redes neuronales	124
5.1.2.3.7.	Comparativa	126
5.1.3.	Solución planteada.....	127
5.2.	Resonancia acústica	128
5.2.1.	Introducción	128
5.2.2.	Ensayo mediante resonancia acústica	129
5.2.2.1.	Introducción	129
5.2.2.2.	Métodos para identificar frecuencias de resonancia.....	131
5.2.2.3.	Métodos de medida	132
5.2.2.4.	Análisis modal.....	133
5.2.2.4.1.	Introducción	133
5.2.2.4.2.	Visión general del análisis modal experimental.....	134
5.2.2.4.3.	Supuestos básicos del análisis modal.....	135

5.2.2.4.4.	Dominio del tiempo. Función de respuesta de impulso.	135
5.2.2.4.5.	Dominio de la frecuencia. Función de respuesta de frecuencia.	136
5.2.2.4.6.	Dominio de Laplace. Función de transferencia	137
5.2.2.4.7.	Fundamentos del análisis modal experimental	138
5.2.2.4.7.1.	Transformada rápida de Fourier	139
5.2.2.4.7.2.	Función de respuesta de frecuencia	140
5.2.2.4.8.	Sistema ideal para un análisis modal experimental.....	141
5.2.3.	Solución planteada.....	142
6.	Grupo II: Ultrasonidos y Visión Artificial	143
6.1.	Ultrasonidos	143
6.1.1.	Phased-array	148
6.1.2.	NCU.....	149
6.1.3.	Ultrasonidos VW Navarra.....	152
6.1.4.	Prueba ultrasonidos	154
6.2.	Visión artificial.....	154
6.2.1.	Introducción	154
6.2.2.	Tipos de cámaras.....	157
6.2.2.1.	Cámaras lineales.....	158
6.2.2.2.	Cámaras matriciales	159
6.2.2.3.	Cámaras color.....	160
6.2.3.	Visión artificial como ensayo no destructivo	161
6.2.4.	Sistema de detección: solución planteada.....	162
6.2.4.1.	Detección grietas en puertas	163
6.2.4.2.	Detección de grietas en otras piezas.....	169
7.	Conclusiones.....	171
8.	Bibliografía	172

Resumen

En este trabajo se realiza un análisis de los diferentes ensayos no destructivos con la finalidad de introducir un sistema de detección de grietas en piezas estampadas a la salida o en el interior de la prensa, entre dos estampaciones consecutivas de la misma, el control de las piezas formará parte del proceso productivo en serie en el que se producen. Este sistema de detección tiene que analizar la totalidad de la producción y no realizar un análisis aleatorio de las piezas que salen de la prensa. De cada ensayo no destructivo se analizarán las ventajas e inconvenientes descartando aquellos cuya implantación no es posible. Por lo que las posibilidades de dispositivos de control de las grietas se basarán en cuatro de estos ensayos: termografía infrarroja activa, resonancia acústica, ultrasonidos y visión artificial.

Palabras clave: Detección, grieta, estampación, prensa, troquel, fisura, ensayo no destructivo, análisis, termografía activa, resonancia acústica, ultrasonidos, visión artificial.

1. Introducción

1.1. Prácticas curriculares

Este año 2014 es el primer año en el que es posible realizar unas prácticas curriculares, es decir, en lugar de elegir ciertas asignaturas optativas a cursar en la Universidad Pública de Navarra realizar un programa de formación en diferentes empresas con la posibilidad de realizar el Trabajo Fin de Grado (TFG) en ellas. Al formar parte de la primera generación de estudiantes que realizan el Grado en Tecnologías Industriales tanto este año como los cuatro anteriores han sido unos años llenos de cambios y novedades en el plan de estudios y en la forma de llevarlos a cabo.

Estas prácticas curriculares realizadas en el último semestre del Grado en Tecnologías Industriales tienen una duración de aproximadamente cuatro meses, en mi caso en concreto, las prácticas en Volkswagen Navarra comenzaron el 17 de febrero y terminan el 25 de junio, siendo la primera semana de este periodo una semana de formación general en la propia fábrica.

La forma de selección de las prácticas se realizó de acuerdo con el orden de expediente académico. Varios proyectos en diferentes departamentos de diferentes empresas eran propuestos a la universidad, y ésta nos los propuso a nosotros, los alumnos. De esta forma en una reunión en la Escuela en el orden de expediente cada alumno escogía el proyecto que más se ajustaba a sus preferencias e intereses.

De esta forma pude elegir el proyecto al que se refiere este documento: sistema de detección de grietas en piezas estampadas en Volkswagen Navarra. En la fábrica conté con la ayuda y apoyo de un tutor, Dr. Javier Lapeire, sin el cual el desarrollo del trabajo hubiera sido imposible.

1.2. El consorcio Volkswagen

1.2.1. Historia

Cuando Ferdinand Porsche presentó al gobierno alemán un proyecto para la construcción de un coche al alcance de cualquier persona en 1934 (Volkswagen significa literalmente “coche del pueblo”) empezó la historia de Volkswagen. Pasaron varios años hasta que se comenzó a vender el modelo definitivo, 1939, y durante la Segunda Guerra Mundial se fabricaron 75000 unidades militares y civiles. Cuando finalizó el conflicto bélico se creó la fábrica de Wolfsburg donde se reanudó la producción del “Kafer”, escarabajo, como ya se le conocía en Alemania.



Figura 1. Producción del Käfer, primer modelo de la marca Volkswagen [19]

En los seis primeros meses se fabricaron 1785 coches, desde entonces el aumento de producción y el crecimiento de las ventas fue enorme, en 1955 ya se habían alcanzado casi el millón de unidades.

Desde el principio la innovación es una de las principales características que definen a Volkswagen, como se ve reflejado en sus modelos.

Un espíritu que continua vigente en la mayoría de los modelos del Consorcio, como la fabricación en serie del primer coche con carrocería en aluminio, el Audi A2, o la experimentación en motores de bajo consumo tanto de gasolina (inyección directa FSI) como diésel (TDI con sistema inyector-bomba).

1.2.2. Situación actual

El Grupo Volkswagen, cuya sede, como se ha comentado previamente, se encuentra en Wolfsburg, es uno de los productores líderes de la industria del automóvil en el mundo y es el mayor fabricante de automóviles de Europa. Consta de 105 plantas por todo el mundo donde se producen una gran variedad de modelos de automóviles con diferentes características que se comercializan en 154 mercados diferentes y que satisfacen las necesidades de cada cliente.

Trece marcas procedentes de seis países europeos componen el Grupo Volkswagen: Volkswagen, AUDI, Bentley, Bugatti, Lamborghini, SEAT, Skoda, Scania, MAN, Porsche, Ducati, Volkswagen Vehículos Comerciales y Volkswagen Finance. Cada Marca mantiene su propio

carácter y opera independientemente en el mercado aunque todas las marcas del Grupo tienen un objetivo común: producir vehículos atractivos, seguros y respetuosos con el medio ambiente.

1.3. Volkswagen Navarra

1.3.1. Historia de la fábrica

Volkswagen Navarra es la fábrica líder del nuevo Polo, conocido también como Polo "A05" o Polo de 5ª generación.

La historia de esta fábrica se divide en tres grandes etapas o eras, la era Authi, que transcurrió entre 1965 a 1975, la era Seat comprendida entre 1976 y 1983, y la era Volkswagen que comenzó en 1984 y todavía continúa. Desde sus inicios ha sido el motor principal de la economía navarra y ha experimentado un importante desarrollo a lo largo de su evolución y del paso del tiempo.

1.3.1.1. Era AUTHI

La actual fábrica de VOLKSWAGEN Navarra tiene su origen en 1965, cuando la empresa de motores y cambios "Nueva Montaña Quijano" contactó con la British Motor Corporation para proseguir su actividad industrial de producción de coches. El marqués Eduardo Ruiz de Huidobro Alzuren que era presidente de "Nueva Montaña Quijano" fue el principal responsable de la creación de la fábrica.



Figura 2. Fábrica Landaben en la era AUTHI [20]

De esta manera nació en Pamplona Automóviles de Turismo Hispano Ingleses (AUTHI).

El 24 de agosto de 1965 se inician las obras de construcción de la planta de AUTHI en Landaben. Pamplona es el lugar adecuado para esta fábrica, en primer lugar, por las exenciones fiscales y el suelo facilitado por la Diputación Foral de Navarra, y además por su privilegiada situación geográfica.

Se hizo efectiva la contratación de 500 trabajadores. El 30 de septiembre sale el primer coche de la fábrica: un Morris 1100. El automóvil fue regalado a la hermanitas de los Pobres de la mano del Marqués de Huidobro.

Antes de fin de año se inició la producción en cadena. En aquel momento, trabajaban en la factoría 1000 personas.

En el año siguiente, octubre de 1967, se presentó el segundo modelo, el MG 1100, de mayor potencia que su predecesor. La aparición de "Sedán Deportivo" MG 1100 provocó una auténtica sensación entre la crítica, que no escatimó en dedicarle todo tipo de elogios



Figura 3. Modelos producido (Mini) y extensión de la fábrica [20]

A mediados de diciembre se hizo público el lanzamiento, previsto para 1968, de cuatro nuevos modelos Morris Traveller 1100, Furgón, Mini y Mini Cooper. El año se cerró con un aumento de la producción del MG 1100 debido a la gran aceptación suscitada.

En el mes de julio de 1969 la multinacional British Leyland adquirió el 50% de AUTHI a Nueva Montaña Quijano, de modo que la compañía inglesa se hizo cargo de la dirección de AUTHI.

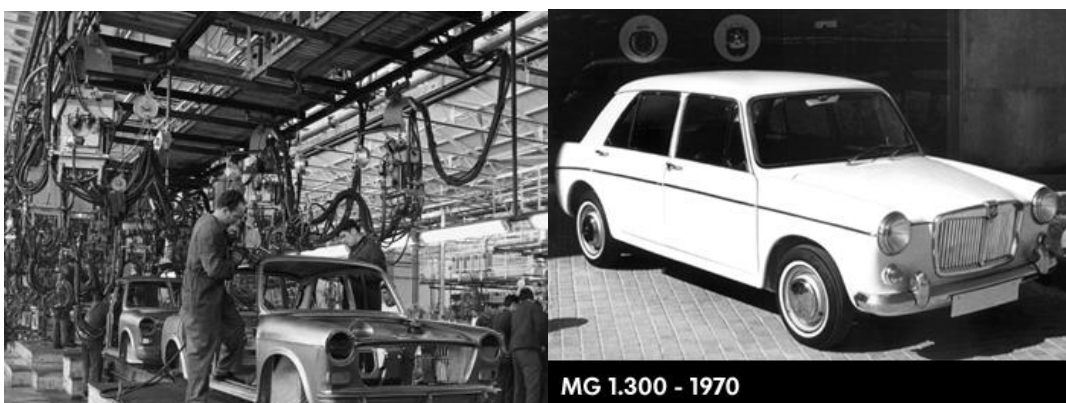


Figura 4. Producción en la era AUTHI de los nuevos modelos [20]

Finalmente, British Leyland, en 1973, pasó a controlar el 98% del capital de la empresa. El sector inglés del automóvil sufrió una grave crisis que no solo imposibilitó la expansión de la planta de Pamplona sino que hizo peligrar la supervivencia de la firma inglesa.

A partir de 1974 empezaron a aparecer problemas dentro de la fábrica, incluso hubo un incendio en octubre de ese mismo año el cual agravó la ya de por sí preocupante situación. En febrero de 1975, se decidió la suspensión de pagos. Esta situación provocó la compra de Authi por Seat.



Figura 5. Incendio de 1974 [20]

1.3.1.2. Era SEAT

En enero de 1976 sale de la fábrica el primer modelo de Seat, un 124 D. Habían transcurrido menos de 7 meses desde la compra de las instalaciones por parte de Seat.



Figura 6. Producción de la marca SEAT en la fábrica de Landaben [20]

En este momento, SEAT era una de las cinco firmas fabricantes de automóviles que trabajaban en España y la número uno en cuanto a producción. Se constituyó en 1950 con un capital de 600 millones, propiedad de una sociedad formada por el INI (51%), accionistas particulares (42%) y FIAT (7%). La superficie de la planta de Pamplona era de 470000 metros cuadrados.

Entre 1978 y 1979, con el objetivo de lanzar un nuevo modelo, se ampliaron al otro lado de la vía las instalaciones de la factoría. SEAT adquirió una importante responsabilidad al fabricar en Pamplona, por primera vez, un modelo Lancia fuera de Italia. De hecho, la marca italiana se había convertido en toda una leyenda en el mundo del automóvil.



Figura 7. Aspecto de la fábrica 1978-1979 [20]

La finalización de las obras de ampliación en Landaben coincidió con el lanzamiento del Panda.

El lanzamiento del llamado "coche de la crisis" fue uno de los acontecimientos automovilísticos del año ya que, según se afirmaba, iba a gozar de una larga vida y ayudaría a SEAT a subsanar sus males económicos.



Figura 8. Seat Panda [20]

Ya en los primeros meses de 1981 el Panda era el coche más vendido en España.

En junio SEAT y FIAT llegaron a un acuerdo por el que la empresa italiana rompía sus vínculos tecnológicos y accionariales, y cedía todo su capital en SEAT al INI. De este modo las relaciones entre las dos firmas llegan a su fin. Un año después de su lanzamiento, en septiembre, el Panda se consolidaba como el líder indiscutible de ventas. Lo que se consideraba como una "auténtica irrupción"; se traducía ya en más de 50.000 unidades matriculadas, y otras tantas exportadas.

1.3.1.3. Era Volkswagen

El último día del mes de septiembre de 1982 se firmó en Madrid un acuerdo entre el INI y VOLKSWAGEN que contemplaba la fabricación en Landaben de las 90000 unidades de los modelos Polo-Derby de la multinacional alemana. Dicho acuerdo suponía la llegada del grupo alemán a la Comunidad Foral.



Figura 9. Aspecto de la fábrica al comienzo de la era Volkswagen [20]

El acuerdo firmado consideraba la fabricación de otras 30000 unidades del modelo Santana en régimen de CKD (montaje en España de los componentes totalmente fabricados en Alemania).

El 29 de abril de 1983 salió el último modelo SEAT Panda de las instalaciones de Landaben. Era la unidad 149872 desde que en febrero de 1980 SEAT iniciara la fabricación de este utilitario que ahora se produciría exclusivamente en Barcelona.

El mes de febrero de 1984 marcó la fecha de inicio de la fabricación del Polo con los nuevos equipos de Landaben. Entre las inversiones realizadas, destacó la adquisición de veintiséis robots para las líneas de soldadura de las carrocerías y el reacondicionamiento de la nave de pintura.

Como paso previo al inicio de las inversiones previstas por parte de VOLKSWAGEN, a lo largo de 1986, se produjo la compra de acciones de SEAT por parte de VOLKSWAGEN hasta alcanzar el 75% del capital. En este mismo año, la fábrica de Landaben recibió el Premio Mundial de Calidad (Q-86).



Figura 10. Polo en VW Navarra [20]

En 1989 se alcanzó una producción de 638 coches/día, con una plantilla de 2518 personas. En marzo se dio a conocer la noticia de que el Polo Coupé, hasta el momento fabricado en Wolfsburg y Landaben, se produciría exclusivamente en Pamplona. En mayo de 1989 se implantó el sistema Just in Time para el envío secuenciado de asientos a la planta.

En septiembre de 1992 se traspasó a la planta de Pamplona la fabricación total del Polo.



Figura 11. Nueva línea de prensas en 1993 [20]

El 23 de diciembre de 1993, se constituyó la Fábrica Navarra de Automóviles, S.A., la nueva sociedad que gestionaría la factoría de Landaben, desvinculándose totalmente de SEAT a efectos productivos.

La producción del Polo A02 cesó en mayo de 1994. Quince días más tarde comenzó la fabricación del nuevo modelo Polo A03, un vehículo de mayor habitabilidad que su antecesor, cuyo primer ejemplar salió en junio. Este hecho coincidió con la adquisición por parte de VOLKSWAGEN del 100% de las acciones de Fábrica Navarra de Automóviles, S.A.



Figura 12. Dibujo nuevo Polo [20]

Tras cinco años con el modelo Polo A03 y un total de 1400000 unidades vendidas, en julio de 1999 se lanzó el nuevo Polo A03 GP. La producción del primero continuó hasta noviembre, dado su éxito comercial.

En 2001 se comenzó la fabricación del modelo Polo A04, coche que se presentó en el salón de Frankfurt el fatídico día 11 de septiembre. Este año se invirtió la tendencia en cuanto a niveles de producción, y comenzó un descenso continuado en el número de coches que se fabricarán los próximos años.

El año 2002 estuvo marcado por la confirmación de la tendencia ya apuntada en el año 2001 de un descenso de la demanda en el mercado europeo de automóviles.

El 14 de Marzo de 2005 comenzó el lanzamiento a régimen del modelo POLO A04-GP, habiéndose iniciado la fabricación de las primeras unidades de Preseries y Series 0, en septiembre de 2004.

El 3 de marzo de 2009 es presentado el nuevo Polo A05. En Mayo comienza su producción en serie, habiendo sido producidas 979088 unidades del modelo A04.

Durante mi estancia en la fábrica se produjo el cambio en el modelo producido ya que se dejó de producir el Polo A05 para producir el PoloA05 GP.

1.3.2. Sistema productivo

Para explicar el sistema productivo comenzaré la explicación por el final terminando con el taller de prensas, donde comienza todo el proceso productivo y en el cual me centraré más ya que es el área en el que he realizado mis prácticas y en la que se centra este trabajo.

1.3.2.1. Revisión final

Una vez que el automóvil se ha montado completamente (en el taller de montaje, explicado a continuación), ya sólo resta probarlo y que Calidad dé su visto bueno. Verificar el correcto funcionamiento de los elementos eléctricos y mecánicos, detectar posibles ruidos y entradas

de agua o retocar las posibles anomalías son, entre otros, los cometidos del Taller de Revisión Final.

Con una superficie de 13602 m² y una capacidad para probar 1550 coches diarios en tres turnos, la nave está dividida en dos zonas de trabajo por las que pasan la totalidad de vehículos. En la primera se hacen diferentes pruebas y ajustes de los componentes del vehículo, y en la segunda se lleva a cabo el retoque de las posibles anomalías detectadas (zona de retrabajos).



Figura 13. Motor del Polo en Revisión Final [20]

1.3.2.2. Montaje

En el Taller de Montaje se completa el vehículo, añadiendo a la carrocería ya pintada los componentes exteriores e interiores elegidos por el cliente. Su construcción se inició en 1979. Esta nave tiene una superficie total de 36125 m² y se trata del taller con mayor número de trabajadores, quienes utilizando una moderna tecnología, son imprescindibles para obtener un producto de calidad dentro de un marco de protección medioambiental y prevención de riesgos laborales.



Figura 14. Línea en la nave de montaje [20]

El proceso comienza cuando la carrocería, que saliendo secuenciada del almacén del Taller de Pintura llega al punto de lanzamiento. El montaje se estructura en cuatro tramos paralelos, por los que el vehículo se traslada suspendido en un pulpo tradicional que discurre a lo largo de una cadena mecánica. Cuando llega al tramo cuatro, y una vez colocadas las ruedas, la carrocería abandona este sistema para ser trasladada por suelo. En las líneas de montaje se utilizan muebles específicos para suministros Justo a Tiempo (JIT). En cada tramo se adapta la altimetría de la línea a cada nuevo proceso de trabajo y así se obtiene una mejora considerable de la postura.

Del mismo modo, el Taller de Montaje respeta y cuida el Medio Ambiente con un sistema de recogida selectiva de residuos, tanto inertes como peligrosos. Además, en el Taller de Montaje se generan residuos peligrosos, fundamentalmente líquido de frenos, servodirección, anticongelantes, aceites y disolventes, combustibles, restos de pasta adhesiva, baterías de desecho y ceras. Para ellos se ha implantado un sistema de envasado, etiquetado y recogida específica, y son controlados de modo especial.

1.3.2.3. Motores

El Taller de Motores de VOLKSWAGEN Navarra comienza su fabricación en serie en el año 1991, y desde 1994 se incorporan los medios necesarios para montar todo el conjunto motopropulsor (Triebsatz). Cuatro años más tarde se traslada a la nave la Línea de Guarnecido de Puertas procedente del Taller de Montaje.

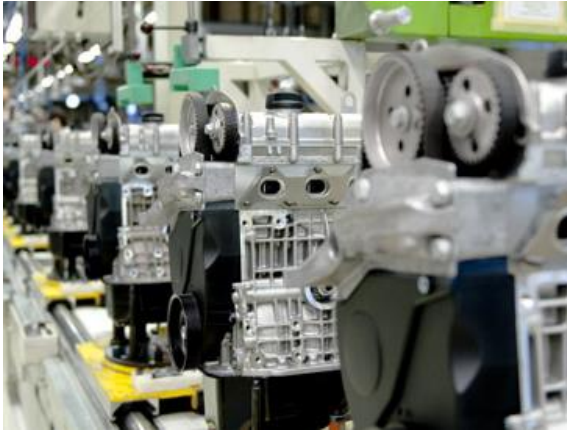


Figura 15. Línea de motores [20]

Con una superficie de 23400 m², de los cuales 20475 m² se dedican a producción, y una avanzada tecnología, el Taller de Motores es uno de los más modernos de Europa, donde el transporte y la fabricación son seguros y silenciosos. La nave de Motores se estructura fundamentalmente en tres áreas: la Línea de Montaje Motor y los Bancos de Rodaje, la zona de Montaje del Conjunto Motopropulsor (Triebwek) y conjunto Mecánico (Triebsatz) y por último, las Líneas de Guarnecido de Puertas.

En septiembre de 1998 se traslada al Taller de Motores la Línea de Guarnecido de puertas, hasta entonces ubicada en el Taller de Montaje. A su entrada en este último, las puertas son desmontadas de la carrocería y colocadas sobre unos ganchos de transporte (balancinas) que las envían al Taller de Motores para completarlas.



Figura 16. Línea de montaje de puertas en la nave de motores (20)

La Línea de Puertas tiene una longitud de 120 m. y su capacidad de producción es de 1250 conjuntos (puertas izquierda y derecha) por día. En ella se montan los cristales, burletes (marco circundante de goma), espejos exteriores, instalación eléctrica, altavoces, insonorizantes, paneles, tiradores, manillas etc.

La segunda Línea de Puertas, inaugurada en 1999, mide alrededor de 90 m., y tiene una capacidad de producción de 420 conjuntos.

Finalmente, en ambas líneas se comprueba el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas de las puertas mediante la prueba de "Ecos". Después son devueltas a Montaje a través del Túnel de Enlace entre ambas naves, y se ensamblan definitivamente al vehículo.

1.3.2.4. Pintura

El proceso de pintado, uno de los más complejos y delicados en la producción de un automóvil, se divide fundamentalmente en dos fases.



Figura 17. Pintura [20]

En la primera (Taller2), la carrocería recibe tratamientos que la protegen y hacen resistente a las agresiones externas, con los que se facilita, además, la adherencia posterior de la pintura.

En la segunda fase (Talleres 2A y 2B) se aplican masillas de sellado, el PVC, el color y por último la cera de protección de huecos.

En Octubre de 2006 se cambió el proceso de pintado convencional en base disolvente por el proceso 2010, caracterizado por la desaparición de la capa de imprimación y por la utilización de pinturas al agua.

La capacidad productiva de Pintura es de 1.500 carrocerías/ día.

1.3.2.5. Chapistería

En el Taller de Chapistería tiene lugar la unión de las diferentes piezas de chapa procedentes de Prensas y otros proveedores externos para conformar la carrocería del coche. Este proceso tiene lugar en dos talleres, el Taller 1 y el Taller 1B. El primero se dedica a la construcción de la carrocería sin elementos móviles y consta a su vez de dos fábricas con una capacidad de producción de 775 carrocerías diarias cada una. En el taller 1B se ensamblan las partes móviles.

La actividad llevada a cabo en Chapistería se caracteriza por su alto grado de automatización, entorno al 95%: 439 robots (Taller 1) y 95 (Taller 1B) se encargan de manipular, soldar y aplicar masillas. Para el actual modelo se fabrican ocho tipos de carrocerías diferentes, resultado de la combinación de cuatro techos (normal, abrible, Cross normal y Cross abrible) y dos versiones de laterales (2 o 4 puertas). A las soldaduras por resistencia, MIG, láser y remachado ya existentes para el modelo A03, se añadieron nuevos tipos de uniones de chapa con el A04: láser con aportación de material y clinchen.



Figura 18. Robots de chapistería [20]

La soldadura láser consigue mayor precisión en el cordón que la tradicional por puntos y las características mecánicas de la chapa son mejores. Por otro lado, la soldadura láser trabaja a mayor velocidad, permite acceder a zonas a las que una pinza tradicional no llega, y hace posible soldar tres y hasta cuatro chapas con garantía total. El láser con aportación suelda el techo con el lateral en una unión perfecta. Así se elimina el sellado posterior con PVC y la moldura del techo, lo cual supone una mejora estética en el coche.

La tecnología clinchen se utiliza en capós y portones. Consiste en presionar los materiales que se van a soldar, previamente colocados sobre una matriz, con la ayuda de un punzón redondo. De este modo se obtiene una unión limpia que aumenta el poder anticorrosivo de la chapa, sin ninguna rebaba o canto afilado. En general, se trata de una tecnología de menor impacto

medioambiental, puesto que no desprende partículas ni humo, y conlleva un menor gasto de gas y agua.

1.3.2.6. Prensas



Figura 19. Plano de la fábrica de VW Navarra

El primer paso para iniciar el proceso de producción de un automóvil es la estampación de las piezas de la carrocería. Esta operación se realiza en el Taller de Prensas de Volkswagen Navarra desde el año 1994, cuando comenzó la fabricación del modelo Polo A03.

Desde finales del año 2000 y durante el 2001 la nave de Prensas se ha ampliado con el fin de adaptar el proceso de estampación a las características del nuevo modelo Polo A04. Así ha pasado de ocupar una superficie de 8432 m² a 12604 m². Antes de la ampliación, la producción del Taller era de 27000 piezas/día en tres turnos. Actualmente se fabrican 34000 piezas. A las dos prensas anteriores de 38000 KN de fuerza de prensado cada una, se ha incorporado una línea de prensas de 81000 KN que se extiende a lo largo de 53 m. y ronda las 3000 Tm de peso, es en esta prensa en la que centraremos el estudio, es conocida como la prensa Erfurt. Con ella se estampan piezas de gran volumen, como laterales (dos y cuatro puertas), techo (normal y abrible) y aletas (izquierda y derecha de un solo golpe). Para el A05 los cuatro revestimientos de puertas se hacen de un solo golpe.

La materia prima son los desarrollos de chapas suministrados por un proveedor externo ya cortados y colocados en pallets específicos que contienen entre 400 y 500 unidades.

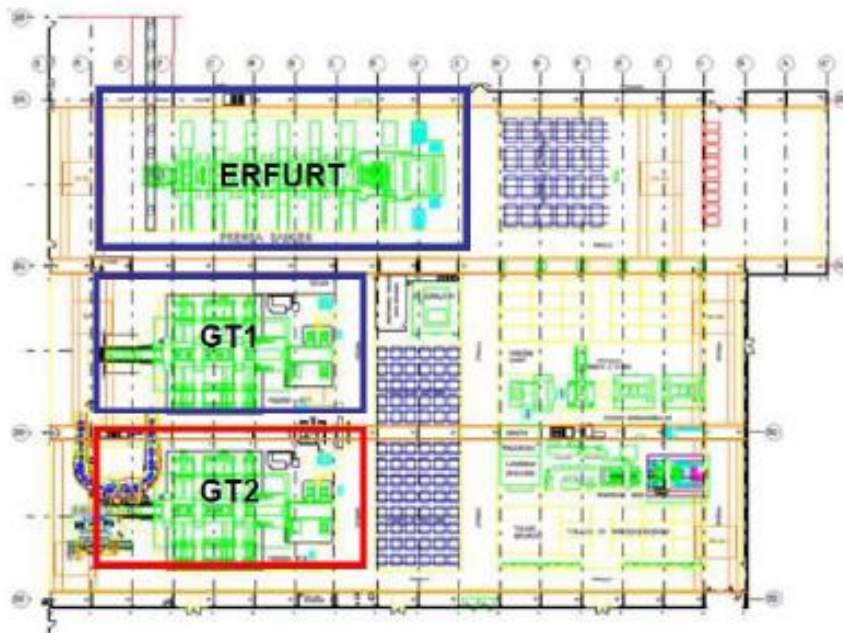


Figura 20. Plano nave de prensas



Figura 21. Salida de la prensa GT1 [20]

El proceso de estampación comienza con la colocación, en las mesas de cambio, del juego de troqueles en función de la pieza que se quiere obtener. El troquel es la herramienta más importante del Taller, ya que se encarga de embutir, cortar, punzonar y conformar los desarrollos de chapa hasta configurar la pieza definitiva.

Cada vez que se va a producir una pieza diferente es necesario un cambio de troqueles. Este proceso es automático y se realiza en un tiempo no superior a siete minutos en las prensas GT

y 16 minutos en la prensa Erfurt, que como ya se ha comentado anteriormente es en la que se centrará el TFG. Mientras un juego se retira de la prensa, el siguiente se introduce y se acopla para comenzar a producir. Con el fin de facilitar el traslado de troqueles se utilizan seis puentes grúa.



Figura 22. Transporte de un troquel de la Erfurt mediante el uso de un puente grúa[20]

Al ser el troquel la herramienta vital para la conformación y acabado de las piezas, su mantenimiento y puesta a punto cobran gran importancia. Para ello son necesarios, entre otros equipos, el lavadero de matrices, la fresadora-copiadora, el torno, el horno para tratamientos térmicos, los equipos de soldadura y la prensa-plegadora, además de cuatro prensas de puesta a punto para el ajuste de los troqueles.

Una vez seleccionados los troqueles y puestos a punto, se introducen en la prensa. La alimentación de chapa es automática, por medio de imanes que recogen los desarrollos. Antes de su estampación en la prensa, la materia prima debe estar limpia, para lo cual se ha instalado una lavadora o cepilladora de desarrollos.

La prensa Erfurt está preparada para trabajar con aluminio, gracias a que se añaden unas ventosas a su sistema de alimentación magnético. La chapa pasa por diferentes estaciones donde se efectúan las operaciones precisas para obtener su forma definitiva. Cada prensa cuenta con un transfer encargado de recogerla, pasarla por las estaciones y depositar la pieza terminada en la cinta de salida. Este proceso se lleva a cabo de forma mecánica en las prensas GT. El transfer, accionado por un sistema de levas, se desplaza horizontalmente y en paralelo al suelo. Así, mediante unos brazos recoge el desarrollo de una estación, sube 250 mm y avanza hasta la siguiente estación bajando a su vez y depositando la pieza en la siguiente fase del proceso. Finalmente, retrocede para volver al punto de partida. Mientras, en la prensa Erfurt, el transporte de piezas se realiza con un transfer eléctrico que permite que cada prensa

lleve un ritmo de trabajo distinto. El transporte de pieza de una estación a otra se realiza a través de ventosas con accionamiento neumático.

Una vez terminadas las piezas, éstas se cargan en contenedores específicos manualmente a través de una cinta de salida de 10 m de longitud en la prensa GT1, automáticamente por medio de unos robots, en la prensa GT2 y por un operador logístico en el caso de la prensa Erfurt. En el modelo A05 se incorpora un tercer robot en la GT2 para apoyo de los otros dos ya existentes.



Figura 23. Descarga automática de la prensa GT2 [20]

Un operario revisa el producto a la salida de la línea según unas pautas de control establecidas. Los recortes sobrantes de los desarrollos en el proceso de estampación caen a través de unas tolvas a una cadena porta-retales situada en el sótano del Taller que los transporta hasta un contenedor con gran capacidad.

Por otro lado, parte de la producción de Prensas es enviada a otras factorías del Grupo Volkswagen.

2. Proceso de estampación

2.1. Introducción

El estampado es un proceso de fabricación que consiste en hacer caer un peso sobre una plancha metálica de manera que la plancha toma entonces la forma de las matrices que tiene por encima y por debajo de ella. Podemos definir el estampado como el conjunto de operaciones con las cuales sin producir viruta sometemos una lámina plana a ciertas transformaciones a fin de obtener una pieza de forma geométrica propia. Este proceso de fabricación es una de las tareas de mecanizado más fáciles que existen, y permite un gran nivel de automatización cuando se trata de realizar grandes cantidades de un producto.

Un ejemplo del proceso es el que aparece a continuación:



Figura 24. Pasos en la estampación

Actualmente se pueden estampar piezas hechas con chapas de distinto grosor, previamente soldadas entre sí.

El estampado puede realizarse en frío o en caliente, el estampado de piezas en caliente se llama forja, y tiene un funcionamiento diferente al estampado en frío, realizado en chapas normalmente.

El trabajo se realiza con troqueles en máquinas llamadas prensas (generalmente de movimiento rectilíneo alternativo). Las dimensiones de cada troquel de la Erfurt es de 4,5 m x 2,4 m, y la prensa tiene 81000KN de fuerza de prensado.

En el caso que nos ocupa nos centraremos en las piezas fabricadas en la prensa Erfurt, como ya se ha comentado anteriormente.



Figura 25. Exterior Erfurt que tiene 53 m de longitud

Las propiedades de la chapa vienen determinadas por los procesos previos de laminación y tratamientos térmicos a los que haya sido previamente sometida.

- Anisotropía: las propiedades no son iguales en todas las direcciones como consecuencia de la recristalización direccional durante la laminación (similar al fibrado direccional en forja).

- Estados tensionales variables en las distintas zonas de la pieza.

Características de los productos de chapa:

- Formas complejas con excelentes acabados superficiales.

- Piezas de elevada relación rigidez/peso.

- Alta productividad.

- Solo se justifican series largas (costes de utillajes y medios de producción)

Para definir el ciclo de troquelado es necesario:

1. Definir la forma de la pieza, que impone cierto número de operaciones, de acuerdo con su complejidad.
2. Determinar las dimensiones.
3. Conocer el material del que se hará la pieza, su plasticidad y elasticidad.

4. La posibilidad de extraer fácilmente la pieza de la matriz.

Quizá la principal característica de las piezas metálicas troqueladas es que, con unas cuantas excepciones, el espesor de la pared es esencialmente el mismo en toda la pieza. No se realizan repujados gruesos del tipo que se encuentra en muchos vaciados.

En Volkswagen Navarra, en todas las prensas, el proceso de estampación se realiza en frío, y en los próximos años no está contemplado el hecho de cambiar el sistema con el que se trabaja ya que esto supondría una inversión elevadísima y cambiar los procesos actuales.

En la conformación en frío se presenta una variación considerable de las características tecnológicas debido al endurecimiento en frío. La dureza, la resistencia a la rotura y el límite de fluencia o bien el límite elástico convencional de 0.2 aumentan, mientras que el alargamiento y la estricción de rotura disminuye. Naturalmente las piezas acabadas endurecidas en frío no deben exponerse a un tratamiento en caliente, ya que en este caso perderían otra vez las características de resistencia obtenidas.

En las piezas conformadas se presenta además, a menudo, una distinta rugosidad en las diferentes zonas de las superficies parciales, pueden indicarse solamente valores de dispersión para la rugosidad.

En general ha de procurarse en piezas prensadas en frío conseguir profundidades de rugosidad especialmente reducidas utilizando lubricantes y portalubricantes, sin medidas adicionales.

El estado superficial de la pieza en bruto de partida y sus superficies de separación (serrado, cizallado, etc.) tienen una influencia decisiva sobre la profundidad de rugosidad y la profundidad de alisado de la pieza conformada. Cuantas más operaciones de recalco y prensado se realicen en una pieza, tanto más favorable será el estado superficial, es decir, continuando el recalco, la rugosidad superficial se hace cada vez más reducida.

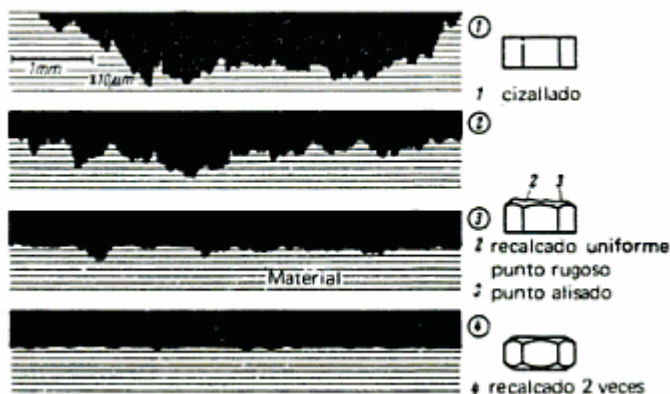


Figura 26. Estados superficiales, reducción de la rugosidad con el recalco

Para obtener una buena superficie definitiva es una condición importante el uso de lubricantes fluidos y en pocas cantidades. Al no tener en cuenta estas condiciones, los lubricantes forman huecos en la pieza a elaborar. Si se utilizan lubricantes sólidos en grandes cantidades, de modo que eviten el contacto total entre la herramienta y la pieza a elaborar, éstos forman la llamada “cama de lubricante” dentro de la que se presenta una rugosidad libre. Si el recalado se realiza con impactos, pequeñas cantidades de lubricante o bien lubricantes viscosos tienen ya el mismo efecto que los lubricantes sólidos.

El uso de lubricantes no solo mejora el acabado superficial de la pieza sino que favorece y evita la rotura en zonas de máxima deformación; de esta forma el uso de lubricantes evita o ayuda a evitar la aparición de grietas y fisuras tema que ocupa este trabajo.

El material que suministran los proveedores a VW Navarra viene ya con el lubricante aplicado, en este caso se utiliza un aceite, sin embargo, en piezas donde se prevé una gran deformación, es decir, un gran estiramiento, o a piezas que tienen mayor tendencia a la rotura se les aplica aceite al principio del proceso de estampación. El aceite se aplica a la pieza mediante una aceitadora situada al principio de la prensa, pueden aparecer suciedades en la pieza debido al uso del mismo.

El material se coloca para ser cargado en la prensa de la siguiente manera:

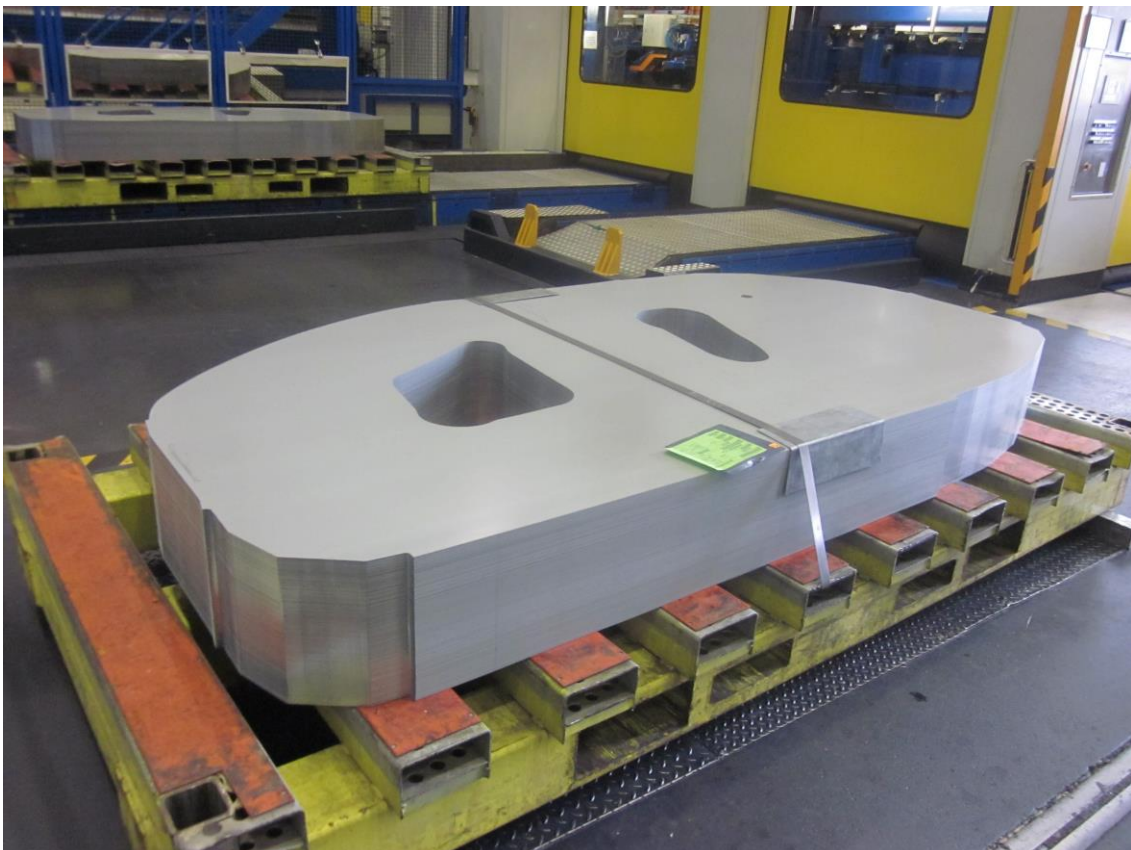


Figura 27. Estado inicial de chapas suministradas por el proveedor

Como se acaba de comentar los desarrollos de las imágenes ya están aceitados para evitar que aparezcan defectos en las piezas estampadas.

Otra mejora de la calidad superficial de piezas conformadas en frío (y en caliente) se consigue mediante un estampado adicional (estampado a medida o estampado alisado). En la práctica este estampado se conoce como calibrado.

En la conformación en frío las exactitudes de las medidas son, en general, más favorables que en el caso de la conformación en caliente.

Al determinar las medidas y las tolerancias de piezas estampadas debe tenerse en cuenta que la contracción y el desgaste de herramienta son causa de ciertas oscilaciones de medidas.

Las normas para configuración según fluencia pueden aplicarse también en este caso, pero no obstante han de ampliarse, ya que, por una parte, ha de tenerse en cuenta la conformación en frío y, por otra parte, las tensiones producidas en la zona de la superficie e inmediatamente debajo de ésta. Vértices agudos ocasionan tensiones máximas en las piezas solicitadas. En caso de una sollicitación dinámica estos vértices pueden causar la rotura prematura.

Cuanto menos agudo sea el vértice, cuanto mayor se elija el redondeamiento y más suave la transición de sección, tanto más favorable es el recorrido de la tensión. Al mismo tiempo se hace posible una fluencia libre del material, lo que lleva consigo ventajas de orden técnico y de fabricación. Desde el punto de vista técnico se recomienda prever grandes redondeamientos en todos los vértices y transiciones agudas.

Por las razones comentadas las grietas suelen aparecer en las mismas zonas, a las cuales llamaremos zonas críticas, en el caso que nos ocupa las grietas aparecen como máximo en tres zonas en cada pieza, estas son las que sufren mayor deformación, radios muy pequeños, etc. Las zonas críticas de las piezas estampadas en la Erfurt se concretarán en apartados posteriores, pero algún ejemplo son:



Figura 28. Ejemplos de zonas críticas

Esta clase de defectos tienen bastante importancia en la conformación en frío, ya que en este caso la separación de material sigue subsistiendo y las grietas no se sueldan luego, como en el caso de las piezas conformadas en caliente. Una formación de pliegues, debida a una incorrecta realización del recalado, puede reconocerse en muchos casos en la superficie de la envoltura de la pieza recalada, en otros casos, sin embargo, no es visible en el exterior. La

aparición de grietas transversales se observa frecuentemente cuando se ha utilizado un material de partida inadecuado con una insuficiente capacidad de deformación. Especialmente los materiales que tienen tendencia a la formación de grietas de cizallamiento son muy sensibles en el desbarbado y se agrietan a menudo en la forma descrita.

La experiencia, no obstante, ha demostrado que la aparición de grietas transversales no sólo depende de las características del material, sino también de las condiciones de fabricación.

Materiales utilizados en Volkswagen Navarra:

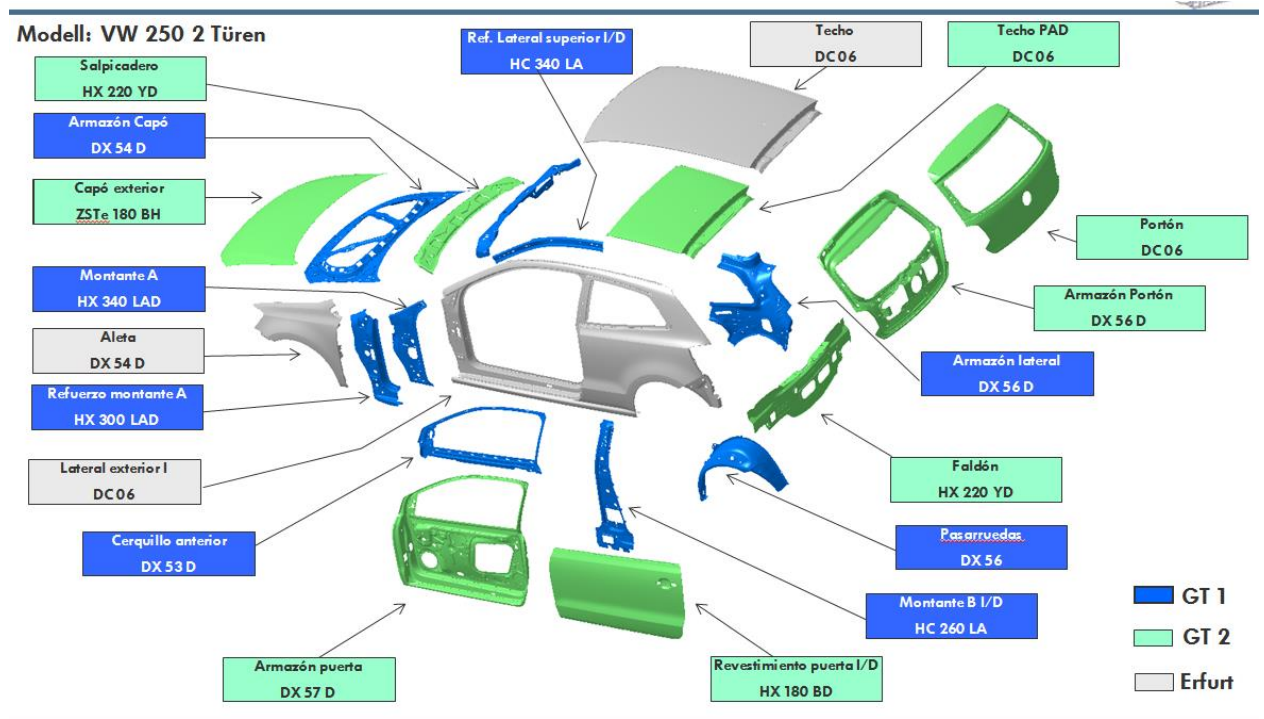


Figura 29. Materiales en el polo A05 2 puertas

Modell: VW 250 4 Türen

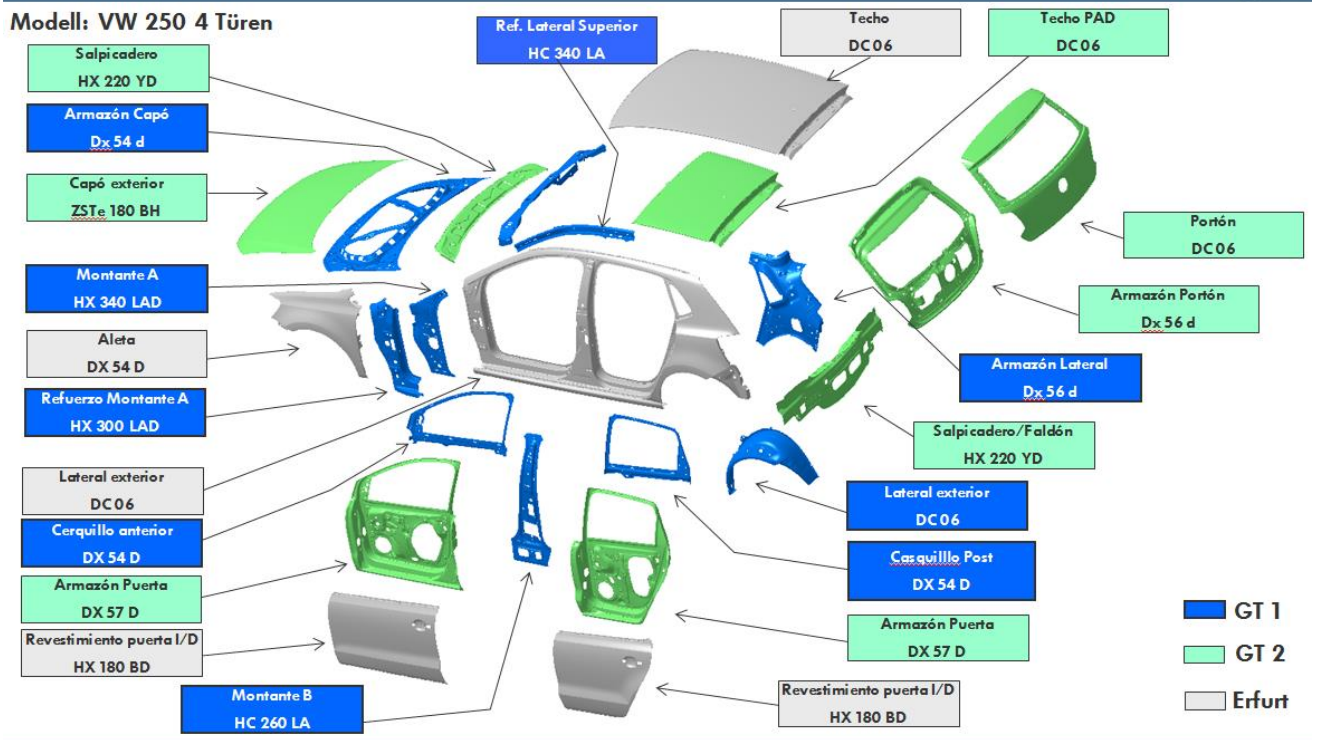

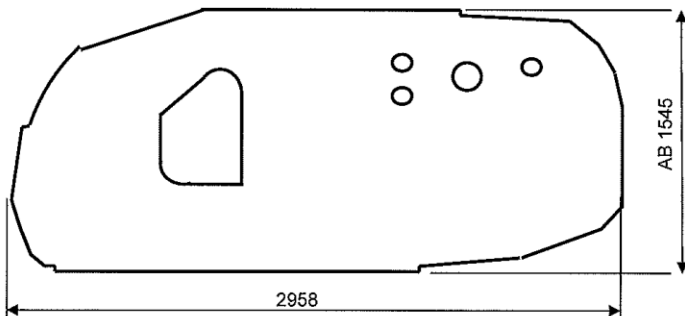
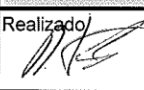
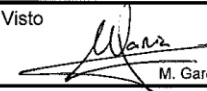

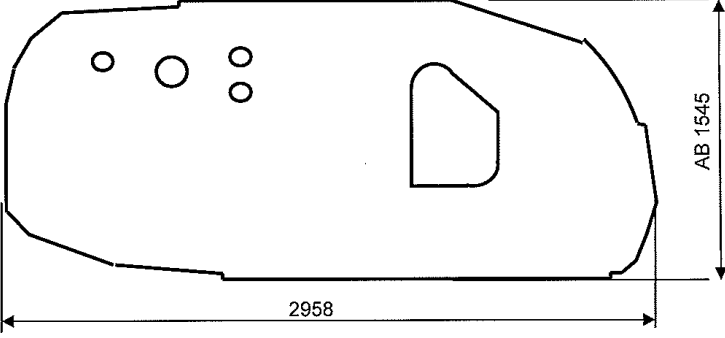



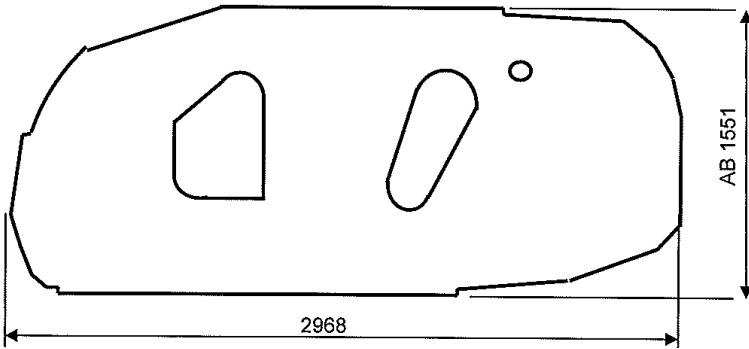





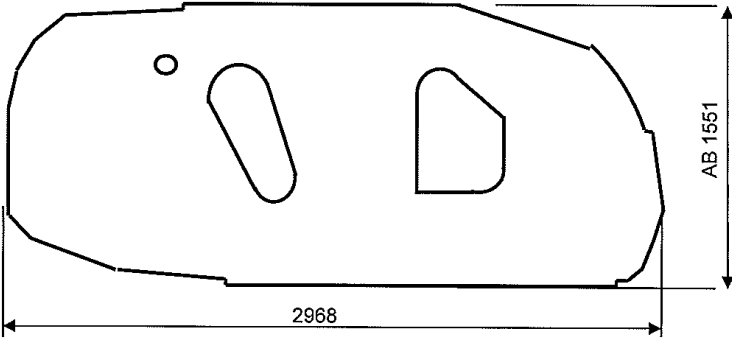


Figura 30. Materiales en el polo A05 4 puertas

Las fichas técnicas de las chapas que se utilizan en los procesos que trata este proyecto se encuentran a continuación con las características del material en cada caso.

 Volkswagen Navarra, S.A. Procesos Prensas/Chapistería		Hoja de Prescripciones Empleo de Materiales									
Fichas Técnicas:											
Modelo: VW 250			Clave 6R3.809.605 PLA			CALIDAD DC06 ZE 50/50 BPO (EN 10152)			Variante 1		
Nº	Clave	Denominación	Cara		Situación Pza.						
			Garantiz.	Ext.	Int.	Exterior	Interior				
1	6R3.809.605 A	LATERAL EXT IZQUIERDO	X			X					
Características mecánicas											
A%	Newtons mm ²		E/R	Coeficientes		Rugosidad			Tolerancias		Aceite
L-80	E	R		r	n	Ra	R max	Nº Picos	Espesor	Ancho	gr. / m ²
>40	120-190	270-350	<0,63	>1,8	>0,22	0,9-1,4	10	>60	+0,03 -0,03	+3 -0	1,4±0,2
Bobina											Sellado por la cara no garantizada
Diámetro interior	610		Diámetro exterior	2.000		Peso Mínimo		Peso Máximo			
Historia	1		2		3		4		5		6
Dimensiones	0,7 X 1545										
Paso	2958										
Peso Kg desarrollo											
Necesidad Desarrollo	25,1127										
Piezas por Desarrollo	1										
											
Nº	Fecha	Variación									
1	21/05/2008	PUESTA EN VIGOR									
2											
3											
4											
5											
6											
								Realizado/  R. Tirapu			
								Visto  M. Garcia			

 Volkswagen Navarra, S.A. Procesos Prensas/Chapistería		Hoja de Prescripciones Empleo de Materiales											
Fichas Técnicas:													
Modelo: VW 250		Clave			CALIDAD				Variante				
Máquina: FE 81000		6R3.809.606 PLA			DC06 ZE 50/50 BPO (EN 10152)				1				
Nº	Clave	Denominación	Cara		Situación Pza.								
			Garantiz.		Exte	Interior							
			Ext.	Int.	rior	Vista	No V.						
1	6R3.809.606	LATERAL EXT DERECHO	X		X								
Características mecánicas													
A%	Newtons mm ²		E/R	Coeficientes		Rugosidad			Tolerancias		Aceite		
L-80	E	R		r	n	Ra	R max	Nº Picos	Espesor	Ancho	gr. / m ²		
>40	120-190	270-350	<0,63	>1,8	>0,22	0,9-1,4	10	>60	+0,03 -0,03	+3 -0	1,4±0,2		
Bobina											Sellado por la cara no garantizada		
Diámetro interior	610		Diámetro exterior	2.000		Peso Mínimo			Peso Máximo				
Historia		1		2		3		4		5		6	
Dimensiones		0,7 X 1545											
Paso		2958											
Peso Kg desarrollo													
Necesidad Desarrollo		25,1127											
Piezas por Desarrollo		1											
													
Nº	Fecha	Variación											
1	21/05/2008	PUESTA EN VIGOR											
2													
3													
4													
5													
6													
		Realizado								 R. Tirapu			
		Visto								 M. Garcia			

 Volkswagen Navarra, S.A. Procesos Prensas/Chapistería		Hoja de Prescripciones Empleo de Materiales									
Fichas Técnicas:											
Modelo: VW 250		Clave			CALIDAD				Variante		
Máquina: FE 81000		6R4.809.605 PLA			DC06 ZE 50/50 BPO (EN 10152)				3		
Nº	Clave	Denominación	Cara		Situación Pza.						
			Garantiz.		Exte	Interior					
			Ext.	Int.	rior	Vista	No V.				
1	6R4.809.605 A	LATERAL EXT IZQUIERDO	X		X						
Características mecánicas											
A%	Newtons mm ²		E/R	Coeficientes		Rugosidad			Tolerancias		Aceite
L-80	E	R		r	n	Ra	R max	Nº Picos	Espesor	Ancho	gr. / m ²
>40	120-190	270-350	<0,63	>1,8	>0,22	0,9-1,4	10	>60	+0,03 -0,03	+3 -0	1,4±0,2
Bobina											Sellado por la cara no garantizada
Diámetro interior	610	Diámetro exterior	2.000	Peso Mínimo		Peso Máximo					
Historia	1	2	3	4	5	6					
Dimensiones	0,7 X 1551		0,7 X 1551	0,7x1551							
Paso	2974,11		2984,11	2968							
Peso Kg desarrollo											
Necesidad Desarrollo	25,3476		25,4328	25,2955							
Piezas por Desarrollo	1		1	1							
											
Nº	Fecha	Variación									
1	30/10/2008	PUESTA EN VIGOR				Realizado  R. Tirapu					
2	23/01/2009	CAMBIO PASO A 2984,11									
3	31/03/2009	CAMBIO PASO A 2968									
4						Visto  M. Garcia					
5											
6											

 Volkswagen Navarra, S.A. Procesos Prensas/Chapistería		Hoja de Prescripciones Empleo de Materiales									
Fichas Técnicas:											
Modelo: VW 250 Máquina: FE 81000			Clave 6R4.809.606 PLA			CALIDAD DC06 ZE 50/50 BPO (EN 10152)			Variante 3		
Nº	Clave	Denominación	Cara Garantiz.		Situación Pza.						
			Ext.	Int.	Exterior	Interior	Vista	No V.			
1	6R4.809.606 A	LATERAL EXT DERECHO	X		X						
Características mecánicas											
A%	Newtons mm ²		E/R	Coeficientes		Rugosidad			Tolerancias		Aceite
L-80	E	R		r	n	Ra	R max	Nº Picos	Espesor	Ancho	gr. / m ²
>40	120-190	270-350	<0,63	>1,8	>0,22	0,9-1,4	10	>60	+0,03 -0,03	+3 -0	1,4±0,2
Bobina											Sellado por la cara no garantizada
Diámetro interior	610		Diámetro exterior	2.000	Peso Mínimo	Peso Máximo					
Historia	1		2		3		4		5		6
Dimensiones	0,7 X 1551		0,7 X 1551		0,7 X 1551						
Paso	2974,11		2984,11		2968						
Peso Kg desarrollo											
Necesidad Desarrollo	25,3476		25,4328		25,2955						
Piezas por Desarrollo	1		1		1						
											
Nº	Fecha	Variación									
1	30/10/2008	PUESTA EN VIGOR									
2	21/01/2009	CAMBIO PASO A 2984,11									
3	31/03/2009	CAMBIO PASO A 2968									
4											
5											
6											
		Realizado									
		 R. Tirapu									
		Visto									
		 M. Garcia									



Volkswagen
Navarra, S.A.
Procesos Prensas/Chapistería

Hoja de Prescripciones Empleo de Materiales

Fichas Técnicas:

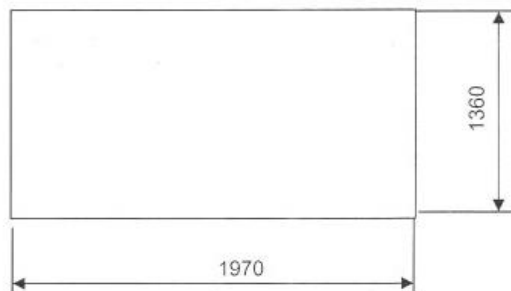
Modelo: VW 250	Clave	CALIDAD	Variante			
Máquina: FE 81000	6R6.817.111 B PLA	DC05 ZE 50/50 BO(EN 10152)	1			
Nº	Clave	Denominación	Cara		Situación Pza.	
			Garantiz.		Exte	Interior
			Ext.	Int.	rrior	Vista
1	6R6.817.111 B	TECHO	X		X	
2						
3						
4						

Características mecánicas

A%	Newtons mm ²		E/R	Coeficientes		Rugosidad			Tolerancias		Aceite
L-80	E	R		r	n	Ra	R max	Nº Picos	Espesor	Ancho	gr. / m ²
>39	140-190	270-330		>1,9	>0,19	0,9-1,4	8	≥60	+0,04 -0,04	+3 -0	1,4±0,2

Bobina

Diámetro interior	610	Diámetro exterior	2.000	Peso Mínimo		Peso Máximo		Sellado por la cara no garantizada	
Historia	1	2	3	4	5	6			
Dimensiones	0,7 X 1360								
Paso	1970								
Peso Kg desarrollo	14,7222								
Necesidad Desarrollo	14,7222								
Piezas por Desarrollo	1								



Nº	Fecha	Variación	Realizado
1	24/08/2008	Puesta en vigor	
2			
3			
4			Visto
5			
6			

Las operaciones se subdividen en:

- a) Corte o Punzonado (se realiza generalmente en frío).
- b) Doblado y/o Curvado (se realiza generalmente en frío).
- c) Embutido (puede realizarse tanto en frío como en caliente).

2.2. Corte o punzonado

El punzonado es la operación de troquelado en la cual con herramientas aptas para el corte se separa una parte metálica de otra, el corte se realiza mediante un dispositivo mecánico formado por dos herramientas: el punzón y la matriz.

La aplicación de una fuerza de compresión sobre el punzón obliga a éste a penetrar en la chapa, creando una deformación inicial en régimen elastoplástico seguida de un cizallamiento y rotura del material por propagación rápida de fisuras en las aristas de corte del punzón con la matriz. El proceso termina con la expulsión de la pieza cortada.

La lámina para que pueda ser cortada con punzón de acero templado, debe tener un espesor menor o igual al diámetro del punzón.

Este proceso, al igual que otros procesos mecánicos, está fuertemente influenciado por factores muy diversos relacionados con la máquina, las herramientas, el material y características geométricas de la pieza o el propio entorno del proceso.

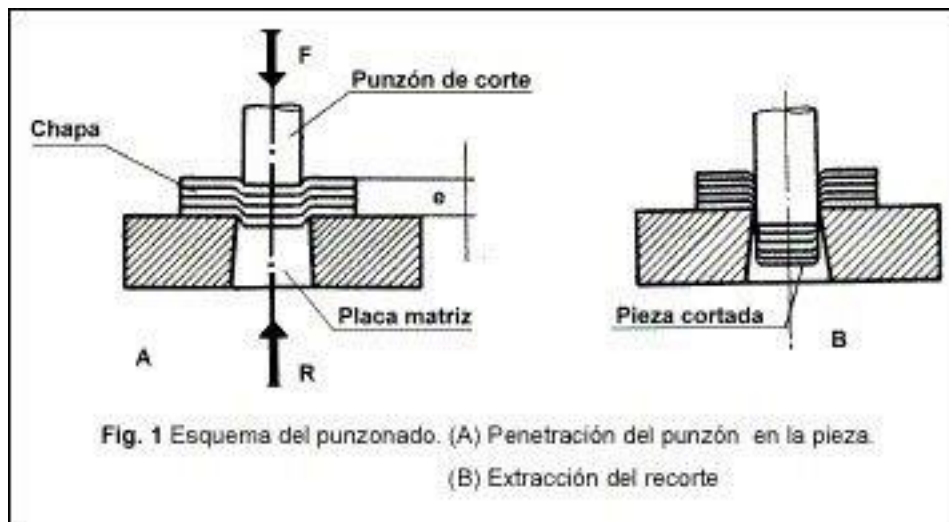


Figura 31. Proceso punzonado [3]

La mecánica del corte:

En el proceso de punzonado se pueden considerar tres etapas:

1. Deformación: los esfuerzos del punzón sobre la chapa metálica, originan en ésta deformación, inicialmente elástica y después plástica, alrededor de los bordes del punzón y la matriz.
2. Penetración: Los filos de corte del punzón y matriz penetran dentro del material, produciéndose grietas en el material debido a la concentración de tensiones a lo largo de los filos de corte.
3. Fractura: Las grietas originadas a uno y otro lado de la chapa se encuentran, originando la separación del material. Asimismo, el punzón continúa su descenso para expulsar el recorte.

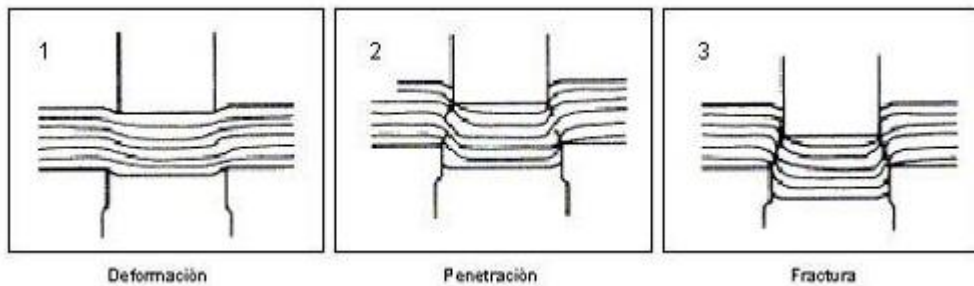


Figura 32. Pasos punzonado [3]

Para conseguir perfiles exactos y limpios, habrá que observar, además, las dos reglas siguientes:

- Para el corte de perfiles exteriores, la medida de la matriz, será la medida de la pieza.
- Para el corte de perfiles interiores, la medida del punzón, será la medida del agujero

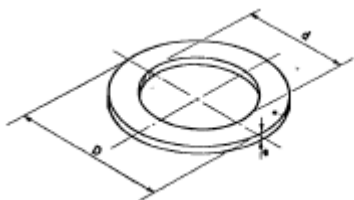


Figura 33. Dibujo de anillo punzonado [5]

2.2.1. Juego

El juego de corte J tiene un efecto importante en el proceso de corte y se define como la distancia lateral entre el filo del punzón y el filo de la matriz.

El corte por punzonado produce varias características en los bordes de la chapa y del material cortado:

1. Deformación plástica caracterizada por un pequeño radio R .
2. Zona bruñida de aspecto brillante caracterizada por el ancho D .
3. Fractura angular, con aspecto mate, definida por la penetración P .
4. Rebaba caracterizada por su altura H .

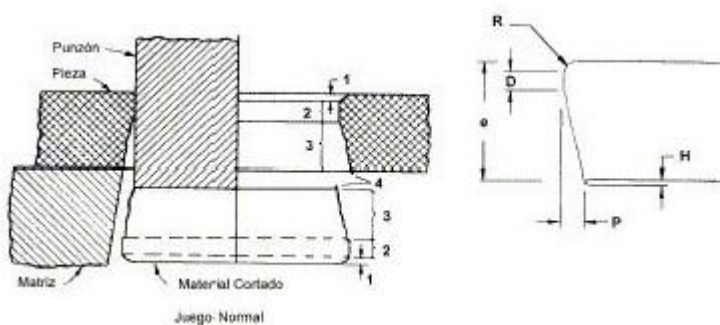


Figura 34. Características de la chapa punzonada [3]

Todas estas características del borde cortado dependen del tipo, dureza y espesor del material, juego entre punzón y matriz, estado de los filos de corte, sujeción del material y tamaño del punzón, en el caso de la chapa, o la matriz en el caso del material cortado.

En el caso de las piezas de la Erfurt estas zonas no se aprecian a simple vista ya que el espesor de las mismas es muy pequeño, en función de cada pieza varía, pero en todos los casos está alrededor de los dos o tres mm.

La fractura angular y la calidad del corte dependen del juego entre matriz y punzón.

Con un juego insuficiente se produce un corte secundario. Las grietas iniciales correspondientes al punzón y matriz no están alineadas (no llegan a encontrarse). Al disminuir el juego de corte se produce una mejora en la precisión de la pieza, sin embargo, otros factores, como el desgaste de las herramientas o la energía consumida se ven afectados negativamente.

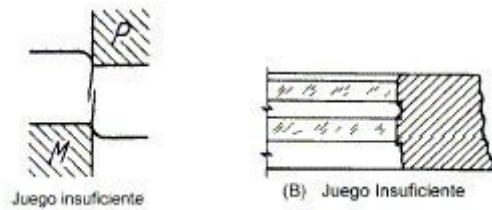


Figura 35. Dibujo juego insuficiente [3]

En el caso de tener un juego de corte excesivo aparece una deformación plástica excesiva, una parte bruñida menor y una altura de rebaba mayor. Por otro lado, hay que resaltar que, al aumentar el juego de corte por encima de los valores normales se consigue aumentar la vida de la herramienta en detrimento de la precisión obtenida en los bordes.

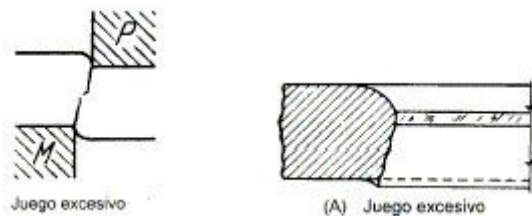


Figura 36. Dibujo juego excesivo [3]

Desde el punto de vista de la mecánica de la fractura del material, puede considerarse que el funcionamiento del proceso es óptimo cuando las grietas iniciadas desde el punzón y matriz se encuentran alineadas.

2.2.2. Fuerza de corte

La fuerza de corte varía en función del juego manteniendo los demás parámetros constantes.

$$Q = p \cdot s \cdot \sigma_t$$

[5]

Considerando el rozamiento: $Q' = 1.2 \cdot Q$

Donde:

- Q=Fuerza de corte (N)
- p= Perímetro de la figura (mm)
- s= Espesor de la lámina
- σ_R =Esfuerzo de rotura del material por tensión (N/mm²)
- σ_t = Esfuerzo por rotura del material por corte (N/mm²)

Influencia del juego de corte J sobre la fuerza de corte:

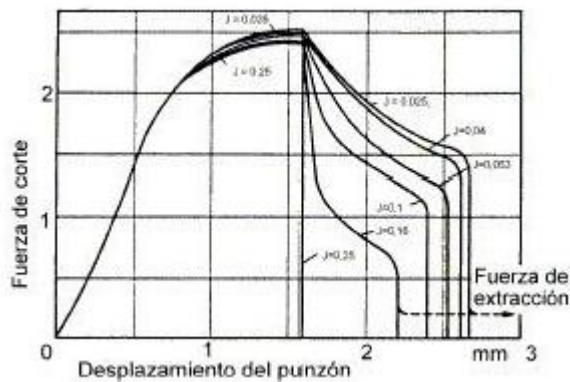


Figura 37. Gráfica de influencia del juego de corte J sobre la fuerza de corte [3]

En esta figura se representa la fuerza ejercida por un punzón de 10mm de diámetro y su desplazamiento al cortar una chapa de acero de 2.8mm de espesor, con diferentes juegos de corte. Las curvas se descomponen en dos partes diferenciadas. La primera parte en la cual la fuerza aumenta desde 0 hasta su valor máximo, siendo este el punto de inicio de la fractura, esta parte presenta un aspecto muy similar en todas las curvas. La segunda parte en la que las grietas crecen y se completa el corte del material, en esta parte se desarrollan fluctuaciones importantes para los diferentes juegos.

Resistencia de corte por punzonado según el juego (a) $s_r=630\text{N/mm}^2$ $e=5\text{mm}$, (b) $s_r=450\text{N/mm}^2$ $e=5\text{mm}$, (c) $s_r=460\text{N/mm}^2$ $e=10\text{mm}$.

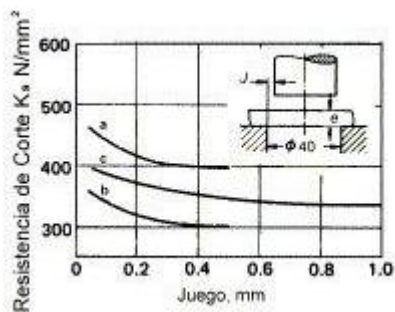


Figura 38. Gráfica resistencia del corte según el juego [3]

La formación de grietas puede asociarse a los descensos repentinos que se aprecian en los diagramas. Cuando las grietas originales no se encuentran alineadas, las fuertes pendientes de descenso tienden a suavizarse, llegando en algunas ocasiones a la horizontalidad. En estos casos, suele producirse nuevamente disminuciones importantes de la fuerza debido a la formación de cortes secundarios.

Una vez cortado el material, debe ser expulsado a través de la matriz, que en general tiene forma cónica para facilitar la extracción y dificultar el regreso del material cortado con el retroceso del punzón. La fuerza necesaria debe vencer el rozamiento y compresión radial entre el punzón y la chapa y entre la pieza cortada y la matriz. Parte de estas fuerzas también están presentes durante el retroceso del punzón debido al rozamiento de la chapa con el punzón. Esta fuerza de extracción suele expresarse como porcentaje de la fuerza necesaria para el punzonado y depende del material y del juego de corte.

2.3. Doblado y/o curvado

El doblado y curvado son dos operaciones en las cuales no se modifica el espesor de la chapa una vez conformada. Se suelen producir mediante flexión aplicando desde fuera fuerzas de compresión y tracción; y mediante torsión. En el caso de la estampación, caso que nos ocupa, nos centraremos en el caso de flexión.

Esta operación provoca alargamiento en las fibras exteriores y acortamiento en las interiores (toda deformación en una dirección ha de ser compensada con deformación en otras). Cuando se desea una deformación permanente, las fibras externas son sometidas a una sollicitación σ' superior σ_f (tensión de fluencia) y la variación de las tensiones ya sólo es lineal en las proximidades de la fibra neutra. Al cesar el esfuerzo deformante se recupera parcialmente el estado de la chapa, con excepción de las regiones exteriores.

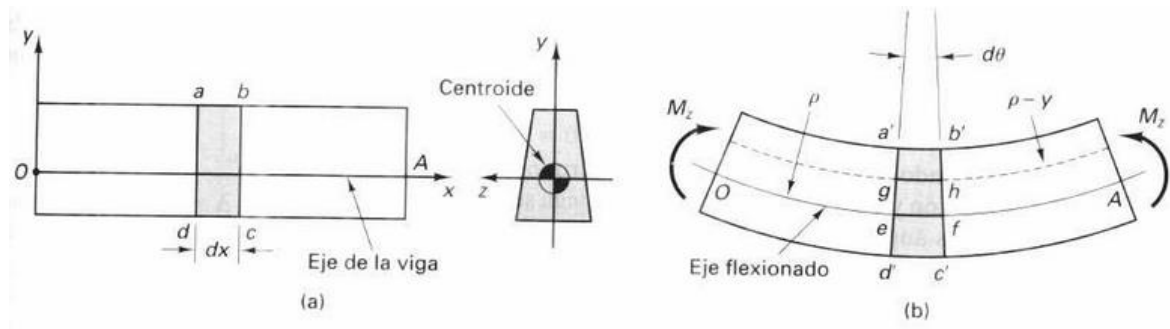


Figura 39. Dibujo flexión [11]

Cuanto más alejadas se encuentren de la línea las fibras deformadas, tanto mayor es la deformación y, por tanto, el esfuerzo requerido. De todo ello resultan las siguientes consecuencias:

- La resistencia del material doblado es menor que la esperada de las dimensiones originales.
- El ángulo de doblado ha de calcularse teniendo en cuenta que en el material se produce una recuperación elástica al cesar el esfuerzo deformante.
- La longitud de la pieza después de la operación no es la misma que antes: resulta mayor en la parte doblada. El cálculo del aumento no es fácil a causa de los muchos factores que pueden modificarlo.

El doblado puede ser:

- Una operación parte de un troquel más complejo que incorpore otras operaciones de punzonado y embutición.
- Una operación aparte que se realiza en máquinas específicas denominadas plegadoras.

En nuestro caso, la operación de doblado forma parte de un troquel más complejo que incorpora más operaciones (punzonado y embutición). Las operaciones de doblado se realizan principalmente a partir del primer estampado, ya que en este se produce fundamentalmente la embutición

También son posibles otras configuraciones de doblado, como el doblado por tubos o el doblado con rodillos.

2.3.1. Factores doblado

El doblado es la operación más sencilla después de la del corte o punzonado, pero es necesario tener en cuenta dos factores fundamentales:

1. Recuperación elástica: aparece un momento recuperador debido a que la chapa trabaja en la zona elástica. Se debe tener en cuenta, por tanto, que los metales son elásticos, al cesar la acción de doblado o curvado tienden a recuperar su forma primitiva.

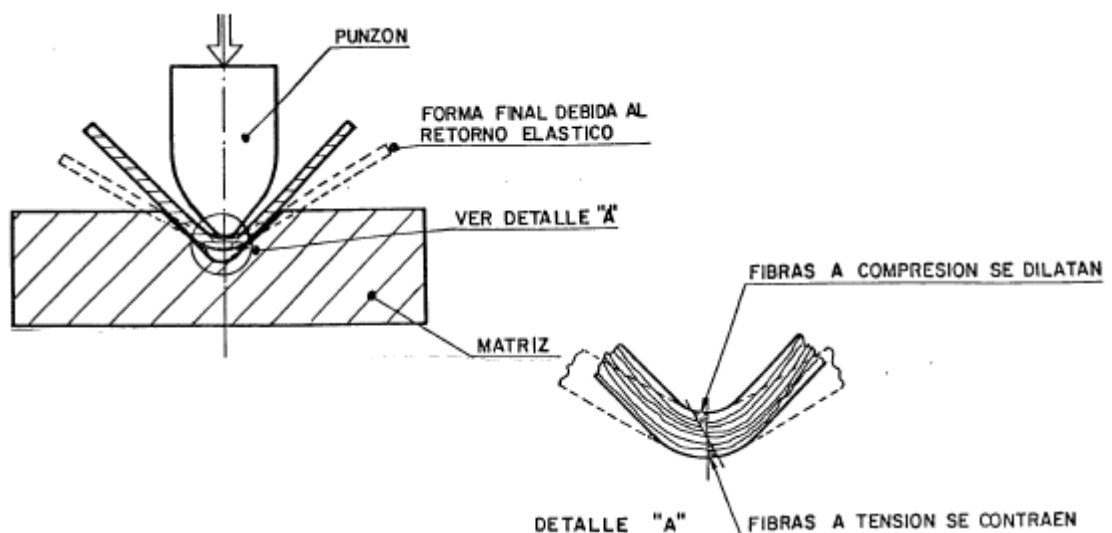


Figura 40. Recuperación elástica en el doblado [5]

- La recuperación es tanto mayor cuanto mayor es el límite elástico de la chapa.

- Es difícil saberlo a priori: simulación numérica o ensayos previos.
- Soluciones:
 - Sobre-flexionar la chapa
 - Trabajar en caliente.

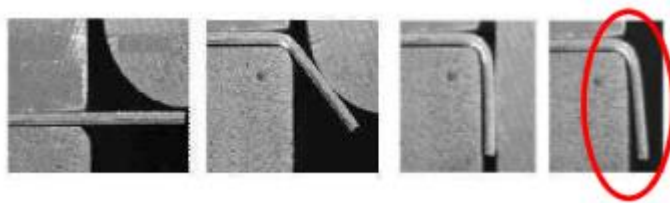


Figura 41. Recuperación elástica en el doblado [2]

Combate del retorno elástico:

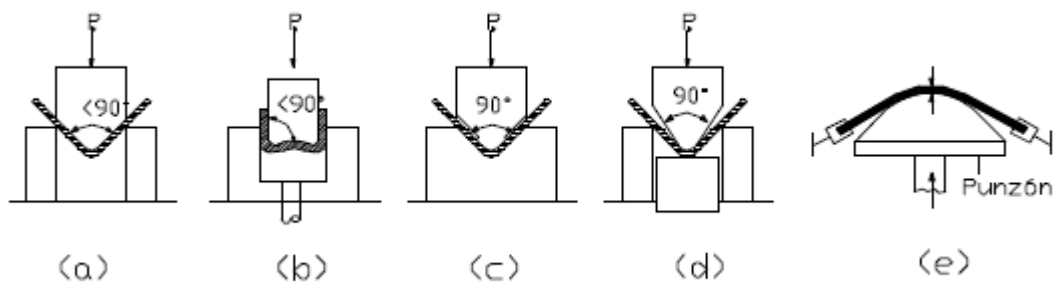


Figura 42. Combate del retorno elástico [5]

- a) Sobredoblado.
- b) Sobredoblado.
- c) Deformación plástica en el doblez (láminas gruesas).
- d) Doble con estirado.
- e) Doble a alta temperatura (disminuye el punto de cedencia).

- Radio de curvatura: se recomienda que el radio de curvatura interior sea mayor o igual que el espesor de la lámina con el fin de no estirar excesivamente la fibra exterior causando su ruptura

Los radios de unión que se recomiendan son:

-1 a 2 veces el espesor de la chapa para materiales dulces.

-3 a 4 veces el espesor de la chapa para materiales duros.

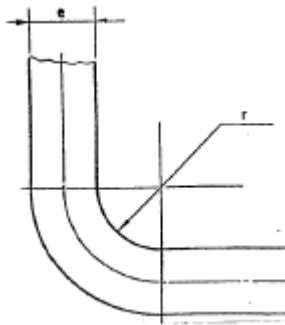


Figura 43. Radio de curvatura en el doblado [5]

Donde e es el espesor de la chapa y r el radio de curvatura.

Las fibras más externas trabajan a tracción y pueden superar la tensión de rotura del material. El radio mínimo depende de:

- El material de la chapa
- Su espesor

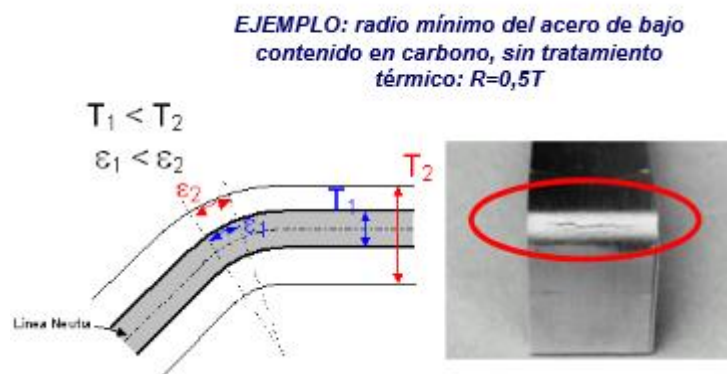


Figura 44. Radio de curvatura y grieta por estiramiento excesivo del material [2]

El doblado que realiza el punzón puede ser de tres formas: libre, forzado e intermedio siendo las dos últimas las que proporcionan mayor exactitud.

Troquel para punzonar, cortar y doblar:

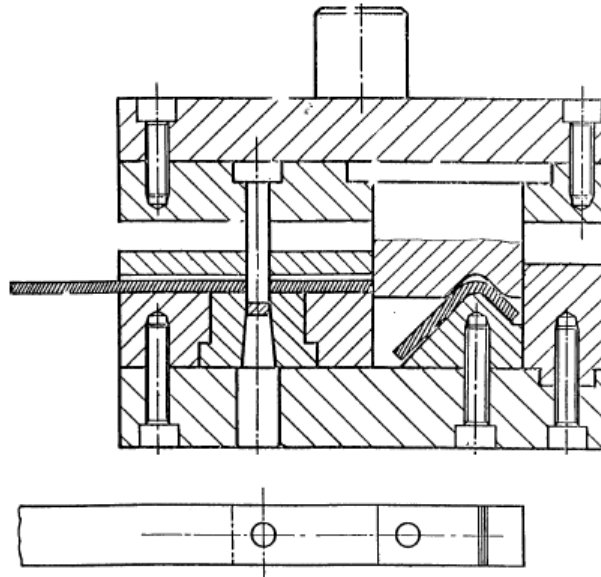


Figura 45. Dibujo troquel y pieza doblada [5]

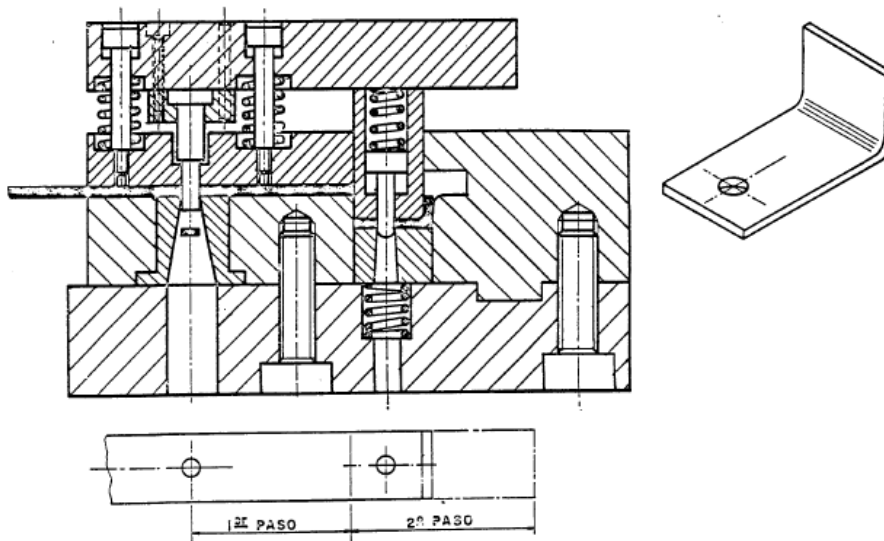


Figura 46. Dibujo troquel y pieza doblada [5]

2.3.2. Fuerza doblado

El cálculo de las fuerzas de doblado es difícil porque no se obtiene una determinación exacta. Esto se patentiza en el hecho de que las mismas casas constructoras de las prensas y de las máquinas para doblado discrepan en los valores para un mismo proceso.

Podemos acercarnos a su cálculo esbozando en líneas generales el proceso, refiriéndolo a las prensas o máquinas de cantear.

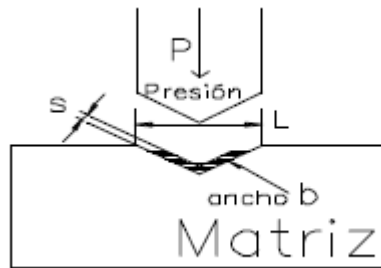


Figura 47. Dibujo proceso doblado [5]

Cuando una lámina se coloca sobre la matriz de plegado, se comporta, en muchos casos, como un sólido apoyado en sus extremos. En el caso más simple, se puede usar la siguiente fórmula:

$$F = \frac{2\sigma_d b s^2}{3l}$$

[5]

Según Schuler y Cincinatti, $\sigma_d = 2 \cdot \sigma_R$

Donde:

- F= Fuerza necesaria para el doblado (N)
- σ_d =Esfuerzo de flexión necesario para la deformación permanente (N/mm²)
- b= Ancho de la pieza (mm)
- s= Espesor de la lámina (mm)
- l= Distancia entre los apoyos

2.4. Embutido

2.4.1. Introducción

Consiste en transformar una lámina de metal en un cuerpo hueco tridimensional en una o más pasadas.

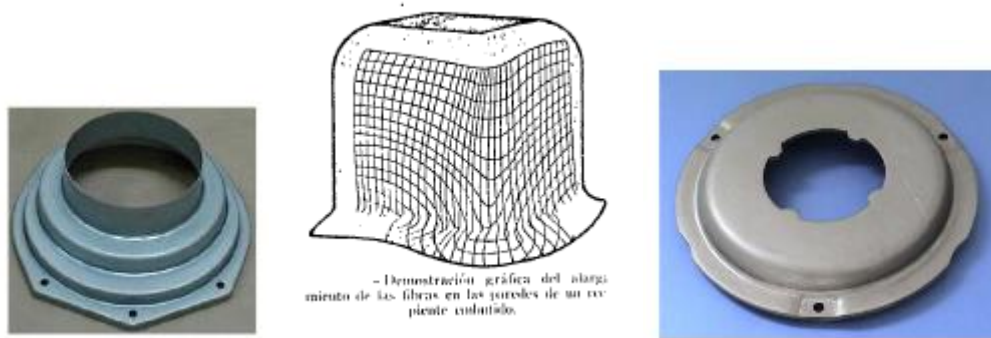


Figura 48. Dibujo y fotos piezas embutidas [2][5]

La embutición es un procedimiento tecnológico que consiste en dar la forma a una lámina metálica en superficie no desarrollable, por deformaciones plásticas. Además del desarrollo y comportamiento del material, otros factores a considerar son:

- Juego entre el punzón y la matriz
- Radio de embutición
- Redondeo del punzón y la matriz
- Lubricación
- Velocidad de embutición
- Presión del pisador
- Esfuerzo de embutición

A grandes rasgos, podemos decir que la embutición es una operación cuya finalidad es convertir una chapa plana en un cuerpo hueco.

Se realiza mediante una estampa de embutición compuesta de:

- Matriz: forma el hueco al que debe adaptarse la chapa.
- Punzón: empuja la chapa, adaptándola al hueco.
- Pisador o sujeta chapas: presiona el borde de la chapa contra la matriz, evita que se formen arrugas, pero sin sujetarla. La chapa debe fluir conforme baja el punzón.

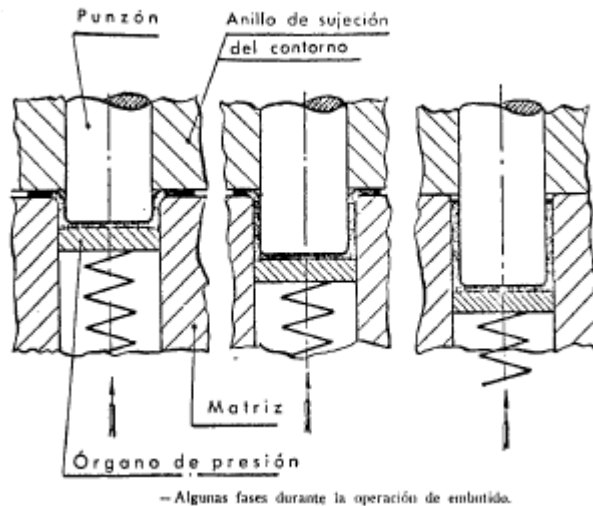


Figura 49. Dibujo embutido [5]

2.4.2. Fuerza embutición

Durante el proceso se produce un complejo sistema de fuerzas de tracción y compresión que componen el flujo o corrimiento del material.

El cálculo de la fuerza necesaria para la embuticiones muy complicado sobre todo para piezas de formas irregulares, y en función de los autores se pueden encontrar varias formulas distintas.

Sin embargo, se verifica en los ensayos que el espesor permanece en promedio constante. Por lo tanto, aplicando el principio de conservación de volumen tenemos que:

Área disco primitivo=Área exterior de la pieza embutida

[5]

En la operación de embutir no se debe modificar el espesor de la lámina, aunque en la práctica esto no sea totalmente cierto.

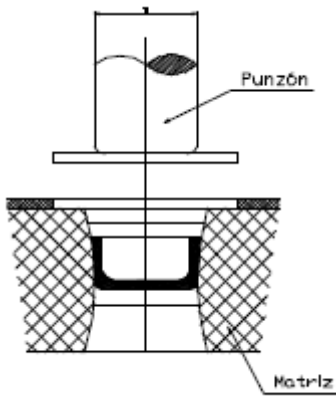


Figura 50. Dibujo punzón y matriz

El troquel se debe lubricar para dar mayor fluidez al material y proteger las partes contra el rozamiento

2.4.3. Embutición en varias etapas

Cuando el trabajo exige un elevado grado de deformación de la chapa, superando la máxima deformación admisible, será necesario realizarlo en varias etapas, con distintas relaciones de embutición (usando diámetros de punzón distintos).

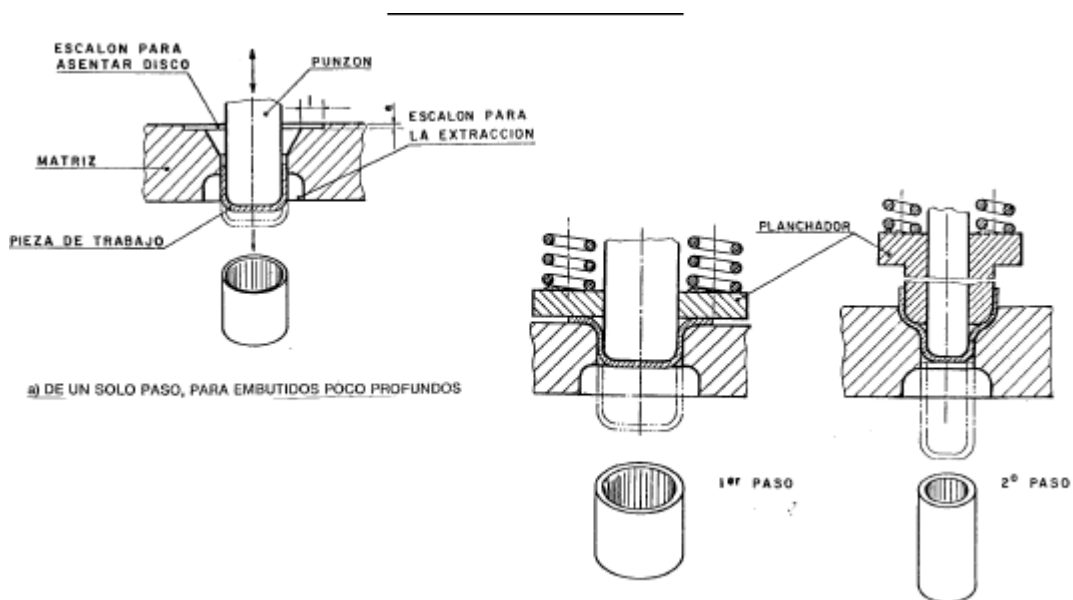


Figura 51. Dibujo embutición en varias etapas [5]

Reembutado:

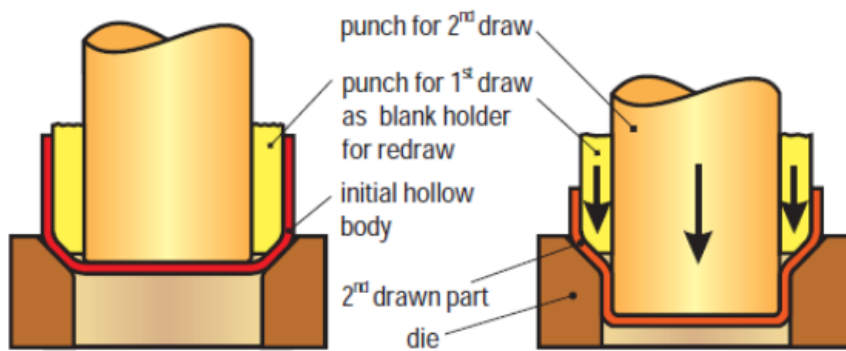


Figura 52. Dibujo reembutado

Embutido inverso:

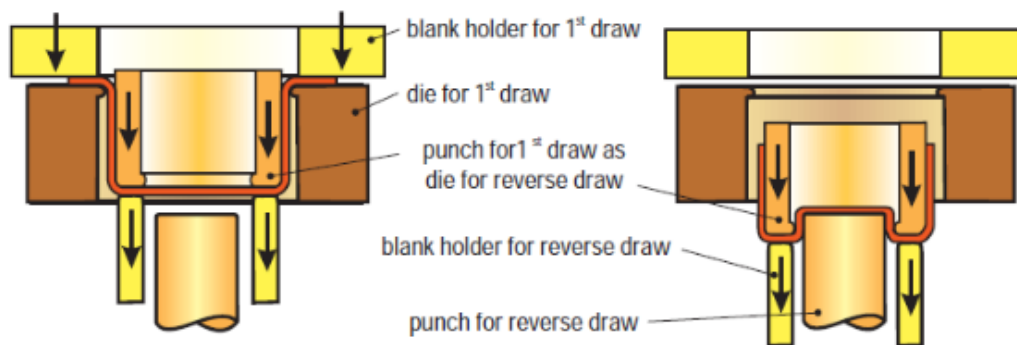


Figura 53. Dibujo embutido inverso

Tendremos

D = diámetro del disco

$d_1 \dots d_n$ = diámetros del punzón en cada caso.

$\beta_0 = D/d$ = Relación de embutición de estirado único.

$m_0 = d/D$ = Factor de embutición mínimo ($1/\beta_0$)

En cada paso debe cumplirse:

$$d_0 = D/\beta_0 \quad \text{o} \quad d_0 = m_0 D$$

$$d_1 = d_0 / \beta_1 \quad \text{o} \quad d_1 = m_1 d_0$$

...

$$D_n = d_{n-1} / \beta_n \quad \text{o} \quad d_n = m_n d_{n-1}$$

VARIAS PASADAS DE EMBUTIDO

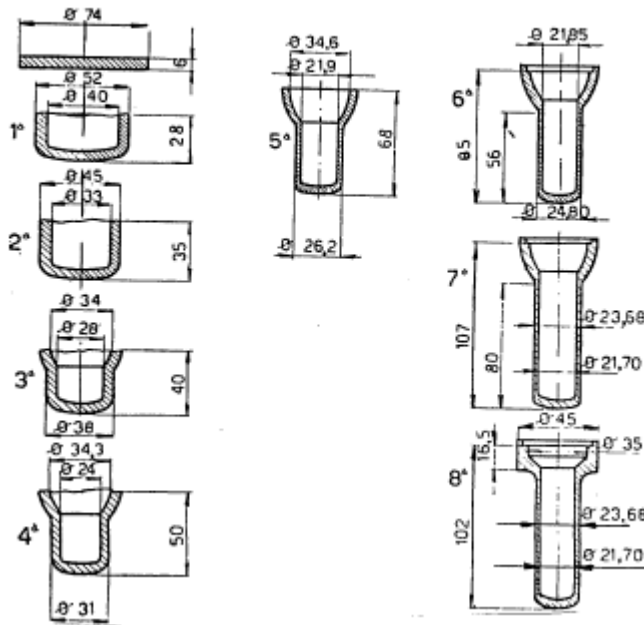


Figura 54. Dibujo ejemplo embutido en varias etapas [5]

2.4.4. Problemas

Los defectos que pueden surgir durante la embutición están directamente relacionados con la máxima relación de estirado, esta a su vez depende directamente de las características del material, concretamente de:

- Resistencia del material.
- Dimensiones y espesor de la chapa
- Presión, fricción.

Un control defectuoso de la operación puede provocar la aparición de daños en la pieza

- Aparición de grietas.



Figura 55. Foto grieta en la embutición [2]

- Aparición de arrugas



Figura 56. Foto pieza con arrugas formadas en la embutición

2.4.5. Otras operaciones de conformado de láminas en prensas

Existen otras operaciones de conformado de láminas en prensa, ya sea con herramientas metálicas o con hule.

- Con herramientas metálicas
 - Planchado: Se utiliza para calibrar (uniformar) espesores de piezas embutidas.

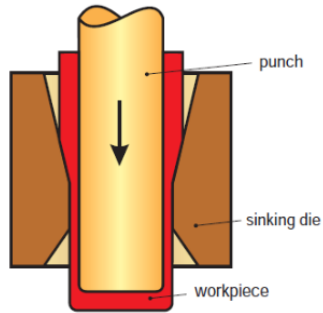


Figura 57. Dibujo del proceso de planchado

- Acuñado y estampado: Se utiliza para crear refuerzos y grabados en relieve
 - En el estampado la forma de la matriz superior es positiva y la inferior es negativa (o viceversa)

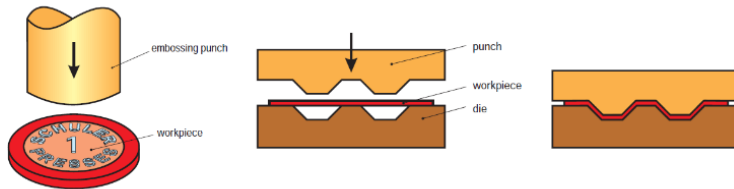


Figura 58. Dibujo proceso de acuñado

- Desplegado: Es una combinación de corte y doblado o corte y formado. Se utiliza para hacer rejillas de ventilación, ensamblar piezas, etc.

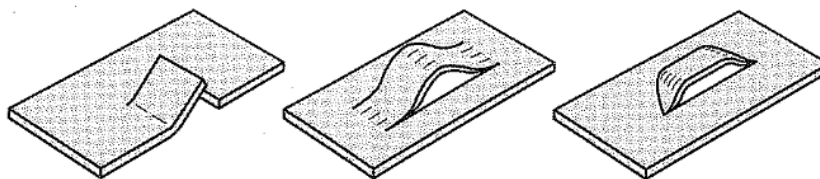


Figura 59. Dibujo proceso de desplegado

- Torcido: La pieza se somete a una carga de torsión. Tiene aplicaciones relativamente limitadas (paletas de ventiladores). Este proceso se realiza en prensas con matrices especiales.

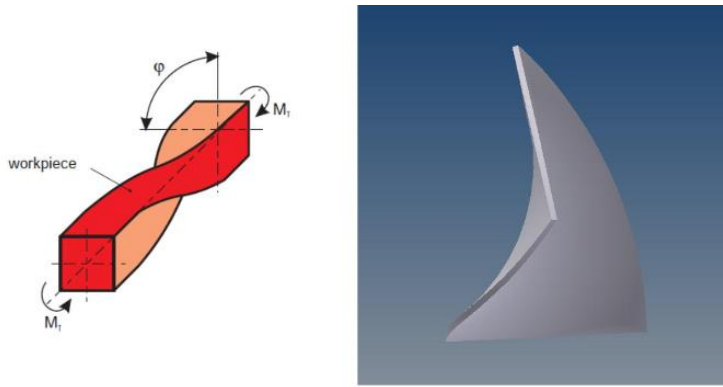


Figura 60. Dibujo proceso de torcido

- Formado de cuellos o Flanging: Se forman cuellos a una pieza previamente punzonada, se utiliza para poder roscar piezas en chapa (poca longitud de rosca).

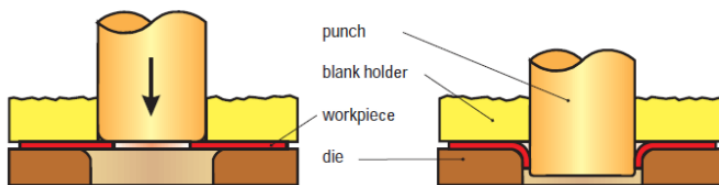


Figura 61. Dibujo proceso de formado de cuellos

- Formado con Hule
 - Proceso Guerin: Se limita a piezas poco profundas (presiones no suficientes para evitar arrugado)
 - Ventajas: Bajo coste herramental
 - Usos: Baja producción (industria aérea)

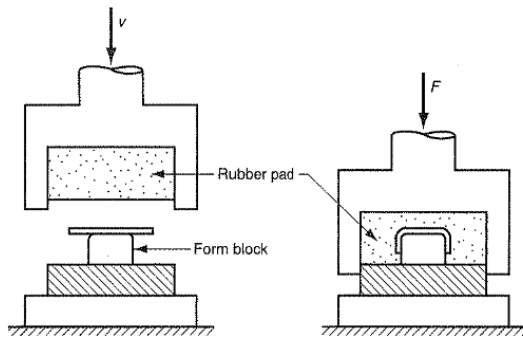


Figura 62. Dibujo de proceso Guerin

- Hidroformado: Proceso similar al Guerin, se sustituye el cojín de hule por un diafragma con fluido hidráulico, se logran así mayores presiones y piezas más profundas. La presión al ser uniforme permite mayores deformaciones que en el embutido profundo.

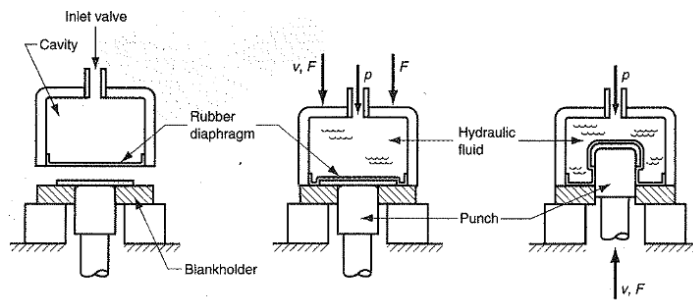


Figura 63. Dibujo del proceso de hidroformado

2.5. Troqueles

El troquel determina el tamaño y forma de la pieza terminada y la prensa suministra la fuerza necesaria para efectuar el cambio. Cada troquel está especialmente construido para la operación que va a efectuar y no será adecuado nunca para otras operaciones. El troquel tiene dos mitades, entre las cuales se coloca la lámina metálica, cuando estas se juntan se lleva a cabo la operación.

Las dos partes suelen estar montadas en un portatroquel: la matriz montada sobre la base y el punzón en una zapata superior. El uso de un portatroquel asegura una alineación adecuada del punzón y la matriz, sin importar el estado de la prensa.

Los troqueles industriales se dividen en:

- Troqueles simples: estos troqueles realizan una única operación en cada golpe de prensa y su alimentación es manual.

- Troqueles progresivos: los troqueles progresivos pueden realizar varias operaciones en cada golpe de prensa y se alimentan de una bobina de chapa automáticamente.
- Troqueles transfer: estos troqueles son similares a los progresivos, siendo su principal diferencia que no son alimentados mediante una bobina, sino que realizan su trabajo sobre piezas en las que se ha realizado un trabajo previo.

Componentes:

- Base superior (parte móvil)
- Base inferior (parte fija)
- Sufrideras
- Reglas guías
- Porta punzones
- Porta matriz
- Placa pisadora
- Punzones
- Sistema de guiado
- Pilotos centradores

2.5.1. Troqueles Volkswagen

Localización de los troqueles en VW Navarra:

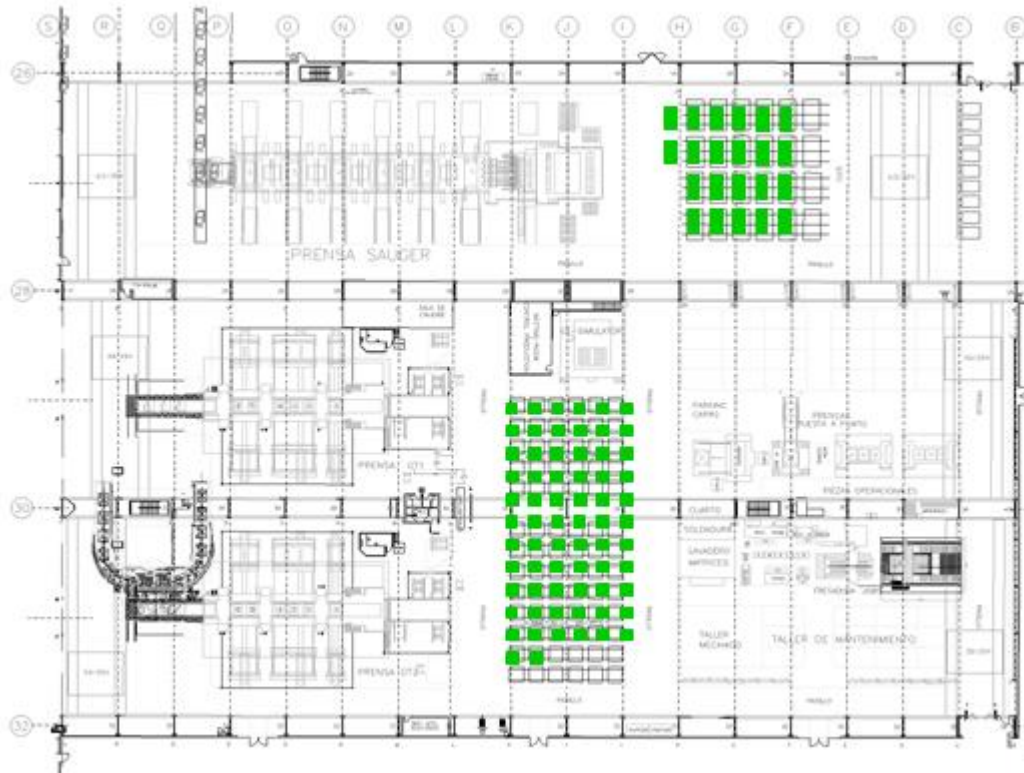


Figura 64. Plano con la ubicación de los troqueles en la nave de prensas de VW Navarra

Se almacenan como se muestra en la siguiente foto

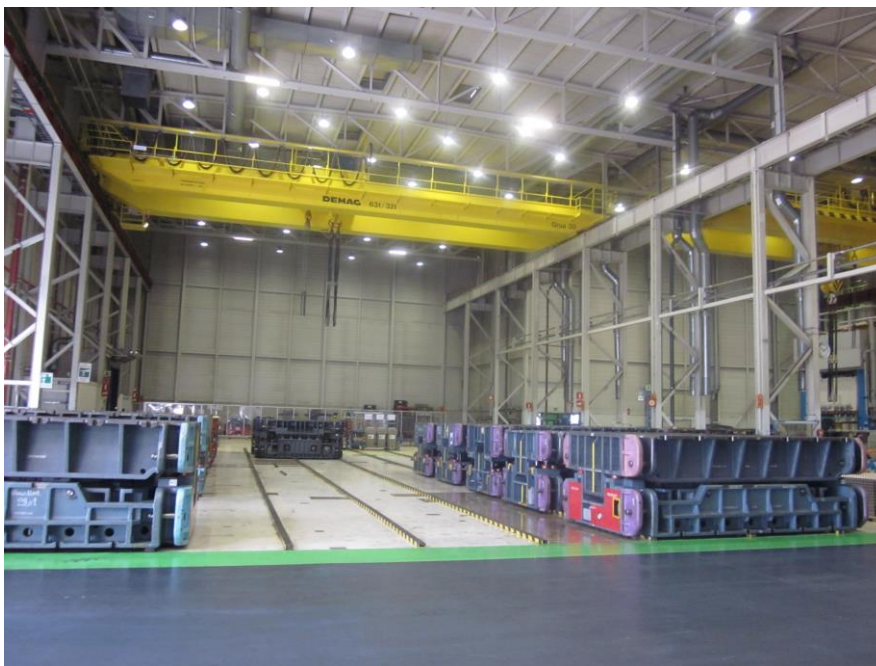


Figura 65. Troqueles almacenados en la nave de prensas de VW Navarra



Figura 66. Troquel VW Navarra



Figura 67. Troquel VW Navarra



Figura 70. Foto de máquina MAFI transportando un troquel en la nave de prensas de VW Navarra

3. Problema a resolver: Detección de grietas

Se centrará el estudio en la prensa Erfurt para la implantación de un sistema de detección de grietas que analice la totalidad de las piezas producidas como un proceso dentro de la producción en serie con la finalidad de detectar las grietas que pueden aparecer tras el proceso de estampación. Se busca analizar el 100% de la producción, y no análisis aleatorios, para evitar que ninguna pieza defectuosa pase el control de calidad y cuyo defecto sea encontrado en procesos posteriores con la carrocería ya montada, caso en el cual el coste sería muy elevado.

El coste de cada pieza realizada en la Erfurt es:

- 4 Puertas:





Figura 71. Fotos piezas con el coste de cada una

- 2 Puertas:



Figura 72. Fotos piezas con el coste de cada una

Pero como se ha dicho anteriormente en el caso de que el fallo sea detectado más tarde el coste de la pieza que se tire será mucho mayor. No siempre es necesario tirar toda la carrocería o la parte de la misma defectuosa, sino que puede ser retrabajada, en cuyo caso el coste también es relativamente alto ya que se requiere un cierto tiempo de trabajo y por lo tanto algún trabajador o incluso varios en función del tipo de fallo.

Se trata de un sistema productivo en la que se producen piezas estampadas en serie, la velocidad con la que salen las piezas depende de la producción, pero suele ser alrededor de los 7 segundos. Debido a diversos factores existe la posibilidad de que se produzcan grietas en las piezas. Estas grietas se producen en zonas localizadas, concretamente, se suelen dar en, como máximo, tres zonas de cada pieza. La localización de estas zonas críticas es conocida al igual que el tipo de grieta que se produce en cada caso, lo que simplifica la inspección ya que de esta forma no es necesario comprobar toda la extensión de la pieza si no las zonas en las que

se suele producir el fallo, es decir, no es necesario realizar el ensayo o análisis en la totalidad de la superficie de la pieza sino únicamente en las zonas críticas.

Se quiere encontrar un sistema capaz de localizar las grietas mencionadas anteriormente, que indique a través de una señal, ya sea luminosa o acústica, que la pieza requiere una atención especial y/o ser retirada debido a la presencia de un fallo o defecto en la misma.

En este primer acercamiento al problema se busca detectar únicamente las grietas, es decir, aquellos casos en los que hay una rotura total del material (cuando hay paso de luz), sin embargo, se busca también, en el caso de que sea posible, la detección de pequeños defectos o fisuras. Estos defectos no son detectados visualmente pero en procesos posteriores, por ejemplo tras la estancia en los hornos en el taller de pintura de la carrocería completa, pueden aparecer habiéndose desarrollado y crecido.



Figura 73. Zonas críticas lateral derecho 4 puertas



Figura 74. Zonas críticas lateral izquierdo 4 puertas

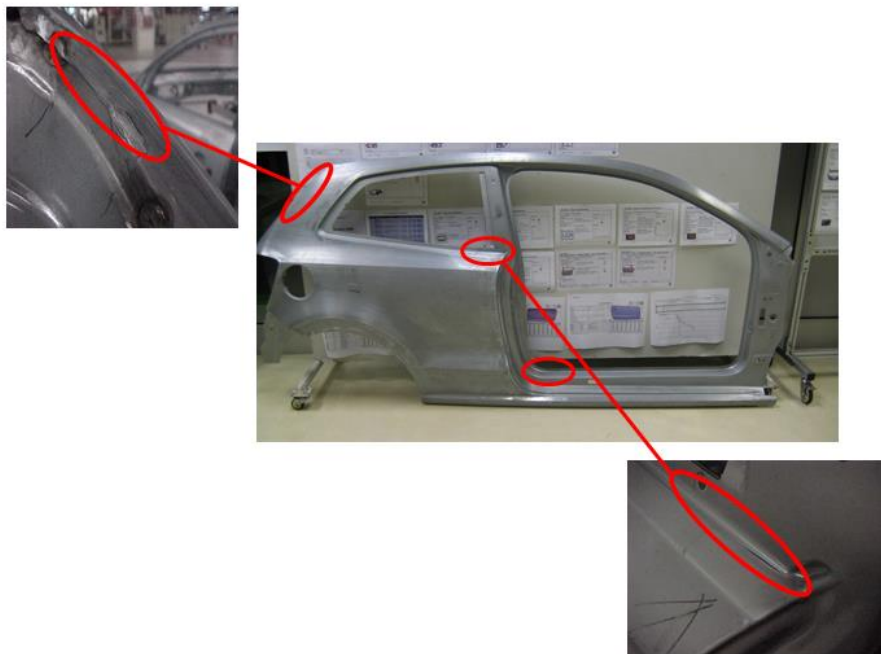


Figura 75. Zonas críticas lateral derecho 2 puertas

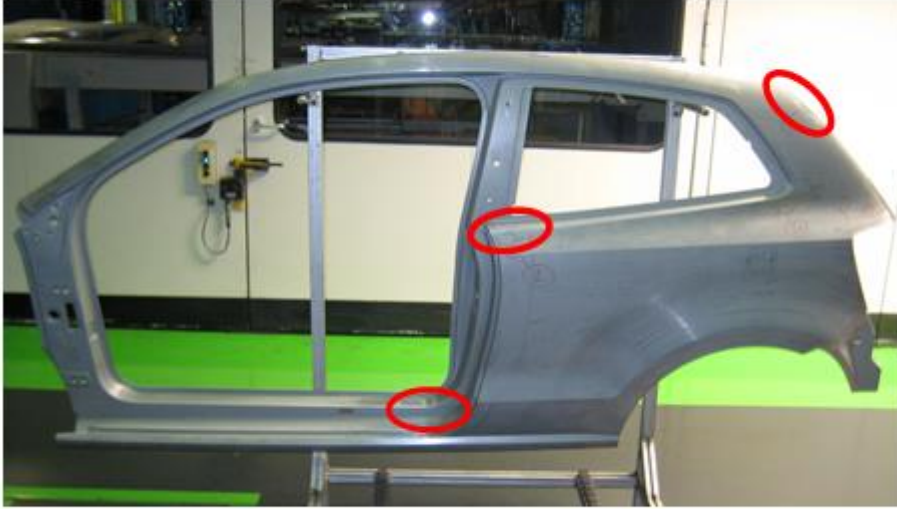


Figura 76. Zonas críticas lateral izquierdo 2 puertas

Los laterales, tanto de dos puertas como de cuatro suelen romper principalmente en la zona de abajo, como se mostrará a continuación.

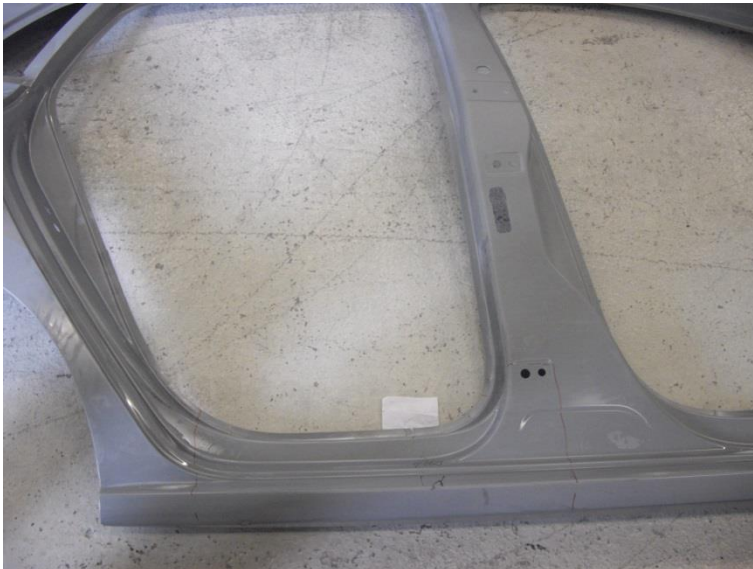


Figura 77. Foto lateral derecho 4 puertas con grieta



Figura 78. Zona de la grieta del lateral de la figura 76



Figura 79. Foto lateral izquierdo con grieta



Figura 80. Zona de la grieta del lateral de la figura 78

Otra grieta típica que suele aparecer:



Figura 81. Zona lateral derecho



Figura 82. Grieta de la muestra de la figura 80

Como se observa en las imágenes se trata de un caso especial de fractura del material ya que la grieta se ha producido a lo largo de todo el espesor de la pieza, no se trata de un defecto interno ni superficial, por lo que analizando los diferentes ensayos no destructivos, tanto superficiales como volumétricos, se pretende encontrar la técnica de ensayo no destructiva que mejor se ajuste a nuestras necesidades. Lo que se busca es un sistema que se adapte a las necesidades del proceso productivo en serie de la Erfurt pudiéndose implementar como parte del mismo, es decir, sin tener que analizarlo en un espacio separado parando el flujo de material.

Para que el sistema de detección de piezas pueda formar parte de la producción en serie debe ser un sistema rápido, que permita analizar la totalidad de las zonas en las que hay más probabilidad de que se produzca el fallo, y en la medida de lo posible, sin contacto. Si se necesita un operario que establezca el contacto del instrumento con la pieza no hemos solucionado el problema.

Las piezas realizadas en la Erfurt:

- Revestimientos puerta I/D del 4 puertas:

HX 180 BD

UNE EN 10292 Bandas (chapas y bobinas) de acero de alto límite elástico, galvanizadas en continuo por inmersión en caliente para conformación en frío. Este material forma parte de los aceros IF de alta resistencia, se trata de bobina fría.

Características mecánicas			
Acero	Límite elástico Re N/mm2	Carga de rotura Rm N/mm2	Alargamiento A80 min %
HX 180 BD	180-240	300-360	34

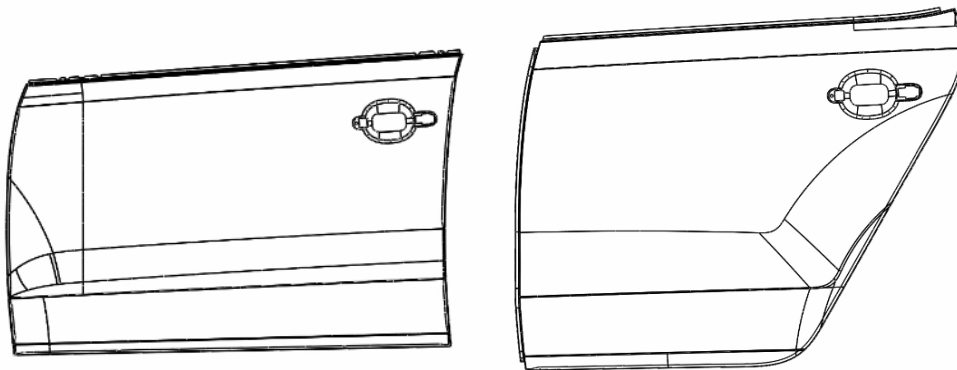


Figura 83. Dibujo de los revestimientos de las puertas

- Lateral exterior 4 y 2 puertas:

DC06

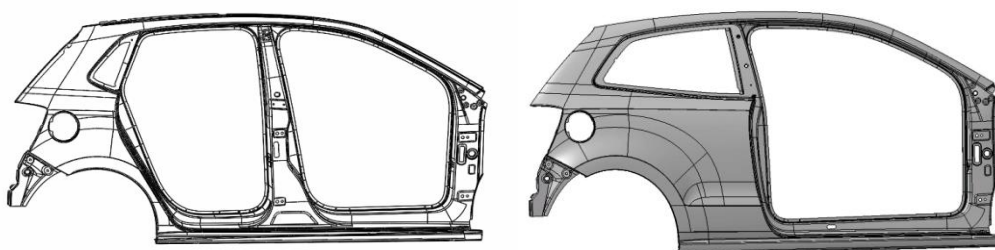


Figura 84. Dibujo laterales exteriores derechos 2 y 4 puertas

Los productos de chapa laminada en frío (en flejes o en chapa) se utilizan en múltiples campos de aplicación debido a su enorme versatilidad: en la industria del automóvil, en muebles metálicos, línea blanca, productos sanitarios, tubería, etc.

Se trata de un tipo de acero para conformar

- Tipo de producto: fleje, chapa, con borde de bobina o refilada, o bobina.
- Tipo de superficie: normal o superior
- Características superficie: lisa, mate o rugosa.
- Tratamiento superficie: aceitado o sin aceitado.

En el caso de VW Navarra se utilizan piezas aceitadas, como ya se ha comentado previamente.

Acero	Definición EN 10 020	Método desoxidación	Vigencia caracte- rísticas	Exento de envejeci- miento	Re N/mm2	Rm N/mm2	A % min	r90 min	n90 min	Composición química				
										Ánalysis en % máx. en colada				
										%C	%P	%S	%Mn	%Ti
DC 06	Acero aleado	Totalmente calmado	6 meses	Ilimitado	-/180	270 a 350	38	r 1.8	n 0.220	0.02	0.02	0.02	0.25	0.3

Para el grado DC 06, no se garantiza un límite elástico inferior, Re; a efectos de cálculo, se puede considerar que es igual a 120 N/mm².

El titanio puede reemplazarse por niobio. El carbono y el nitrógeno deben estar combinados en su totalidad.

- Aleta 4 puertas y 2 puertas:

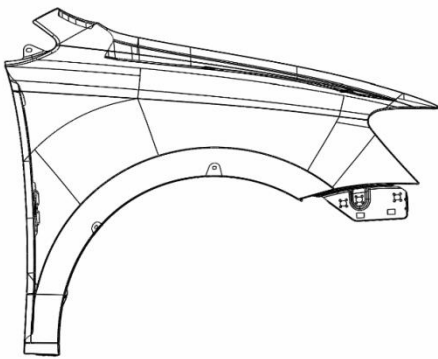


Figura 85. Dibujo aleta derecha

DX 54 D

La chapa fina aluminizada al fuego es un material laminado en frío, con recristalización por recocido con el método de horno continuo, y recubierta posteriormente con aluminio mediante el proceso de fusión por inmersión.

Este material reúne las características de resistencia a la corrosión, simultaneada con la resistencia térmica y el buen aspecto del aluminio, con la resistencia del acero. Es apropiado para resistir a esfuerzos térmicos de hasta 700 °C.

El DX 54 D es un tipo de acero maleable no aleado que tiene una calidad de embutición profunda especial.

- Tipo de producto: fleje, chapa, con borde de bobina o refilada, o bobina.
- Tipo superficie: Relaminada.
- Calidad de superficie: estándar o superior
- Tratamiento superficie: ésta puede estar cromatizada y/o untado de aceite.
- Capa de aluminio: Tiene una capa de aluminio de 80, 120 y 200 g/m² en ambas caras, en función del tipo de acero, de la sección del fleje y del tipo de superficie, se puede acordar otros espesores de capa tras previo acuerdo.

Características mecánicas			
Acero	Límite elástico N/mm ² Mpa	Carga de rotura N/mm ² Mpa	Alargamiento A ₈₀ %
DX 54 D	Max. 220	Max. 350	Min. 34

- Techo 4 puertas y 2 puertas

DC06

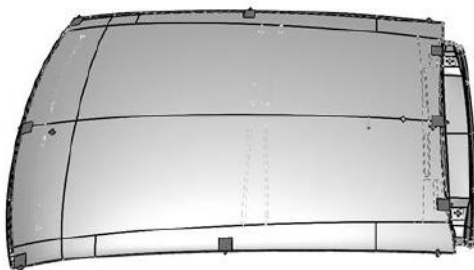


Figura 86. Dibujo techo

Las propiedades de este material ya han sido comentadas.

Existen dos posibilidades en la posición del nuevo sistema de control, en la estación número dos, posición L2 (después de la primera estampación) o en la posición L7. El puesto dos es adecuado ya que alrededor del 90% de las grietas se produce en la primera estampación y que es en esta en la que se produce la embutición, en las estampaciones posteriores se realizan principalmente operaciones de corte y doblado. La grieta en el techo sí que se suele producir más adelante por lo que el control de la misma tendría que realizarse en la última posición.

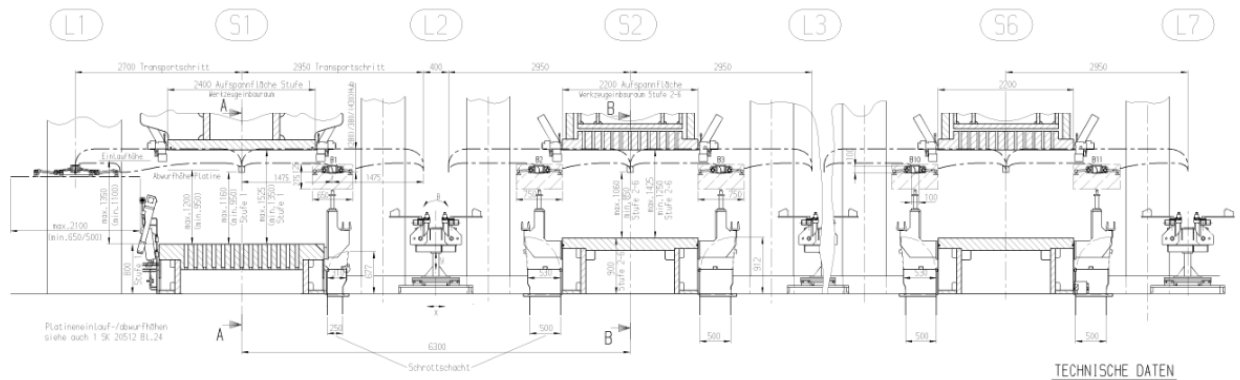


Figura 88. Dibujo Erfurt con las distintas estaciones marcadas

En la posición número dos la pieza está en reposo más tiempo, sin embargo, resulta más complicada la instalación de un dispositivo de detección de grietas ya que el espacio es mucho más reducido, por lo que la última posición puede resultar más interesante, pero dependerá de cada caso.

El puesto de control de calidad ocupado por operarios tiene una serie de inconvenientes por los cuales resulta interesante implantar un nuevo medio de control. Se presenta ahora un breve resumen de los principales:

- Costes salariales altos
- Inseguro
- No reproducible, sin documentar
- Demasiado impreciso
- Las personas pueden perder la atención.
- Procedimientos orientados a la superficie.

4. Ensayos no destructivos (END)

4.1. Conceptos generales

Para analizar distintos materiales y realizar controles de calidad en la industria se suelen utilizar los ensayos no destructivos (END). Se trata de métodos físicos que permiten la exploración interna de la pieza sin modificar sus propiedades, de forma que tras el análisis quede apta para su uso. Este tipo de ensayos detecta discontinuidades superficiales e internas y sirven para la detección de heterogeneidades tales como grietas, inclusiones e incluso poros. Podemos definir una discontinuidad como una interrupción en la estructura normal de un material.

Podemos decir que el objetivo de los ensayos no destructivos es la evaluación del estado de los materiales sin que queden afectadas las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de las mismas y que se realizan sin producir daños que afecten a su funcionalidad. Para obtener resultados adecuados es necesario disponer de patrones de calibración y estándares de referencia con la que comparar los resultados.

Los ensayos no destructivos, son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que eran relativamente desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado con sus productos.

La inspección es muy importante, y la concienciación sobre este asunto va en aumento. La inspección durante el proceso de manufactura se realiza para evaluar su calidad y ver si se están elaborando según las normas y/o especificaciones que acrediten la calidad exigida. Las heterogeneidades o defectos afectan directamente la vida útil del producto, es decir, ocasiona o favorece el fallo del mismo, lo que implica pérdidas económicas en la industria.

Hay diversos tipos de ensayos que se adecuan a las necesidades y finalidades de cada pieza o material: ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas sub-atómicas, capilaridad, rayos X, etc...

La selección del tipo de técnica a utilizar depende directamente del tipo de aplicación pero sobre todo del tipo de defecto que esperamos encontrar.

A modo de resumen podemos resumir los objetivos de los END:

- Detección: detectar discontinuidades en materiales y estructuras sin destrucción de los mismos.

- Evaluación: Determinar la ubicación, orientación, forma, tamaño y tipo de discontinuidades.

- Calificación: Establecer la calidad del material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades y/o defectos de acuerdo a las normas de calidad y los objetivos del diseño.

De acuerdo con su aplicación, los ensayos no destructivos se dividen en:

- Técnicas de Inspección Superficial
- Técnicas de Inspección Volumétrica
- Técnicas de Inspección de la integridad o hermeticidad.

Técnicas de Inspección Superficial

Mediante estas sólo se comprueba la integridad superficial de un material. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos no destructivos:

- Inspección visual.
- Líquidos penetrantes.
- Partículas magnéticas.
- Electromagnetismo.
- Termografía.

Técnicas de Inspección Volumétrica

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que son visibles en la superficie de la pieza. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Radiografía industrial.
- Ultrasonidos industrial.
- Radiografía neutrónica.
- Emisión acústica.
- Resonancia acústica.

Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad

Son aquellas en las que se comprueba la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica, sin que existan pérdidas apreciables de presión o de volumen del fluido de prueba en un período previamente establecido. Este tipo de inspección se realiza empleando cualquiera de los siguientes ensayos:

- Pruebas por cambio de presión: hidrostática y neumática.

-Pruebas por pérdida de fluido: cámara de burbujas, detector de halógenos, espectrómetro de masas, cámara de vacío, etc...

Clasificación END según el método físico:

PRINCIPIO FÍSICO	TÉCNICA NO DESTRUCTIVA
Térmicos	Termografía
Radiación	Radiografía
Electromagnetismo	Partículas magnéticas Corrientes inducidas
Ópticas y colores	Inspección visual Líquidos penetrantes
Acústicos	Ultrasonidos Emisiones acústicas Resonancia acústica

Clasificación END según la posición del defecto:

POSICIÓN DEL DEFECTO	TÉCNICA NO DESTRUCTIVA
En la superficie o cerca de ella	Inspección visual Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Corrientes inducidas Electromagnetismo Termografía
En el interior de los objetos	Radiografía Ultrasonidos Radiografía neutrónica Emisión acústica

Ventajas de los ensayos no destructivos:

-Se pueden realizar en cualquier paso de un proceso productivo, al llegar las materias primas, en los diferentes procesos de fabricación, en la inspección final o en la liberación de los productos terminados.

-En la inspección y comprobación de partes y componentes que se encuentran en servicio.

Limitaciones de los ensayos no destructivos:

-La inversión inicial es alta.

-La propiedad física a controlar es medida de forma indirecta.

-Cuando no existen patrones de referencia una misma indicación puede ser interpretada de forma diferente por dos o más inspectores.

-Personal capacitado y calificado.

4.2. Calidad en los END

Para efectuar una aplicación correcta de los ensayos no destructivos, debe seleccionarse previamente con un esquema a seguir para capacitar, calificar y certificar al personal que realiza este tipo de inspecciones.

Para asegurar la correcta realización de este tipo de pruebas han de utilizarse patrones de calibración y estándares de referencia con los que comparar los resultados que se obtienen. Las principales normas o códigos de fabricación quedan recogidas en ASME, ASTM, AWS y API entre otros.

Los inspectores encargados de llevar a cabo los distintos ensayos deben estar debidamente cualificados por la ASNT según niveles I, II y III acorde a los requisitos que se recogen las normas SNT-TC-1A, CP-189. De esta forma quedan altamente capacitados para el manejo de equipos y la realización de técnicas, además adquieren un alto conocimiento de los materiales que manejan.

Rendimiento de una inspección:

El beneficio de una inspección está influenciado por su rentabilidad, que depende esencialmente de cuatro factores: sensibilidad, velocidad, cobertura y fiabilidad.

1. Sensibilidad: Se define como el tamaño mínimo del defecto que puede ser detectado de forma correcta. Su cálculo depende del tipo de material que se está examinando y del objetivo de la inspección, aunque también hay que tener en cuenta la precisión con la que se caracterizan los defectos.

2. Velocidad: Hay que considerar el tiempo empleado en realizar una inspección y el tiempo que se invierte en la interpretación de los datos. Queda principalmente determinado por la técnica no destructiva utilizada.
3. Cobertura: se define como el porcentaje inspeccionado del material objeto de estudio al concluir el ensayo. Depende de la geometría de la pieza, de su ubicación y de la técnica utilizada.
4. Fiabilidad: La fiabilidad de la inspección se define generalmente a través de la probabilidad de detección y la probabilidad de falsa indicación.

Una de las formas de mejorar el rendimiento de la inspección es reducir la velocidad de ensayo que se puede conseguir reduciendo la cobertura de inspección que, a su vez, reduce el costo final de la inspección. También se pueden utilizar varios palpadores de forma simultánea, aunque su manejo y la interpretación de los datos es más complicado además de aumentar considerablemente el coste final del equipo de exploración.

A la hora de realizar técnicas no destructivas se han de tener en cuenta diversos factores como son:

1. El método de inspección utilizado: hay que elegir el procedimiento de inspección más adecuado para la aplicación que se está considerando.
2. La calificación del inspector: El encargado de la inspección debe tener experiencia en el tipo de ensayos que realice, interprete y evalúe los resultados de la inspección. Para ello debe estar debidamente acreditada para certificar su conocimiento sobre equipos, técnicas, materiales y procedimientos.
 - a. Nivel I: Un inspector de este nivel debe estar preparado para realizar, de acuerdo a instrucciones escritas, calibración de equipos, realización de ensayos y evaluación de resultados que determinen la aceptación o rechazo del material objeto de estudio. Para recibir la acreditación debe estar formado por un inspector de nivel III y adquirir experiencia como aprendiz.
 - b. Nivel II: Un inspector de este nivel debe estar preparado para ajustar y calibrar el equipo, para interpretar y evaluar los resultados atendiendo a códigos, normas y especificaciones, debe estar en disposición de preparar instrucciones escritas, organizar y realizar informes acerca de los resultados obtenidos. Para recibir la certificación el inspector ha de trabajar durante un tiempo como inspector de nivel I.
 - c. Nivel III: Es el máximo nivel y certifica que el inspector es capaz de constituir técnicas y procedimientos, interpretar códigos, normas y especificaciones y seleccionar el método de ensayo para una aplicación concreta, ha de tener gran experiencia práctica en tecnología de materiales y procesos de fabricación y conocer las técnicas no destructivas más comunes. Es responsable de la formación y entrenamiento de los inspectores de nivel I y II.

Para conseguir la acreditación nivel III es necesario haber trabajado antes como aprendiz de nivel I y al menos uno o dos años como nivel II.

4.3. Técnicas de inspección superficial

4.3.1. Inspección visual

La inspección visual corresponde al método más sencillo puesto que, de forma rápida, se obtiene una exploración superficial de los materiales extrayendo información del mismo rápidamente y a simple vista; con este método se pueden detectar únicamente defectos macroscópicos.

Esta técnica requiere de un gran conocimiento previo acerca de las características de la pieza a ser examinada para una acertada interpretación de las posibles indicaciones.

Con este método se pueden detectar defectos macroscópicos como abultamientos, grietas y delaminaciones superficiales.

Para este ensayo se requiere una fuente efectiva de iluminación, diferente en función del tipo de defecto que busquemos localizar.

Podemos dividir este ensayo en dos grandes grupos: inspección visual directa o remota. Este último método de inspección es un ensayo en el cual el inspector se sirve de espejos, telescopios, fibra óptica, cámaras, etc.

Con el desarrollo de la tecnología, que está en auge, un nuevo método podría considerarse como un método de inspección visual remota, ya que se realiza con un sistema de cámaras y un software que procesa las imágenes, esta nueva técnica se trata de la visión artificial.

La “visión artificial” está incluida en el concepto de “inteligencia artificial”. Mediante la utilización de las técnicas adecuadas, permite la obtención, procesamiento y análisis de cualquier tipo de información especial obtenida a través de imágenes digitales.

La visión artificial la componen un conjunto de procesos destinados a realizar el análisis de imágenes: captación de imágenes, memorización de la información, procesado e interpretación de los resultados.

Con la visión artificial se han mejorado y optimizado muchos procesos ya existentes:

- Automatizar tareas repetitivas de inspección realizadas por operadores.
- Realizar controles de calidad de productos que no era posible verificar por métodos tradicionales.
- Realizar inspecciones de objetos sin contacto físico.
- Realizar la inspección de toda la producción a gran velocidad.

- Reducir el tiempo de ciclo en procesos automatizados.
- Realizar inspecciones en procesos donde existe diversidad de piezas con cambios frecuentes de producción

Este concepto de visión artificial se desarrollará con más detalle en apartados posteriores.

Ventajas inspección visual:

- Simple, se puede utilizar en casos donde otros métodos no.
- Se emplea en cualquier etapa de un proceso productivo o durante las operaciones de mantenimiento preventivo o correctivo.
- Muestra las discontinuidades más grandes y generalmente señala otras que pueden detectarse de forma más precisa por otros métodos.
- Puede detectar y ayudar en la eliminación de discontinuidades que podrían convertirse en defectos.
- Las ayudas ópticas mejoran mucho el proceso.

Inconvenientes de la inspección visual:

- Requiere accesibilidad para visualidad directa de la zona, si la zona es de difícil acceso se pueden emplear robots motorizados o vídeos portátiles.
- La calidad de la inspección visual depende en gran parte de la experiencia y conocimiento del inspector.
- Está limitada a la detección de discontinuidades superficiales y macroscópicas.
- La detección de discontinuidades puede ser difícil si las condiciones de la superficie sujeta a inspección no son correctas.

4.3.2. Líquidos penetrantes

Para detectar discontinuidades superficiales, tales como roturas, pliegues, inclusiones o porosidades, en materiales no porosos (metales, vidrio, plásticos) que afloran a la superficie de los materiales examinados.

Para realizar este ensayo hay que seguir una serie de pasos muy bien diferenciados que no se pueden suprimir o eliminar en ningún caso.

- 1) Limpieza inicial: Hay que dejar la superficie de la pieza libre de contaminantes, sean éstos óxidos, grasa, aceite, pintura, etc..., pues impiden al penetrante introducirse en las discontinuidades
 - 1.1) Pre-Limpieza: medios químicos o mecánicos para remover contaminantes de la superficie.

1.2) Limpieza con solvente: removedor.

- 2) Penetración: Se aplica sobre toda la superficie un líquido de alta capilaridad, suele ser de color rojo, que penetra en el material en el caso de que exista un defecto. Actualmente existen diferentes clases de penetrantes, que tienen aplicaciones bien definidas, en función de la calidad de la superficie, de la sensibilidad y del tiempo de penetración.

Tipos de penetrantes:

-Penetrantes removibles con agua.

-Penetrantes pos-emulsificables. Requieren de la aplicación de una sustancia para provocar que el penetrante se solubilice con agua.

-Penetrantes removibles con solvente.

- 3) Limpieza intermedia: Se elimina el exceso de líquido penetrante.

- 4) Revelado: Líquido revelador de color blanco que tiene una gran capacidad de absorción, absorbe el líquido penetrante que ha quedado en el interior de las discontinuidades quedando manchado de rojo en las zonas de defectos.

Tipos de reveladores:

-Reveladores secos. Líquidos fluorescentes

-Reveladores en suspensión. Pueden ser de tipo acuoso o no acuoso, están compuestos de un material sólido de tamaño controlado de partículas, las cuales se mantienen en suspensión mediante una agitación vigorosa.

-Revelador en suspensión acuosa. Se recomienda cuando la inspección se realiza empleando penetrantes removibles con agua, son los reveladores con más baja resolución.

-Reveladores en suspensión no acuosa. Son los más empleados y tienen la ventaja de una evaporación muy rápida.

-Reveladores en solución. Generalmente son soluciones acuosas y tienen la ventaja con respecto a los reveladores en suspensión de no necesitar una agitación continua para mantener la solución homogénea.

- 5) Observación: Después de que ha transcurrido el tiempo de revelado, la pieza está lista para su evaluación. Se ven a simple vista las indicaciones de los defectos. La calidad de la inspección depende principalmente de la norma de aceptación, de la habilidad y de la experiencia del inspector para encontrar y valorar las indicaciones presentes en la pieza.

- 6) Limpieza final



Figura 89. Dibujo distintas fases líquidos penetrantes [4]

Actualmente existen 18 posibles variantes de inspección empleando este método; cada una de ellas ha sido desarrollada para una aplicación y sensibilidad específica.

Es muy importante definir las características de las discontinuidades y el nivel de sensibilidad con que se las quiere detectar, ya que si son relativamente grandes o se quiere una sensibilidad entre baja y normal, se recomienda emplear penetrantes visibles; pero si la discontinuidad es muy fina y delgada o se requiere de una alta o muy alta sensibilidad, es preferible emplear los penetrantes fluorescentes.

Otro factor de selección es la condición de la superficie a inspeccionar ya que si es una superficie rugosa, como sería el caso de una unión soldada o una pieza fundida, se debe emplear un penetrante líquido removible con agua. Pero si la superficie es lisa y pulida, es preferible emplear penetrante removible con solvente. Y así con muchos otros factores.

Ventajas:

- Fácil de llevar a cabo.
- Extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie.
- Configuración de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- Preciso.
- Económico.
- Relativamente sencillo de interpretar, se necesitan pocas horas de capacitación de los inspectores.
- Razonablemente rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.

Desventajas:

- Sólo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos.

- Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.
- No se proporciona un registro permanente de la prueba no destructiva.
- Una selección incorrecta de la combinación de revelador y penetrante puede ocasionar falta de sensibilidad del método.

4.3.3. Partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, es una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes.

Cuando los materiales ferromagnéticos se magnetizan, aparece un flujo magnético mucho mayor que en los materiales no magnéticos. El principio de este ensayo es el hecho de que cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este se deforma o produce un polo. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo en la superficie sujeta a inspección y por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

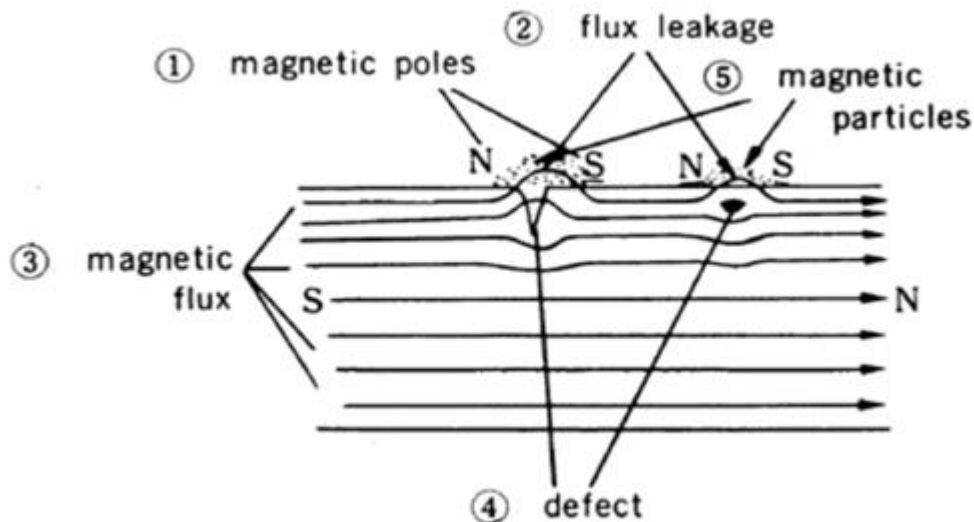


Figura 90. Dibujo ensayo partículas magnéticas [6]

Las perturbaciones en el campo se deben a presencia de defectos o anomalías en el material que se inspecciona. Así un aspecto importante es determinar cómo se induce y orienta el campo magnético en la pieza, ya que de esto dependerá la sensibilidad de detección de las anomalías.

Existen dos formas de inspección según se aplique el campo magnético; la forma continua, en la cual el campo magnético se mantiene constante en la inspección; y el método por campo residual, que consiste en aplicar un campo magnético y después de que se retira, se mide la magnetización residual del material. Este segundo método se aplica en materiales que tienen alta capacidad para retención del campo magnético.

Actualmente existen 32 variantes del método, que al igual que los líquidos penetrantes sirven para diferentes aplicaciones y niveles de sensibilidad.

-Magnetización por yugo:

Se puede magnetizar la pieza a inspeccionar con un magneto denominado yugo; al colocarlo sobre un área uniforme, se genera un campo magnético cuyas líneas conectan los dos polos del magneto, el yugo se puede girar por lo tanto podemos tener diferentes orientaciones del campo magnético sobre una misma superficie. Por lo tanto, el empleo de yugos desarrolla procedimientos muy versátiles. El principal limitante es el tamaño del área que se quiere inspeccionar, particularmente si la pieza es muy grande.

Existen dos tipos de yugo: los electroimanes y los imanes permanentes.

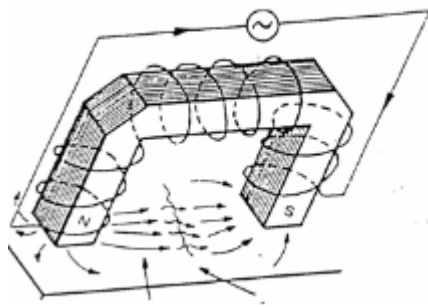


Figura 91. Magnetización por yugo

-Magnetización por bobina:

Pueden usarse bobinas electromagnéticas para producir en una pieza colocada en su interior, un campo magnético longitudinal a lo largo del eje de la misma bobina. La magnitud de la corriente eléctrica en la bobina determina la intensidad del campo magnético que es proporcional a la corriente y al número de espiras de la bobina. Para obtener la mayor sensibilidad de detección un defecto debe estar orientado perpendicularmente a la dirección del campo magnético.

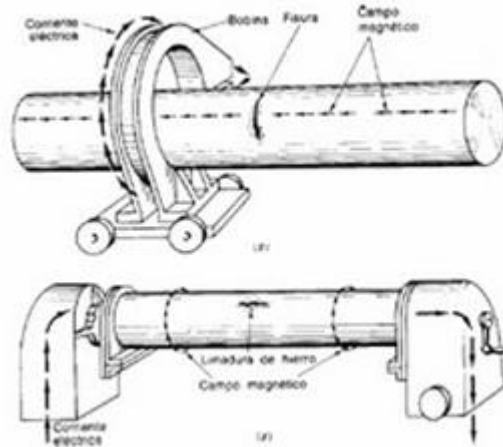


Figura 92. Magnetización por bobina

Las bobinas son una forma muy simple para inducir y controlar el campo magnético sobre una pieza que se va a inspeccionar, y no involucra contacto directo con la misma. Como desventaja está que es necesario que la pieza se coloque en el centro de la bobina para asegurar la uniformidad del campo magnético.

-Magnetización por puntas de contacto:

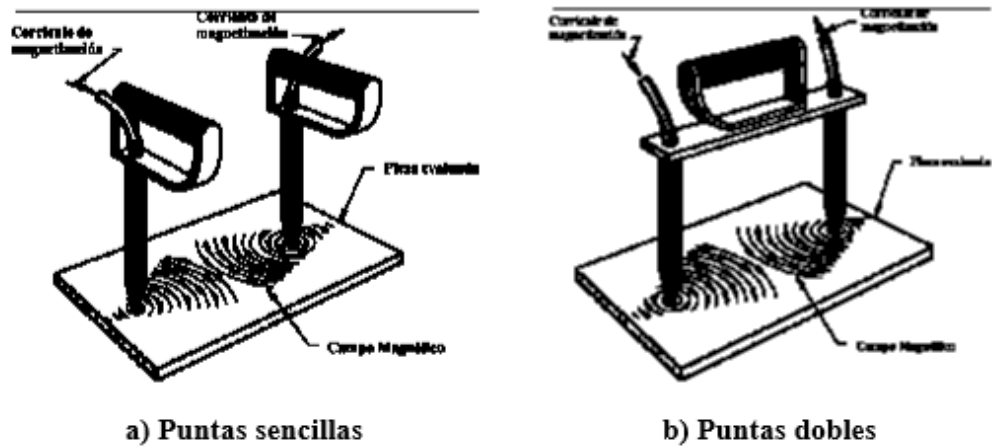


Figura 93. Magnetización por puntas de contacto [21]

Cuando se emplean las puntas de contacto el campo magnético se induce a través de una corriente eléctrica que fluye por las puntas y el material inspeccionado. Tienen gran movilidad y fácil manejo. Además su versatilidad permite variar la magnitud y orientación del campo magnético facilitando la detección de defectos,

independientemente de su orientación o localización. La separación de las puntas no debe ser superior a 0.3 m. Otras desventajas son la interferencia del campo magnético que se puede producir por la corriente en el material, y el riesgo de daño al material por una chispa por descarga eléctrica.

- Conductores centrales:

Cuando se van a inspeccionar tubos, anillos o piezas con agujeros, el campo magnético se puede inducir mediante una corriente eléctrica (directa o alterna) que fluye a través de un conductor que pase por el centro del tubo, anillo o agujero. En este caso, la intensidad del campo magnético es inversamente proporcional a la distancia del objeto al eje conductor.

En la figura se muestra cómo la intensidad del campo magnético es mayor en el interior de la sección tubular o anular, por lo que este método tiene mayor sensibilidad para la inspección de interiores.

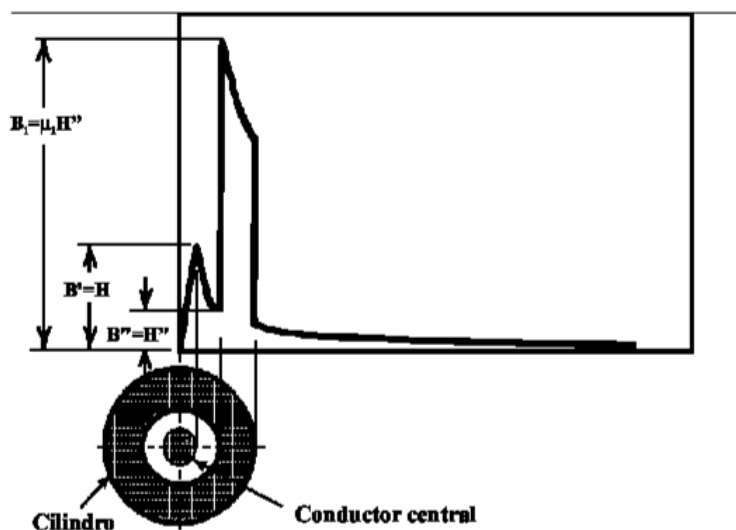


Figura 94. Magnetización por conductores centrales [21]

La mayor ventaja que se obtiene con los conductores centrales es que no hay contacto directo con la pieza inspeccionada con lo que se reduce el riesgo de dañarla. Aunque con esta técnica se consigue una alta sensibilidad para identificar anomalías en superficies internas, en superficies externas no es así y el método tampoco es sensible a defectos cuya orientación sea paralela al eje del conductor central. Otro inconveniente es que el conductor debe tener capacidad de permitir el flujo de corriente eléctrica que se requiere para generar un campo magnético con la intensidad necesaria para la inspección, que por lo general, debe ser muy grande.

Ventajas:

- Método simple, fácil, portable y rápido.
- Requiere un menor grado de limpieza que los líquidos penetrantes.
- Generalmente es un método más rápido y económico.
- Puede revelar discontinuidades que no afloran a la superficie.
- Es muy práctico en la búsqueda de defectos superficiales, puede llegar a detectarse discontinuidades de tamaño muy pequeño.

Desventajas:

- Solo aplicable en materiales ferromagnéticos.
- No tiene gran penetración.
- No puede calcularse la profundidad de las heterogeneidades detectadas.
- Antes de la inspección se deben limpiar las piezas, y después se deben desmagnetizar.
- El flujo magnético tiene que tener una dirección normal al plano del defecto.
- Disminuye su sensibilidad cuando aumenta el espesor de la muestra.

4.3.4. Corrientes inducidas

Corrientes inducidas o de Eddy se utilizan para la detección de discontinuidades en superficies metálicas de geometría sencilla como tubos, barras, cables, etc... Se busca detectar heterogeneidades como grietas, corrosión intergranular y/o tratamientos térmicos. Esta técnica se emplea para inspeccionar materiales que sean electroconductores, siendo especialmente aplicable a aquellos que no son ferromagnéticos.

La inspección por Corriente de Eddy está basada en el efecto de inducción electromagnética. Su principio de operación es el siguiente:

Se conecta un generador de corriente alterna, con frecuencia comprendida entre 500 y 5000 HZ, a una bobina, que produce un campo magnético. Si la bobina se coloca cerca de un material que es eléctricamente conductor, el campo magnético de la bobina, llamado primario, inducirá una corriente eléctrica en el material inspeccionado. A su vez, esta corriente generará un nuevo campo magnético (campo secundario), que es proporcional al campo primario pero de signo contrario. En el momento en que la corriente de la bobina se vuelve cero, el campo magnético secundario inducirá una nueva corriente eléctrica en la bobina. Este efecto se repetirá cuantas veces cambie la corriente de signo.

Para la detección de discontinuidades por electromagnetismo, éstas deben ser perpendiculares a las corrientes de Eddy.

Esta técnica cuenta con una amplia gama de alternativas, cada una con un objetivo específico de detección.

Antes de iniciar las pruebas con electromagnetismo, es conveniente revisar la siguiente información:

- Conocer la forma y las características eléctricas, metalúrgicas y magnéticas del material a inspeccionar.
- Si se trabaja bajo normas internacionales, los instrumentos de inspección, así como las sondas deben ser de los proveedores de las listas de proveedores aprobados o confiables publicados en ellas.
- Una vez seleccionado uno o varios proveedores, no es recomendable mezclar sus productos.

Las etapas básicas de esta técnica de inspección son:

- 1) Limpieza previa: La importancia de este paso depende de si el equipo puede operar sin contacto, ya que se pueden producir falsas indicaciones por la presencia de óxidos de hierro, capas de pintura gruesas, o algún tipo de recubrimiento que sea conductor.
- 2) Selección de la sonda de prueba: Este paso es tan crítico como la elección del instrumento empleado. La capacidad de detección de una sonda es proporcional a:

-La magnitud de la corriente aplicada.

-La frecuencia de la corriente.

-Las características de diseño de la sonda que incluyen: inductancia, diámetro de enrollamiento, longitud de la bobina y número de espiras.

Las ondas pueden ser absolutas o diferenciales.

Las absolutas son aquellas que realizan la medición sin necesidad de una referencia directa o de un patrón de comparación. Sus principales ventajas son:

-Responden a cambios bruscos o progresivos de la característica que mide.

-Cuando existe más de una indicación, estas son relativamente fáciles de separar (interpretación sencilla).

-Puede detectar la longitud real de una discontinuidad.

Las principales limitaciones de este tipo de arreglo son:

-Son muy sensibles a cambios de temperatura (térmicamente inestables).

-Registran cualquier variación de la distancia entre la bobina y la pieza (falsas indicaciones).

Las sondas diferenciales son aquellas que están formadas por dos o más bobinas conectadas entre sí, pero con diferente dirección de enrollamiento. Se puede dividir en dos tipos:

- a) Bobinas diferenciales autorreferidas: una bobina es la que realiza las mediciones y en un punto cercano existe una segunda bobina con un núcleo con el cual se balancea el equipo cuando se calibra el sistema.
 - b) Bobinas diferenciales con referencia externa: dos variantes. En un primer caso, se coloca la bobina de referencia en el material a inspeccionar (bobinas separadas físicamente). En segundo lugar, las bobinas de medición y referencia se colocan sobre un mismo objeto.
- 3) Frecuencia de prueba: Normalmente está referida al valor de penetración normal del material, al tipo de discontinuidad que se espera localizar y a la profundidad a la que se encuentra.
 - 4) Tipo de calibración que se desea efectuar y selección del Patrón de Calibración o de Referencia: Los instrumentos de pantalla osciloscópica pueden calibrarse para detectar fracturas superficiales o bien de cambios de conductividad eléctrica. En general la pantalla muestra como la corriente de Eddy es afectada por la pieza, si existe una fractura o una costura la corriente se reduce (las discontinuidades alteran el patrón observado en la pantalla).
 - 5) Interpretación de las indicaciones: Hay que ser cuidadoso ya que un cambio en las propiedades del material también afecta las lecturas.

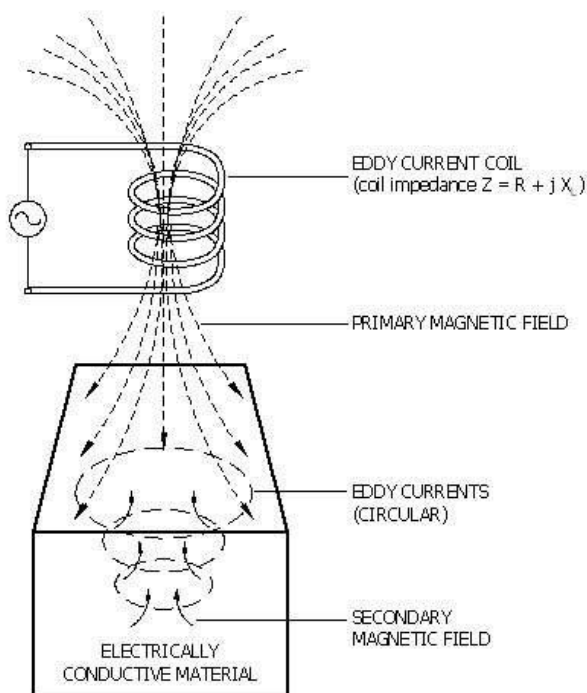


Figura 95. Dibujo ensayo por corrientes de Eddy

Ventajas:

- Sistema rápido, sensible y portable.
- Detecta y generalmente evalúa discontinuidades internas en casi cualquier conductor eléctrico.
- La inspección por Electromagnetismo, en muchos casos, puede ser completamente automatizada.
- No requiere contacto directo por lo que puede emplearse a altas velocidades para la inspección continua a bajo costo.
- Con esta técnica es posible clasificar y diferenciar materiales de aleaciones, tratamientos térmicos o estructura metalúrgica distinta, siempre y cuando presenten una diferencia significativa de conductividad.
- Es excelente para la inspección de productos tubulares, de preferencia fabricados con materiales no ferromagnéticos.

Inconvenientes:

- Sensible a combinaciones y variaciones del material.

-Debe eliminarse de la superficie cualquier tipo de contaminación o suciedad que sea magnética o eléctricamente conductora.

-Requiere de probetas especiales para cada examen, la bobina de prueba debe diseñarse en especial para una pieza específica.

-La profundidad de la inspección está limitada a aproximadamente 6mm de penetración y depende de la frecuencia elegida para excitar el campo electromagnético y el tipo de material inspeccionado.

-Gran entrenamiento para calibrar y operar adecuadamente el equipo de prueba.

-Señal sensible a las diferencias en composición y estructura del material, lo que enmascara pequeños defectos o proporciona indicaciones falsas.

4.3.5. Termografía infrarroja

Técnica de ensayo no destructivo (END) sin contacto que obtiene la temperatura de la superficie de un cuerpo a través de la captación de la radiación infrarroja que ésta emite. El mapa térmico de la superficie obtenido es llamado termograma.

La técnica termográfica supone la evaluación y registro de la temperatura a distancia. La termografía infrarroja capta la radiación emitida por cualquier cuerpo por el hecho de encontrarse a una temperatura superior al cero absoluto (-273°C) y cuya longitud de onda depende de la temperatura a la que se encuentre dicho cuerpo.

El análisis termográfico consiste en la obtención gráfica de la temperatura en la superficie de un objeto. Aplicado a la industria, podemos obtener un mapa de temperaturas donde se visualizan puntos fríos o calientes sobre una tubería, pieza, maquinaria, envolventes, puntos de contacto en subestaciones eléctricas, etc.

La mayoría de las disfunciones en los diferentes procesos o máquinas y equipos se manifiestan por un cambio de la temperatura normal del servicio. Normalmente, los defectos se verán más calientes en comparación con el área que los rodea, ya que no pueden transferir el calor fácilmente; o en otras palabras, se restringe la velocidad de enfriamiento debido al proceso de difusión. También se puede dar el caso contrario aunque es menos frecuente. Una detección rápida y eficaz del mismo puede prevenir fallos de funcionamiento o consecuencias fatales.

De este modo podremos conseguir:

- Conocer el estado térmico de una instalación o de un proceso
- Detectar la presencia de pérdidas existentes (fugas térmicas) y por lo tanto de posibles puntos de actuación.
- Una mayor eficiencia energética de los sistemas evaluados y, por tanto, el ahorro correspondiente.

La termografía por infrarrojos utiliza como equipo detector el termógrafo. Es un aparato que percibe la radiación infrarroja y la transforma, a través de una pantalla, en imágenes luminosas visibles por el ojo humano. Los objetos más calientes emiten más radiación infrarroja que los fríos.

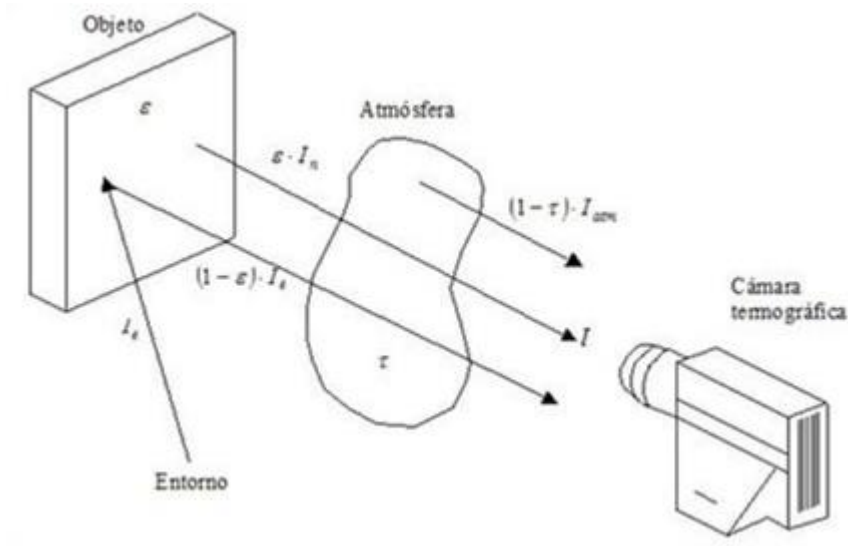
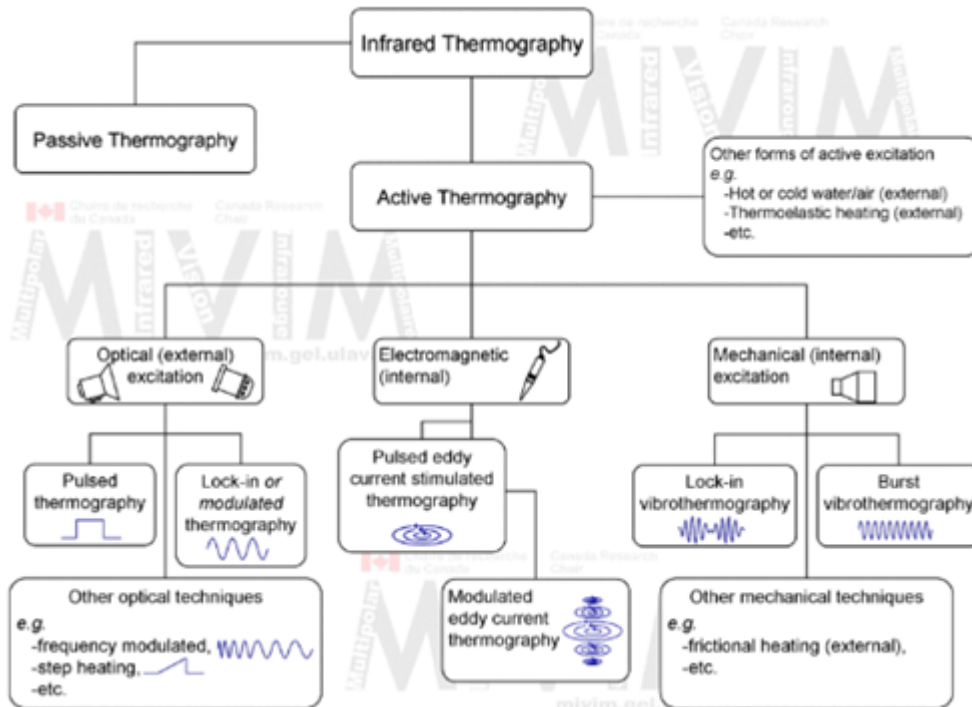


Figura 96. Dibujo termografía [8]

Existen varios tipos de técnicas:



[8]

- Termografía pasiva:

Se refiere a aquellos casos en los que no se usa ninguna estimulación de calentamiento o enfriamiento externo para provocar un flujo de calor en el cuerpo inspeccionado. El objeto de estudio produce un patrón de temperaturas típico por el hecho de estar involucrado en un proceso (industrial) que produce calor. Unos pocos grados de diferencia respecto a la temperatura normal de referencia (la de trabajo) del objeto muestran un comportamiento inusual. La termografía es capaz de capturar información de temperatura en tiempo real desde una distancia segura sin ninguna interacción con el objeto.

La TIR pasiva se usa, por ejemplo, para la monitorización del producto en procesos de fabricación, monitorización de procesos de soldadura o comprobación de la eficiencia de los discos de freno de automóviles.

- Termografía activa:

En termografía activa se usa una estimulación externa para provocar un flujo de calor interno en el objeto estudiado. Un defecto interno afectaría al flujo calorífico produciendo un contraste térmico en la superficie. Las técnicas de TIR principales son: TIR pulsada, step heating y TIR lock-in.

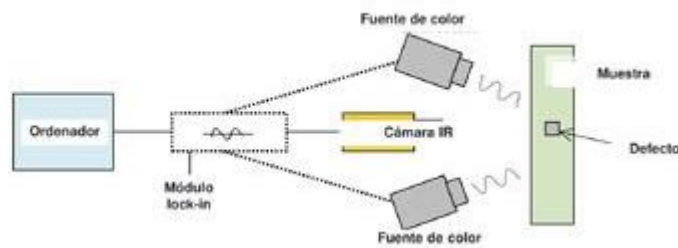


Figura 97. Termografía activa [7]

-TIR activa pulsada:

Consiste en aplicar un pulso corto de calor sobre el objeto (3ms a 2s dependiendo del material) y grabar el enfriamiento del espécimen. El frente térmico aplicado se propaga en el material y cuando encuentra un defecto el ratio de difusión es reducido produciendo un contraste de la temperatura sobre ese punto.

-Step Heating:

También llamada de pulso largo, el objeto es calentado continuamente a baja potencia y se monitoriza el incremento de temperatura en la superficie. Aplicaciones del step heating son, la evaluación de espesores de recubrimientos y de uniones de recubrimientos a sustrato en estructuras compuestas y también la detección de corrosión oculta en el fuselaje de aviones, por ejemplo.

-TIR lock-in:

Está basada en la generación de ondas de calor dentro del espécimen inspeccionado (por ejemplo, depositando periódicamente calor en el cuerpo por medio de una lámpara modulada) y monitorizando de forma sincronizada el campo de temperaturas oscilante obtenido mediante una computadora o un amplificador lock-in. Por transformación de Fourier se obtienen las imágenes de fase y amplitud de la temperatura. Las imágenes fase están menos afectadas por heterogeneidades del calentamiento y de la emisividad, y son más sensibles en profundidad que otras técnicas de TIR. Sin embargo, requiere como mínimo la observación de un ciclo de modulación y cada ensayo es realizado para una frecuencia estudiando una profundidad cada vez, lo que aumenta el tiempo de inspección.

La TIR lock-in es usada, por ejemplo, en inspecciones de componentes estructurales, detección de remaches sueltos, investigación de estructuras de absorción de radar y detección de grietas, descolados, etc.

-TIR de fase pulsada:

Es una mezcla entre la TIR lock-in y TIR pulsada. La aplicación del ensayo es la misma que en termografía pulsada pero la adquisición de datos es tratada mediante transformada de Fourier para obtener la amplitud y la fase de la imagen a diferentes frecuencias con un único ensayo, con la consecuente rapidez de ensayo

Además de la elección de la técnica más adecuada, un procesamiento de los datos adquiridos es, esencial para optimizar la localización y visualización de defectos. Incluso este procesamiento de datos puede permitir obtener medidas de otros parámetros aparte de las temperaturas absolutas de la superficie, como por ejemplo profundidad a la que se encuentra el defecto, difusividad térmica, coeficiente de calor transmitido, medidas de flujo térmico o análisis tensional.

Ventajas:

- Es un método de inspección rápido y sin contacto que sirve para localizar defectos por debajo de la superficie y en ella.
- Interpretación de los termogramas sencilla.
- Permite la detección exacta de defectos subsuperficiales en tiempo cuasi-real, lo que permite cuantificar la gravedad y repercusión del defecto además de programar las acciones necesarias de mantenimiento.
- Radiación infrarroja no es nociva (al contrario que los rayos X).
- Puede ser aplicado a un amplio rango de materiales y áreas relativamente amplias pueden ser inspeccionadas en un único ensayo.

Desventajas:

- Únicamente es efectivo en la detección de defectos poco profundos.

- Requiere operarios con formación especializada y una amplia experiencia.
- Resulta complicado producir un calentamiento uniforme al aplicar las técnicas activas y pueden existir variaciones de emisividad en diferentes partes del cuerpo de estudio.

4.4. Técnicas de inspección volumétrica

4.4.1. Radiografía industrial

Es un método no destructivo para buscar defectos internos en piezas, se busca detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o en la configuración física del material. Es muy interesante ya que permite asegurar la integridad y confiabilidad de un producto; además, proporciona información para el desarrollo de mejores técnicas de producción y para perfeccionamiento de un producto en particular.

Se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, debido a que este método emplea radiación de alta energía, que penetra materiales sólidos, por lo que el propósito principal de este tipo de inspección es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades presentes.

Es uno de los métodos más antiguos y de mayor uso en la industria, sin embargo, se realizan continuamente avances que modifican las técnicas radiográficas con la finalidad de hacer más confiables los resultados durante la aplicación de la técnica.

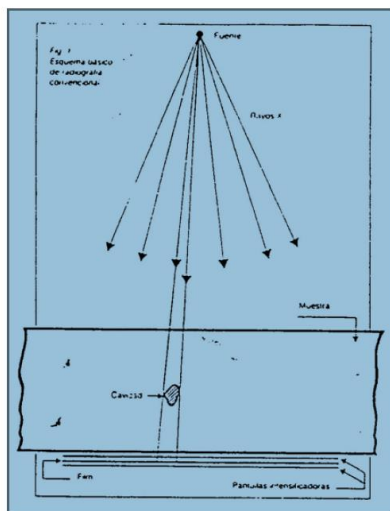


Figura 98. Dibujo radiografía industrial



Figura 99. Foto radiografía industrial

Se fundamenta en la capacidad de penetración de los rayos X o de los Gamma en los distintos materiales en función de su naturaleza o espesor, es decir, en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética. Las radiaciones que se utilizan tienen una longitud de onda muy corta y muy alta energía.

El material se irradia y se presentan cambios internos que hacen que se retenga la radiación si existen heterogeneidades. La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión en una placa o papel fotosensible. Al colocar una película radiográfica se obtienen cambios en la tonalidad en las zonas donde se recibe la radiación. La correcta interpretación de la imagen permite la detección de fallos que no se pueden ver.

La energía de los rayos X o Gamma es absorbida o atenuada al atravesar un material (de manera proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado). Este proceso es muy similar a la fotografía solo que en este caso con rayos X o Gamma.

Actualmente, dentro de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiográfica, como ya se ha ido introduciendo: Radiografía con rayos X y Radiografía con rayos Gamma. La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación: los rayos X proceden de un alto potencial eléctrico, los rayos gamma se producen, en cambio, por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo.

Equipo está compuesto por diversas partes:

- Fuente de radiación (rayos X o rayos Gamma).
- Controles de la fuente.
- Película radiográfica.
- Pantallas intensificadoras.
- Indicadores de calidad de una imagen.
- Accesorios.

Es una técnica con la que se obtienen buenos resultados para la detección de defectos volumétricos que tengan un volumen superior al 3% relativo al espesor del material en la dirección de los rayos incidentes.

Requisitos y Secuencia de la Inspección por Radiografía Industrial

En primer lugar se deben conocer algunas características del material que se va a examinar (tipo de metal, configuración, espesor...) para seleccionar el radioisótopo o el kilovoltaje adecuado. Una vez seleccionada se deben calcular las distancias entre ésta, el objeto y la película para obtener una nitidez adecuada, así como la película con las características convenientes para obtener el resultado deseado.

La película se coloca en un porta película para evitar que la luz dañe la emulsión fotográfica, y además contiene las pantallas intensificadoras que tienen como misión reducir el tiempo de exposición, este proceso se realiza en el laboratorio.

El siguiente paso consiste en poner en práctica las medidas de seguridad radiológica, en la zona en la que se va a efectuar la radiografía. Es muy importante mantenerse a una distancia prudente de la fuente para evitar la exposición. En segundo lugar, es una medida a la que no se puede renunciar el usar protección entre el individuo y la fuente.

La exposición se realiza, bien sea sacando la cápsula que contiene al radioisótopo o encendiendo el aparato de rayos X; esto se lleva a cabo durante el tiempo previamente calculado para realizar la exposición. Una vez terminada la exposición se recupera la cápsula o se apaga el equipo de rayos X y la película se lleva a revelar. El revelado es una parte muy crítica y se lleva a cabo en varios pasos: revelado, baño ácido o de parada, baño de fijado y lavado final.

Ventajas:

- Su uso se extiende a diversos materiales.
- Se obtiene una imagen visual del interior del material.
- Descubre errores de fabricación.
- Método sensible.
- Proporciona una imagen en película pudiéndose conservar como evidencia objetiva de la presencia o no de defectos.

Inconvenientes:

- No debe emplearse cuando la orientación de la radiación sobre el objeto sea inoperante, es decir, no es posible obtener una definición correcta.
- La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados.
- No es recomendable en piezas de geometría muy complicada.

- Discontinuidades de tipo laminar no pueden ser detectadas.
- Método peligroso ya que el operador se expone a la radiación, su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.
- Debido al uso de materiales radiactivos se necesita un permiso especial para su realización además de detectores de radiación para asegurar la integridad y salud de los inspectores.
- Los inspectores encargados han de tener conocimiento sobre el tratamiento de imágenes, se requiere personal altamente capacitado, calificado y con experiencia.

4.4.2. Ultrasonidos

Este sistema tiene sus orígenes en los ensayos de percusión, en los cuales los materiales eran golpeados con un martillo y se escuchaba cuidadosamente el sonido que la pieza examinada emitía.

Las ondas ultrasónicas son aquellas ondas de sonido de frecuencia superior a 20 KHz, la escala de sonido audible está comprendida entre aproximadamente 16 Hz a 20 kHz. Estas ondas son mecánicas lo que implica que están compuestas por oscilaciones de pequeñas partículas del material.

Es uno de los ensayos no destructivos más empleados debido a su fácil manejo, no exige grandes requisitos de Hardware y Software y la inspección se produce in situ (otras técnicas en el laboratorio).

Las ondas ultrasónicas se reflejan en zonas de transición, es decir, cuando aparece un cambio brusco de la impedancia acústica Z. La diferencia de impedancia en superficies límite acero-aire es muy alta, este es el caso que se da en los defectos como grietas.

Impedancia acústica (Z):

Para calcular las presiones del sonido de la onda sonora reflejada y de la transmitida se requiere la impedancia acústica Z de los materiales. La impedancia acústica Z del material se define como el producto de su velocidad de sonido c y su densidad ρ .

$Z = \rho \cdot c$ donde Z es la impedancia acústica (Pa·s/m), ρ la densidad del material (Kg/m³), c la velocidad del sonido (m/s).

En Volkswagen Navarra se dispone de dispositivos de ultrasonidos de método pulso-eco, es decir, que el emisor y el receptor están en el mismo elemento y la frecuencia de sus ondas, en este caso, puede oscilar entre los 0.5 y 25 MHz. Se detectan discontinuidades en superficies, por medio de técnicas de pulsos y ecos.



Figura 100. Trabajador realizando ensayo por ultrasonidos

Las ondas ultrasónicas las suelen producir materiales piezoeléctricos.

Efecto piezoeléctrico:

Cristales en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en su superficie. La carga cambia de signo si se invierte la dirección del esfuerzo, este efecto es reversible. La piezoelectricidad está basada en una propiedad de la célula elemental de la estructura cristalina.

El efecto piezoeléctrico directo es el que aparece cuando el material es deformado por fuerzas externas y consecuentemente se generan cargas eléctricas en su superficie, este efecto se utiliza en el receptor ultrasónico. El efecto contrario recibe el nombre de efecto piezoeléctrico inverso, y es lo que se utiliza en los transmisores ultrasónicos.

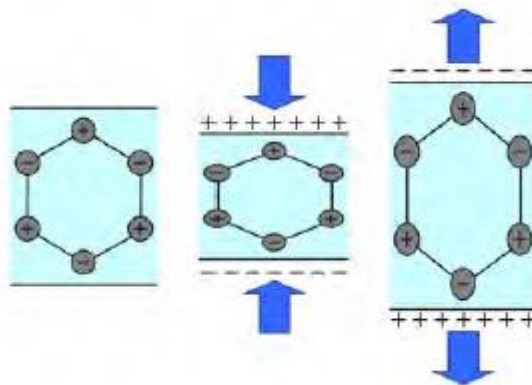


Figura 101. Efecto piezoeléctrico [4]

Los transductores son dispositivos en los cuales se produce la emisión y recepción de los ultrasonidos. En su interior tienen un cristal piezoeléctrico que al ser excitado eléctricamente comienza a vibrar a frecuencias del orden de veinte mega hertzios,

generando así ultrasonidos con su frecuencia característica. También es receptor, cuando el cristal contenido en el transductor es excitado por ultrasonidos genera señales eléctricas.

Cuando se tiene en cuenta la detección de heterogeneidades se necesita que el haz sonoro del palpador abarque la máxima superficie de la pieza objeto de estudio. Para ello se recomiendan palpadores de baja frecuencia porque poseen una divergencia angular bastante grande.

Cuando además de detectar reflectores (heterogeneidades) se quiere localizarlos y saber su tamaño, es interesante utilizar palpadores cuyo haz sonoro sufra la máxima distorsión al alcanzar la discontinuidad además ha de incidir sobre la misma de la forma más perpendicular posible. Además hay que tener en cuenta la naturaleza, estructura y geometría del material. Por ejemplo para grano muy fino se recomienda utilizar frecuencias entre 5-10 MHz, grano fino 2-5 MHz y para grano grueso 0.5-2 MHz.

El diámetro del cristal determina la sección de salida de los ultrasonidos, son de diámetros 3,6mm, 4,5mm y 6mm. Cada uno de ellos genera un flujo de ultrasonidos de diámetro diferente.



Figura 102. Fotos distintos transductores

Hoy en día contamos con una infinidad de variantes de la inspección ultrasónica; cada una de ellas ha sido especialmente desarrollada para poder detectar un tipo particular de discontinuidad o para inspeccionar diferentes materiales.

Requisitos y Secuencia de la Inspección por Ultrasonido Industrial

Antes de empezar la inspección es necesario definir varios parámetros:

- Cuál es el tipo de discontinuidad que se puede encontrar
- Qué extensión y orientación puede tener la pieza
- Qué tolerancias se pueden aplicar para aceptar o rechazar la indicación.

Los equipos que se comercializan forman un abanico muy grande, por lo que antes de comprar un equipo es conveniente que se analicen todas las posibles alternativas de operación.

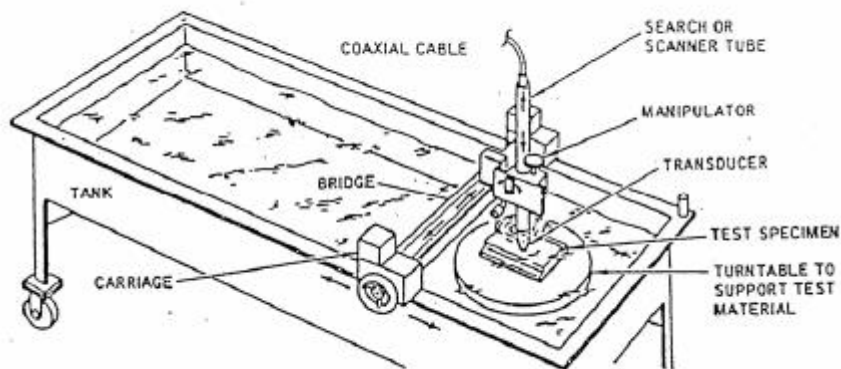


Figura 103. Dibujo dispositivo de ensayo por ultrasonidos automatizado

Las normas establecen que los requisitos mínimos que debe cumplir cualquier instrumento de inspección por ultrasonidos sea:

- a) La ganancia debe ser por lo menos de 60 dB (que se pueda amplificar las señales del orden de 1000 veces como mínimo), y ésta debe ser calibrada por pasos discretos de 2dB.
- b) La pantalla debe tener una retícula grabada en la pantalla del tubo de rayos catódicos y deberá estar graduada en valores no menores del 2% del total de escala.
- c) El ruido del instrumento no debe exceder el 20% del total de la escala vertical cuando la ganancia esté en máximo de operación.
- d) El instrumento debe ser revisado y, en caso necesario, recalibrado por un taller de servicio autorizado por el fabricante.

Se debe seleccionar el palpador y el cable coaxial a ser empleado, la longitud del cable afectará a la calidad de inspección, por lo que se deben evitar el uso de cables largos. La selección de él dependerá en gran medida la calidad de la inspección.

Los factores a ser tomados en cuenta para la selección del palpador son:

- Número de elementos piezoeléctricos.
- El tipo de inspección (contacto, inmersión, alta temperatura).
- El diámetro del elemento piezoeléctrico.
- La frecuencia de emisión.

-En su caso, el ángulo de refracción.

-El tipo de banda.

-El tipo de protección de antidesgaste.

Es importante apuntar la necesidad de emplear un acoplante (aceite, grasa o glicerina) con objeto de que el sonido pueda transmitirse del transductor a la pieza de trabajo sin que existan grandes pérdidas de energía en la interfase acústica conformada por el espacio de aire entre el metal o el material a examinar y el palpador.

En cuanto al sonido, una vez que ha sido introducido en el material sujeto a inspección, puede presentar diferentes modos de conversión. Cada uno de estos modos tiene aplicaciones muy específicas.

- El palpador orientado perpendicularmente a la superficie de inspección, el sonido viajará preferentemente de forma comprensiva (se desplazará con una velocidad longitudinal) y será este modo el que se empleará para detectar las indicaciones.
- Palpador se inclina dentro de ciertos ángulos(entre el primer y segundo ángulo crítico de la ley de Snell) sobre la superficie de incidencia (de inspección) el sonido viajará preferentemente de modo cortante (el sonido se desplazará de con una velocidad transversal).
- Palpador se inclina con una orientación tal que el haz incida con un ángulo igual al segundo ángulo crítico de la Ley de Snell, el haz viajará de forma superficial.

Si el material está libre de defectos la señal será constante en cuanto a su intensidad y posición; pero si hay un cambio en las propiedades acústicas del material o una discontinuidad que refleje, atenúe o disperse el haz de ultrasonido, la señal se modificará y se podrá observar una disminución en la amplitud de la señal de la pared posterior o la aparición de indicaciones antes de lo esperado.

En la aplicación de las ondas ultrasónicas para la detección de fallos encontramos, como para cada ensayo no destructivo, una serie de ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

-Rápido y fácil de operar.

-Se puede aplicar a una gran gama de materiales y a un gran número de productos conformados.

-Resultados inmediatos

-Permite detectar discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales e internas.

-Muy alta precisión.

-Los equipos pueden ser portátiles y adaptables a un gran número de condiciones.

Inconvenientes:

-Orientación de la grieta conocida.

-El equipo y los accesorios son costosos.

-Varios tipos de palpadores a fin de determinar todas las discontinuidades presentes en la pieza.

-Patrones para ajustar el instrumento.

-Operarios entrenados, deben tener una amplia experiencia y calificación en el manejo de la técnica y el equipo.

4.4.3. Emisión acústica

Esta técnica también conocida como emisión de ondas de esfuerzo ha tomado un gran impulso en los últimos años por ser capaz de determinar las condiciones generales de equipos y materiales en servicio.

El principio de la emisión acústica es la detección de ondas elásticas que se crean de forma espontánea en aquellos puntos del material que se está deformando de manera elástica o plástica, al ser sometido a un esfuerzo (carga estática o dinámica), o por esfuerzos residuales que están presentes en el material. Las deformaciones del tipo cortante o que produzcan deslizamientos de los planos cristalinos y las dislocaciones intercristalinas en los metales son las fuentes principales de la emisión acústica.

En el caso de que el material esté sano, la emisión más intensa se produce en la porción elástica de la curva de esfuerzo-deformación, alcanzando su máximo en el punto del límite elástico, a partir del cual decrece abruptamente.

Sin embargo, cuando el material presenta una discontinuidad y ésta se propaga, se tiene una emisión constante que se va incrementando hasta que el material falla por fractura. Quizás uno de los principales inconvenientes que tiene esta técnica es que la emisión continua es un proceso irreversible, efecto Kaiser. Es decir, una vez que el material se ha sometido a un esfuerzo hasta un valor determinado, y después se reduce dicho esfuerzo, cuando se vuelva a someter a tensión al material, la emisión no se iniciará sino hasta que se exceda ese valor máximo del esfuerzo anterior.

La emisión acústica se presenta como pulsos definidos que se propagan en el material de forma radical a la velocidad del sonido. La duración del pulso es muy corta por lo que su detección debe realizarse con equipos electrónicos.

La emisión acústica se diferencia de otros métodos no destructivos en dos principales aspectos. En primer lugar, la energía que se detecta, se libera del interior del material que se

está inspeccionando, a diferencia de otros métodos como el ultrasonido o el radiográfico en los cuales de cierta forma se induce una energía en los materiales. Segundo, la técnica de emisión acústica es capaz de detectar procesos dinámicos asociados con la integridad estructural (crecimiento de grietas, deformación plástica). Es decir, esta técnica detecta movimientos mientras que los métodos convencionales de pruebas no destructivas detectan discontinuidades geométricas.

Requisitos y Secuencias de la Inspección por Emisión Acústica

Lo primero es seleccionar las frecuencias de rastreo y éstas estarán relacionadas con el origen de la onda y el tipo de discontinuidad que se desea detectar.

El segundo paso es la selección de los puntos en los cuales se deben colocar los transductores, los cuales se colocan en la superficie del material a inspeccionar; ya que la detección de los defectos se hace por triangulación. Los transductores suelen ser de materiales piezoeléctricos cuya función es detectar el movimiento de las ondas elásticas y convertir este tipo de señal en voltaje eléctrico.

Una vez que el equipo está dispuesto y se han calibrado los instrumentos se inicia la prueba aplicando un esfuerzo mecánico a una velocidad conocida, registrándose las señales que se producen, las computadoras analizan la cantidad de eventos que se detectan por unidad de tiempo, la intensidad de las emisiones y el tiempo que tardan las señales en ser registradas por los diferentes transductores (las principales características de las señales de emisión acústica son: duración, tiempo a la máxima amplitud, amplitud, energía y conteos). La señal es amplificada con ayuda de un pre-amplificador, asegurando así que la señal tenga suficiente intensidad para llegar a la computadora.

Características de señal de emisión acústica

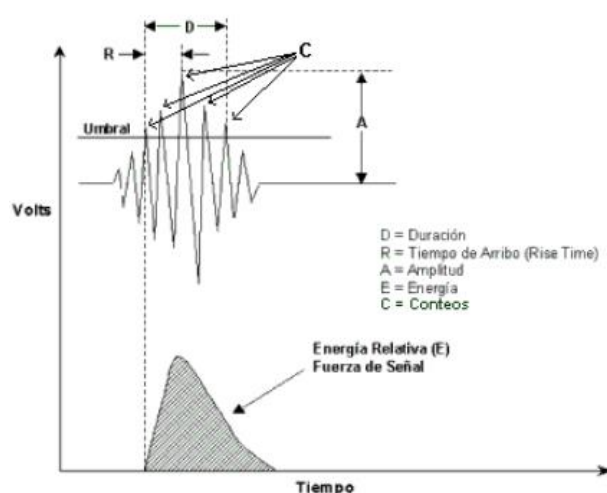


Figura 104. Gráfica emisión acústica

El último paso es analizar el tipo de emisor que ha generado la emisión acústica.

Aplicaciones

Se emplea sobre todo en el estudio de estructuras sujetas a esfuerzos cíclicos, como es el caso de las estructuras aeronáuticas, los recipientes a presión, edificios o puentes. Otra aplicación es la evaluación de nuevos materiales

Defectos encontrados con la emisión acústica

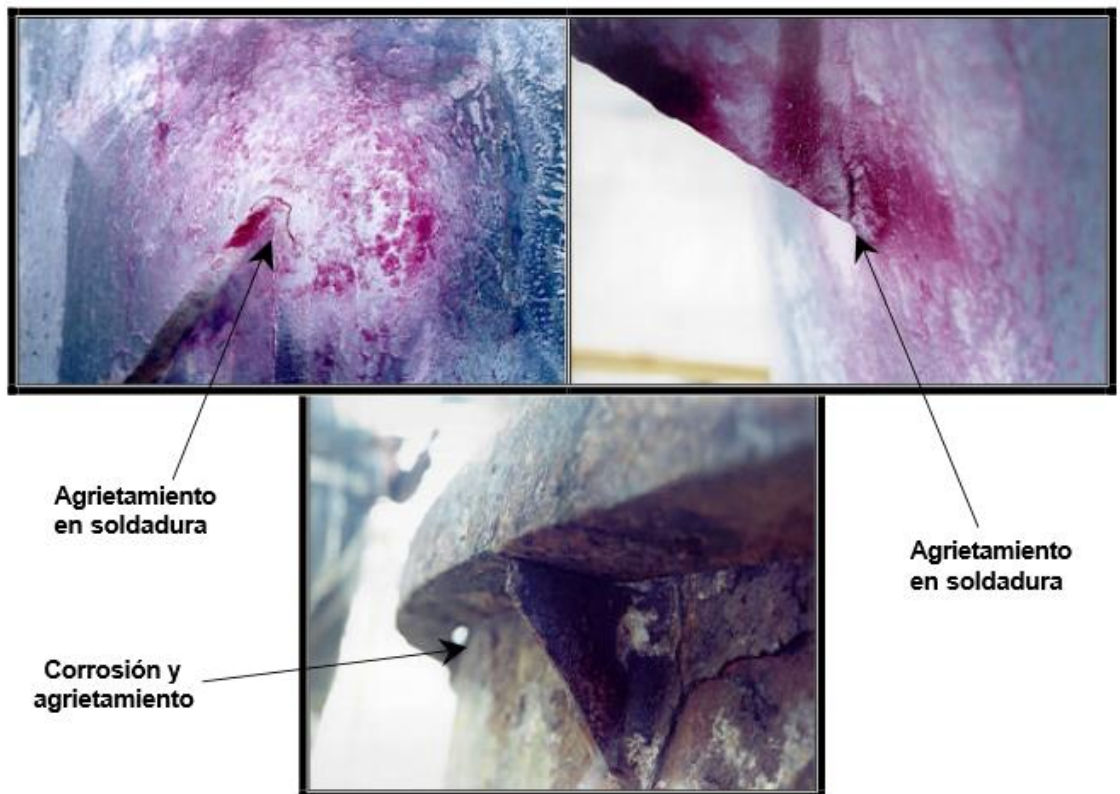


Figura 105. Fotos defectos localizados mediante emisión acústica

Ventajas:

- Permite detectar un defecto o fractura durante su desarrollo, antes de que sea posible detectarla por algún otro tipo de ensayo no destructivo. Monitoreo en tiempo real.
- Permite tener un patrón del comportamiento de la estructura sujeta a prueba, la cual puede ser tomada como referencia para evaluar su comportamiento después de haber estado en servicio y conocer si ha sufrido algún daño o debilitamiento.

Limitaciones:

- Para una evaluación completa se requiere de procesadores que tengan alta velocidad y gran capacidad de memoria y almacenamiento; costo bastante elevado.
- El personal debe tener una gran capacidad y experiencia en esta técnica.

4.4.4. Resonancia acústica

El análisis acústico de resonancias, también conocido como "prueba de sonido", es un método de ensayo no destructivo que permite la evaluación rápida y rentable de un amplio abanico de piezas de trabajo. Este método se basa en el conocido fenómeno físico que un cuerpo sufre tras ser convenientemente excitado (por ejemplo golpeándolo), el cuerpo vibra en ciertos modos y frecuencias propias tras la excitación. Estas vibraciones o "frecuencias naturales" pueden ser consideradas una "huella dactilar" de la pieza de trabajo que, mediante micrófonos (ruido aéreo) o mediante vibrómetros láser (ruido estructural), son capturadas y digitalmente analizadas. Se evalúa la fuerza dinámica (rigidez) del componente, ya que las posibles fisuras, defectos u otras discontinuidades suponen un punto débil en la pieza.

La geometría es un factor decisivo que determina el número de resonancias naturales de la pieza de trabajo: una barra tiene pocas frecuencias naturales, mientras que una pieza más compleja cuenta con varias.

El análisis acústico de resonancias es un método volumétrico de ensayo (defectos internos) que evalúa la pieza como un conjunto. A diferencia de los métodos orientados a superficies, como p. ej. pruebas por líquidos penetrantes o de partículas magnéticas; este método permite una evaluación rápida y rentable de cualquier fisura, defecto u otra discontinuidad presente en la pieza.

Con este ensayo se pueden detectar los distintos fallos o discontinuidades que afecten a frecuencias propias o naturales y a las formas de vibración propia de las propiedades físicas. Estos defectos pueden ser muy diversos como grietas abiertas o cerradas, plegados, diferencias de densidad, uniones soldadas defectuosas o que faltan, diferencias de masa o diferencias geométricas. Los errores de tratamiento se pueden detectar o encontrar, sin embargo, otras características, como por ejemplo el color, no se reflejan de ninguna manera en este ensayo.

El objetivo es extraer las frecuencias propias y obtener una solución segura y automatizada del ensayo. El punto de partida para el mismo es establecer una configuración de las medidas adecuada y un régimen de medición. Podemos decir, que lo que busca este ensayo es encontrar piezas con discontinuidades, características o parámetros diferentes a las demás, también con fallos pequeños, ajustado con técnicas y procedimientos estadísticos para calificar y evaluar así la calidad de las piezas.

Pasos:

- Determinar apoyo, animación y posición de la masa y/o centro de gravedad de la pieza
- Medir frecuencias propias de piezas de geometría, material, dureza y estructura conocidas.
- Analizar frecuencias propias según duración (desplazamiento espectral) tamaño y existencia.
- Comparar frecuencias propias con ejemplares malos.
- Fijar algoritmo de clasificación.

Los componentes se evaluarán asistidos por ordenador en relación a los datos de medición de las divergencias de oscilación; y se seleccionan en función de dichas divergencias. Para cada parámetro o característica es interesante utilizar un “reconocimiento de fugitivos” para reducir el rango de piezas “diferentes” del que se parte. Es un método comparativo, por lo que la definición de los estándares de referencia es un paso clave para el éxito del ensayo.

Es importante recalcar que no se evalúa “el sonido”, sino las frecuencias de resonancia en las cuales oscila el cuerpo golpeado.

Ventajas del ensayo:

- Pieza completa. Incluye el objeto completo en la medida y evalúa como la oscilación se extiende en el cuerpo completo. A diferencia de otros ensayos en los cuales el posible lugar de error debe ser conocido.
- Objetivo.
- Sensible, alta resolución.
- Automatizable.
- Ecológico.
- Rápido. Duración dependiente de factores diferentes como la duración del sonido, propagación necesaria y número de excitaciones a la pieza.
- Económico.

Limitaciones:

- Tamaño del defecto. El análisis de resonancia acústica es un ensayo cualitativo no cuantitativo.
- Animación del defecto. Los desgarros son problemas de enlace; que “interrumpen” la propagación de las ondas en el cuerpo.

- Un cuerpo con una estructura compleja posee una amplitud de frecuencias de resonancia que probablemente solo pocos Hz se diferencian unas de otras.

4.5. Análisis END

En un primer análisis de las diferentes técnicas podemos descartar varios de estos métodos.

En primer lugar es imposible implementar la técnica de los líquidos penetrantes en nuestro sistema productivo puesto que es una técnica lenta, sucia, que requiere condiciones especiales y está más destinada al análisis en laboratorio. Es lenta porque se necesita una limpieza previa, aplicación de distintos tipos de líquidos (penetrantes y reveladores), una limpieza intermedia, análisis de los resultados y por último, una limpieza final. Además, el hecho de trabajar con líquidos implica que el puesto de trabajo se ensucie y dificulte las buenas condiciones del mismo. Este tipo de análisis de las piezas está destinado a realizarse en laboratorios para estudios posteriores a la fabricación sobre el estado de las piezas. Además puesto que se trata de una rotura a lo largo de todo el espesor de la chapa es imposible la utilización de esta técnica ya que los líquidos caerían a través de la grieta sin que se pudiera detectar la zona de fallo. Sin embargo, las fisuras sí podrían detectarse con esta técnica. No obstante, además de los inconvenientes enumerados anteriormente, se añade la complejidad y el tiempo que conlleva la detección de estos defectos.

En siguiente lugar se puede descartar la utilización del ensayo no destructivo de las partículas magnéticas. Esta técnica puede aplicarse únicamente a materiales ferromagnéticos lo que implica que la aplicación de la misma queda restringida. Este ensayo detecta fallos superficiales muy pequeños lo que es un punto muy positivo, sin embargo, exige una limpieza de la pieza previa y una desmagnetización posterior al ensayo, lo que implica que se debe hacer una parada en el proceso productivo antes y después del análisis. Cualquier tipo de parada de un tiempo superior a dos segundos, aproximadamente, hace imposible la implementación de un sistema basado en esa técnica ya que implicaría parar o reducir el ritmo de la producción, lo que es imposible, ya que lo que se busca es mejorar la calidad del mismo.

Las corrientes inducidas, al igual que la técnica de las partículas magnéticas, detectan fallos o discontinuidades muy pequeñas, sin embargo, son aplicables principalmente a geometrías muy sencillas. Además, para que sea posible la detección de discontinuidades mediante electromagnetismo, éstas deben ser perpendiculares a las corrientes de Eddy, lo que implica un conocimiento previo de la posición y orientación de las heterogeneidades a detectar, lo que complica la aplicación de esta técnica. Otro punto muy positivo de esta técnica es que puede ser automatizado, pero requiere una limpieza previa, por lo que también queda descartada.

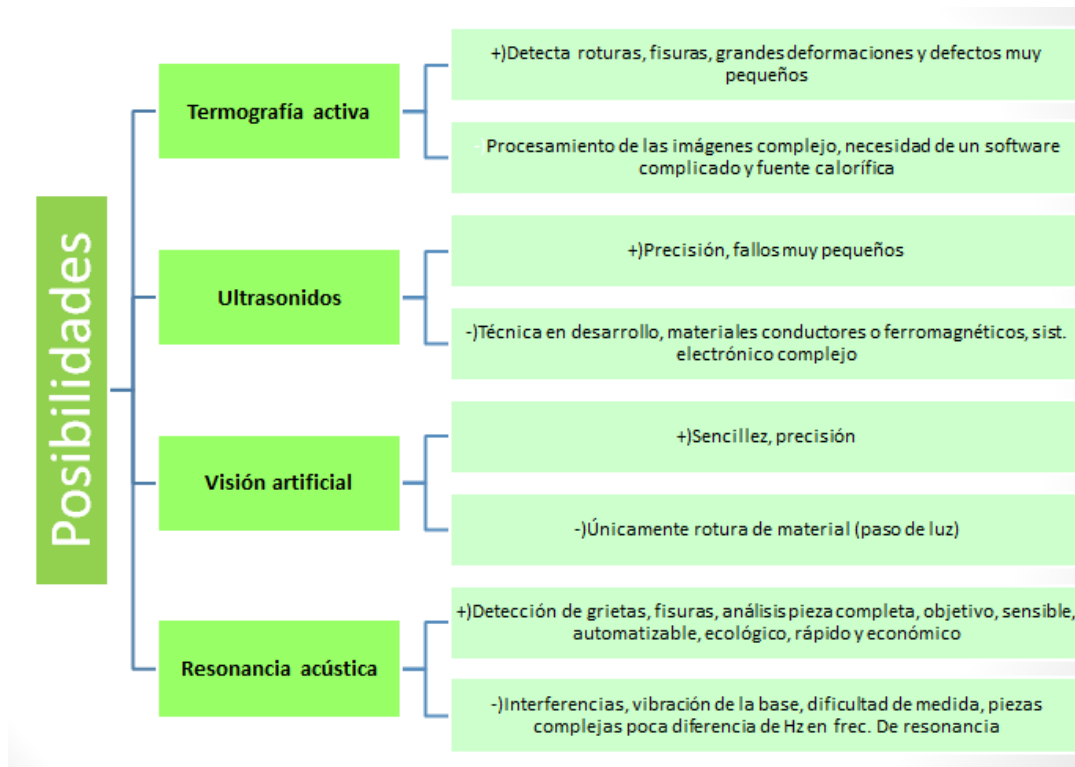
La emisión acústica es una técnica muy interesante que está en desarrollo. Con la emisión acústica se pueden conocer los fallos durante su formación y evolución, es decir, cuando se están formando y/o creciendo. El principal inconveniente es que los sensores que detectan el fallo deben estar en la pieza, lo que hace imposible su utilización en este caso. Se suele utilizar esta técnica para comprobar grandes estructuras como edificios o puentes y evaluar así su calidad y estabilidad.

Por último, la radiografía industrial es otro ensayo no destructivo que podría resultar interesante ya que detecta fallos muy pequeños en piezas de geometrías muy variadas. Sin embargo, se requiere una orientación directa hacia el defecto, medidas de seguridad especiales (debido a la radiación que se emite) al igual que condiciones muy específicas. También se necesita una preparación cuidadosa. La imposibilidad de realizar el examen de radiografía industrial sin parar la producción y/o necesidad de disponer de áreas para realizar esta tarea hacen que se deseché esta técnica como solución al problema planteado. Además hay que realizar una serie de trámites y solicitar unos permisos para que sea posible su utilización para analizar piezas, no solo conlleva mucho tiempo sino que además son económicamente costosos.

A pesar de que puede parecer que la resolución de este problema es complicado, puesto que las técnicas no se adaptan muy bien a las condiciones requeridas, existen una serie de técnicas que pueden adaptarse y resultar interesantes para nuestro caso: la termografía, los ultrasonidos, la visión artificial y la resonancia acústica. Los cuales se dividirán en dos grupos en función de la realización de pruebas o no. El primer grupo estará compuesto por la termografía infrarroja y la resonancia acústica, este grupo es del cual no ha existido la posibilidad de realizar pruebas, y el segundo estará formado por la visión artificial y ultrasonidos, con estos métodos se analizaron las muestras que tenemos.

Descartados:

Líquidos penetrantes	Lento, sucio, condiciones especiales, laboratorio
Partículas magnéticas	Sólo materiales ferromagnéticos, limpiar antes y desmagnetizar después
Corrientes inducidas	Únicamente aplicable a geometrías sencillas, limpieza previa
Radiografía industrial	Orientación directa, seguridad, condiciones especiales
Emisión acústica	Sensores en la superficie del material o pieza a analizar



5. Grupo I: Termografía Infrarroja y Resonancia Acústica

5.1. Termografía Infrarroja (TIR)

5.1.1. Introducción

Recordamos que la termografía mide la radiación que todo cuerpo emite como consecuencia de tener una temperatura, la radiación que emiten permite la estimación de la temperatura de los cuerpos de forma remota y sin contacto. Para ello se utilizan métodos ópticos tales como radiación térmica, esparcimiento de luz, interacción con la materia, métodos relacionados con el cambio del índice de radiación, etc.

Se mide la temperatura cinética, es decir, la manifestación interna de la energía de translación promedio de las moléculas del cuerpo. Los cuerpos irradian energía en función de su temperatura. Solo detectores electrónicos permiten medir esta radiación. La radiación registrada por las cámaras termográficas consiste en la radiación de onda larga, emitida, reflejada y transmitida que surge de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara.

El parámetro físico indispensable para determinar los variables y temporalmente dependientes campos y gradientes de temperatura es la difusividad térmica, α .

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$$

Directamente relacionado con un parámetro termofísico tan importante como la conductividad térmica. Valores elevados de difusividad térmica del material implica un aceleramiento del fenómeno asociado con la igualdad de la temperatura como una función del tiempo.

Si nos centramos en la metrología óptica encontramos dos tipos distintos, la pirometría y la termografía. La pirometría se utiliza para la medida de temperaturas muy elevadas. La termografía infrarroja es una técnica de producir una imagen visible consecuencia de la luz infrarroja, invisible para el ojo humano, emitida por objetos de acuerdo con su condición térmica. Los sistemas infrarrojos portátiles convierten instantáneamente la radiación térmica en mapas térmicos visibles.

La termografía es una técnica que puede resultar muy interesante, ya que si se encuentra la manera adecuada de implementarla se localizarían tanto las roturas como las zonas de máxima deformación, fisuras, pequeñas heterogeneidades, etc.

Concretamente la TIR activa pulsada (explicada en apartados anteriores) podría ser una solución para el problema planteado, podría aplicarse al final del proceso, una vez que la pieza está terminada y así detectar las posibles heterogeneidades o defectos que aparecen en la pieza a lo largo del proceso, como se explicará más adelante.

La TIR pasiva también podría servir para identificar los fallos, en este caso debería ponerse una cámara después de cada puesto de estampación, ya que el fallo se puede producir en cualquiera de estos, no únicamente al final, si no identificamos el fallo nada más producirse se igualaría el campo térmico de la pieza (se perdería el calor de la zona peligrosa; en la que se produce el fallo o la máxima deformación). Las zonas defectuosas se calientan más que el resto de la pieza. Se suele observar un máximo de temperatura en la rotura del material. Hay que tener en cuenta el hecho de que la actuación de la carga tiene una clara influencia en el incremento de temperatura.

La termografía permite hacer diagnósticos pertinentes, si el operador tiene conocimiento del objeto, concretamente si conoce características como su comportamiento térmico, interacciones con el medio ambiente, geometría o su conductividad térmica.

Es importante destacar que la aplicación de esta técnica es más sencilla cuando el sistema es mal conductor del calor.

La efectividad de la termografía en END puede ser mejorada utilizando tratamientos de las imágenes que tienen una influencia sobre las características de las cámaras.

Características de las cámaras:

- Sensibilidad térmica o NETD (Noise Equivalent Temperature Difference)

Cuanto menor es el NETD mejor se puede detectar el contraste térmico significativo observable emergiendo sobre el ruido del sistema, de este parámetro depende la efectividad en la detección de defectos.

- Precisión

Cuán precisa es la temperatura medida del objeto con relación a su verdadera temperatura (importante para la termografía pasiva). Una alta precisión no nos interesa ya que queremos ver si la temperatura o transmisión del calor es diferente en alguna zona (donde se encontrarán los defectos) respecto a la del resto de la pieza.

- Resolución espacial

IFOV (Instantaneous Field of View), campo de vision instantáneo. Se expresa en miliradianes se trata del área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento. Depende del tamaño del detector y de la lente. Es importante cuando se trata de descubrir defectos de tamaño reducido. En nuestro caso necesitamos comprobar o analizar una zona limitada.

- Frecuencia de la imagen

Las imágenes en tiempo real tienen tasas de actualización de centenares de Hz, cámara con matriz de detectores cuánticos refrigerados. Muchas cámaras ofrecen la posibilidad de reducir el tamaño de las imágenes (windowing) lo que permite aumentar la tasa de actualización, alcanzando varios millones de Hz. Esta característica es importante cuando el sistema observado es un buen conductor de calor, y por lo tanto, se encuentran tiempos característicos muy breves.

A pesar de la aplicación de la termografía infrarroja, en el caso de poder realizarse, puede parecer la solución a nuestro problema su aplicación resulta francamente complicada. Conforme la producción aumenta, es decir, conforme pasa el tiempo desde la primera estampación una vez producido el cambio de matriz, la temperatura de la matriz, y por consecuencia, la de la pieza, va aumentando muchísimo por lo que el patrón con el que habría que comparar para detectar la rotura va cambiando en cada caso, ya que aumenta la temperatura de toda la pieza. Se hicieron estudios antes de iniciar este proyecto sin conseguir resultados interesantes.

5.1.2. Termografía activa

5.1.2.1. Introducción

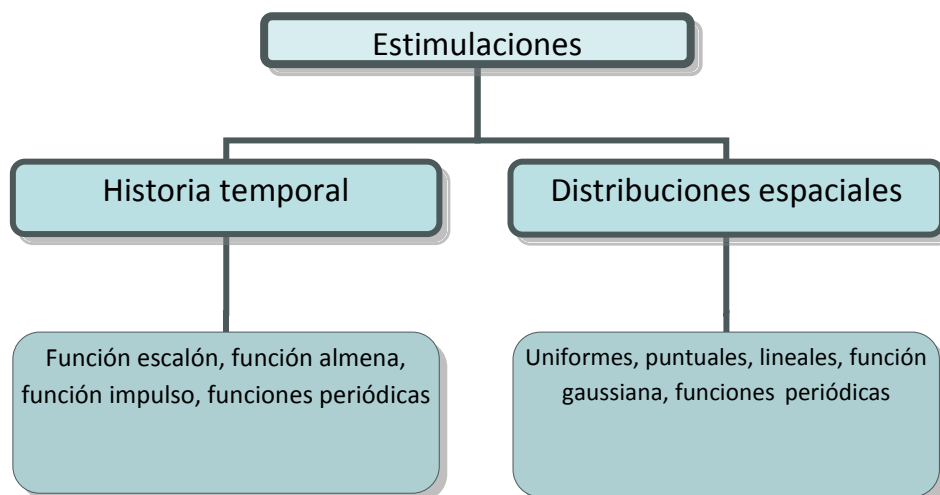
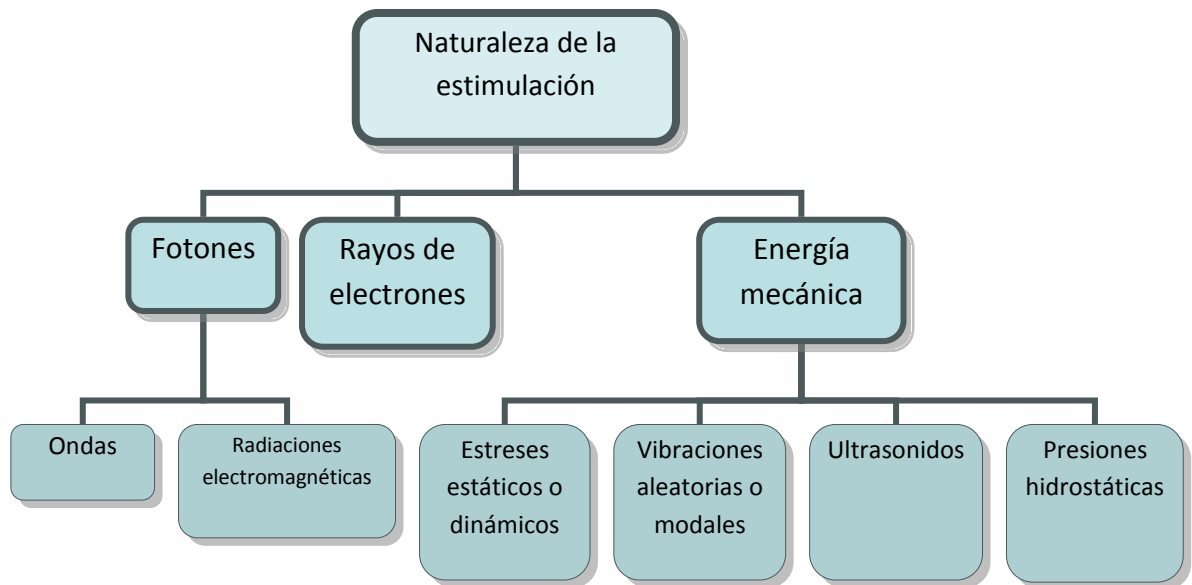
En este apartado se va a desarrollar con más detalle en que consiste la termografía activa y sus variantes.

La termografía puede ser llamada activa cuando el operador produce una estimulación del sistema observado con el objetivo de identificar parámetros del mismo a través de un análisis comparativo de los estados antes y después de la estimulación.

Una vez la muestra ha sido estimulada térmicamente el calor se propaga a través de la misma; y cuando el frente de calor se encuentra con un defecto la tasa de difusión de calor se modifica de tal manera que al observar la temperatura sobre la superficie surge un diferencial térmico entre el defecto y el área que lo rodea, es decir, cuando el flujo de calor presenta alteraciones

y anomalías, provoca contrastes de temperatura en su superficie; permite la identificación de fallos o defectos en tiempo real.

La cámara infrarroja registra el enfriamiento de la muestra y lo almacena para el posterior análisis.



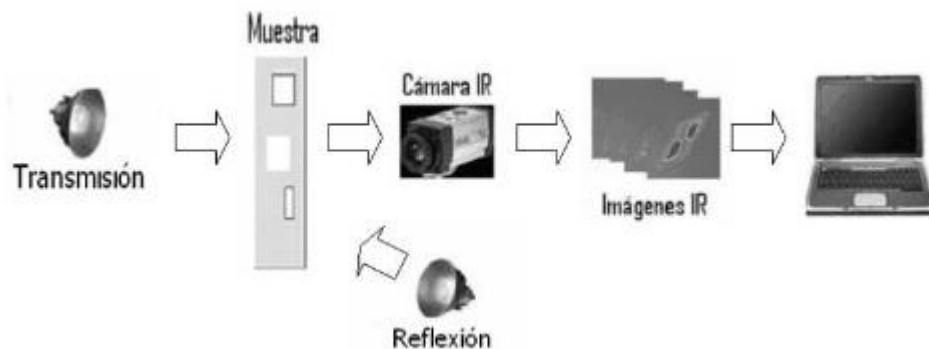
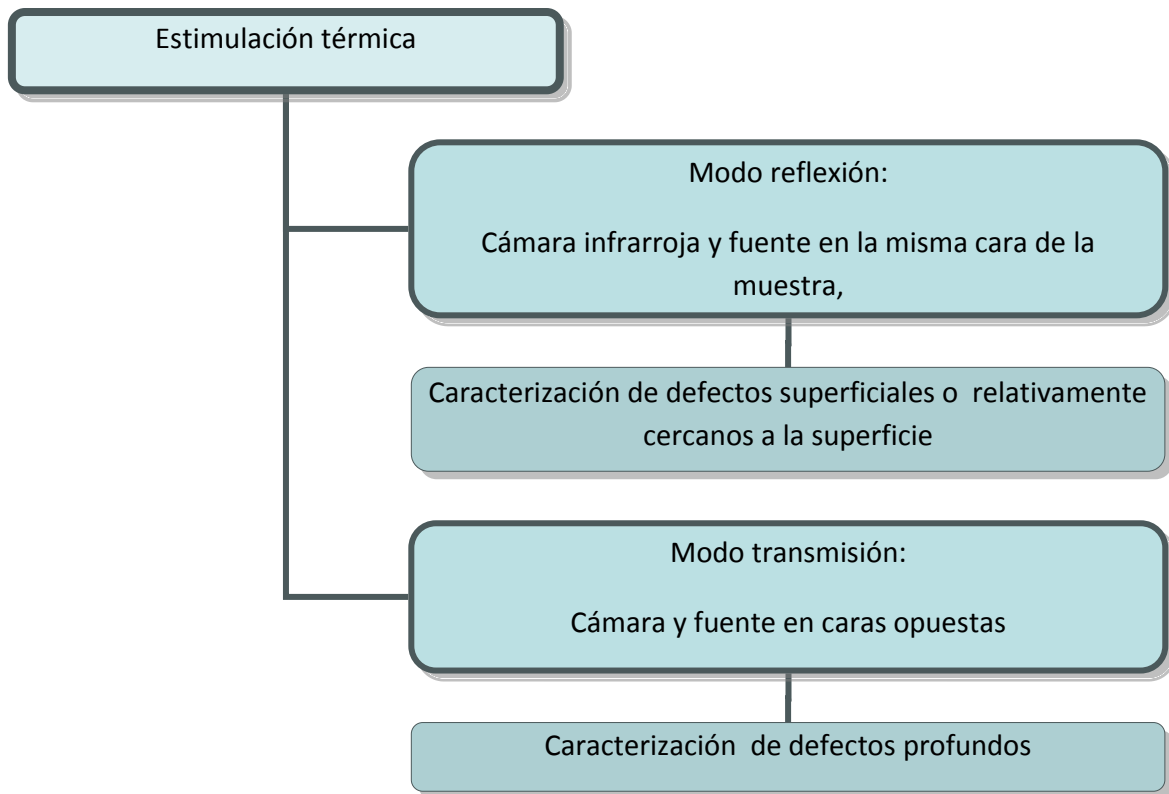


Figura 106. Termografía activa [10]

5.1.2.2. Técnicas de estimulación

5.1.2.2.1. Introducción

Las técnicas de estimulación más comunes son aquellas con fotones, reciben el nombre de técnicas fototérmicas y generalmente son flujos impulsivos modulados con distribución espacial uniforme.

Clasificación de la termografía IR

Forma de excitación	Categoría	Tiempo de respuesta
PULSADA	Calentamiento por Flash	Milisegundos
	Calentamiento transitorio	Desde segundos a minutos
LOCK-IN	Calentamiento repetitivo	Sinusoidal o rectangular 0.01Hz a 20Hz Desde segundos a horas

El calentamiento mediante un flash es mejor para materiales que tienen una alta difusividad térmica, como pueden ser los metales. El área de inspección es limitada debido a que el flash calienta una zona limitada de la superficie de la pieza, calentándose el resto de la pieza de forma irregular. La principal ventaja son los tiempos de medida muy cortos y la posibilidad de realizar inspecciones internas obteniendo muy buenos resultados para la inspección de chapas finas así como para la detección de defectos superficiales.

La principal ventaja de la termografía con calentamiento transitorio es que es aplicable para el control de grandes áreas. Las lámparas halógenas son una fuente de calor asequible y tienen una carga de calor bastante pequeña en la pieza a inspeccionar. La desventaja más importante es que no es recomendable para analizar piezas o muestras gruesas.

Pulsada y Lock-in Fuentes de excitación

Técnica	Fuente de excitación	Aplicación típica
Flash pulsado	Lámpara de flash de Xenón	Corrosión detrás de pintura
Pulsada transitorio	Lámpara halógena	Delaminaciones en grandes estructuras
Lock-in	Lámpara halógena	Vacíos en las estructuras de capas múltiples
	Calentamiento ultrasónico	Grietas profundas
	Calentamiento mecánico	Patrones de estiramiento y esfuerzo

5.1.2.2.2. Termografía pulsada

Es una técnica relativamente sencilla y con la que se obtiene rápidamente los resultados. Consiste en la excitación térmica del material a través de un flash luminoso de alta potencia que inyecta un pulso de calor al material inspeccionado. El análisis de la secuencia de

imágenes infrarrojas que se adquieren durante el experimento se centra en cómo evoluciona el enfriamiento en cada punto (pixel de imagen) ya que una región defectuosa a partir de un cierto instante de tiempo, se enfriará con mayor o menor velocidad que en una región sana de la misma.

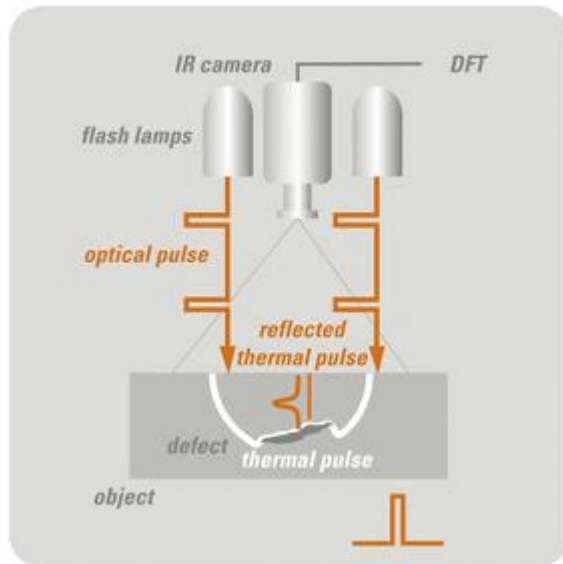


Figura 107. Principio termografía activa pulsada [13]



Figura 108. Dispositivo termografía activa pulsada [13]

Básicamente, la termografía pulsada consiste en un breve calentamiento de la muestra y la observación del enfriamiento de la misma:

- La temperatura del material primero aumenta durante el pulso
- Después del pulso, la temperatura cae por la propagación del frente calórico por difusión bajo la superficie.
- Después, en la presencia de defectos subsuperficiales la difusión del calor cambia de forma que el defecto se ve por un contraste en la temperatura en la zona del mismo y el resto de la pieza.

Si la temperatura de la superficie de la pieza ya es superior a la temperatura del ambiente, puede resultar interesante utilizar una fuente de frío. De hecho, un flujo de calor se propaga igual ya sea frío o caliente. Realmente es menos frecuente utilizar fuentes de frío, ya que es más fácil y más eficiente calentar que enfriar una pieza.

Aparece un problema bastante importante al excitar la pieza con un flash y es que al aplicar el flash hace que el calor irradiado se distribuya de manera no uniforme sobre la cara irradiada del material. Por lo tanto, también su propagación en el interior del mismo.

Se suele utilizar para el control de calidad en varios campos:

- Soldadura por puntos
- Álabes de turbina
- Detección de descolados
- Delaminaciones
- Grietas
- Corrosión



Figura 109. Defecto detectado por termografía activa pulsada

Limitaciones de la termografía pulsada:

- Dificultad para lograr un calentamiento uniforme en un periodo corto de tiempo sobre un área grande a inspeccionar.
- Pérdidas térmicas por convección o radiación.
- Capacidad para detectar sólo defectos que resulten de un cambio medible de las propiedades térmicas del material inspeccionado.
- Degradación de la imagen debido a la presencia de ruido multiplicativo y aditivo.

5.1.2.2.3. Lock-in

La técnica de lock-in es extremadamente robusta e insensible a las distorsiones o interferencias externas, y puede trabajar en condiciones difíciles y estados superficiales ásperos. Es ampliamente utilizada para la caracterización de fibra de carbono reforzada con plásticos que es un material frecuentemente empleado en la industria aeroespacial y del automóvil ya que permite la detección de defectos y heterogeneidades internas y superficiales.

La idea básica de la técnica de la termografía lock-in es la visualización de la propagación de las ondas caloríficas lo que nos da información acerca de la estructura térmica y heterogeneidades. Las ondas suelen estar generadas por lámparas halógenas que calientan la superficie de la pieza a inspeccionar.

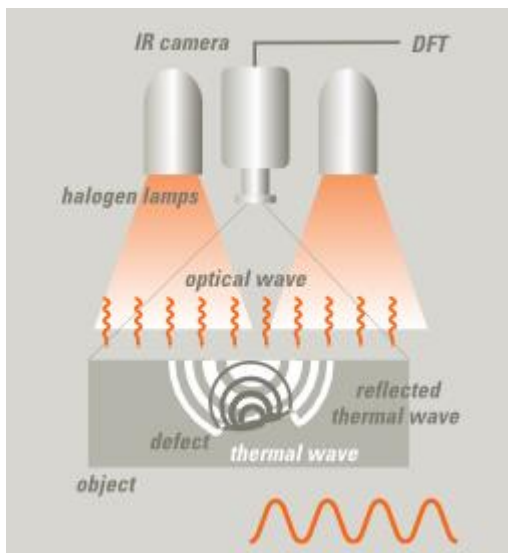


Figura 110. Principio termografía lock-in [13]

La señal es capturada por una cámara infrarroja de alta resolución.

Las características de esta técnica son:

- Grandes áreas de inspección.
- Técnica no destructiva y sin contacto.
- Excitación térmica de estructuras y/o formas complejas.
- Detección de defectos profundos.

El estímulo dinámico puede ser aplicado de una gran variedad de formas: ultrasonidos, inducción, etc.

Matemáticamente, en el caso del lock-in, la información guardada de la temperatura es transformada al campo de la frecuencia. En cada pixel, la evolución temporal medida de la temperatura es transformada mediante la transformada de Fourier para toda la secuencia de imágenes guardada, de forma que la fase y amplitud es derivada y presentadas como una imagen.

5.1.2.2.3.1. Termografía con excitación láser

Técnica sin contacto de inspección termográfica muy adecuada para la caracterización de uniones, soldaduras y recubrimientos finos. La rapidez del ensayo así como la elevada sensibilidad del sistema hace la termografía láser una herramienta extremadamente potente para la inspección no destructiva. El láser se utiliza para el calentamiento punto por punto.

La evaluación mediante la transformada de Fourier permite la determinación precisa de propiedades del material como espesor, porosidad o la conductividad térmica. Además interferencias por variaciones en el acabado superficial o por el calentamiento no uniforme pueden ser eliminadas.

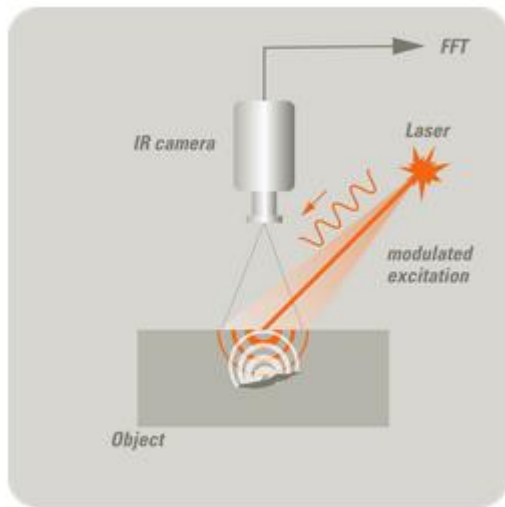


Figura 111. Principio termografía por excitación láser [13]

Normalmente se utiliza un láser que barre la superficie a comprobar. Si se producen cambios en la conductividad térmica, lo cual implica cambios en la huella térmica, lo que se usa para la detección de grietas.



Figura 112. Dispositivo de termografía por excitación láser [13]

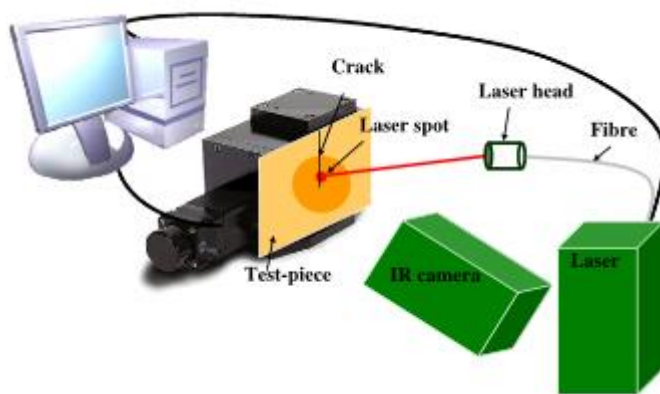


Figura 113. Hardware termografía por excitación láser [14]

La idea principal es evaluar la asimetría de la huella térmica que causa la presencia de una grieta. El calor se introduce en una posición de referencia fija relativa a la posición de la grieta.

5.1.2.2.3.2. Termografía ultrasónica o vibro termografía

La vibrotermografía es una técnica activa del ETND en la cual se analiza el calor liberado por los efectos de vibraciones mecánicas (0 a 25 KHz) inducidas externamente a la estructura inspeccionada. El calor es liberado por fricción precisamente en aquellos puntos donde defectos como fisuras y delaminaciones se encuentran presentes. Los defectos son excitados a resonancias mecánicas específicas. Por lo tanto si se cambia (incrementando o disminuyendo) la frecuencia de excitación mecánica hace que aparezcan o desaparezcan gradientes térmicos locales

Técnica para detectar grietas, delaminaciones, falta de adherencia, etc.

Se fundamenta en la utilización de un transductor piezoeléctrico como fuente de estimulación.

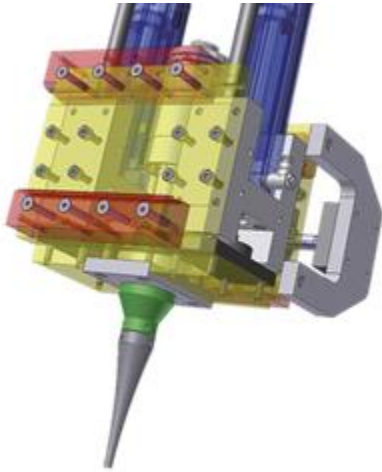


Figura 114. Dibujo excitador termografía ultrasónica [13]

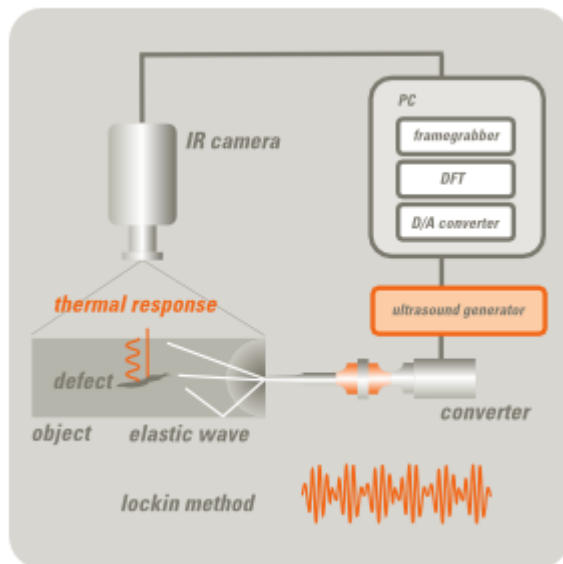


Figura 115. Principio termografía ultrasónica [13]

Es un método excelente para detectar defectos en las siguientes aplicaciones:

- Detección de grietas (superficiales o internas, independientemente de su orientación en el material).
- Test de adhesivos, soldaduras y otros tipos de uniones.
- Caracterización de piezas de más de un material (o multimaterial).
- Detección de delaminaciones e impactos en materiales de fibra compuesta.

5.1.2.2.3.3. Termografía por inducción

Otra variación es la TIR lock-in termoinductiva que excita corrientes de Eddy en materiales conductores mediante una bobina de inducción y la resistencia de los materiales genera un calentamiento local. La mayor densidad de corriente en las grietas provoca una temperatura mayor que es detectada por la cámara termográfica. Esta técnica ha sido probada en detección de grietas longitudinales en barras y tochos de acero aparecidas durante su moldeo en caliente y en álabes de compresores.

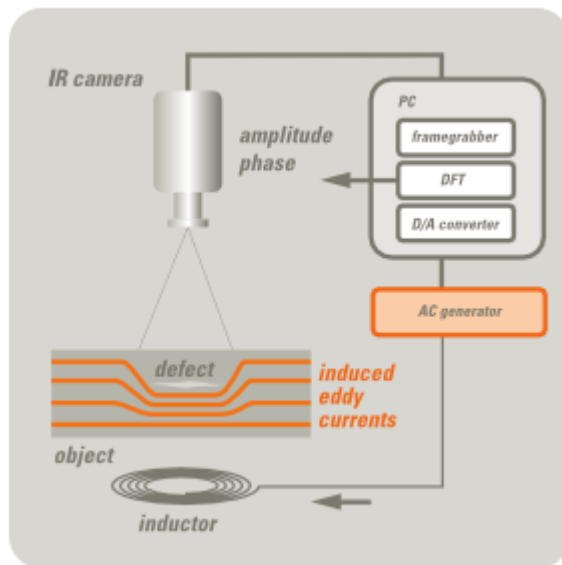


Figura 116. Principio termografía por inducción [13]

Método sin contacto para detección de defectos en estructuras metálicas. Este método ofrece excelentes capacidades de detección en comparación con otros ensayos no destructivos como pueden ser los líquidos penetrantes o las partículas magnéticas. Además que el tiempo de duración del test es extremadamente corto, ya que no se necesita una preparación de la muestra ni la utilización de productos químicos. Como se ha comentado anteriormente la técnica de lock-in prácticamente no se ve influenciada por distorsiones e interferencias del entorno lo que resulta en una sensibilidad óptima. Además, la interpretación y documentación de los resultados del test es sencilla y simple.



Figura 117. Dispositivo termografía por inducción [13]

Puede ser utilizada en líneas de manufactura así como una herramienta de control de calidad en una producción en línea.

El problema que tiene el ensayo mediante las corrientes de Eddy es que algunas grietas fácilmente visibles para el ojo humano no son detectadas, ya que las grietas superficiales inclinadas son difícilmente detectadas. La detección de grietas con las corrientes de Eddy por termografía está basada en el cambio de la distribución de las corrientes debido a la presencia de las grietas, pérdida cerca de las grietas, que resulta en un aumento de la temperatura cerca de la grieta a pesar de que estas estén inclinadas o perpendiculares.

Dependiendo del tipo de material la interacción con el defecto es diferente:

- No magnéticos: la profundidad de las corrientes suele ser más o menos del orden de la del defecto a localizar. Se produce un bloqueo de las corrientes por la grieta, de forma que estas se van acercando, así que la fuente de calor es el campo cercano a la grieta (donde se produce el bloqueo) y da lugar a un contraste térmico observable.
- Magnéticos: profundidad de las corrientes es menor que la profundidad de la grieta por lo que la fuente de calor son las paredes de la grieta

La señal decrece lentamente cuando la corriente no es perpendicular a la grieta, pero incluso cuando es paralela se obtienen señales entre el 25-30% del máximo.

5.1.2.3. Procesamiento de imágenes termográficas

5.1.2.3.1. Método de procesamiento por contraste térmico

- Contraste térmico clásico

Se utiliza para evaluar la visibilidad de un defecto

- Mejorar la calidad de la imagen
- Determinar profundidad, grosor y tamaño de los defectos.

Se define de modo más simple como la diferencia entre la temperatura en una zona no defectuosa, T_{no-def} , y una región defectuosa, T_{def} .

- Contraste absoluto

$$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_{no_def}(t)$$

[10]

- Contraste relativo
- Contraste normalizado
- Contraste estándar

Todos estos tipos requieren el uso de la temperatura de un área sobre a la muestra del material definida como no defectuosa. El problema es que estas áreas no defectuosas no se definen precisamente ya que no se conocen con anterioridad donde están ubicados los defectos caso de que existan.

En la siguiente figura se observan las curvas de temperatura para un punto sin defecto y otro con defecto y su contraste térmico absoluto.

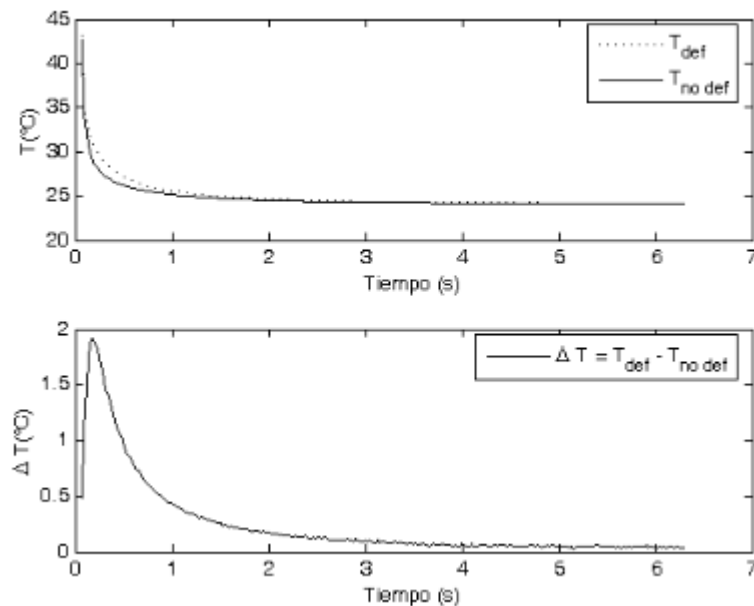


Figura 118. Gráfica contraste térmico [10]

- Contraste absoluto diferencial (CAD)

Se basa en un medio unidimensional y el calor se propaga en las 3 dimensiones espaciales, el CAD no compensa completamente bien la evolución del calor en las regiones sanas de la materia.

Desarrollado para solucionar el problema de la temperatura en un área no defectuosa, con el fin de calcular adecuadamente la temperatura de un área no defectuosa a través de la solución unidimensional de la ecuación de Fourier para materiales homogéneos y semi-infinitos estimulado con un impulso térmico Delta de Dirac expresado en la siguiente ecuación

$$T(t) = T_0 + \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}}$$

[10]

To → Temperatura inicial de la placa

Q → Energía por unidad de área depositada sobre la placa

b → efusividad térmica cte en el material

Combinando la anterior ecuación con esta:

$$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_{no_def}(t)$$

[10]

Obtenemos:

$$\Delta T_{CAD} = T_{def} - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t')$$

[10]

Donde tiempo t' es un tiempo dado entre el instante en el cual el impulso Dirac de calor llega a la muestra y el instante en el cual se observa por primera vez un defecto en el experimento.

Es un medio 1D para placa semi-infinita (no tiene en cuenta el espesor de la placa); por lo que el error en los resultados aumenta para tiempos largos (al final de la secuencia) cuando el frente de calor alcanza el lado opuesto de la placa.

Ventajas:

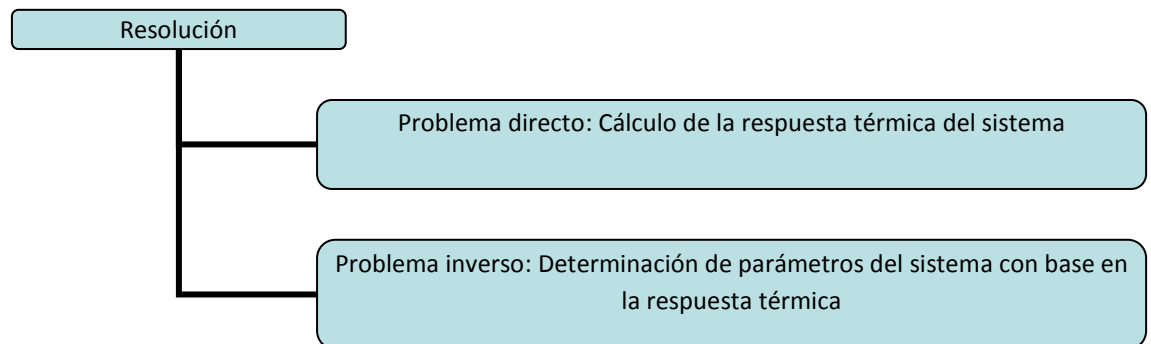
- Permite detectar y caracterizar defectos sin la selección a priori de un área no defectuosa

Desventajas:

- Debido a que está basado en la evolución de temperatura para una placa semi-infinita, no es posible inspeccionar de manera confiable muestras de material delgadas y con defectos profundos
 - o CAD modificado por cuadrupolos térmicos

Los cuadrupolos son definidos como un método empleado para resolver problemas de la transferencia de calor con base en la transformada de Laplace. Es decir, transforma las ecuaciones diferenciales desde el dominio espacio-tiempo hasta el dominio de Laplace en donde se puede tener una representación simple y explícita del problema tratado. Una vez resuelto el problema en el dominio de Laplace debe volver a transformarse de vuelta al espacio original.

Se utiliza para:



- o CAD modificado

Ajusta el modelo 1D para un medio semi-infinito a un medio finito en espesor y toma en cuenta el ancho del pulso de excitación, pero sigue basándose en un modelo 1D. Modelos tridimensionales de transferencia térmica fueron y siguen siendo empleados generalmente para estimar la distribución y la evolución de la temperatura en un cuerpo.

5.1.2.3.2. Filtrado 3D

Usa el modelo 3D de propagación del calor para simular el comportamiento térmico de un material sin defectos para luego restárselo a nuestra secuencia real de imágenes IR sobre el mismo material. El principal inconveniente de esta técnica de procesamiento de las imágenes exige un conocimiento suficientemente exacto de los parámetros intrínsecos del material, además, el tiempo de ejecución del método numérico para los cálculos de la distribución del calor en la pieza es relativamente elevado.

5.1.2.3.3. Termografía de fase pulsada (PPT, Pulsed Phase Thermography)

Es una mezcla entre la termografía activa pulsada y la termografía lock-in. El ensayo se realiza de la misma forma que la termografía activa pulsada pero los tratamientos de datos se realizan mediante la transformada de Fourier.

La detección de anomalías tanto superficiales como internas suele ser descrita atendiendo a dos términos:

- Tamaño mínimo detectable (MDS):

Depende de la óptica utilizada, tamaño de pixel del detector y la distancia a la que se produce la medida.

- Diferencia de temperaturas equivalente al ruido (NETD):

Como se ha comentado anteriormente, este parámetro (la diferencia de temperaturas equivalente de ruido) se define como el cambio de temperatura tal que la relación señal a ruido del sistema termográfico sea la unidad. Depende, igualmente, del tamaño del pixel del detector, etc. Su valor está entre las centésimas del Kelvin.

A frecuencias espaciales bajas el NETD es lo más importante, pero sin embargo, a frecuencias espaciales altas la resolución espacial es el factor más determinante.

Aparece un nuevo parámetro que combina los dos parámetros anteriores en un único concepto, MRTD.

Esta técnica extrae y analiza en el dominio de frecuencia la respuesta de la muestra a inspeccionar.

La extracción de las frecuencias es llevada a cabo por una transformada de Fourier unidimensional sobre cada pixel de la secuencia de termograma:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi mk/N} = \text{Re}_n + \text{Im}_n$$

[10]

Donde

n → corresponde a los incrementos de frecuencia

Δt → intervalo de tiempo de las adquisiciones

Re_n y Im_n → Partes real e imaginaria de la transformada de Fourier.

Pueden combinarse para extraer la amplitud y la fase

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2}, \quad \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n}\right)$$

[10]

La PPT menos afectada que otras técnicas por el calentamiento no uniforme, variaciones de emisividad y la geometría de la superficie inspeccionada.

Ventajas:

- Las imágenes de fase son menos afectadas que otras técnicas por el calentamiento no uniforme, las variaciones de emisividad y la geometría de la superficie inspeccionada.
- Se puede estimar profundidad de un defecto.

Desventajas:

- Una inspección satisfactoria con PPT ya sea cuantitativa o cualitativa depende de un compromiso entre la tasa de muestreo la longitud de la ventana de truncamiento y la capacidad computacional disponible.
- Se debe definir a priori un área no defectuosa con el fin de estimar la profundidad de los defectos

5.1.2.3.4. Reconstrucción de señales termográficas (TSR, Thermographic Signal Reconstruction)

Técnica de procesamiento de imágenes termográficas basados en la ecuación unidimensional de difusión del calor que describe la evolución de temperatura sobre la superficie de una placa semi-infinita después de haber recibido un estímulo térmico tipo Delta de Dirac

$$T = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad [10]$$

Donde

t → Tiempo

e → Emisividad térmica

Q→Densidad de energía sobre la superficie

Esta reacción puede ser escrita en una forma logarítmica de tal manera que la dependencia temporal de cada pixel pueda ser aproximada a un polinomio de la siguiente manera:

$$\ln[T(t)] = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_n \ln^n(t)$$

[10]

Se obtienen resultados cualitativos relativamente buenos

Aunque la TSR genera datos experimentales filtrados la primera y segunda derivada de los datos filtrados mejoran el contraste entre las áreas defectuosas y no defectuosas.

Evolución de la temperatura en el campo logarítmico:

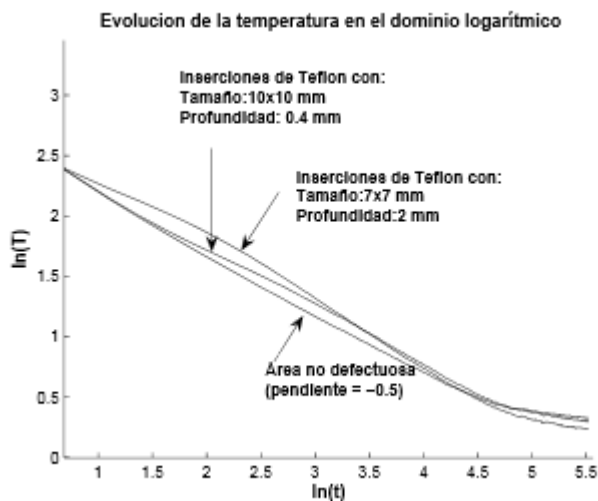


Figura 119. Gráfica evolución temperatura en el campo logarítmico

Ventajas:

- Ayuda a eliminar ruido de alta frecuencia y permite buenos resultados cualitativos en la detección de defectos y la reducción del número de datos ya que una secuencia de imágenes se puede reemplazar por las imágenes de los coeficientes polinomiales.

Desventajas:

- Se debe optimizar el grado del polinomio a usar para el ajuste.
- Si el ajuste no es adecuado pueden aparecer artefactos en las imágenes procesadas.

5.1.2.3.5. Termografía de componentes principales

Para procesar secuencias de imágenes IR, para extraer características y reducir la redundancia de datos descomponiendo la temperatura que varía en el tiempo a través de la descomposición en valores propios y proyectándolo en funciones más apropiadas que las oscilatorias empleadas en la PPT que se ajustan mejor a la naturaleza monotónicamente decreciente de las señales producidas a partir del Ensayo Térmico No Destructivo (ETND)

Antes de aplicar la descomposición, la matriz 3D que representa la secuencia de imágenes IR debe transformarse en una 2D. De esta forma, la SVD (Singular Value Decomposition) de la matriz A de MxN elementos (M>N), está dada por:

$$A=U \cdot R \cdot V^T$$

[10]

Donde

R→Matriz diagonal NxN (valores singulares de A presentes en la diagonal)

U→Una matriz MxN

V^T →Transpuesta de NxN (característica temporal)

Ventajas:

- Mejora el contraste de los defectos y se puede usar para estimar su profundidad.
- Con un único proceso computacional se produce una imagen que contiene contrastes espaciales relacionados con la estructura subyacente de los defectos y una evolución temporal que provee una base para la cuantificación de defectos.

Desventajas:

- Este proceso es computacionalmente costoso y requiere más esfuerzo computacional que otras técnicas.

5.1.2.3.6. Redes neuronales

Conocidas por realizar mapas entre conjuntos variables, baja sensibilidad al ruido y por sus capacidades de aprendizaje y generalización

Se suelen utilizar como detectores de defectos y estimadores de parámetros de defectos de ETND.

La figura que aparece a continuación corresponde a una configuración detectora de defectos en cuya salida se tiene una neurona que decide si el píxel analizado es o no defectuoso dependiendo de un umbral

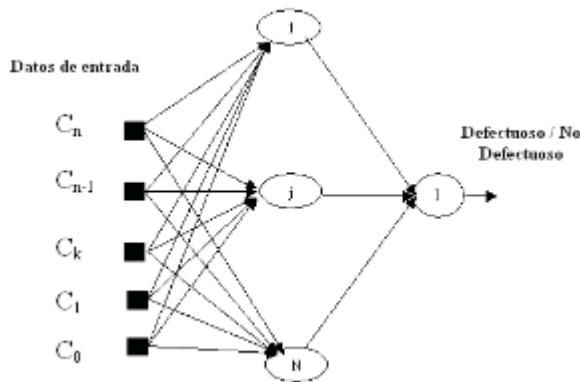


Figura 120. Red neuronal [10]

Por otro lado, la figura que viene a continuación corresponde a una configuración estimadora de profundidad en donde la red es usada para mapear entre el espacio de entrada, definido por alguno de los tipos de datos mencionados anteriormente, y la profundidad de los defectos encontrados. Si se encuentra una zona no defectuosa esta se codifica como profundidad cero.

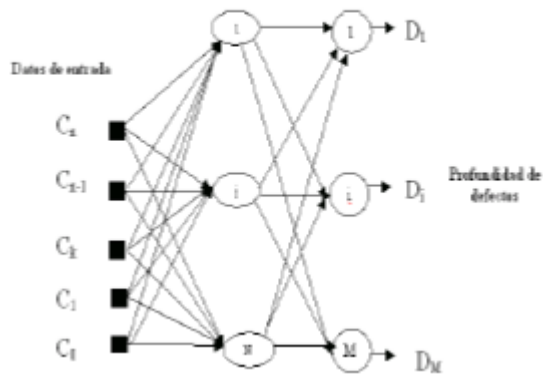


Figura 121. Red neuronal [10]

En general, se usan estas dos configuraciones en conjunto de tal manera que todos los píxeles son analizados inicialmente por la configuración detector y luego se presentan a la configuración estimadora sólo aquellos píxeles clasificados como defectuosos por parte del detector.

Ventajas:

- La detección y cuantificación de defectos son problemas de clasificación, una aplicación para la cual las redes neuronales han sido ampliamente usadas.
- Redes neuronales son adaptables y robustas.

Desventajas:

- Una vez la red neuronal ha sido entrenada para un tipo de material y sistema de adquisición esta solo puede ser empleada para el mismo tipo de material y sistema.
- Se necesita al menos una muestra con un conjunto conocido de defectos para extraer la información necesaria para el entrenamiento.
- Cuando se usa un tipo de contraste ya sea térmico o de fase para el entrenamiento los resultados se ven influenciados por la selección a priori del área no defectuosa.

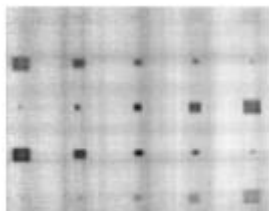
5.1.2.3.7. Comparativa

Ejemplo de imágenes obtenidas en otro ensayo : “Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografía Infrarroja Mediante Máquinas de Aprendizaje” de Hernan Darío Benítez Restrepo

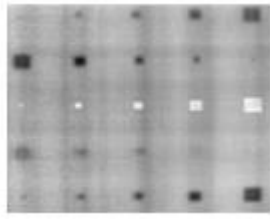
A) Imagen sin procesar



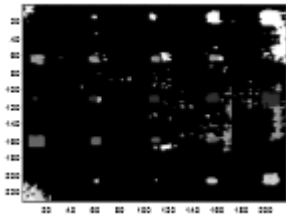
B) TSR 1ª Derivada t=1.8 s



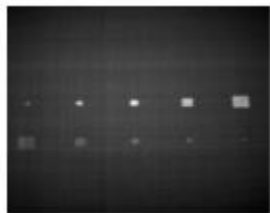
C) TSR 2ª Derivada t=1.8s



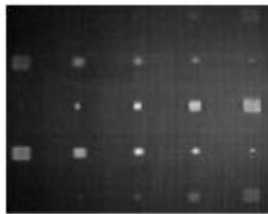
D) Resultado red neuronal



E) Máximo contraste



F) Máximo contraste CAD modificado



En función del tipo de defecto que queramos detectar habrá que utilizar una técnica u otra, en este caso se trataba de inclusiones de otro material.

5.1.3. Solución planteada

Con la termografía infrarroja se pueden plantear muchas soluciones para la detección de grietas a la salida de la Erfurt de acuerdo con nuestras necesidades. Sin embargo, debido a la imposibilidad de la realización de pruebas no se puede determinar si las soluciones planteadas son adecuadas y funcionan según lo esperado. A pesar de esto, se pueden plantear algunas ideas para ser desarrolladas y llevadas a cabo en un futuro.

La solución, que más puede ajustarse a las necesidades que se plantean, es la termografía activa pulsada que debido a la gran velocidad del ensayo puede resultar muy adecuada para la solución al problema planteado. Además puesto que las zonas críticas son áreas limitadas el

problema del calentamiento de la superficie de manera no uniforme no resultaría un problema ya que lo que nos interesa es comprobar las áreas concretas en las que aparecen las grietas, en el caso de que se formen, no la totalidad de la pieza.

Este puesto de análisis o control se podría situar tanto en la cinta de salida o en la posición L7, ya que al no ser necesario el contacto su implantación es más sencilla. Sin embargo, la posición L7 puede ser mejor opción, ya que las piezas permanecen en reposo dos segundos aproximadamente, lo que implica una mejor calidad en la medida de temperaturas y por lo tanto de la imagen formada.

Otra opción que resultaría muy interesante es la termografía de fase pulsada, debido a que el ensayo se lleva a cabo de la misma forma que la termografía activa pulsada pero el tratamiento de datos se realiza mediante la transformada de Fourier, por lo que se obtendrían muy buenos resultados. Además esta técnica es la menos afectada por el calentamiento no uniforme. Por lo que su aplicación puede ser muy efectiva.

Para terminar recalcar que esto se trata únicamente de una idea ya que, lamentablemente, no se ha podido realizar ningún tipo de ensayo con estas técnicas.

5.2. Resonancia acústica

5.2.1. Introducción

La acústica es un área de la física que estudia los fenómenos de oscilaciones y ruido: aparición, radiación, propagación, alojamiento, etc.

Las ondas pueden propagarse en función del medio en que se propagan en tres grandes grupos, ondas mecánicas, electromagnéticas y gravitacionales, de las cuales nos ocuparemos únicamente de las mecánicas.

Las ondas mecánicas son aquellas que necesitan de un medio elástico para propagarse. Se produce una vibración en un punto de un medio elástico y está se transmite a todos los puntos de este. Cuando el movimiento es uniforme se llama vibración armónica. Las partículas del medio oscilan alrededor de un punto fijo; por lo que no existe transporte neto de materia a través del medio. Dentro de las ondas mecánicas consideramos las ondas elásticas, las ondas sonoras y las ondas de gravedad (analizadas en dinámica de fluidos; no confundir con las ondas gravitacionales).

Las ondas sonoras constituyen un tipo de ondas mecánicas que tienen la virtud de estimular el oído humano y generar la sensación sonora. En el estudio del sonido se deben distinguir los aspectos físicos de los aspectos fisiológicos relacionados con la audición. Desde un punto de vista físico el sonido comparte todas las propiedades características del comportamiento ondulatorio.

Las ondas sonoras se producen también como consecuencia de una compresión del medio a lo largo de la dirección de propagación. Son, por tanto, ondas longitudinales.

En medios homogéneos el sonido se propaga sin deformarse y con una velocidad constante. En la práctica, por regla general, esto no se da y aparecen efectos tales como la flexión, refracción, reflexión o amortiguación los cuales tenemos que considerar.

En todo tipo de ondas mecánicas el medio juega un papel esencial en la propagación de la perturbación, hasta el punto de que en ausencia de medio material, la vibración, al no tener por donde propagarse, no da lugar a la formación de la onda correspondiente. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio. Las desviaciones mecánicas en medios elásticos como gases, líquidos o cuerpos sólidos se llaman ondas elásticas. La velocidad de propagación es más rápida en un medio rígido que en un medio blando y está relacionado con las constantes o propiedades del material como pueden ser la densidad, el módulo de elasticidad, etc. En el caso de medios gaseosos, como el aire, las vibraciones son transmitidas de un punto a otro a través de choques entre las partículas que constituyen el gas, de ahí que cuanto mayor sea la densidad de éste, mayor será la velocidad de la onda sonora correspondiente. En los medios sólidos son las fuerzas que unen entre sí las partículas constitutivas del cuerpo las que se encargan de propagar la perturbación de un punto a otro. Este procedimiento más directo explica que la velocidad del sonido sea mayor en los sólidos que en los gases.

En resumen podemos decir que la onda elástica es la perturbación efectuada sobre un medio material y que se propaga con movimientos uniformes a través de este mismo medio. La rapidez con que se propaga la onda elástica, como se ha comentado anteriormente, depende de las propiedades físicas (tales como el módulo elástico, la densidad, la temperatura, etc.) del medio material que se perturba.

Una onda sonora está definida por cuatro características principales: periodo, frecuencia, amplitud y longitud de onda. El periodo es el tiempo que tarda una partícula en realizar un periodo completo, la frecuencia es el número de oscilaciones de una partícula por segundo. Por otra parte, la amplitud es el máximo desplazamiento que realiza la partícula sometida a la vibración, y por último, la longitud de onda es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento.

Es importante introducir brevemente el concepto de resonancia, un cuerpo que sea capaz de entrar en vibración al ser excitado por alguna fuerza exterior lo hará obteniendo máximas elongaciones con el mínimo esfuerzo. Esto será la frecuencia natural de resonancia.

5.2.2. Ensayo mediante resonancia acústica

5.2.2.1. Introducción

El ensayo mediante la resonancia acústica llamada también en ocasiones “control de ruido”, como se ha comentado previamente, se basa en el análisis del comportamiento oscilatorio de los componentes elásticos para evaluar la calidad de los mismos por una medida comparativa. Este tema se irá desarrollando a lo largo de este. El análisis modal se basa en el estudio de la frecuencia natural; modos de vibración natural y otros parámetros del sistema.

Esta técnica resulta muy interesante debido a que analiza la pieza en su totalidad, además, resulta muy atractivo el hecho de que la automatización del proceso resulte relativamente sencilla, económica y sin impacto medioambiental. No sólo eso, sino que además esta forma de análisis resulta eficaz para el análisis de cualquier forma geométrica.

La “prueba de sonido” es un método de ensayo no destructivo que permite la evaluación rápida y rentable de un amplio abanico de piezas de trabajo.

Casi todos los cuerpos oscilan si se les estimula por un golpe o una oscilación externa. Las oscilaciones con las que el cuerpo oscila preferentemente se califican como oscilaciones propias o resonancias naturales; calificadas en la mayoría de los casos como frecuencias de resonancia o anti-resonancias. Se analiza la frecuencia en la que oscila, no el sonido. En el área no audible se llama control de ultrasonidos.

Después de la excitación un cuerpo vibra en frecuencias características específicas que depende del material, la estructura interna y la geometría. Estas oscilaciones representan directamente las propiedades mecánicas de la pieza. Esa vibración puede ser medida en la banda de frecuencia del sonido o del ultrasonido usando un micrófono o un láser.

Las oscilaciones son el “idioma” de la pieza que se comprenden con un sensor y se pueden analizar digitalmente. El análisis de resonancia requiere un procedimiento sistemático y gradual para conocer el modo de acción de los factores de influencia diferentes en las frecuencias de resonancia.

La microestructura de materiales metálicos es decisiva para la estabilidad y viabilidad de una pieza de trabajo, ya que influencia la duración de las ondas acústicas que se propagan en una pieza. Mediante el análisis acústico de resonancia (también conocido como “prueba de sonido” o “análisis de sonido”). Se pueden evaluar los cambios de calidad. Para ello, el espectro acústico o de resonancias de las piezas de prueba se compara con espectros de resonancia de piezas de estructuras conocidas.

Los errores típicos en piezas de embutición o conformadas como discontinuidades en el material son causados por el proceso de formación. Si una de estas discontinuidades cambia la rigidez de la pieza esta variación puede detectarse de manera fiable por cambio de comportamiento de las frecuencias de resonancia y, por consiguiente descartarla.

Para cada pieza hay muchas frecuencias propias por lo que se forman parámetros estándares (frecuencia, amplitud, amortiguación, etc.). Estas frecuencias características pueden ser desde 10 hasta más de 1000. Por lo que el reto es ajustar las frecuencias y características de forma que se puedan detectar pequeñas divergencias o diferencias pero que, sin embargo, sean relevantes.

Para componentes más grandes, las características sonoras son menos distintivas y más parecidas a un “traqueteo”. En este caso, las características acústicas se pueden determinar con menos precisión que en piezas pequeñas.

Las resonancias acústicas pueden detectar defectos como grietas, defectos en la microestructura, desprendimientos en el material o variaciones en la densidad. A través de todo el cuerpo se forman ondas longitudinales y transversales, las cuales se ven influenciadas por las grietas, cambios en la estructura y en la densidad, porosidad y/o diferencias dimensionales y de peso. La clasificación de los defectos se da por comparación de los efectos de la resonancia medidos con los definidos “buenos” valores.

Antes de realizar el ensayo por resonancia acústica nos debemos preguntar:

- ¿Qué formas de onda están presentes?
- ¿Qué frecuencias de resonancia están asociadas con cada forma de onda?
- ¿Qué tipo de sensor puede medir la resonancia?
- Etc.

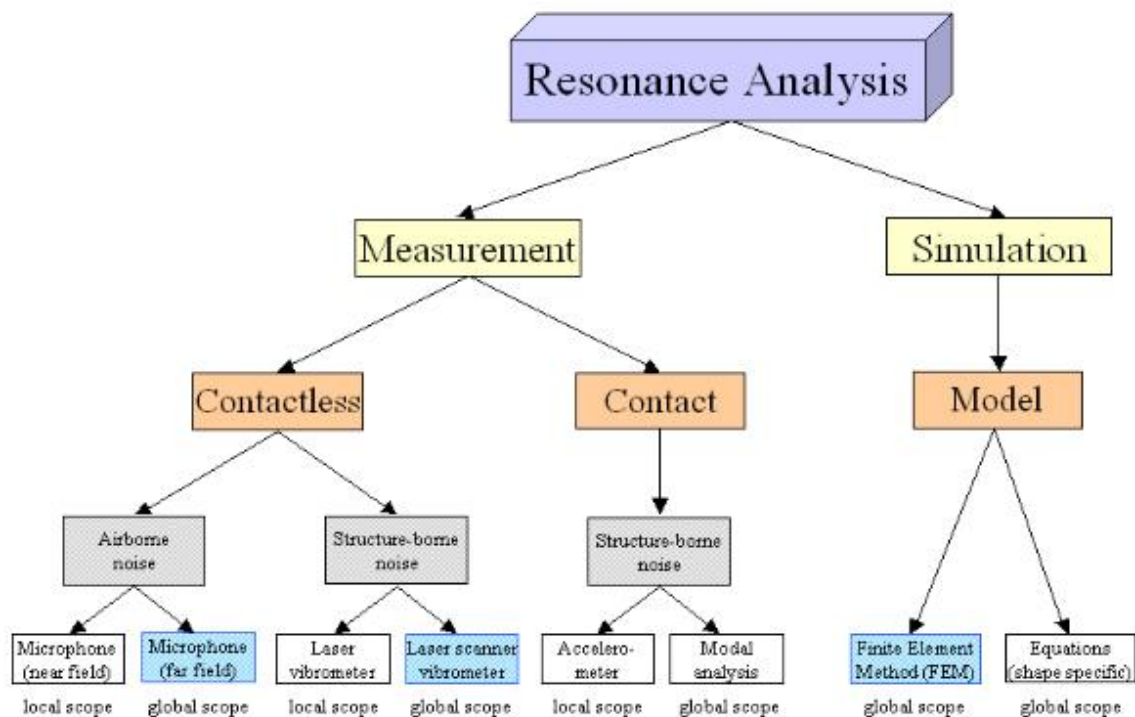
Para que este sistema de análisis resulte atractivo para la resolución de nuestro problema es imprescindible que se pueda implementar en el sistema productivo en serie pudiendo analizar la totalidad de las piezas producidas.

Podemos encontrar básicamente tres tipos de software:

- a) Medida de las frecuencias naturales: Uno o más pulsos electromecánicos dirigidos son utilizados para determinar las frecuencias naturales. Esta información será utilizada para evitar los efectos de la resonancia.
- b) Identificación de la estructura de fundición: Mediante una estimulación en zonas predefinidas las zonas de interés serán evaluadas. Los valores de referencia serán determinados haciendo pruebas con piezas con defectos y sin defectos.
- c) Identificación del defecto en la pieza: Mediante la estimulación de zonas predefinidas, la calidad en términos de grietas, agujeros de soplado y otros defectos serán evaluados. Como en el caso anterior, los valores de referencia se determinarán mediante pruebas con piezas defectuosas y no defectuosas.

5.2.2.2. Métodos para identificar frecuencias de resonancia

Métodos para identificar la frecuencia de resonancia:



Determinar los modos de vibración no resulta sencillo de forma manual en geometrías complejas. El análisis se complica al considerar la geometría 3-D y resulta especialmente difícil incorporar las “condiciones adicionales” que simulan los defectos.

Con el cálculo modal mediante elementos finitos se pueden obtener eficazmente las diferentes frecuencias propias de vibración.

Las heterogeneidades se traducen como una reducción total o parcial de continuidad entre elementos de dicha zona; lo que implica una independencia de los estados tensionales entre los puntos separados por dichos “huecos”. Este tipo de defectos reducen la rigidez y afectan imperceptiblemente a la masa; lo que a su vez, aumenta la flexibilidad del sistema. Esto hace que varíe la frecuencia natural y también cambien los desplazamientos de cada punto de la pieza en estudio

El efecto de presencia de impurezas, por otra parte, implica igualmente una reducción de la resistencia pero con mayor dificultad de modelización. Esto es así debido a la incertidumbre elevada de la naturaleza de las impurezas y su efecto. Pero el estudio, en este caso, no se ocupa de este tipo de defectos.

5.2.2.3. Métodos de medida

La medida de estructuras sólidas se puede realizar mediante una técnica con contacto con un sensor piezoeléctrico como puede ser un acelerómetro o sin contacto con un vibrómetro láser. En los dos casos la propagación de las ondas se mide únicamente en una posición, esta

desventaja se puede compensar usando un método de barrido. En este caso un vibrómetro láser realizará una serie de medidas en diferentes posiciones y las une mediante el ordenador.

Las medidas utilizando un micrófono pueden realizarse tanto en el campo cercano como en el campo lejano de la pieza a ensayar.

En el campo cercano el micrófono se situará muy cercano a la pieza y medirá únicamente parte de la vibración, es decir, no en la totalidad de la pieza. Sin embargo, frecuencias de resonancias son una característica mecánica de la pieza y existe independientemente de donde se realice la excitación de la pieza, la amplitud depende de la posición de la excitación y la distancia entre la pieza y el micrófono. Los modos de vibración en áreas remotas en el campo cercano solo generan resonancias de baja amplitud.

En el campo lejano el micrófono es colocado de forma que mide la vibración del cuerpo entero.

Acústicamente la frecuencia de vibración está relacionada con un infrasonido, sonido o ultrasonido. El sonido fruto de la vibración de un elemento está asociado a su frecuencia. A su vez, la frecuencia está relacionada con el tono, siendo creciente con el aumento de rigidez de la pieza.

La contribución inicial de este tipo de ensayos es desarrollar un diagnóstico preliminar de la estructura para luego caracterizar las grietas con técnicas convencionales de ensayos no destructivos, obviamente en el caso en que interese caracterizarlas o tener más detalles de las mismas. Sin embargo, los resultados no han sido siempre lo que se esperaba debido a varios factores que van desde poca sensibilidad del sistema; influencias ambientales hasta dificultades prácticas de las mediciones.

Grietas pequeñas en estructuras relativamente complejas tienden a producir pocos cambios en las frecuencias de resonancia que caen dentro del margen de error del análisis modal experimental; razón por la cual muchos investigadores plantean la potencialidad de la transformada de Wavelet para detectar a partir del análisis de los desplazamientos nodales las grietas en estos casos.

5.2.2.4. Análisis modal

5.2.2.4.1. Introducción

El análisis modal se basa en técnicas teóricas y experimentales.

El análisis modal teórico se basa en el modelo físico del sistema, teniendo en cuenta propiedades como masa, rigidez y amortiguamiento; estas propiedades se obtienen en las ecuaciones diferenciales parciales. Un modelo físico real comprendería las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento de forma de la distribución espacial, esto es llamado matriz de masa, rigidez y amortiguamiento.

El análisis modal experimental es el proceso de determinar los parámetros modales como las frecuencias, amortiguación y modos de vibrar de un sistema lineal e invariante en el tiempo a través de una aproximación experimental. Los parámetros modales pueden ser determinados a través de métodos analíticos, como el análisis de elementos finitos, y una de las razones más comunes para el análisis experimental es la verificación y/o corrección de estos resultados analíticos. Además, a menudo el modelo analítico no existe y los parámetros modales determinados experimentalmente sirven de modelo (base) para futuras evaluaciones.

5.2.2.4.2. Visión general del análisis modal experimental

El proceso de determinar los parámetros modales desde datos experimentales implica varias fases: teoría del análisis modal, métodos del análisis modal, adquisición de datos modales, presentación y/ validación de los datos modales.

Teoría del análisis modal

Se refiere a la parte de las vibraciones que explica teóricamente la existencia de frecuencias naturales, factor de amortiguamiento y las formas de modos de sistemas lineales. Incluye tanto modelos de parámetros discretos como modelos continuos.

Métodos de análisis modal experimental

Relación teórica entre las cantidades medidas y la teoría clásica de vibración visualmente representada como las ecuaciones diferenciales matriciales. Todas las formas modernas de medición están basadas en las ecuaciones diferenciales matriciales, producen una forma matemática final en términos de datos medidos.

La información medida puede ser información de entrada de datos bruta y de salida en los dominios del tiempo o de frecuencia o información procesada como la respuesta de impulso o las funciones de respuesta de frecuencia.

Adquisición de datos modales

Se compone de los aspectos prácticos de la adquisición de información que es requerida como la entrada de datos para la fase de estimación de parámetros modales.

Esta fase está relacionada con el problema de estimar los parámetros modales basada en una elección de modelo matemático, y justificado por el método modal experimental de análisis de los datos medidos.

Presentación o validación de datos modales

Es la fase en la cual se suministra una interpretación de los parámetros modales. Por ejemplo, ésta simplemente puede ser la tabulación numérica de la frecuencia, amortiguamiento, y los vectores modales junto con la geometría asociada. La presentación modal de datos involucra la esquematización y la animación de tal información.

5.2.2.4.3. Supuestos básicos del análisis modal

Una de las claves para entender el análisis modal involucra las relaciones entre diferentes dominios usados para descubrir la dinámica de un sistema estructural. Esto involucra el tiempo, la frecuencia (Fourier) y el dominio de Laplace. Estas relaciones con respecto a un sistema estructural, son las transformadas integrales (Fourier y Laplace) que reflejan la información contenida por las ecuaciones diferenciales gobernantes transformadas para cada dominio. Es importante notar que estas son relaciones integrales y que las ecuaciones diferenciales gobernantes representan relaciones continuas en cada dominio.

Hay cuatro suposiciones básicas, concernientes a cualquier estructura, que están hechas para realizar un análisis modal experimental.

- Se asume comportamiento lineal de la estructura: la respuesta de la estructura a cualquier combinación de fuerzas, simultáneamente aplicadas, es la suma de las respuesta individuales para cada fuerza actuando por si sola.
- La estructura es invariante en el tiempo: los parámetros a determinar permanecen constantes.
- La estructura obedece a la ley de Reciprocidad de Maxwell: una fuerza aplicada en el grado de libertad p que causa una respuesta en el grado de libertad q; produce la misma respuesta en el grado de libertad p si la fuerza es aplicada en el grado de libertad q.
- La estructura es observable: las mediciones realizadas deben contener suficiente información para generar un adecuado modelo del comportamiento de la estructura.

5.2.2.4.4. Dominio del tiempo. Función de respuesta de impulso.

La función de respuesta al impulso puede ser determinada a partir de:

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}$$

[12]

Asumiendo que las condiciones iniciales son 0 y $f(t)$ es un impulso. La respuesta del sistema, $x(t)$ a un impulso unitario es conocido como la función respuesta al impulso del sistema $h(t)$. Por lo tanto:

$$h(t) = Ae^{\lambda_1 t} + A^* e^{\lambda_1^* t} \quad [12]$$

$$h(t) = e^{\sigma_1 t} [Ae^{(+j\omega_1 t)} + Ae^{(-j\omega_1 t)}] \quad [12]$$

- A y A* controlan la amplitud de la respuesta
- La parte real es la razón de decaimiento y la parte imaginaria la frecuencia de oscilación

5.2.2.4.5. Dominio de la frecuencia. Función de respuesta de frecuencia.

Equivale a la ecuación de movimiento ,pero determinada por el dominio de Fourier o de la frecuencia (ω). Esta función tiene la ventaja de convertir una función diferencial a una algebraica. Esto resulta realizando la transformación de Fourier de la ecuación de movimiento:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad [12]$$

Donde:

- M=cte de masa
- C=cte de amortiguación
- K=cte de rigidez

Se convierte en:

$$[-M\omega^2 + jC\omega + K]X(\omega) = F(\omega) \quad [12]$$

el resultado de la transformación de Fourier de una ecuación diferencial a una algebraica donde $s=j\omega$.

Escrito de otra forma:

$$B(\omega) \cdot X(\omega) = F(\omega) \quad \text{donde } B(\omega) = -M\omega^2 + jC\omega + K$$

Lo que establece que la respuesta del sistema $X(\omega)$ está relacionada con la función de fuerza $F(\omega)$ a través de la cantidad $B(\omega)$, la función de impedancia

$$B(\omega) = \frac{F(\omega)}{X(\omega)} \quad [12]$$

$$X(\omega) = \frac{F(\omega)}{B(\omega)} \quad [12]$$

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad [12]$$

$$H(\omega) = \frac{1}{-M\omega^2 + jC\omega + K} \quad [12]$$

Siendo $H(\omega)$ la Función de Respuesta de Frecuencia

5.2.2.4.6. Dominio de Laplace. Función de transferencia

Igual que en el caso de la frecuencia, una información equivalente puede ser presentada en el dominio de Laplace a través de la transformada de Laplace. La única diferencia consiste en el hecho de que la transformada de Fourier está definida desde el infinito negativo a infinito positivo.

La transformación de Laplace también tiene la ventaja de convertir una ecuación diferencial en una ecuación algebraica

La ecuación del movimiento:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad [12]$$

Queda:

$$[Ms^2 + Cs + K]X(s) = F(s) + [Ms + C]X(0) + M\dot{X}(0) \quad [12]$$

$X(0)$ y $\dot{X}(0)$ son los desplazamientos y velocidad en $t=0$.

Si las ecuaciones iniciales son cero, la Ec. queda:

$$[Ms^2 + Cs + K]X(s) = F(s) \quad [23]$$

$$B(s)X(s) = F(s) \quad [23]$$

Donde:

$$B(s) = Ms^2 + Cs + K \quad [23]$$

Así, usando la misma lógica que en el caso del dominio de la frecuencia, la función de transferencia puede ser definida en la misma forma para el dominio de la frecuencia.

$$X(s) = H(s)F(s) \quad [23]$$

Donde:

$$H(s) = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} \quad [23]$$

Donde la función puede ser escrita como:

$$H(s) = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} = \frac{1/M}{s^2 + \left(\frac{C}{M}\right)s + \left(\frac{K}{M}\right)}$$

[12]

Válida únicamente si las condiciones iniciales son cero.

La ecuación puede ser escrita como función de polos complejos:

$$H(s) = \frac{1/M}{(s - \lambda_1)(s - \lambda_1^*)} = \frac{A}{(s - \lambda_1)} + \frac{A^*}{(s - \lambda_1^*)}$$

[12]

5.2.2.4.7. Fundamentos del análisis modal experimental

Usando técnicas de análisis de señales, podemos medir vibraciones en estructuras y realizar análisis de frecuencias. La descripción del espectro de frecuencia de cómo varía el nivel de

vibración con la frecuencia puede ser comparado con un patrón. Este tipo de prueba entrega resultados que son relevantes para las condiciones medidas. El resultado será producto de la respuesta estructural y el espectro de una fuerza de excitación desconocida.

El análisis modal es una técnica de análisis de sistema en donde un analizador FFT (Transformada rápida de Fourier) puede ser usado para medir la respuesta de una fuerza conocida. La medición de la Función Respuesta de Frecuencia (FRF) describe la respuesta estructural inherente entre los puntos de medición. Usando un conjunto de mediciones de la FRF realizadas en puntos definidos de la estructura, se puede comenzar a construir una imagen de su respuesta.

5.2.2.4.7.1. Transformada rápida de Fourier

Está basada en el Análisis de Fourier el cual establece que por muy compleja que se una onda, si la forma de dicha onda es periódica, entonces se puede representar con una precisión arbitraria mediante la superposición de un número suficientemente grande de ondas senoidales que forman una serie armónica.

La función $f(t)$ periódica de periodo T ; se puede representar como:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos(i\omega t) + b_i \text{sen}(i\omega t))$$

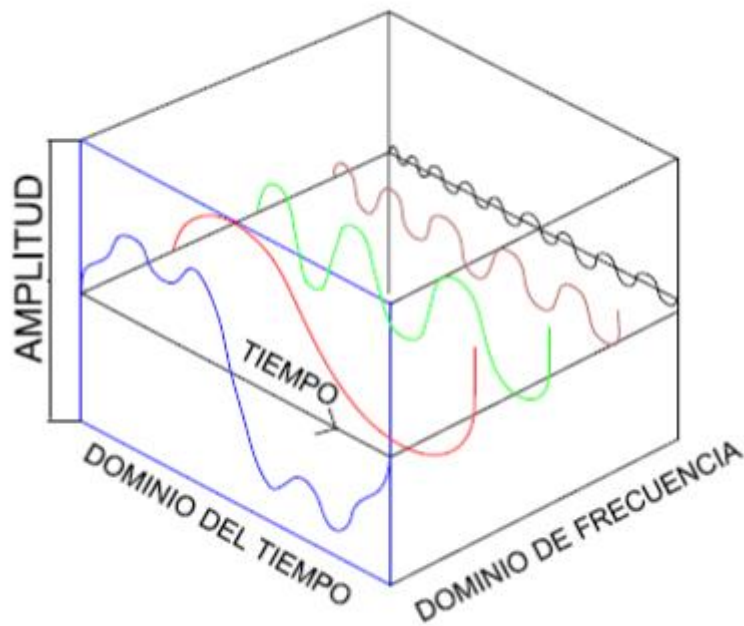
[22]

Donde $T=2\pi/\omega$ y $a_0, a_1, \dots, a_i, \dots$ y $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots$ son coeficientes de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) dt \quad [22]$$

$$a_i = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) \cos(i\omega t) dt \quad [22]$$

$$b_i = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) \text{sen}(i\omega t) dt \quad [22]$$



Concepto de la Transformada de Fourier

Figura 122. Concepto de la transformada de Fourier (12)

5.2.2.4.7.2. Función de respuesta de frecuencia

Usada normalmente para describir la relación entrada-salida de algún sistema, en nuestro caso es usado para descubrir la relación entre la fuerza aplicada a una pieza estampada en la Erfurt a través de un golpe y la respuesta obtenida a través del acelerómetro.

La respuesta de frecuencia es una característica de un sistema que tiene una respuesta medida que es resultado de una entrada conocida aplicada. En el caso de una estructura mecánica, la respuesta de frecuencia es el espectro de vibración de la estructura, dividida entre el espectro de la fuerza de entrada del sistema. Para medir la respuesta de frecuencia de un sistema mecánico, hay que medir los espectros de la fuerza de entrada al sistema y de la respuesta de vibración.

La estimación de la función de respuesta de frecuencia depende de la transformación de los datos desde el tiempo al dominio de la frecuencia, sirviéndose de la transformada de Fourier. Como la definición de la transformada de Fourier requiere una colección de datos en el tiempo que va desde menos infinito a más infinito, y esto no es posible experimentalmente, la computación es realizada digitalmente usando un algoritmo de transformación rápida de Fourier que se basa en un historial de tiempo limitado (la transformada rápida de Fourier).

De esta forma las ventajas de la transformada de Fourier pueden ser implementadas en un esquema digital computacional. La función de frecuencia satisface las siguientes relaciones para entradas simples y múltiples.

5.2.2.4.8. Sistema ideal para un análisis modal experimental

Existen dos formas de realizar un Análisis Modal Experimental (AME):

- Utilización de un Excitador Electrodinámico (Shaker) el cual actúa como una fuerza de excitación externa que puede variar la frecuencia de vibración con el fin de realizar un “rastreo de frecuencias” más uno o más acelerómetros para medir la respuesta a esta fuerza.
- “Prueba de impacto” a través de un martillo sensorizado que genera un golpe como fuerza excitadora.

En ambos la fuerza de excitación es medida y luego utilizada como dato de entrada, además, ambos emplean un sistema de adquisición de datos de dos o más canales y un software para el manejo de los datos obtenidos.

El proceso de análisis se puede resumir:

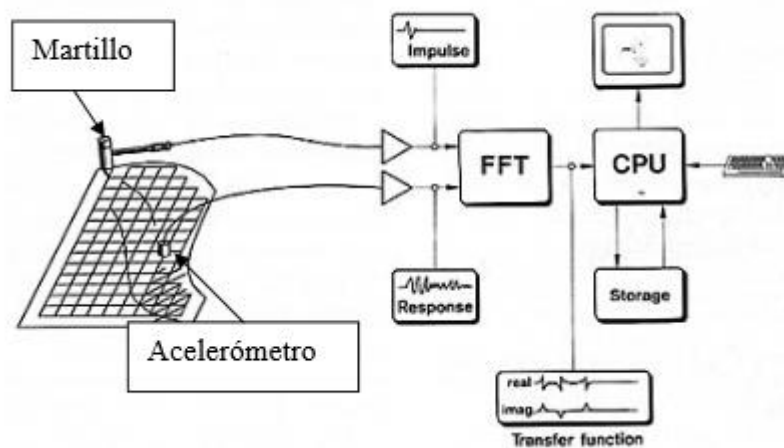


Figura 123. Proceso de análisis, prueba de impacto [12]

Se transforma las señales analógicas de los sensores en digital y se transforma la onda recibida en un espectro de frecuencias a través de la FFT (Transformada Rápida de Fourier).

Prueba de impacto

Es un método simple para el análisis de la respuesta modal estructural de una máquina o estructura. Cuando la estructura es impactada produce una amplia banda de frecuencia de

componentes de excitación; cuando estos componentes coinciden con la frecuencia natural estructural, las condiciones de resonancia se hacen presentes lo que resulta en un nivel de vibración más alto que el normal a esas frecuencias. Durante la prueba de impacto las amplitudes de vibración y las frecuencias son medidas con un acelerómetro o vibrómetro láser y la información se entrega en gráficos de amplitud vs frecuencia. Los picos de las frecuencias corresponden a los modos flexibles estructurales y el ancho de los picos provee información sobre los factores de amplificación.

La técnica implica simplemente golpear la estructura con algún artefacto con un martillo de madera o de goma y analizar la respuesta.

5.2.3. Solución planteada

En primer lugar se deberá hallar la frecuencia de resonancia de cada pieza, para poder establecer los valores con los cuales comparar los datos que se obtengan en el análisis modal experimental o resonancia acústica.

Una vez que se tienen estos datos se podrá proceder al ensayo de las piezas producidas, sin embargo, la implantación de este sistema es más complejo que en el caso de la termografía activa puesto que en este caso para la excitación de la pieza es necesario el contacto.

Se podría colocar el dispositivo en la última posición de la prensa, L7, donde están en reposo todas las piezas realizadas, de esta forma el contacto entre el impulsor y las piezas es más sencillo, se podría incluso unir al útil, de forma que una vez se coloque en el mismo la pieza, esta entre en contacto con el excitador. Aunque esto puede presentar problemas, como el hecho de que falle el transfer y la pieza se coloque ligeramente desviada o que el contacto por diversos factores no sea perfecto.

El dispositivo a colocar debe ser similar al que aparece en la siguiente imagen:

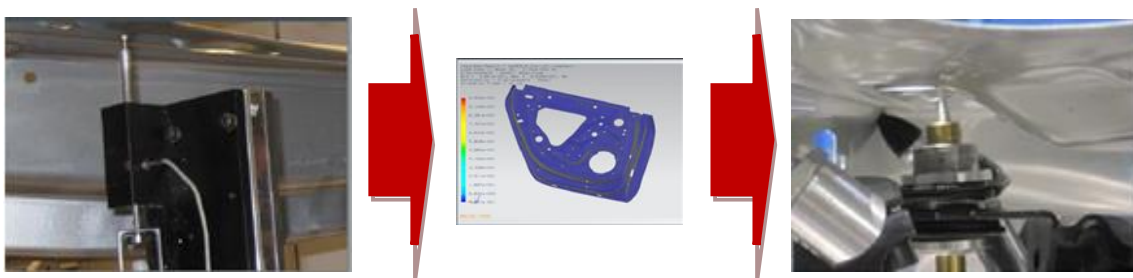


Figura 124. Dispositivo resonancia acústica

En la primera foto se ve el excitador; en la segunda el análisis según el software empleado, y por último, el acelerómetro que es el dispositivo que mide la vibración u oscilación de la pieza.

El dispositivo a colocar en la Erfurt, en lugar de un acelerómetro debe constar de un vibrómetro láser. Ya que de esta forma no es necesario que haya contacto también en el sensor de medida de la vibración.

La señal de pieza OK o No Ok se verá en el puesto de control de calidad actual donde se retirarán las piezas defectuosas, ya sea para re TRABAJARLAS o enviarlas a chatarra.

De esta forma podrían analizarse todas las piezas con este innovador sistema.

6. Grupo II: Ultrasonidos y Visión Artificial

6.1. Ultrasonidos

Se ha explicado anteriormente la técnica de los ultrasonidos, y como hay diferente tipos de palpadores y de ondas en función de la aplicación y de los defectos que se buscan.

Debido a que las materias sólidas tienen buena conductibilidad se utilizan las ondas mecánicas (especialmente ultrasónicas) para los ensayos de materiales. Pero no solo se utiliza la propagación sino la reflexión de las ondas sonoras, de esta forma las piezas de trabajo se pueden examinar en busca de defectos internos y superficiales de una forma no destructiva.

Las ondas de sonido se pueden utilizar de dos formas diferentes, en primer lugar, para actuar físicamente sobre el material, por ejemplo cuando la energía de la onda sonora se utiliza para separar cuerpos extraños de una superficie durante la limpieza. En segundo lugar la energía de la onda sonora se puede utilizar para explorar la condición física de un material. En este caso la onda sonora es la que transporta la información, se transmite una onda ultrasónica en la pieza y recibimos una onda de retorno para analizar la información que lleva.

Las ondas ultrasónicas suelen ser producidas por materiales piezoeléctricos, estos materiales son aquellos que sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico.

Para la emisión de ondas ultrasónicas se suelen utilizar dos efectos que aparecen en algunos materiales:

- Efecto magnetostrictivo:

Materiales ferromagnéticos se contraen o se expanden por efecto de un campo magnético. También se puede dar el efecto contrario.

- Efecto piezoeléctrico:

El efecto piezoeléctrico, es un fenómeno físico que presentan algunos cristales debido al cual, aparece una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal cuando éste se somete a una deformación mecánica y se denomina efecto piezo-eléctrico directo.

Este efecto funciona también a la inversa: cuando se aplica un campo eléctrico a ciertas caras de una formación cristalina, esta experimenta distorsiones mecánicas (efecto piezo-eléctrico inverso). Pierre Curie y su hermano Jacques descubrieron este fenómeno en el cuarzo y la sal de Rochelle en 1880 y lo denominaron 'efecto piezoeléctrico' (del griego piezein, 'presionar').

Cuando se comprime el cristal, los átomos ionizados (cargados) presentes en la estructura de cada celda de formación del cristal se desplazan, provocando la polarización eléctrica de ella.

Como se ha comentado en apartados anteriores, cualquier onda mecánica está compuesta por oscilaciones de pequeñas partículas de material.

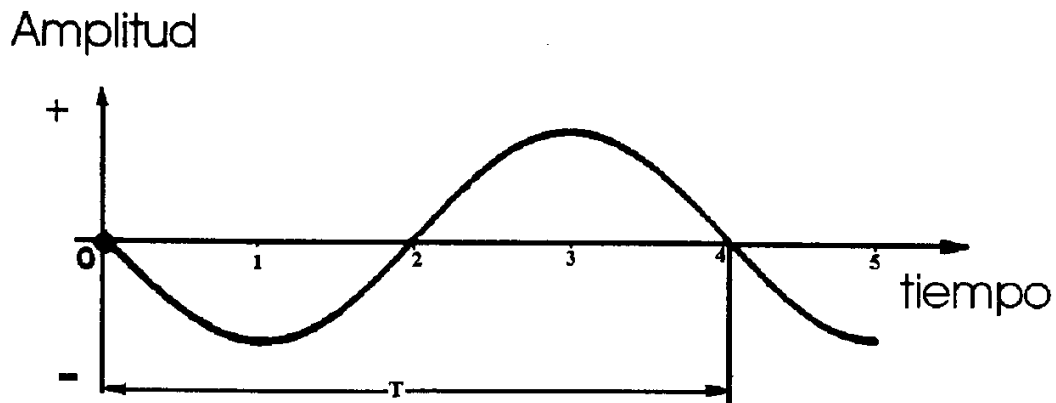


Figura 125. Onda y movimiento oscilatorio

-c: velocidad de propagación de la onda (mm/ μ s).

-T: periodo de oscilación, tiempo requerido para una oscilación completa (μ s).

- λ : longitud de onda (mm).

-f: frecuencia, número de oscilaciones por segundo (Hz).

$$f=1/T$$

Y tenemos la relación: $c=\lambda/T$

$$c=\lambda \cdot f$$

Es importante destacar que existen dos tipos de ondas, longitudinales o de compresión y transversales o de corte.

Las ondas de compresión son aquellas cuya dirección de oscilación de las partículas se produce en el mismo sentido que la propagación de la onda y en las de corte las partículas oscilan transversalmente respecto a la dirección de propagación de la onda. Los gases y líquidos son incapaces de transmitir ondas de corte, por el contrario, las de compresión se pueden transmitir en sólidos, líquidos y gases.

Con el método de impulso-eco y para la detección de discontinuidades hay dos parámetros de gran interés en lo que se refiere a la onda y al instrumento que se utiliza, el tiempo de tránsito del sonido y la intensidad de la señal reflejada. El tiempo de tránsito del sonido depende, y por lo tanto, sirve para medir la profundidad a la que se encuentra un defecto o interfase, este parámetro es el tiempo necesario para que los impulsos de sonido viajen desde la superficie de reflector y regreso, para que se pueda medir es necesario utilizar impulsos sonoros cortos.

$s = c \cdot t$ donde s es la profundidad, c la velocidad de propagación y t el tiempo de tránsito.

En segundo lugar, el parámetro que suscita interés es la intensidad de señal reflejada (el eco), una medición de las características de reflexión del defecto o interfase detectados.

En una pieza homogénea la velocidad del sonido se puede considerar constante, es decir, se propaga diferente en la pieza y en el aire. El sonido se propaga de modo diferente en la materia sólida debido a que la materia sólida tiene una densidad mucho más alta que los gases y líquidos, esto quiere decir que la distancia entre átomos y moléculas es muy pequeña, además están dispuestos en una estructura cristalina y las fuerzas elásticas entre átomos o moléculas son considerablemente fuertes.

En los ensayos de materiales es fundamental la presión del sonido. En los puntos de mayor densidad de partículas la presión será mayor que la presión normal, mientras que en zonas dilatadas será inferior. La amplitud de la presión del sonido está íntimamente relacionada con la amplitud del movimiento de las partículas, es decir, la desviación máxima de las partículas de su posición de descanso.

En los límites del material o pieza la onda resulta distorsionada. Si más allá del límite se encuentra otro material la onda sonora se puede propagar al segundo material (dirección, intensidad y modo de onda más o menos cambiado).

Impedancia acústica (Z):

Para calcular las presiones del sonido de la onda sonora reflejada y de la transmitida se requiere la impedancia acústica Z de los materiales. La impedancia acústica Z del material se define como el producto de su velocidad de sonido c y su densidad ρ .

$Z = \rho \cdot c$ donde Z es la impedancia acústica (Pa·s/m), ρ la densidad del material (Kg/m³), c la velocidad del sonido (m/s)

Factor de reflexión (R):

La relación R de la presión de sonido reflejada con el incidente se llama factor de reflexión y se calcula mediante la fórmula:

$$R = [Z(2) - Z(1)] / [Z(2) + Z(1)]$$

Factor de transmisión (D):

La relación D de la presión del sonido transmitida con la presión de sonido incidente se llama factor de transmisión y se calcula mediante la fórmula:

$$D = 2 \cdot Z(2) / [Z(2) + Z(1)]$$

Todo lo expuesto anteriormente está planteado para un caso ideal, sin embargo, en la práctica esta situación no se da nunca.

El campo acústico de un transductor ultrasónico acoplado a una pieza está formado por un sistema complicado de máximos y mínimos de presión acústica. En el haz central del campo acústico se produce un último máximo, el máximo principal del campo acústico, y a partir de este punto ya no existen ni máximos ni mínimos.

La zona de máximos y mínimos hasta el máximo principal se llama el campo cercano, y a la distancia entre la cara delantera del transductor y el máximo principal, o foco se le llama longitud del campo cercano, N (mm).

$$N = D(\text{eff})^2 \cdot f / 4c$$

Siendo:

- $D(\text{eff})$ el diámetro efectivo del transductor cilíndrico es $0,95 D$ (siendo D su diámetro nominal) (mm)
- f la frecuencia (MHz)
- c la velocidad de propagación del sonido (Km/s).

En la práctica se utiliza una representación aproximada del campo acústico que muestra la zona donde se producen reflexiones procedentes de defectos en la pieza cuando se aplica el método de impulso eco. Esta representación aproximada se llama haz de sonido.

La geometría del transductor y las características de onda de las ondas del sonido son la razón de la forma característica del haz del sonido y de los efectos de interferencia. Nótese que hasta ahora se asume una propagación sin problemas de ondas sonoras en el material de ensayo.

Los materiales naturales producen un efecto más o menos pronunciado que debilita el sonido. Esto es consecuencia de dos efectos básicos: la dispersión y la absorción verdadera del sonido; ambos efectos se combinan en el término atenuación.

La dispersión es consecuencia de que el material contiene límites de grano en los cuales la impedancia acústica cambia de forma abrupta. Incluso cuando está compuesto de un único cristal el material puede ser heterogéneo para las ondas ultrasónicas si es anisótropo (granos están orientados al azar y tiene diferentes propiedades elásticas y diferentes velocidades del sonido en direcciones diferentes, es decir, las propiedades

cambian con las direcciones). En un material con granos muy gruesos de un tamaño comparable a la longitud de onda la dispersión se puede visualizar geométricamente.

Normalmente el tamaño del grano suele ser mayor que la longitud de onda (recordemos que trabajamos con frecuencias entre 0.5-25 MHz).

La segunda causa de la atenuación es la absorción verdadera, es una transformación directa de la energía sonora en calor, la absorción aumenta cuando aumenta la frecuencia porque una oscilación rápida pierde más energía que una más lenta, este es el efecto que se aprovecha en la termografía ultrasónica comentada en apartados anteriores.

En los transductores modernos ya no se usa el cuarzo, sino cerámica sinterizada como el titanato de Bario. Los materiales más importantes para los transductores ultrasónicos, así como sus características, se muestran en la siguiente tabla:

	Titanio de zirconato de plomo (PZT)	Titanio de bario	Metaniobato de plomo	Sulfato de litio	Cuarzo	Niobato de litio
Velocidad del sonido (m/s)	4000	5100	3300	5460	5740	7320
Impedancia acústica Z	30	27	20,4	11,2	15,2	34
Factor k de acoplamiento electromecánico	0,6-0,7	0,45	0,4	0,38	0,1	0,2
Módulo piezoeléctrico d	150-593	125-190	85	15	2,3	6
Constante H de deformación piezoeléctrica	1,8-4,6	1,1-1,6	1,9	8,2	4,9	6,7
Factor de acoplamiento para oscilación radial Kp	0,5-0,6	0,3	0,07	0	0,1	-

El rendimiento durante la conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa difiere según el material transductor utilizado. Los rasgos correspondientes están definidos por las constantes piezoeléctricas y el factor de acoplamiento. La constante d (módulo piezoeléctrico) mide la calidad del material transductor como transmisor ultrasónico. La constante H (constante de deformación piezoeléctrica) mide la calidad como receptor. La constante k muestra el rendimiento para la transformación del voltaje eléctrico en desplazamiento mecánico y viceversa.

En equipo ultrasónico a grandes rasgos consta de un ordenador y un transductor (también se le denomina sensor o palpador) encargado de emitir y recibir los ultrasonidos.

Las ondas ultrasónicas se reflejan en zonas de transición, en las cuales hay un cambio brusco de impedancia acústica Z (interfase acero-aire). Las ondas ultrasónicas, si inciden perpendicularmente, se reflejan en la dirección de origen y producen la altura máxima posible en pantalla.

Hay dos tipos de ultrasonidos que se están desarrollando y pueden resultar muy interesantes para la resolución del problema planteado. Los palpadores phased-array y los ultrasonidos sin contacto o NCU (Non Contact-Ultrasound), con los cuales se obtendrán los mismos resultados que con los transductores y técnicas tradicionales.

6.1.1. Phased-array

La inspección de ultrasonidos phased-array es un proceso en el cual parámetros como el ángulo, la distancia focal y el tamaño de la zona de focalización se pueden ajustar mediante software, además se pueden multiplexar el haz dentro de una red extendida.

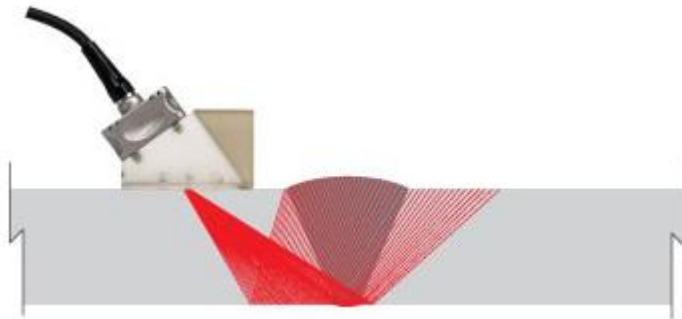


Figura 126. Dibujo ultrasonido phased-array [15]

Este tipo de ultrasonidos hace posible cambiar rápidamente el ángulo del haz para inspeccionar una pieza sin necesidad de desplazar el palpador. Además permite maximizar la detección, cualquiera que fuera la orientación del defecto, optimizando, además, la reacción señal-ruido. Se puede focalizar el haz ultrasónico a la profundidad o rango que se requieran, mejorando la detección de zonas de interés.

Esta técnica se basa en el empleo de cristales ultrasónicos multicanal, palpadores multielementos de 16 a 128 cristales, electrónica y software adecuado para gestionar la excitación y recepción de cada uno de los elementos en diferentes tiempos lo que permite realizar el examen ultrasónico mediante I/E Phased-Array.

Ventajas de este método:

- Ajuste mediante software (ángulo, distancia focal, etc.).
- Inspección desde varios ángulos mediante un solo pequeño palpador controlable eléctricamente.
- Mayor flexibilidad para el análisis de piezas complejas.

- Escaneos de alta velocidad sin ninguna pieza móvil.
- Permite registrar la inspección.
- Posible cambiar rápidamente el ángulo del haz para inspeccionar una pieza sin necesidad de cambiar el palpador.

6.1.2. NCU

Otra de las técnicas de ultrasonidos que podría resultar interesante son los NCU.

Esta técnica esta en desarrollo desde 1978 y en 1997 alcanzó lo que se conoce hoy como su culminación. Están basados en el efecto piezoeléctrico y consiguen el 100% de la transducción en aire desde <100KHz hasta 10MHz. Está totalmente libre de contacto y por lo tanto de contaminación en la pieza y ambiente, tienen una eficacia equiparable a la de los transductores con contacto y una construcción robusta.

En este grupo destacan el acoplador libre EMAT, Electro Magnetic Acoustic Transducers, (transductor acústico electromagnético). Estos aprovechan las fuerzas de Lorentz para inducir una perturbación acústica en el material. Es muy eficaz en la medición de espesores y detección de defectos. Estos dispositivos son especialmente eficientes en la creación de ondas superficiales, pero pueden generar ondas de volumen Horizontal Shear, ondas de Lamb, todo tipo de otros modos de onda guiada en metales y/o materiales ferromagnéticos. Lo que ocurre con los ultrasonidos de contacto es que generan un tipo de onda que no se propagan por el aire.

Para la utilización de estos dispositivos se asume un conocimiento previo de aspectos como la geometría de la pieza, la posición probable del fallo, tamaño y orientación de la misma, reflectividad del fallo, etc.

Son muy interesantes para aplicaciones que implican automatización, inspecciones rápidas, objetos que se mueven, complicadas localizaciones o posiciones, elevadas o bajas temperaturas, superficies secas y para superficies ásperas con mal acabado.

Los transductores acústicos electromagnéticos son dispositivos que permiten generar y detectar ondas ultrasónicas en metales, se utilizan para la generación de sonido sin contacto y la recepción utilizando mecanismos electromagnéticos, el sonido se genera directamente dentro del material adyacente al transductor, es decir, genera el sonido en la pieza analizada en vez de en el transductor.

En materiales conductores, como puede ser el acero, el funcionamiento está basado en la fuerza de Lorentz, mientras que en materiales ferromagnéticos, funcionan basándose en la magnetostricción.

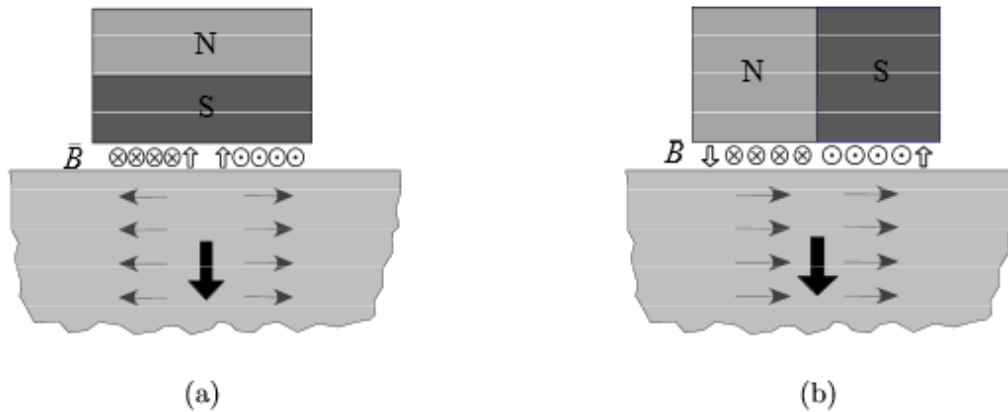


Figura 127. Dispositivos Emat generando ondas ultrasónicas normales a la superficie (a) bobina espiral, (b) bobina espiral alargada. La flecha gruesa indica la dirección de propagación y las pequeñas la dirección de polarización [17]

Los dispositivos EMAT también pueden montarse en las sondas Phased-Array.

Ventajas:

- Inspección seca.
- No se necesita ningún medio de acoplamiento, hecho que lo hace ideal para inspecciones a temperaturas por debajo o por encima del punto de congelación o evaporación o situaciones en las que el acoplante no es práctico.
- No se requiere contacto físico (aunque mejor si hay proximidad).
- Menos sensible a la condición de la superficie (único requisito para la superficie es eliminar escamas sueltas o similares).
- Transductores utilizados son de tamaño grande, en ocasiones puede resultar un inconveniente pero en este caso es beneficioso para nosotros.
- Flexibilidad en la disposición de sensores.
- Modos de ondas transversales y horizontales y Lamb, prácticamente imposible en los transductores piezoeléctricos.
- Puede generar ondas transversales con cualquier ángulo y barrer el material desde 0 hasta 90°, variando la frecuencia.

Desventajas:

- Suelen producir señales en bruto de potencia inferior que en transductores piezoeléctricos de contacto, por lo que se necesitan técnicas más sofisticadas de procesamiento de señales para aislar la señal del ruido.

-Limitado a los productos metálicos o magnéticos.

EMAT es capaz de generar todos los tipos de ondas que se utilizan en la inspección ultrasónica.

Bulk/Guided	Beam Orientation	Wave Mode	Technique	Main Applications
Bulk	Normal	Longitudinal	Piezo EMAT	- Thickness and Velocity Measurements - Flaw Detection - Properties Measurement
		Shear Horizontal	EMAT ¹	
	Angled	Shear Vertical	Piezo EMAT	- Flaw Detection
		Shear Horizontal	EMAT ¹	- Flaw Detection, including austenitic materials
Guided	Surface	Rayleigh	Piezo EMAT ²	- Flaw Detection (surface)
	Volumetric	Lamb	Piezo EMAT ²	- Flaw (including Corrosion) Detection - Velocity and Properties Measurements
		Shear Horizontal	EMAT ¹	- Flaw (including Corrosion) Detection - Velocity and Properties Measurements

[16]

Alcance:

- Detectar discontinuidades en el material que están cerca de la superficie (grietas, laminaciones, costuras, solapa...).
- Cubre procedimientos de no contacto con ondas superficiales mediante campos electromagnéticos.
- Se puede aplicar en cualquier material en el que se pueden introducir la onda acústica de forma electromagnética.
- Esta práctica está pensada para la examinación de piezas en aplicaciones durante el proceso, al final y de mantenimiento.

Si se puede utilizar cualquiera de estas dos técnicas podría resultar muy interesante y adecuada para la resolución de nuestro problema, ya que es rápida, precisa y limpia, características indispensables para lo que buscamos.

6.1.3. Ultrasonidos VW Navarra

En los ultrasonidos que se utilizan en chapistería para detectar fallos en los puntos de soldadura se utilizan palpadores de columna de agua de un diámetro de aproximadamente 3.6 mm. Este palpador se coloca sobre el punto y envía una señal al ordenador que representa la onda y sus reflexiones hasta su atenuación, es decir, hasta que desaparece. En este caso se necesita la utilización de gel acoplante para la transmisión adecuada de la onda de sonido.



Figura 128. Dispositivo control por ultrasonidos VW Navarra

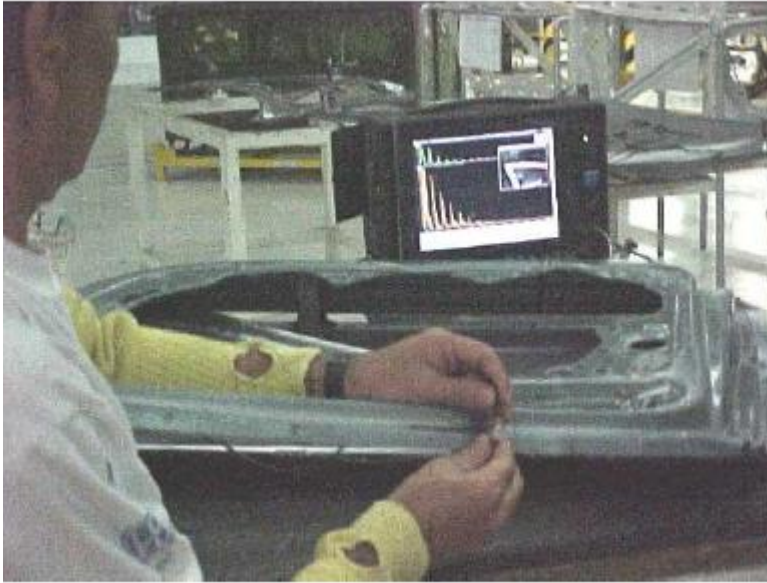


Figura 129. Proceso de verificación puntos de soldadura en VW Navarra

En este puesto de control se utiliza el ensayo mediante ultrasonidos para la verificación de los puestos de soldadura. Surgen una serie de problemas en la utilización de esta técnica para nuestro caso. En primer lugar hay que ir punto a punto. Además, en cada punto hay que pararse hasta que la señal que se ve en el ordenador sea la adecuada. A veces, cuando el fresado no es perfecto la señal que se recibe no tiene exactamente la forma adecuada y puede parecer que el punto de soldadura tiene algún fallo cuando en realidad está bien. Otro problema que se puede dar es, en el caso de querer medir el espesor o el fallo en radios o curvaturas más pronunciadas, el palpador utilizado no hace un contacto adecuado con la superficie, lo que quiere decir que se necesitaría un transductor especial para cada caso y/o tipo de superficie. En este caso el palpador es muy pequeño lo que implica que la zona que abarca en el análisis es muy pequeña también, lo que interesa es analizar una zona bastante más amplia rápidamente, lo que con este tipo de transductores resulta imposible. Otros inconvenientes muy importantes son la necesidad de gel acoplante, el contacto perfecto que se requiere en cada punto, el análisis de cada onda por personal especializado, etc.



Figura 130. Transductores ultrasonidos de columna de agua

Aunque la aplicación de esta técnica no destructiva en un sistema productivo es inviable resultaría interesante realizar una prueba con las muestras que tenemos para ver cómo se comporta la señal ante una grieta. Ver si se detecta con facilidad y cómo se comporta la onda ante una rotura del material, en otras palabras, ver si el método es preciso e interesante para este tipo de fallo. Comprobando así si se podrían aplicar los ultrasonidos sin contacto y/o phased-array para la detección de grietas.

6.1.4. Prueba ultrasonidos

Al realizar la prueba vemos que este sistema queda totalmente descartado ya que no se detecta la grieta, el comportamiento no es el esperado. Como se ha dicho anteriormente el haz sonoro se transporta por el material hasta que entra en contacto con el aire, momento en el cual, cambia su dirección y vuelve al receptor. En el caso que estamos tratando, puesto que se trata de una rotura a lo largo de todo el espesor de la pieza, el haz sonoro no se puede propagar por el material y volver, ya que la pieza está rota, no hay forma de que el haz sonoro cambie de dirección, no hay cambio de material o medio por el que viaja. El haz de ondas se desplaza en la dirección del espesor de la pieza, no en la dirección paralela a la superficie.

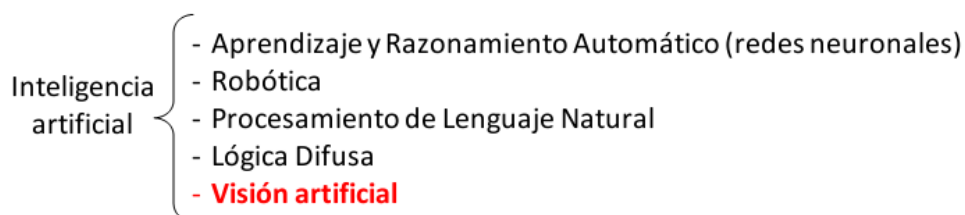
Por lo que concluimos que para la detección de grietas o fallos internos estos métodos podrían resultar muy beneficiosos y obtener resultados francamente positivos, sin embargo, para el caso que tratamos no es aplicable.

Otro inconveniente con el que nos encontramos es que el grosor de la chapa o pieza a analizar es muy pequeño, puede que incluso el aparato empleado en la fábrica no fuera capaz de detectar o medir el espesor del mismo, lo que nos lleva a pensar que se necesitaría un dispositivo y un software con unas características y precisión muy buenas, por lo tanto, un dispositivo de coste relativamente elevado.

6.2. Visión artificial

6.2.1. Introducción

Se puede definir la “Visión Artificial” como un campo de la “Inteligencia Artificial” que, mediante la utilización de las técnicas adecuadas, permite la obtención, procesamiento y análisis de cualquier tipo de información especial obtenida a través de imágenes digitales. La visión artificial la componen un conjunto de procesos destinados a realizar el análisis de imágenes. Estos procesos son: captación de imágenes, memorización de la información, procesado e interpretación de los resultados.



En definitiva, la visión artificial consiste en la captación de imágenes en línea mediante cámaras CCD y su posterior tratamiento a través de técnicas de procesamiento avanzados, permitiendo así poder intervenir sobre un proceso o producto, para el control de calidad y seguridad de toda la producción.

La visión industrial o Visión Artificial aplicada a la industria abarca la informática, la óptica, la ingeniería mecánica y la automatización industrial. A diferencia de la Visión Artificial académica, que se centra principalmente en máquinas basadas en el procesamiento de imágenes, las aplicaciones de Visión Artificial industrial integran sistemas de captura de imágenes digitales, dispositivos de entrada/salida y redes de ordenador para el control de equipos destinados a la fabricación, tales como brazos robóticos. Los sistemas de Visión Artificial se destinan a realizar inspecciones visuales que requieren alta velocidad, gran aumento, funcionamiento las 24 horas del día o la repetitividad de las medidas.

La tecnología de visión es una disciplina relativamente reciente que tuvo su introducción en la industria en la década de los 80. Aplicada en sistemas basados en la tecnología de los PC, se beneficia de los rápidos avances informáticos y de redes.

La visión artificial tiene por objetivo modelar matemáticamente los procesos de percepción visual en los seres vivos y generar programas que permitan simular estas capacidades visuales por computadora. La visión artificial permite la detección automática de la estructura y propiedades de un posible mundo dinámico en 3 dimensiones a partir una o varias imágenes bidimensionales del mundo. Las imágenes pueden ser monocromáticas o a color; pueden ser capturadas por una o varias cámaras, y cada cámara puede ser estacionaria o móvil. La estructura y propiedades del mundo tridimensional que se intentan deducir en la visión artificial incluyen no sólo propiedades geométricas (tamaños, formas, localización de objetos, etc.), sino también propiedades del material (sus colores, sus texturas, la composición, etc.) y la luminosidad u oscuridad de las superficies.

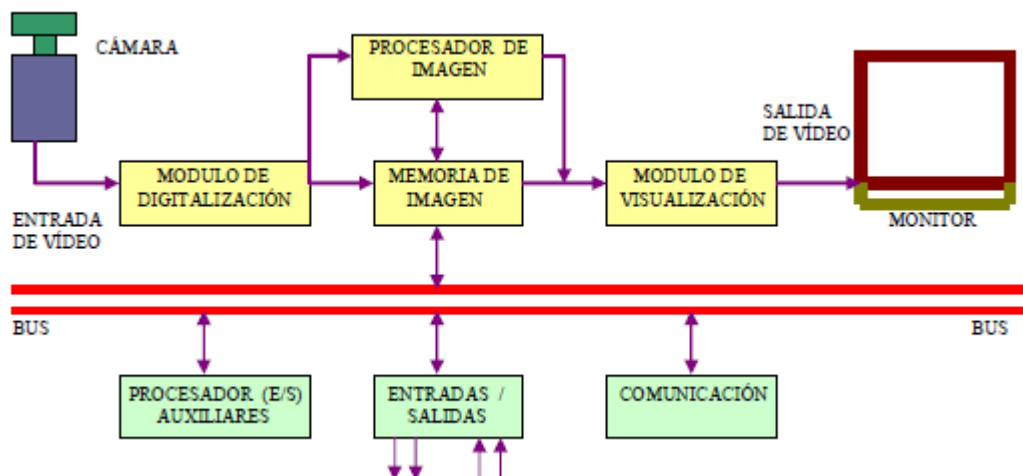
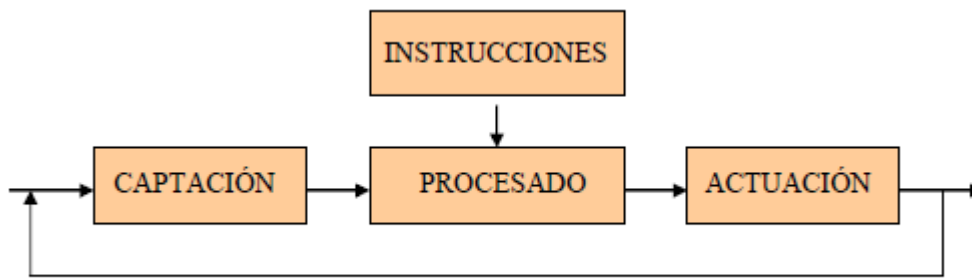


Figura 131. Proceso visión artificial

- Módulo de digitalización: Convierte la señal analógica proporcionada por la cámara a una señal digital (para su posterior procesamiento).
- Memoria de imagen: Almacena la señal procedente del módulo de digitalización.
- Módulo de visualización: Convierte la señal digital residente en memoria, en señal de vídeo analógica para poder ser visualizada en el monitor de TV.
- Procesador de imagen: Procesa e interpreta las imágenes captadas por la cámara.
- Módulo de entradas/salidas: Gestiona la entrada de sincronismo de captación de imagen y las salidas de control que actúan sobre dispositivos externos en función del resultado de la inspección.
- Comunicaciones: Vía I/O, Ethernet, RS232 (la más estándar).

La secuencia a seguir en el proceso operativo es:



- Captación: Obtención de la imagen visual del objeto a inspeccionar.
- Instrucciones: Conjunto de operaciones a realizar para resolver el problema.
- Procesado: Tratamiento de la imagen mediante las instrucciones aplicadas.
- Actuación: Sobre el entorno (aparato, pieza, elemento) en función del resultado obtenido.

Su función es capturar la imagen proyectada en el sensor, vía las ópticas, para poder transferirla a un sistema electrónico.

Elementos de un sistema de visión artificial:

- Sistema de iluminación
- Sensor o cámara de captura de la imagen
- Tarjeta de captura de elevado ancho de banda
- Procesamiento de imagen

- Sincronía con el proceso, para adquirir la imagen en el momento adecuado

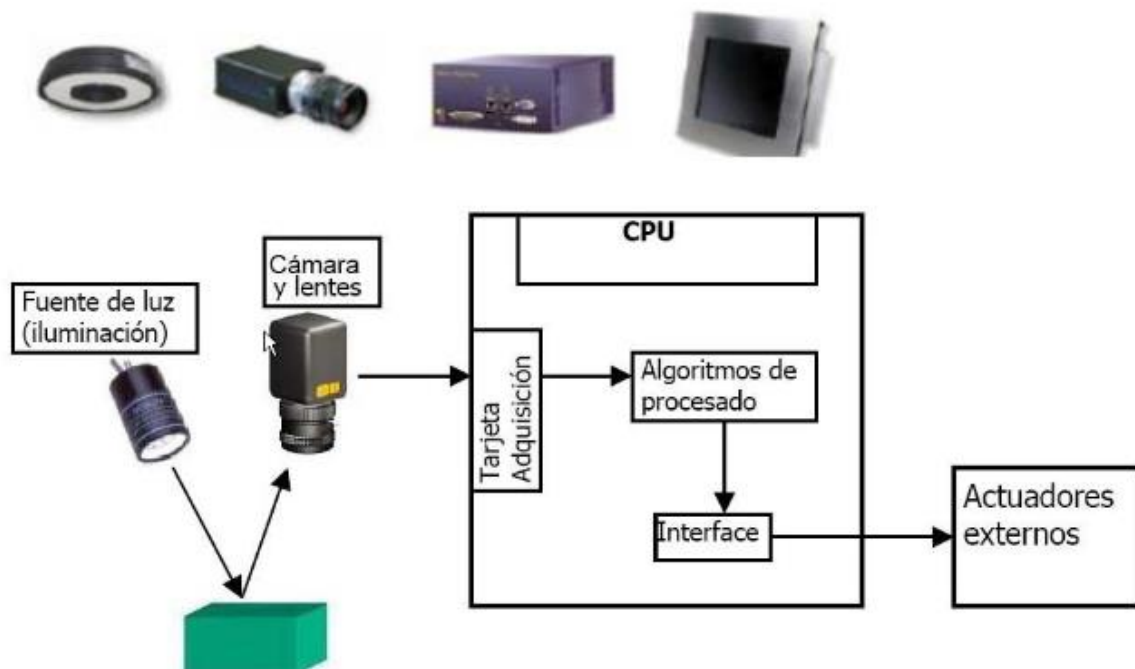


Figura 132. Visión artificial [9]

6.2.2. Tipos de cámaras

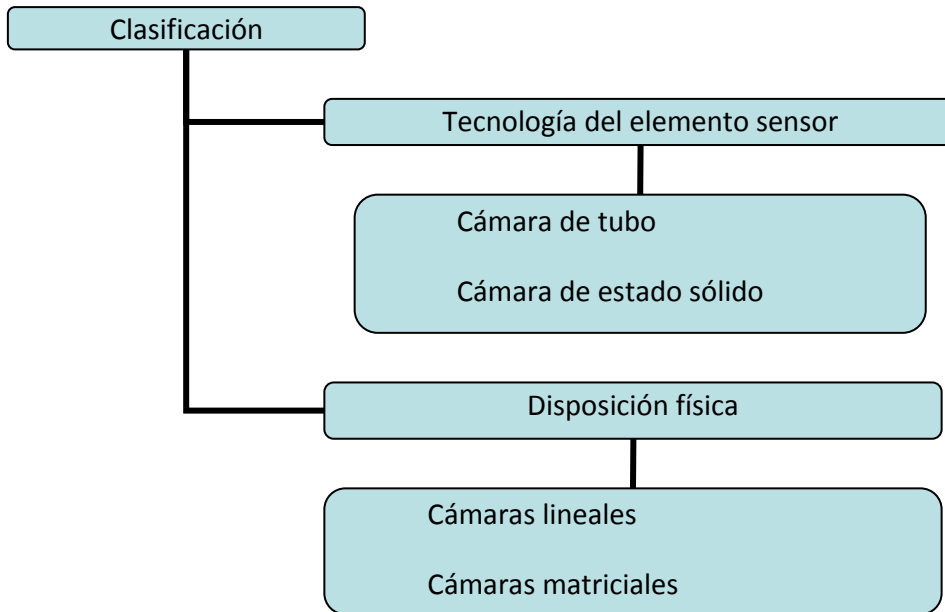
Las cámaras utilizadas en visión artificial requieren de una serie de características que permitan el control del disparo de la cámara para capturar piezas que pasan por delante de ella en la posición requerida. Son más sofisticadas que las cámaras convencionales, ya que tienen que poder realizar un control completo de: tiempos, señales, velocidad de obturación, sensibilidad, etc.

Existen diferentes tipos de cámaras, en función de la aplicación o de lo que buscamos se puede utilizar un tipo u otro.

Se clasifican en función de:

- La tecnología del elemento sensor.
 - Cámaras de tubo. Se basan en la utilización de un material fotosensible que capta la imagen, siendo leída por un haz de electrones.
 - Cámaras de estado sólido CCD (Charge – Coupled – Device). Se basan en materiales semiconductores fotosensibles para cuya lectura no es necesario un barrido electrónico (más pequeñas que las de tubo)
- La disposición física.
 - Cámaras lineales. Se basan en un sensor CCD lineal

- Cámaras matriciales. Se basan en un sensor CCD matricial, lo que permite el análisis de imágenes bidimensionales.



Hay una cámara específica para cada aplicación, color, monocromo, alta definición, alta sensibilidad, alta velocidad, infrarrojas, etc.

6.2.2.1. Cámaras lineales

Construyen la imagen línea a línea realizando un barrido del objeto junto con un desplazamiento longitudinal del mismo.

Las cámaras lineales utilizan sensores que tienen entre los 512 y 8192 píxeles, con una longitud lo más corta posible y gran calidad de imagen.

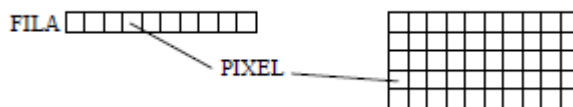


Figura 133. Píxeles y línea. Cámaras lineales

El hecho de construir imágenes de alta calidad a partir de líneas individuales, requiere de una alta precisión. La alineación y el sincronismo del sistema son críticos si se quiere obtener una imagen precisa del objeto a analizar.

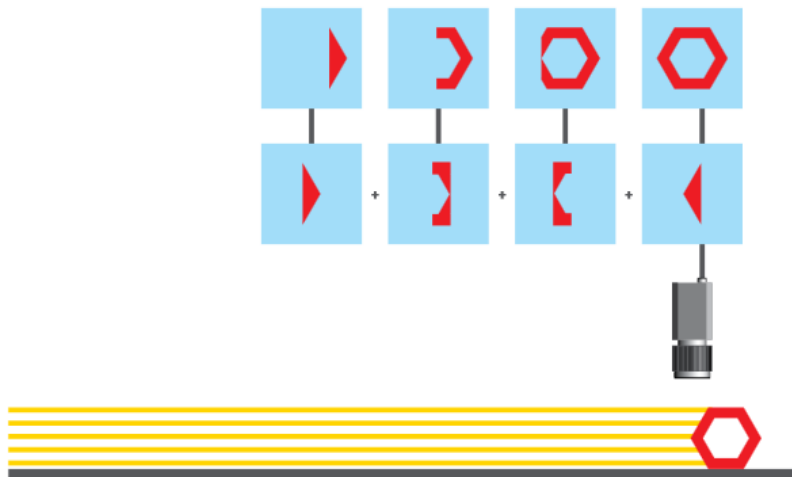


Figura 134. Funcionamiento cámara lineal [18]

Su utilización está muy extendida para la inspección de objetos de longitud indeterminada, tipo telas, papel, vidrio, planchas de metal, etc.

Características técnicas:

- Número de elementos del sensor. A mayor número de elementos (píxeles) mayor tamaño de la óptica.
- Velocidad. Número de píxeles capaces de ser leídos por unidad de tiempo. En las cámaras lineales es un valor mucho más alto que en las matriciales. En las cámaras de última generación se alcanzan velocidades superiores a los 200 MHz.
- Cámaras lineales a color. Tienen tres sensores lineales, uno para cada color (rojo, verde y azul). Pueden ser de dos tipos:
 - Trisensor. Los sensores CCD están posicionados unos junto a otros separados por un pequeño espacio. Tienen una buena sensibilidad pero solo pueden utilizarse en aplicaciones con superficies planas.
 - Prisma. Los sensores están posicionados en las tres caras de un prisma. Pueden utilizarse para cualquier tipo de aplicación pero necesitan de una mayor iluminación.

6.2.2.2. Cámaras matriciales

El sensor cubre un área que está formada por una matriz de píxeles. Los sensores de las cámaras modernas son todos de tecnología CCD formados por miles de diodos fotosensibles posicionados de forma muy precisa en la matriz.

El tamaño de los CCD está definido en pulgadas, sin embargo su tamaño real no tiene nada que ver con su valor en pulgadas, sino que están basados en la relación de los primeros con el tamaño de los tubos Vidicón. Formatos habituales son 1/3", 1/2" y 2/3".

Características de los sensores:

- Factor de relleno. Porcentaje del área de píxel que es sensible a la luz, el ideal es el 100%, porcentaje imposible de obtener por la separación entre los registros.
- Tipo de transferencia. Según la forma de transferencia de la información.
 - o Transferencia Inter-línea (ITL). Son los más comunes, utilizan registros de desplazamiento situados entre las líneas de píxel para almacenar y transferir los datos de la imagen lo que permite una alta velocidad de obturación.
 - o Transferencia de cuadro. Disponen de un área dedicada al almacenamiento de la luz, la cual está separada del área activa, esto permite un mayor factor de relleno aunque se pierde velocidad de obturación.
 - o Cuadro entero. Son los de arquitectura más simple, emplean un registro paralelo para exposición de los fotones, integración de la carga y transporte de la misma, alcanzando con este sistema factores de relleno del 100%.

6.2.2.3. Cámaras color

Aunque el proceso de obtención de las imágenes es más complejo, proporcionan una mayor información que las monocromo.

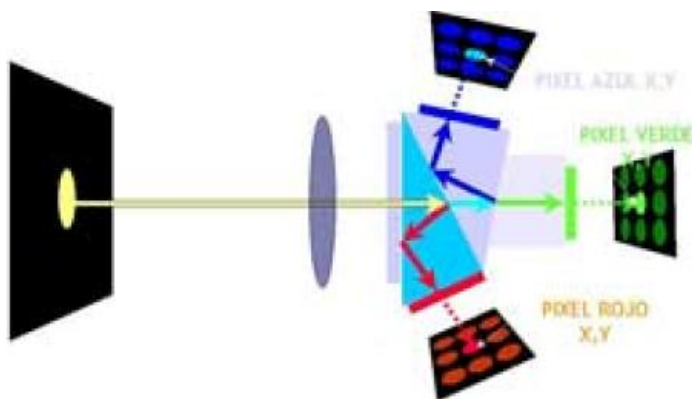


Figura 135. Cámara de color [9]

- Cámara color 1CCD. Incorporan un sensor con filtro en forma de mosaico, con los colores primarios RGB (filtro Bayer), hay el doble de píxeles de color verde para así asemejar la percepción del sensor al ojo humano. Debido al carácter del filtro, bien en

el interior de la cámara, o bien en un ordenador, se realizan los cálculos necesarios para obtener en tiempo real una señal analógica o digital en RGB.

- Cámara color 3CCD. Incorporan un prisma y tres sensores, la luz procedente del objeto pasa a través de la óptica y se divide en tres direcciones al llegar al prisma. En cada uno de los tres extremos del prisma se encuentra un filtro de color (rojo, verde y azul) y un sensor que captura la luz de cada color que viene del exterior. Internamente la cámara combina los colores y genera una señal RGB similar a la que ve el ojo humano. Aunque la calidad de las imágenes de este tipo de cámaras respecto de las de 1CCD es muy superior, tienen dos inconvenientes a tener en cuenta: la necesidad de una mejor iluminación para compensar el efecto producido por el prisma y el efecto de aberración cromática que se crea por la propia estructura del sistema que se subsana colocando las ópticas adecuadas para este tipo de cámaras.

6.2.3. Visión artificial como ensayo no destructivo

El objetivo suele ser la conformidad de una pieza con unos requisitos.

Las inspecciones realizadas por los seres humanos a menudo no pueden cumplir con los requisitos de la industria moderna de:

- Velocidad de producción
- Calidad de producción
- Costes de producción

Debido a que los humanos se cansan, cometen errores y los criterios que se toman son subjetivos.

Con el incremento de potencia de los microprocesadores, las aplicaciones que pueden resolverse con éxito utilizando sistemas de visión están creciendo rápidamente. Una aplicación puede exigir una o más funciones de procesamiento de imágenes, que cuando se combinan crean una solución.

Prácticamente cualquier sector industrial puede beneficiarse de esta tecnología para acelerar sus procesos, para reducir sus costes de producción o para mejorar la calidad de sus productos finales.

Cámaras y sistemas que componen un sistema de visión artificial:

- Mediciones con precisión constante
- Ritmo establecido por el sistema de producción

Alcance:

- Forma o apariencia, control de la conformidad

- Detección de defectos. Elementos discretos
- Detección de defectos. Tejidos o laminados
- Control por colores
- Medidas unidimensionales o bidimensionales
- Luz estructurada y otras técnicas de triangulación
- Técnicas tridimensionales
- Reconocimiento de caracteres
- Reconocimiento de piezas o componentes del producto
- Guiado predeterminado
- Guiado continuo

Aplicaciones:

- Automatizar procesos de control de la calidad; detección de defectos y fallos (en materia prima o proceso final)
- Automatizar procesos de automatización en base a la forma, tamaño o color
- Automatizar procesos de producción, ajustar condiciones de proceso, etc.
- Automatizar procesos de detección de cuerpos extraños
- Automatización de procesos de manipulación y envasado

6.2.4. Sistema de detección: solución planteada

En las dos soluciones planteadas el sistema de detección se situaría en la cinta de salida de la Erfurt o en la última posición del transfer.



Figura 136. Posición L7 de la Erfurt y cinta de salida

La cinta de salida es la que aparece en primer plano, donde se situaría el sistema de detección de grietas de las puertas, como se explicará a continuación; la posición L7 es donde se encuentra la pieza encima de la estructura naranja, es en esta posición donde permanece la pieza estampada alrededor de 2 segundos en reposo antes de ser colocada por un robot en la cinta donde un poco más adelante se realizará el control de calidad actual de la misma.

6.2.4.1. Detección grietas en laterales

Como se ha comentado en apartados anteriores existe una zona crítica en las puertas (en todas las variantes de las mismas) que se localiza en la parte baja de la misma, esta zona recibe el nombre de talonera.

Estas zonas críticas se muestran en las siguientes imágenes:



Figura 137. Zonas críticas de los laterales

Se plantea una sistema para detectar, sin realizar ningún cambio en la configuración o disposición de la salida y del proceso, cualquier tipo de grieta del tipo de la imagen que aparece a continuación en la talonera de cualquiera de los laterales.



Figura 138. Ejemplo grieta talonera del lateral

Para ello se plantea una solución basada en la utilización de dos cámaras lineales con iluminación backlight o por contras, es decir, en la cara opuesta de la pieza a analizar que en la que se van a situar las cámaras. La iluminación se colocará en la unión entre las dos cintas transportadoras en el interior de la prensa, tal y como se indica en la figura 135. Las cámaras lineales proporcionan la imagen de una sola línea. Para construir una imagen completa de la pieza es necesario que la pieza completa pase por debajo de la cámara. La velocidad a la que toma imágenes la cámara viene dada por la velocidad de avance de la línea a través de una señal de encoder. De esta forma las imágenes se construyen de manera proporcionada. La velocidad de la cinta es de aproximadamente 33 m/s.



Figura 139. Foto salida de la Erfurt

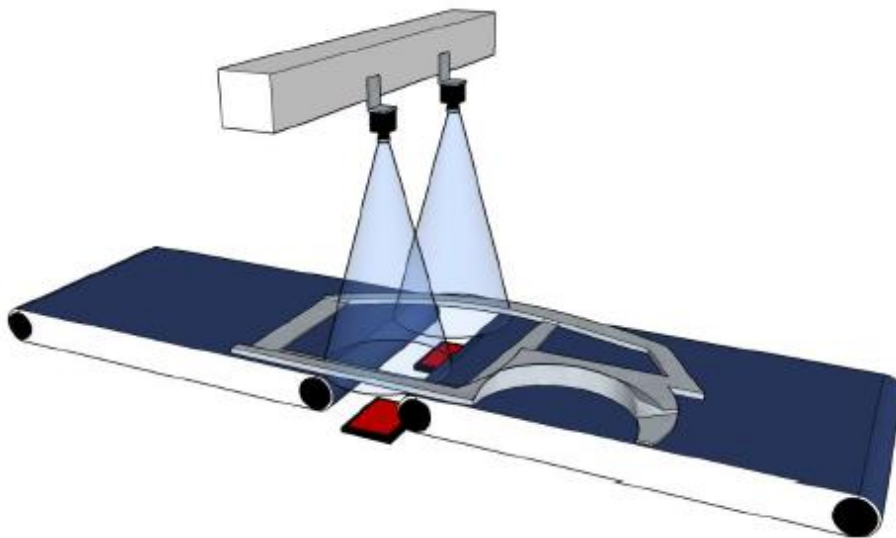


Figura 140. Representación de la solución planteada

La barra que aparece en la figura 135 es la barra azul de la parte izquierda de la figura 134 donde se sitúan los fluorescentes; aunque en esta imagen no se aprecia con claridad existe un pequeño hueco entre las cintas de aproximadamente 5 cm.

Esta disposición de las cámaras y la iluminación proporcionará imágenes como la de la siguiente imagen:

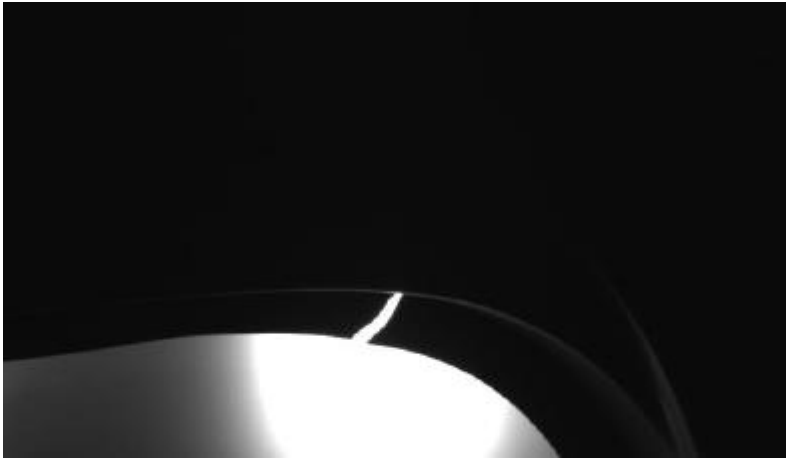


Figura 141. Resultado ensayo

Cuando la pieza haya pasado por debajo de la cámara se tendrá una foto completa de la misma y se procederá a su análisis detectando si hay o no grieta, y proporcionando una señal de pieza OK/NOK que permitirá descartar la pieza o parar la línea si se considera necesario.

La empresa SST ingeniería y sistemas propuso la siguiente oferta para esta propuesta:

Descripción	Unidades	Precio €
EQUIPOS-HARDWARE		16.350
- Cámaras lineales GigaEthernet (2048 pixels)	2	3.000
- Lentes	2	900
- Iluminadores backlight	2	2.000
- Armario eléctrico	1	2.200
- PC + monitor	1	1.500
- Cableado	2	1.200
- Estructura de soporte y cubrimiento	1	2.200
- Armario PC (Rittal)	1	3.000
- Fococélula	1	350
INSTALACIÓN Y MONTAJE		1.750
PROGRAMACIÓN Y PUESTA EN MARCHA		24.500
TOTAL (IVA no incluido)		42.600

Sin embargo, nos pusimos en contacto con otra empresa (Wenglor) viendo que la programación y puesta en marcha es lo que supone un gasto mayor. Wenglor tiene un software gratuito y de manejo y programación sencillo, lo que resulta muy atractivo, aunque en esta oferta no se incluye el montaje del dispositivo. La segunda oferta es la siguiente:

Descripción	Unidades	Precio
Sensor de visión weQubeVision, Color, Ethernet, Luz blanca Referencia nº B50R502	2	1300
Cable conector M12 x 1, 8-pins Referencia nº ZAV50R502	2	62
Cable conexión M12 x 1, 12-pins Referencia nº ZDCL002	2	34
Sistema de anclaje para 60 x 54 x 29 -47 mm y 34 x 55,8 x 44 mm Referencia nº ZMBID1202	2	20
		2832
Portes y embalaje: EXW Tettngang		
Coste transporte		14
Total (IVA no incluido)		2846

Se sigue en contacto con la empresa para acabar de concretar las condiciones para instalar un dispositivo de prueba en la salida de la Erfurt ya que esta oferta es mucho más económica y se puede realizar una prueba sin resultar muy costosa, incluso incluyendo el montaje

6.2.4.2. Detección de grietas en otras piezas

Durante el proceso de estampación también se pueden producir otro tipo de grietas como las indicadas en las figuras siguientes. En estos casos la detección de las mismas requiere que la cámara tenga una cierta inclinación. Se recomienda además emplear cámaras matriciales.

Para presupuestar adecuadamente la detección de este tipo de defectos es necesario conocer con precisión tanto la geometría de la pieza como la del soporte que la sujeta durante el proceso de verificación.

Inclinación de la cámara 30°



Inclinación de la cámara 30°



Cámara directamente orientada a la grieta, inclinada 90° respecto a la posición vertical:



Figura 142. Foto grieta e imagen resultado del ensayo

En este caso se plantean dos posibilidades, que las cámaras tengan unas posiciones fijas para cada pieza, es decir, estén fijadas a través de unos útiles en una posición determinada para

cada pieza que cambien en cada cambio de matriz para analizar las zonas críticas de las piezas estampadas en cada caso, o que se trate de cámaras en brazos robotizados que cambien de posición para el análisis de cada pieza automáticamente.

En el primer caso habría que cambiar el util para cada posición cuando se produzca el cambio de matriz, o por el contrario tener un número relativamente elevado de cámaras de forma que para cada pieza trabajen las que cubren las zonas críticas en cada caso. El inconveniente es que se necesitaría contar con un número mayor de cámaras que el necesario. Sin embargo, el hecho de contar con brazos robotizados aumenta considerablemente la inversión inicial necesaria. Habría que valorar cual es la opción más recomendable para VW Navarra.

7. Conclusiones

En relación con los cuatro ensayos no destructivos que se habían considerado como posibilidades para establecer un puesto de control de detección de grietas se puede analizar cuál es la mejor opción para nuestro objetivo.

Refiriéndonos al primer grupo de ensayos no destructivos la decisión del método más adecuado es más complicada ya que no tenemos evidencias experimentales de sus resultados y forma de funcionamiento. Sin embargo, a pesar de que la resonancia acústica o análisis modal es un método innovador que podría dar muy buen resultado, el hecho de que la termografía infrarroja activa no requiera contacto en ningún momento de su ensayo es un hecho que puede resultar determinante.

Desde mi punto de vista la termografía activa es el método que mejor se ajusta a las necesidades de nuestro proyecto, aunque para la determinación del método de excitación más adecuado para la detección de las fisuras (ya que con este método según la teoría es posible detectarlas) y grietas habría que realizar una serie de pruebas que no hemos tenido la oportunidad de realizar. Pudiendo ser las técnicas más adecuadas la termografía activa pulsada o la termografía de fase pulsada sin poder asegurarlo, como ya se ha comentado previamente.

Refiriéndonos a los métodos incluidos en el grupo II, aquellos mediante los cuales se han realizado pruebas, el ensayo por ultrasonidos se realizó con el equipo con el que consta la fábrica en la nave de chapistería; obteniendo los resultados expuestos anteriormente y siendo descartada. La prueba por visión artificial se realizó con la ayuda de la empresa STT Ingeniería y sistemas que estaba realizando otro proyecto en la fábrica y se le pidió una oferta para la implantación del dispositivo explicado anteriormente.

Dentro de este grupo la elección del sistema más adecuado para nuestros objetivos está clara ya que una de las dos opciones ha sido descartada al no funcionar como se esperaba. Además de por el descarte la visión artificial proporciona datos fiables y sin lugar a error detectando todas aquellas grietas en la totalidad de las piezas analizadas. Sin embargo, con este método no se soluciona el problema de la detección de fisuras cuyo crecimiento o desarrollo pueda aparecer en puestos más adelante en el proceso productivo.

Para finalizar es importante remarcar que a pesar de que la visión artificial es un método que no detecta fisuras, la implantación del mismo es sencilla y poco costosa que no supondría una modificación de la salida de la prensa a diferencia que en el caso de la termografía activa, ya que en este caso la instalación de los sistemas de excitación y recepción podría modificar la distribución actual.

Por lo que desde mi punto de vista la implantación de un sistema de detección de grietas por visión artificial supondría muy beneficioso para la fábrica solucionando el problema al que se refiere el presente Trabajo Fin de Grado. Sin embargo, la termografía establece una línea de futuro muy interesante para la detección de pequeñas discontinuidades y fisuras, al igual que las grietas grandes a las cuales se refiere este trabajo.

8. Bibliografía

<http://www.iee.unavarra.es/detecciondegrietas.htm>

[1]: <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/9888/1/Article011.pdf>

[2]: http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/715_ca.pdf

http://materias.fi.uba.ar/7204/teoricas/conformado_de_laminas_metalicas.pdf

http://www.degraf.ufpr.br/artigos_graphica/ANIMACION.pdf

[3]: <https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/1825-Aspectos-analiticos-y-tecnologicos-del-proceso-de-punzonado-de-chapa-%281-parte%29.html>

<http://es.scribd.com/doc/113834476/PROCESO-de-Estampado-de-Metales-1>

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-335.pdf>

[4]: <http://www.tesisred.net/bitstream/handle/10803/90838/TesisCRG.pdf?sequence=1>

[5]: <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/dctos/Matrices/troquelado.pdf>

[6]: http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-iii/Tema8-Ensayos_no_destructivos.pdf

[7]: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/11149-Termografia-infrarroja-ensayo-no-destructivo-deteccion-defectos-componentes-aerospaciales.html>

<http://www.tuv-nord.com/es/ensayos-no-destructivos/termografias-519.htm>

[8]:

<http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/10901/6390/1/PenaSantosDeyciYamile2012.pdf>

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt231.pdf#page=42>

<http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>

http://www.idepa.es/sites/web/idepaweb/Repositorios/galeria_descargas_idepa/EnsayosNoDestructivosUltras.pdf

http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDQQFjAB&url=http%3A%2F%2Fcei.uniovi.es%2F%2Fdocument_library%2Fget_file%3Fuuid%3D9bdaf096-69b7-4cd7-983f-4b9743c1fbc%26groupid%3D49472&ei=wM4iU6v4MKKCzAOnjYCABA&usg=AFQjCNE2qoxCFmMPE6qcx_8_15YeOMEvuw&sig2=gabsp4zoZZObi60dZgETzw&bvm=bv.62922401,d.bGQ

<http://www2.fe.ccoo.es/andalucia/docu/p5sd8259.pdf>

<http://www.wenglor.com/index.php?id=812>

<http://www.wenglor.com/index.php?id=812>

[9]: http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD_1_didac_Conceptos_previos.pdf

<http://www.gef.es/Congresos/25/pdf/9-3.pdf>

<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3566/1/pfc5205.pdf>

<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10706/TesisDAGF.pdf?sequence=1>

<http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/128.pdf>

https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas_telematica/article/viewFile/1193/1644

[10]:

http://objetos.univalle.edu.co/files/Procesamiento_de_imagenes_infrarrojas_para_la_deteccion_de_defectos_en_materiales.pdf

[11]:

https://www.google.es/search?q=flexi%C3%B3n&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=P4dsU7TNBqLe7Aax2lCoDA&sqi=2&ved=0CAYQ_AUoAQ&biw=1440&bih=796#q=flexi%C3%B3n+deformacion+fibras&tbm=isch&facrc=_&imgdii=_&imgrc=WVOL7Y6HuxXmLM%253A%3BFv-0VTpkTiDX7M%3Bhttp%253A%252F%252F3.bp.blogspot.com%252F-XDPM64H6Z84%252FTJS2rWyQhRI%252FAAAAAAAAAAAM%252FzEcndP9SGSM%252Fs1600%252FDibujo.bmp%3Bhttp%253A%252F%252Fflexion-mecanica.blogspot.com%252F2011%252F07%252Fflexion-mecanica.html%3B961%3B667

[12]: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmf cip259e/doc/bmf cip259e.pdf>

[13]: http://www.edevis.com/en/thermography_process_control.php

[14]: <http://staff.bath.ac.uk/ensdasr/PAPERS/TOAPPEAR/LiAlmondRees.pdf>

[15]: <http://www.olympus-ims.com/es/automated/pv/>

[16]: <http://www.innerspec.com/emat-technology>

[17]: <https://workspace.imperial.ac.uk/nde/Public/PhD-Thesis-R-Ribichini-Final.pdf>

[18]: http://pserv.udg.edu/Portal/Uploads/4103862/CAMARAS_Infaimon.pdf

[19]:

https://www.google.es/search?q=kapfer&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=xndoU_jVI4KiO_HCgbgP&ved=0CAYQ_AUoAQ&biw=1440&bih=796#q=+kafer+aleman&tbm=isch&facrc=_&imgdii=_&imgrc=DL0RAObokdBrhM%253A%3BzsdCf4iOulUBM%3Bhttp%253A%252F%252Fupload.wikimedia.org%252Fwikipedia%252Fcommons%252Fa%252Fa3%252FBundesarchiv_B_145_Bildd-F038788-0006%252C_Wolfsburg%252C_VW_Autowerk%252C_K%2525C3%2525A4fer.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fes.wikipedia.org%252Fwiki%252Fedad_de_oro_del_capitalismo%3B800%3B525

[20]: <http://www.vw-navarra.es/fabrica/historia.aspx>

[21]: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt231.pdf>

[22]: <http://www.unioviado.es/bayon/mm/serfour.pdf>

[23]: <http://www.youtube.com/watch?v=LwwmEcDHsCg>

<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CGEQFjAF&url=http%3A%2F%2Frepositorio.bib.upct.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F10317%2F3383%2F1%2Fpfc5204.pdf&ei=P9kvU7K-HqyV7AaapYGgBg&usg=AFQjCNH1plBHyMf-gpqMekdB4K19pR28Cw&sig2=WKbiSfojqwLTVkyf1PanEg&bvm=bv.62922401,d.bGE>

<http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/2503/Procesado%20y%20compresi%C3%B3n.pdf?sequence=1>

<http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/2417/Procesado%20de%20medidas.pdf?sequence=1>

<http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/18085/3/TFM%20Presencia%20de%20defectos.pdf>

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CEgQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu%2Findex.php%2Frevistaim%2Farticle%2Fdownload%2F9%2F330&ei=I7NoU4wS0ufsBpPXgdAF&usg=AFQjCNGzyG4Lalu4OmNBiFg3O-83OwQmKQ&sig2=qOJ07SkQXAU_4jYVEZ1doQ&bvm=bv.66111022,d.ZWU

<http://zambrano.260mb.com/papers/interaccionfisuradesbalance.pdf>

http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60113/fichero/PFC_CarmenMoranCordoba.pdf

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=29&ved=0CGsQFjAIOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.revistaavances.co%2Fobjects%2Fdocs%2Favances_7%2Fa7_art3_analisis_desgaste.pdf&ei=vPwvU-C-C4TX7AbdkIEI&usg=AFQjCNHPrQLAZE-K5tFM9U9VTgbPwAYQsQ&sig2=F4la8kQWTGtQvdg2QrFUsQ

<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=17&ved=0CGwQFjAGOAo&url=http%3A%2F%2Fwww.alava->

ing.es%2Frepositorio%2Fac4b%2Fpdf%2F5369%2F2%2Ftermografias-para-ciencia--
id.pdf%3Fd%3D1&ei=_jgxU4vCKYqL7AaBIYgGgBA&usg=AFQjCNHe4ITsltLcEu5vni6Jw8Gczed1wg
&sig2=oxpyxrg-EktLlta7UEvPdw

<http://www.nivelatermografia.net/catalogos-serie-t/ver-categoria>

http://www.sensia-solutions.com/index.php?option=com_content&view=categories&id=195&Itemid=60&lang=es

<http://es.scribd.com/doc/99269847/TERMOGRAFIA>

<http://www.termografia.com/paginas/termografia/equiposensayos.htm>

<http://www.lot-qd.de/it/it/home/pulsethermography/echotherm/>

http://www.sensia-solutions.com/brochures/Folleto_Analisis_no_invasivo.pdf

http://www.edevis.com/en/optical_lockin_thermography_principle.php

<http://www.ewshm2012.com/Portals/98/BB/fr2a2.pdf>

http://www.edevis.com/en/download/AppNote_ITvis_Crack_Detection.pdf

<http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/337.pdf>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2010/papers/QIRT%202010-121.pdf>

<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=0ClSBEBYwCA&url=http%3A%2F%2Fwww.scirp.org%2Fjournal%2FPaperDownload.aspx%3FpaperID%3D37639&ei=87BDU6SsDoivPIC7glgB&usg=AFQjCNG1LRjb5CCoWiFeXpG2EQQLE2fMfQ&sig2=Xq02iURhKYeaCSEhpQusAg&bvm=bv.64367178,d.bGE>

<http://www.ndt.net/article/ecndt02/249/249.htm>

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CEoQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.flir.com%2FWorkArea%2FDownloadAsset.aspx%3Fid%3D50058&ei=6uBEU7r_NNGp7Aa294HQcW&usg=AFQjCNEC2e5I1IFJkudrmWS245lxz-M7ZA&sig2=YVZbfHIAdLiCYwP6No-bHQ

<http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/132.pdf>

<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CFUQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.cetim.fr%2Ffr%2Fcontent%2Fdownload%2F31772%2F892254%2Fversion%2F1%2Ffile%2FTowards%2Bthe%2Buse%2Bof.pdf&ei=pgBFU83uJqGu7Ab8u4DIAQ&usg=AFQjCNGt3KQsw1AYVSBFaE9NFZ0Xs2q8Pg&sig2=SU8dxrMMg844whWg-j7-dQ>

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CGIQFjAE&url=http%3A%2F%2Fthermobot.eu%2Fwp-content%2Fuploads%2F2011%2F09%2F20130409_UNIPD_Crack_detection_HES-

13.doc&ei=pgBFU83uJqGu7Ab8u4DIAQ&usg=AFQjCNFRQkFpCW8WKQz2ArOOYN7B1eySsw&sig2=UKSNjl7Atvy57Rsz4lqyGw

http://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1027&context=gradschool_theses

http://www.ndt.net/article/ndt-canada2013/content/papers/20_Uhl.pdf

http://www.t-zfp.de/downloads/Thermographic_Crack_Detection_by__Eddy_Current_Excitation__.pdf

<http://portal.tpu.ru/SHARED/v/VAVILOV/ResAndTrain/Tab/IRThermography.pdf>

http://www.idspektr.ru/10_ECNDT/reports/1_05_13.pdf

<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/115/a115z410.pdf>

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:642621/FULLTEXT01.pdf>

http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape4/PQDD_0016/NQ55806.pdf

http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/99_Broberg.pdf

http://www.vrana.net/physik/GMR+10_Automated%20Induction%20Thermography%20of%20Generator%20Components.pdf

http://www.visioimage.com/fr/products_ir_ndt_thermography_tutorial.htm

http://www.apliter.com/_uploads/documents/184_1e2df8f4c01447033a60577802f42a62.pdf

<http://www.tecsud.com/documents/OmniScan%20PAe.pdf>

<http://iberconsultores.es/images/Fichas%205%20Phased%20Array.pdf>

<http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdf/0062313s.pdf>

<http://www.kenautomation.com/pdf/secondwave02.pdf>

<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn358/idn358.htm>

http://centrodeartigos.com/articulos-educativos/article_11442.html

https://www.google.de/search?q=EMAT&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&channel=fflb&gfe_rd=cr&ei=p4YdU5OFNoWJ8QfJwYQGQA#channel=fflb&q=transductores+emat&rls=org.mozilla:es-ES:official

http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12649/PFC_Eva-M_Munoz_Marcos_Resumen10hojas.pdf?sequence=1

<http://www.biblio-sepi.es/imez.ipn.mx/electronica/2013/Diseno%20y%20construccion%20de%20un%20transductor%20acustico%20electromagnetico.pdf>

<http://www.astm.org/Standards/E1962.htm>

<http://www.astm.org/Standards/E1816.htm>

http://www.irss.ca/documents/CODES%20&%20STANDARDS_02-28-08/ASTM/Ultrasonic/Practices%20for/E1816-96%20UT%20EMAT%20Techniques.pdf

<http://www.innerspec.com/es/faq>

<http://www.olympus-ims.com/es/applications/thickness-boiler-tubes-emat-transducers/>

<http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/923/522>

http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CEoQFjAF&url=http%3A%2F%2Fcpv.upv.es%2Frs%2F2543%2Fd112d6ad-54ec-438b-9358-4483f9e98868%2F8e6%2Ffd%2F1%2Ffilename%2Fcasos-cpi-citrosol.pdf&ei=1R4gU_nGBbLd7QacioHYCA&usg=AFQjCNFHqpLeYApRAN01DJS8UdYbMN2MQ

http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD_4_indus.pdf

http://www.urp.edu.pe/pdf/ingenieria/electronica/CAP-1_Taller_de_Electronica_IV_b.pdf

http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/4768/CONFERENCIA_UNIVERSIDAD.pdf

http://www.infopl.net/files/documentacion/vision_artificial/infoPLC_net_Conocimientos_vISIONARTIFICIAL.pdf

<http://www.softingenio.com/tecnologia/hardware/51-hardware-industria/56-vision-artificial.html>

https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2539/Catalogo_INFAIMON_2011_espanol.pdf

http://pserv.udg.edu/Portal/Uploads/4103862/CAMARAS_Infaimon.pdf

<http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Investiga/GCII/personal/pbecerra/Archivos/PFC.pdf>

<http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/index.html>

<http://www.librovision.eii.uva.es/pdf/cap12.pdf>

http://www.usc.es/gir/docencia_files/dosimetria/capitulo5.pdf

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r34716.PDF>

<http://www.cnad.edu.mx/sitio/matdidac/md/control/SENSORESPARTE1.pdf>

<http://www.urp.edu.pe/labcim/portal/imagenes/Sensores.pdf>

<http://es.scribd.com/doc/73111271/Sensores-Foto-Elctricos-Seleccion-y-Aplicaciones>

http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXI/documentos/ja00_065/ja00_065.pdf

<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4fc7436a1e784.pdf>

http://www.tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113038/cf-rivera_at.pdf?sequence=1

<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=12&ved=0CDgQFjABOAO&url=http%3A%2F%2Fincubadora.periodicos.ufsc.br%2Findex.php%2FIJIE%2Farticle%2Fdownload%2F2087%2Fpdf&ei=NhRNU6rKNcfQ7Abs6YGwBA&usg=AFQjCNHDC5ANoclfntpON3Y81hKFIw1ETQ&sig2=JbF8IPD2xJpHy9D8Sgexug&bvm=bv.64764171,d.bGE>

http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/12327/4/Capitulo3_Emision%20acustica.pdf

http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V13N2/V13N2_art11.pdf

http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/civil/analisisestructuralIII/GuiaDeEstudio/PDF/Unidad_1_04.pdf

<http://es.scribd.com/doc/6562559/Vibracion-de-Los-Cuerpos-Elasticos>

http://www.umng.edu.co/documents/10162/4585612/articulo_3.pdf

<http://www.construsur.com.ar/News-pdf-sid-319.html>

<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2001/8-Exactas/E-026.pdf>

http://www.rte.de/de/_Downloads_de/ARTIK/AM/rte_artik_am_giesserei_die_akustische_resonanzanalyse_d-0006.pdf?id=588

http://www.medav.de/fileadmin/redaktion/documents/Deutsch/IAS_Fachartikel_Risspruefung_Karosserie_Resonanzpruefung.pdf

<http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v18/v18.htm>

<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&ved=0CE0QFjADOAO&url=http%3A%2F%2Finformesdelaconstruccion.revistas.csic.es%2Findex.php%2Finformesdelaconstruccion%2Farticle%2FviewFile%2F2284%2F2502&ei=mzxfU6jqA4OvOZPTgcAP&usg=AFQjCNEPc1LeI3wFUGaa9dO-B3kQNH07VQ&sig2=wwR1hCOsfS0V-AAPI4y9fw&bvm=bv.65397613,d.bGE>

http://www.fisicanet.com.ar/fisica/sonido/ap02_ondas_sonoras.php

<http://www.cmc.org.ve/tswweb/documentos/ApuntesFisII.pdf>

<http://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/marcot.pdf>

http://www.rte.de/es/_Downloads_es/ARTIC-PUB_es/AM/rte_pub_am_2009_equipment_for_testing_cast_parts.pdf?id=2153

http://www.rte.de/es/Produkte_es/ResonanzpruefungSonicTC.Material_es.php

<http://www.atcp.com.br/es/productos/inspeccion-resonancia/soneteste.html>

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0CGwQFjAH&url=http%3A%2F%2F repositorio.unican.es%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F10902%2F4331%2F358100.pdf%3Fsequence%3D1&ei=vHBXU5SKG4Ov7AagwIGoBQ&usg=AFQjCNGEt7chH33aE9iHkAQqwgVqJ3-r0A&sig2=9u5jRPKlwTWy1_8DjheEaA&bvm=bv.65177938,d.bGE

http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/eventosieg/archivos/2do_Seminario_Tema_1.pdf

<http://www.wbw-welser.com/index.php?id=8325>

<http://www.fttech.co.uk/es/technology-acu-res-technology>

http://www.kbeng.com.ar/archivos/1250859545_pipedpulse3.pdf

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/tapia_r_c/capitulo5.pdf