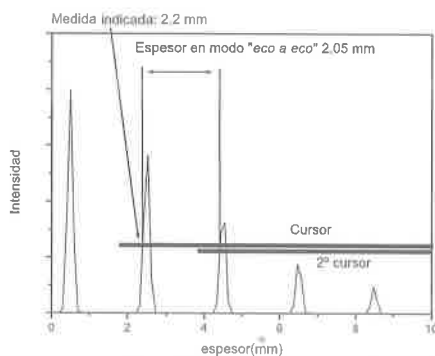




transmitida, y así sucesivamente. Por claridad en la figura se han representado las sucesivas ondas como líneas ligeramente oblicuas, aunque todas se propagan perpendicularmente a las dos caras del material y son en principio ondas planas. El detector recibe la onda primaria, en un instante que tomamos como  $t = 0$  y todos los ecos, que han recorrido distancias  $2d, 4d, 6d, \dots$ , en tiempos  $0, 2d/v, 4d/v, 6d/v$  etc.

Para poder medir los tiempos y evitar efectos de interferencia en vez de emitir continuamente lo que se emite es un pulso de muy corta duración. Por tanto se recibe una serie de pulsos correspondientes a los sucesivos ecos, de intensidad decreciente debido a que la onda no es perfectamente plana sino divergente y a que el medio puede ser absorbente para los ultrasonidos. Lo que se toma para medir el tiempo es el comienzo, el final o el máximo de intensidad del pulso, a voluntad. La justificación de utilizar ultrasonidos en vez de sonido audible viene de la longitud de onda. La duración del pulso y por tanto la resolución (o precisión en la medida) será del orden de la longitud de onda. Para el sonido de más alta frecuencia audible (pongamos de frecuencia  $f = 20$  kHz) la longitud de onda en acero ( $v = 5930$  m/s) tenemos  $\lambda = v/f = 29.6$  cm, mientras que con ultrasonidos de 5 MHz, como vamos a usar en esta práctica, es  $\lambda = 1.2$  mm.

Para que los ultrasonidos pasen del palpador a la pieza de material y viceversa es necesario interponer una capa de aceite o grasa, ya que de lo contrario, debido a la enorme diferencia de velocidad del sonido entre un material sólido y el aire la onda sería totalmente reflejada por la interfase. En cambio un líquido no corrosivo como el aceite es suficientemente incompresible y poco denso como para que la velocidad del sonido sea del mismo orden de magnitud que en un sólido.



El aparato que utilizaremos está diseñado para medir espesores o detectar grietas internas, por lo que sin perder de vista que **lo que se mide directamente es el tiempo de llegada de la señal**, ese valor lo multiplica por  $v/2$  y lo que nos presenta en pantalla (ver figura anterior) es la señal recibida en función de  $d$  (que es *la mitad* de la distancia recorrida por cada eco), es decir, **indica el espesor en milímetros**, aunque pueden cambiarse las unidades. La intención es que podamos ver los

espesores sin tener que hacer cálculos a mano. Nosotros le vamos a dar la vuelta a su uso natural para determinar velocidades desconocidas con espesores conocidos.

La velocidad es un valor **fijo** que hay que introducir en memoria. El aparato funciona suponiendo que la velocidad introducida en memoria es la del sonido en el material y esa velocidad es la que emplea para calcular los espesores. Si la velocidad real no es la introducida en memoria los espesores que salgan serán incorrectos. **La comparación entre los espesores indicados y los medidos con un calibre es lo que usaremos para determinar la velocidad real del sonido.**

Además puede ocurrir que haya otro material intermedio entre el emisor y la primera superficie (siempre hay al menos una delgada capa de aceite y el cristal tiene un recubrimiento que producen un retraso en la señal), por lo que también hay que ajustar el momento de recepción del pulso primario a  $d = 0$ , lo que corresponde físicamente a

indicar cuál es el instante  $t = 0$  y es la variable “zero” de la memoria. El “zero” es un valor fijo que depende del palpador usado y el tipo de aceite, pero no de la muestra que se mide.

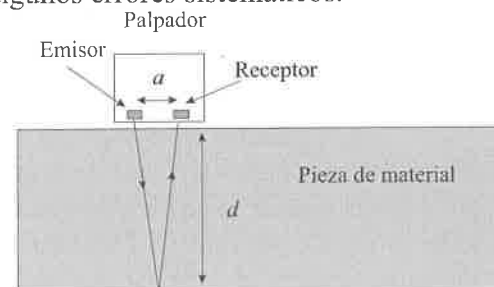
La determinación del “zero” y la velocidad se llama **calibrado del aparato**. Puede hacerse manual, introduciendo directamente los valores de la velocidad del sonido y el cero, o bien automático, probando sobre dos piezas del material de espesores medidos de modo que el aparato calcula la velocidad del sonido y el cero, a partir de los tiempos obtenidos para el primer eco en los dos casos. En el caso automático, el aparato puede utilizar un bloque de material que lleva incorporado y que es un disco de acero del tamaño de una moneda de 20 cts. de euro que lleva en la parte inferior, pero lo mejor es utilizar una pieza de acero especialmente diseñada para calibrar.

Una vez calibrado el aparato está dispuesto para **medir espesores**. Puede hacerse de dos maneras. El llamado “modo de profundidad” consiste simplemente en observar el primer (o el  $n$ -ésimo) eco recibido. El “modo eco a eco” consiste en determinar la distancia entre dos ecos sucesivos. Este modo es especialmente útil cuando entre el palpador y la pieza hay una capa de otro material, ya que en este caso el tiempo invertido en recorrer esa capa por las ondas se resta de los dos ecos. También si el cero no está bien calibrado.

Para **medir la velocidad** del sonido en una pieza de espesor conocido basta determinar el espesor un vez que el aparato se ha calibrado mediante la pieza calibrante de acero. El cero es el mismo ya que depende de cada palpador y de la capa de aceite, que es muy estrecha y prácticamente igual en ambos casos. El espesor obtenido en una pieza de otro material no coincidirá con el espesor real, debido a que la velocidad del sonido no es igual que en el acero y el aparato lo ha calculado suponiendo que sí lo es. Como el espesor obtenido es inversamente proporcional a la velocidad del sonido utilizada para calcularlo, basta una sencilla regla de tres para obtener la velocidad real del sonido. Por ejemplo: se ha calibrado el aparato con la pieza de acero y ha salido una velocidad de 5850 m/s. Ahora se prueba en una pieza de plástico cuyo espesor, medido previamente con un calibre, es de 100 mm, pero sale 210 mm. Entonces la velocidad real en el plástico es  $v = 100 \times 5850 / 210 \text{ m/s} = 2786 \text{ m/s}$ .

Otra opción es calibrar el aparato con la pieza de material conocido, pero en este caso hay recordar que se necesitan dos espesores conocidos. Después de calibrar, el aparato nos da la velocidad del sonido. De todas formas esta opción se recomienda no usarla porque nunca la calibración va a ser tan precisa como con la pieza especialmente diseñada para ello (especialmente saldrá mal el “zero”) y porque **nosotros usaremos no dos sino muchos espesores conocidos**, para obtener diversos resultados, que nos permitirán obtener mejor estadística y corregir algunos errores sistemáticos.

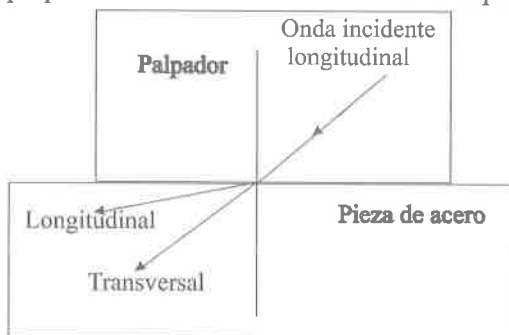
Usando el palpador de bicristal habrá que tener en cuenta el **error de paralaje**. Ver figura. Si entre el emisor y el detector hay una distancia  $a$  (del orden de unos milímetros) y el espesor de la pieza es  $d$  (del orden de centímetros) el camino recorrido por el pulso ultrasónico no será perfectamente perpendicular a la superficie externa del material y no será  $2d$  sino  $\sqrt{d^2 + a^2 / 4}$ . Este efecto será más importante cuanto menor



sea el espesor de la pieza. Se invita al alumno a idear una forma de corregirlo. ¿Cómo afectará esto al segundo, tercer y sucesivos ecos?

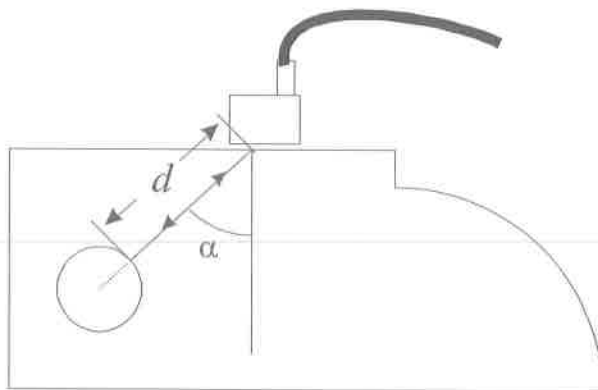
Cuando hay grietas internas en el material, se obtiene un eco reflejado por ellas, que está a una profundidad menor que la cara opuesta. Lo que nos da es la distancia entre el punto donde se refleja la onda y el detector.

En la segunda parte de la práctica haremos **medidas de la velocidad de ondas transversales**, que típicamente es cercano a la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales en sólidos. Para ello emplearemos un **palpador angular** (ver figura siguiente) de monocristal, que se usa normalmente para detectar grietas perpendiculares a la superficie. El palpador emite una onda longitudinal con un gran ángulo de incidencia. En el acero (o en un metal típico) la velocidad es casi el doble que en el palpador. El sonido se refracta en la superficie siguiendo la ley de Snell, como ocurre



para la luz, pero a diferencia de la Óptica, (no hay ondas electromagnéticas longitudinales), cuando se refracta el sonido en la superficie de la pieza de acero se produce una onda transversal y otra longitudinal. La longitudinal se aleja todavía más de la normal o se refleja totalmente mientras que la transversal se desvía poco con respecto a la incidente, ya que la velocidad de la onda transversal en el acero

es parecida a la longitudinal en el cristal del palpador. El palpador que tenemos está construido de modo que en acero el ángulo de refracción sea aproximadamente  $\alpha = 60^\circ$ .



Ver figura. Tanto para calibrar como para medir la velocidad de las ondas en distintos materiales se ha dispuesto una pieza que tiene un hueco circular. La onda se refleja en el hueco, pero sólo volverá al detector si incide normalmente a la superficie, esto es cuando la posición del emisor-detector es la precisa para que la onda vaya dirigida hacia el centro del círculo. Por supuesto que sólo se observará un eco. Así pues

hay que encontrar la posición apropiada del palpador para observar la onda reflejada. En acero será la posición desde la cual el ángulo al centro del hueco forme  $60^\circ$  con la normal, pero en otros materiales la velocidad será distinta y por tanto también el ángulo.

En la práctica se observa la onda reflejada en todo un intervalo de posiciones del palpador cercanas a la que corresponde al ángulo de refracción debido a que la onda no es plana sino divergente. Aunque no es esencial hay que buscar la posición en que se observe el eco más intenso. También hay otros ecos debidos a ondas que se reflejan múltiplemente en en todas las superpies internas de la pieza, pero sólo el primero es interesante. La posición del palpador (lleva un trazo vertical para indicarla más exactamente) dará una idea del ángulo de refracción (que en la pieza calibrante está ya

marcado) y el eco la distancia  $d$  a la superficie circular. Una vez hecho esto el cociente entre la distancia indicada y la medida con una regla o calibre será igual a la relación entre la velocidad que tiene memorizada el aparato (mediante calibración manual) y la velocidad real. Los datos de calibración pueden verse en el (MENU) CALIBRATE, opción MODE MANUAL. **Están calibrados para acero y es mejor no tocarlos cuando se usa el palpador angular (MP 5 60).** La velocidad es 3231 m/s. **Simplemente hay que hacer una comprobación de que los cálculos salen muy aproximadamente correctos cuando el experimento se realiza con la pieza calibrante.**

Cuando se mide con piezas de otros materiales el ángulo de refracción ya no será  $60^\circ$ , sino que habrá que buscarlo encontrando la posición del palpador que da el eco de máxima intensidad. En materiales donde la velocidad de los ultrasonidos sea menor que en el acero puede observarse un eco correspondiente a la onda longitudinal (antes que el de la transversal), pero no es el que hay que medir y es muy fácil equivocarse, especialmente con los polímeros donde la onda transversal resulta muy poco intensa. Para descartarlo basta ver que la velocidad que sale es parecida a la obtenida anteriormente usando el palpador de incidencia normal. Por la posición de hueco se puede aplicar el palpador en cualquiera de los lados de la pieza, cada uno corresponde a una distancia distinta al hueco. Hay que hacerlo por el lado de la mayor distancia, pero puede ocurrir que la onda se atenúe tanto que no se vea el eco. Entonces hay que probar por los otros lados. Esto ocurrirá con toda seguridad en el PVC.

La aplicación de palpadores rectos y angulares con distintos ángulos y en distintas posiciones y el análisis de los ecos correspondientes es un arte que permite a los especialistas hacerse una idea muy precisa de cómo es una grieta. De hecho es una ecografía del material, aunque el método fue aplicado muchos años antes que en medicina. Nosotros por supuesto no vamos a ser tan “artistas”.

## 2)Desarrollo de la práctica.

La práctica es bastante corta, pero una buena parte del tiempo habrá que emplearla en aprender el funcionamiento del módulo electrónico de que disponemos: ALPHAGAGE de SONATEST Plc, cuyas principales funciones se explican en el apéndice.

En segundo lugar debemos conectar el palpador. Comenzaremos por el palpador de haz recto, bicristal, **modelo SC6**, que se distingue porque lleva dos cables conectores, uno para cada cristal. Deben conectarse a los enchufes RX, TX (PROBE CONNECTORS, ver figura del apéndice) que lleva el aparato en la parte superior.

En este momento estamos en condiciones de medir. Las operaciones que debemos realizar en el módulo electrónico, y que están descritas en el apéndice, son:

1. Seleccionar palpador. Es decirle al aparato qué palpador estamos usando.
2. Calibrar.
3. Seleccionar modo y condiciones de medida.
4. Colocar el palpador en el punto de medida, añadiendo unas gotas de grasa para transmisión de los ultrasonidos.
5. Ajustar la posición del cursor, adecuada para la medida.

6. Leer resultado, que siempre es una profundidad, en milímetros.

A partir de ahora es posible guardar permanentemente los datos e incluso transmitirlos electrónicamente a un ordenador, pero no vamos a usarlo. Simplemente anotaremos los resultados en el cuaderno.

a) Una vez seleccionado el palpador (ver apéndice, apartado a), calibrar con la pieza de acero especial que se da (calibrado automático). Los espesores conocidos, que pueden medirse con un pie de rey, son la anchura de la pieza (100 mm) y el espesor (25 mm).

b) Medir los distintos espesores de la pieza en forma de escalerilla con el aparato y con un calibre y comparar resultados. ¿Qué conclusión puede extraerse sobre la velocidad del sonido en esta pieza con respecto a la de la pieza calibrante?

c) Pasar lentamente el palpador por la parte superior de la pieza en forma de escalerilla y observar los ecos adicionales producidos por los defectos, que hay en ella (hechos adrede en este caso, para demostración). Determinar su profundidad con el aparato y midiendo con un pie de rey.

d) Determinar la velocidad del sonido en las piezas macizas que se suministran de acero, aluminio, cobre, ~~PVC (policloruro de vinilo)~~ y metacrilato (polimetil metacrilato). En cada caso, medir en modo "profundidad" y "eco a eco" por distintos sitios de espesor diferente. Anotar los resultados. En el trabajo habrá que discutir la calidad de los distintos tipos de medida y deducir una velocidad del sonido adecuada como resumen de todas las observaciones. También habrá que considerar el error de paralaje debido a que el emisor y el detector no son el mismo. Se nota especialmente al medir espesores pequeños. Estimar la precisión del experimento en la velocidad del sonido finalmente obtenida.

e) Medir la velocidad de las ondas ~~transversales~~ según las direcciones  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  y  $\langle 111 \rangle$  en el monocristal de NaF. Análogamente a lo largo de las direcciones  $\langle 100 \rangle$  y  $\langle 110 \rangle$  para el cristal de KCl

f) Conectar el palpador angular, que produce onda transversal con un ángulo de refracción de  $60^\circ$ . Es de monocristal y hay que conectarlo en el terminal TX, que es el que tiene un punto debajo Calibrar con la pieza de calibración.

g) Obtener la velocidad de las ondas transversales en las piezas de acero, cobre, aluminio, vidrio y metacrilato que se dan. Por supuesto que esta medida es mucho menos precisa que con el palpador de haz recto. En las piezas de plástico es difícil observar la onda transversal. El hueco circular está colocado en una posición donde la distancia a cada una de las caras de la pieza es diferente y se puede escoger por qué cara medir. Cuanto mayor sea la distancia se medirá con mayor precisión pero es posible que la onda se atenúe tanto que no se observe, más que para pequeñas distancias.

h) Pesar las piezas grandes y medir sus dimensiones, para deducir la densidad. La densidad en polímeros depende mucho del grado de polimerización y varía mucho de unas muestras a otras, aun siendo de la misma composición. En un sólido isótropo (o un material policristalino ordinario), la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales es:

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{y} \quad v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

siendo  $E$  el módulo elástico o de Young,  $G$  el módulo de rigidez,  $\nu$  la razón de Poisson (nomenclatura estándar, tal como están definidos en la práctica del ensayo de tracción) y

$\rho$  la densidad Al aplicar estas fórmulas ojo con el uso correcto de unidades: en el SI  $E$  y  $G$  van en Pa = N/m<sup>2</sup> y  $\rho$  en kg/m<sup>3</sup>. Pero dado que en un sólido isótropo es  $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ ,

la medida de las dos velocidades permite obtener  $E$ ,  $G$  y  $\nu$ . Obtener todos esos parámetros y comparar con datos de la literatura para los materiales que se suministran.

99  
..

Comparar el módulo elástico obtenido con el medido en el ensayo de tracción. Si las hay, explicar las diferencias.

i) Los materiales monocristalinos estudiados son cristales cúbicos y las velocidades de las ondas transversales a lo largo de las tres direcciones estudiadas vienen dadas por:

$$v_{\langle 100 \rangle} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad v_{\langle 110 \rangle} = \sqrt{\frac{C_{11} + C_{12} + 2C_{44}}{2\rho}} \quad v_{\langle 111 \rangle} = \sqrt{\frac{C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44}}{3\rho}}$$

Buscar en la literatura valores para las constantes elásticas  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  y  $C_{44}$  de estos materiales y estimar los valores de las velocidades a lo largo de las tres direcciones. Compáralos con tus resultados experimentales.

### Funcionamiento del modelo ALPHAGAGE de SONATEST PLC.

El aparato funciona con una batería, que debe cargarse aparte y tiene una pantalla de cristal líquido con tres partes:

La central y más grande es la que representa la señal detectada por el palpador, es decir intensidad de ultrasonidos frente a "tiempo". Aunque el tiempo se ha multiplicado por  $v/2$  para medirlo en unidades de longitud.  $v$  es la velocidad que hay introducida en memoria y es totalmente arbitraria. El espesor de los ecos correspondería con el real si la velocidad introducida es la verdadera velocidad del sonido en el material. Se actualiza de 5 a 10 veces por segundo, a un ritmo que se puede especificar. Es decir, cada 0.2 s el emisor emite un pulso y la señal reflejada es registrada por el receptor y dibujada en pantalla. Además aparece un cursor, que es una barra horizontal que puede moverse vertical u horizontalmente a voluntad y sirve para facilitar las observaciones, pero no hace nada especial.

La parte de abajo es un display donde se indican las condiciones de medida. Hay varias pantallas a las que se accede mediante el botón MENU.

La parte de arriba se refiere al cursor y se divide a su vez en dos partes. La de la izquierda indica en números grandes el espesor, que corresponde **al primer punto de corte entre la señal y el cursor**. Es decir, la señal es lo que se mide y el cursor lo ponemos donde queremos. La parte de la derecha sirve para cambiar la posición del mismo.

El teclado tiene muy pocas teclas que sirven para cambiar las condiciones de medida, la posición del cursor, almacenar y recuperar datos, etc. En cada caso la opción seleccionada queda resaltada. Veamos una descripción breve de las teclas:

(ON) Sirve para encender y apagar el aparato.

(HELP) Para obtener ayuda sobre su funcionamiento.

(FREEZE) "Congela" la pantalla con la última medida realizada. Es decir, impide que se actualice, cuando interesa para hacer determinaciones precisas sobre ella.

(EDIT) Sirve para introducir o modificar valores numéricos en las condiciones de medida.

(MENU) Para moverse entre la pantalla del cursor y el display de condiciones de medida y también para moverse entre las varias pantallas de éste último.

(↑) y (↓). Flechas hacia arriba y hacia abajo. Para moverse entre las distintas opciones de un menú dado.

(+) y (-) Para aumentar o disminuir el valor seleccionado. En algunos menús sirve para cambiar de opción.

(OK) Para confirmar una acción o un cambio en las condiciones de medida.

#### Movimiento del cursor

Para ello hay que pulsar (MENU) hasta que se seleccione la casilla superior derecha. Luego mediante (↑) y (↓), se puede seleccionar varias opciones. Dentro de cada opción se pueden cambiar los valores con (+) y (-) y automáticamente se ve moverse el cursor en la pantalla.

START. Comienzo de la línea (que siempre va hasta el final de la pantalla).

LEVEL. Posición vertical del cursor

GAIN. Es la amplificación electrónica que recibe la señal. Hay que ajustarla para que se vean bien los pulsos, pero sin pasarse mucho de la pantalla.

BLANK. En el modo "eco a eco" aparecen dos cursores. BLANK hace lo mismo que START para el segundo cursor.

Veamos unos cuantos procedimientos de rutina en el orden en que normalmente se aplican

a) Seleccionar palpador. El aparato tiene guardados unos cuantos modelos de palpadores. Cuando se usa uno de ellos hay que seleccionar la posición que corresponde a éste mismo.

1. Conectar el palpador. Si es de monocristal hay que hacerlo en la conexión TX de las que está arriba (transmisión), que es la que tiene un punto debajo. Si es de bicristal hay que enchufar los dos conectores, indiferentemente. Uno servirá de emisor (TX) y el otro de receptor (RX).

2. Dar a la tecla (MENU). Dar a (↑) o a (↓) hasta que aparezca PROBE SEL (seleccionar palpador). Si se utiliza el bicristal, recto y con onda longitudinal, debe indicar SG 1, Mode DOUBLE. Si es el monocristal, oblicuo y con onda transversal, debe indicar ~~MAP 5~~ y MODE SINGLE. Si indica el correcto no hay que hacer nada. Salir del menú Si no es así hay que seguir los pasos siguientes.

3. Dar otra vez a (MENU). Seleccionar LIST RECALL. Moverse por la lista con las flechas hasta que se seleccione el adecuado, que es el SG1 para el bicristal y ~~MAP 5~~ para el monocristal oblicuo.

4. Pulsar (OK) cuando está seleccionado el correcto.

#### b) Calibración automática

1. Pulsar (MENU). Moverse con las flechas hasta que aparezca la opción CALIBRATE.

PROBE 4

PROBE 4



2. Volver a pulsar (MENU). Moverse con las flechas a la opción MODE. Ahora utilizar (+) o (-) hasta que aparezca AUTOMATIC a la derecha de MODE.

3. Con (↓) bajar a la opción THK 1 (espesor nº 1). Introducir el espesor en milímetros de la pieza que se vaya a usar como calibrante nº 1. Para ello dar a (+) o (-) hasta que aparezca el espesor correcto o utilizar (EDIT).

4. Con (↓) bajar a la opción THK 2 (espesor nº 2). Igualmente introducir el valor del espesor de la pieza nº 2 (que puede ser la misma que la nº 1, pero en otra parte con espesor diferente).

5: Volver mediante (↑) a THK 1. Aplicar un par de gotas de aceite a la pieza calibrante nº 1. Apoyar el palpador sobre la pieza calibrante nº 1 extendiendo un poco el aceite y haciendo una ligera presión. Se verán en la pantalla varios ecos. Ajustar la ganancia y mover el cursor hasta que corte el primero de ellos. Luego pulsar (OK). Al cabo de unos segundos aparecerá en pantalla un mensaje indicando que se ha registrado el eco del primer espesor.

6. Moverse ahora a THK 2. Aplicar aceite y el palpador sobre la pieza nº2 y actuar como en el apartado 5. Se recibirán varios ecos y de nuevo hay que ajustar la y la ganancia y la posición del cursor hasta que corte el primer eco. Entonces pulsar (OK) y aparecerá un mensaje indicando que se ha registrado el eco del 2º espesor.

7. Usando (↑) o (↓) seleccionar CALIBRATE y pulsar (OK). Al cabo de unos segundos aparecerá un mensaje indicando que se ha calibrado y serán correctos la velocidad del sonido y el cero.

#### c) Calibración manual.

1. (MENU) (↑) o (↓) Seleccionar CALIBRATE
2. (MENU) (↑) o (↓) Seleccionar MODE
3. (+) o (-) Seleccionar MANUAL
4. (↑) o (↓) Seleccionar VELOCITY
5. (+) o (-) o bien con (EDIT) introducir la velocidad del sonido correcta.
6. (↑) o (↓) Seleccionar ZERO
7. (+) o (-) o bien con (EDIT) introducir el ZERO para el palpador que se usa.

#### d) Selección del rango de medida (espesor máximo que aparecen en la pantalla)

1. (MENU) (↑) o (↓) Seleccionar CALIBRATE
2. (MENU) (↑) o (↓) Seleccionar RANGE
3. (+) o (-) Seleccionar el rango entre 5 mm y 500 mm.

#### e) Seleccionar modo de medida

1. (MENU) (↑) o (↓) Seleccionar MEAS SETUP.
2. (MENU) (↑) o (↓) seleccionar MEAS MODE.
3. (+) o (-). Seleccionar DEPTH o E-E (eco a eco).

Cuando se selecciona el modo "eco a eco" aparecen dos cursores. El primero debe cruzar el primer eco y el segundo el segundo eco.