

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**BARCELONATECH**

---

**Departament de Ciència i Enginyeria**  
**Nàutiques**

TESIS DOCTORAL UPC/2015

**CONTROL DEL PROCESO DE CURADO DE UN**  
**LAMINADO DE PRFV POR ULTRASONIDOS**

**JUAN ANTONIO MORENO MARTÍNEZ**

# Acta de qualificació de tesi doctoral

Curs acadèmic: \_\_\_\_\_

Nom i cognoms \_\_\_\_\_

Programa de doctorat \_\_\_\_\_

Unitat estructural responsable del programa \_\_\_\_\_

## Resolució del Tribunal

Reunit el Tribunal designat a l'efecte, el doctorand / la doctoranda exposa el tema de la seva tesi doctoral titulada

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_.

Acabada la lectura i després de donar resposta a les qüestions formulades pels membres titulars del tribunal, aquest atorga la qualificació:

NO APTE       APROVAT       NOTABLE       EXCEL·LENT

(Nom, cognoms i signatura)		(Nom, cognoms i signatura)	
President/a		Secretari/ària	
(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	
Vocal	Vocal	Vocal	

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ d'/de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El resultat de l'escrutini dels vots emesos pels membres titulars del tribunal, efectuat per l'Escola de Doctorat, a instància de la Comissió de Doctorat de la UPC, atorga la MENCIÓ CUM LAUDE:

SÍ       NO

(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)
President de la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat	Secretari de la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat

Barcelona, \_\_\_\_\_ d'/de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

## TESIS DOCTORAL UPC/2015

TÍTULO: CONTROL DEL PROCESO DE CURADO  
DE UN LAMINADO DE PRFV POR ULTRASONIDOS

AUTOR: JUAN ANTONIO MORENO MARTÍNEZ  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA

DIRECTOR: Dr. CARLOS ALEMÁN LLANSÓ  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA (UPC)

PROGRAMA

DOCTORADO: CIÈNCIA E INGENIERÍA NÁUTICA

DEPARTAMENTO: CIÈNCIA E INGENIERÍA NÁUTICA

*Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universidad Politécnica de Catalunya.*

*A mis padres.*

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Facultad de Náutica de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya, bajo la dirección del Dr. Carlos Alemán, a quien quiero expresar mi más sincero agradecimiento por la confianza depositada en mí y por su colaboración durante la realización de esta tesis.

Especial agradecimiento a Vicente Sáenz Marín, ingeniero naval y profesor de esta facultad por su apoyo y asesoramiento técnico.

En particular agradecer a los doctores Germán de Melo Rodríguez (FNB/UPC) por su continuo apoyo y a José López López (/UPC), con quién he compartido trabajos de investigación y muchas de las cosas aprendidas se reflejan en este trabajo, al profesor Antoni Isalgué y en general a mis compañeros/as de la Facultad de Náutica de Barcelona.

A los Ingenieros Navales Alejandro Bessednjak y Adrián Prada por facilitarme material para la realización de las probetas de ensayo y ofrecerme soporte técnico.

A los laboratorios Bose de Tiana (Barcelona) por facilitarme la realización de los ensayos destructivos de tracción.



## RESUMEN

En esta tesis doctoral se propone una metodología para el control de la calidad durante el proceso de fabricación de una estructura de plástico reforzado con fibra de vidrio, utilizando el método de ensayo no destructivo de los ultrasonidos mediante impulso-eco y ondas longitudinales por contacto directo.

La metodología que se presenta se basa en la monitorización en tiempo real de la evolución de la señal ultrasónica reflejada durante el proceso de curado-maduración de un laminado de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio (PRFV), que es con diferencia el material más ampliamente utilizado en la construcción de cascos de embarcaciones de la náutica de recreo y gran parte de la flota pesquera. Un posterior procesamiento de los datos registrados en continuo durante un período de 15 días, han permitido representar la evolución de la amplitud de la señal o eco de fondo en función del tiempo, obteniéndose de esta forma una curva sigmoide patrón característica del proceso de fabricación que puede utilizarse como indicador cualitativo del grado de curado-maduración del laminado.

Simultáneamente a la medición ultrasónica, se han realizado ensayos de dureza Barcol, en probetas fabricadas en series homólogas, observándose una similitud entre las curvas obtenidas por ultrasonidos y las de dureza, donde los valores de amplitud de la señal ultrasónica y los datos de dureza registrados van en aumento según evoluciona el proceso de maduración. Finalmente se ajusta matemáticamente la curva ultrasónica obtenida.

Por su versatilidad, su naturaleza no destructiva ni intrusiva del sensor y la posibilidad de utilizar un equipo convencional de ultrasonidos junto a la gran disponibilidad de palpadores comerciales existentes actualmente en el mercado, la metodología propuesta puede facilitar en gran medida la inspección en el proceso de fabricación de embarcaciones.



## ABSTRACT

In this PhD thesis a methodology for the quality control of reinforced fiberglass plastic manufacturing process is proposed. The system is based on the ultrasonic pulse-echo nondestructive method and longitudinal waves on direct contact.

The presented methodology is based on the in-line monitoring of the reflected ultrasonic signal during the laminate curing of the polyester resin reinforced with fiber glass, which is the most widely used material in the construction of pleasure boat hulls and fishing fleet. Further data processing over a period of fifteen days has allowed the representation of the ultrasonic amplitude from the back-wall echo on a function of time, obtaining in this way the characteristic sigmoid curve of growth and maturation of the tested material.

Simultaneously to the ultrasonic measurements, a hardness measurements (Barcol test) have been performed on a series of homologous manufactured samples. A relation between the ultrasonic curing curve and the hardness curve has been obtained where the ultrasonic amplitude and the hardness measurements increases by the days. A final mathematical fitting has been applied.

Due to its versatility, its nondestructive nature and the property of the transducers of being non-invasive in addition to the possibility to use a standard ultrasonic equipment together with a broad selection of existing transducers, this methodology might help to the inspection of the boat building process.



# ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 2. DESARROLLOS ACTUALES.....	4
CAPÍTULO 3. MONITORIZACIÓN DEL CURADO POR ULTRASONIDOS....	7
3.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN .....	18
3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS .....	20
3.3 PROCESAMIENTO Y REPRESENTACIÓN DE DATOS.....	21
3.4 RESULTADOS.....	22
3.4.3 AJUSTE DE LA CURVA DE MADURACIÓN .....	24
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	26
CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA .....	28
ANEXO 1 ENSAYOS DE ULTRASONIDOS.....	35
A1.1 CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYO.....	35
A1.2 DATOS DISEÑO PROBETAS; CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL EQUIPO.....	57
ANEXO 2 ENSAYOS DE DUREZA BARCOL.....	60
A2.1 CÁLCULO DE LAS PROBETAS DE PRFV .....	60
A2.2 MEDICIONES: LECTURAS DE DUREZA BARCOL.....	62
A2.3 RESULTADOS CURVA DE DUREZA BARCOL.....	66
ANEXO 3 ENSAYOS DE TRACCIÓN .....	70
A3.1 CÁLCULO PANELES DE PRFV PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN..	70
A3.2 LAMINACIÓN Y DIMENSIONES DE LAS PROBETAS .....	71
A3.3 RESULTADOS.....	72
ANEXO 4 PROGRAMACIÓN SOFTWARE .....	79
A4.1 REGISTRO AUTOMÁTICO DE ARCHIVOS (Automate). .....	79
A4.2 LECTURA DE FICHEROS (LabVIEW)). .....	81
A4.3 VISUALIZACIÓN AUTOMÁTICA (LabVIEW)). .....	82
ANEXO 5. PUBLICACIONES EN REVISTAS INDEXADAS.....	87

## LISTADO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

CSM	Mat de hilos cortados
DEA	Dielectric analysis
DMA	Dynamic mechanical analysis
DMTA	Dynamic mechanical thermal analysis
DSC	Differential scanning calorimetry
iReMo	Intelligent Reactive Polymer Composites Moulding
iReMo	Intelligent Reactive polymer composites Moulding
NCU	Non Contact Ultrasound
NDE	Non Destructive Evaluation
NDE	Non-Destructive Examination
NDT	Non Destructive Testing
PRFV	Plástico reforzado con fibra de vidrio
QAP	Quality Assurance Program
RTM	Resin Transfer Molding
SHM	Structural Health Monitoring
SSCC	Sociedades de Clasificación
UDMA	Ultrasonic dynamic mechanical analysis
UT	Ultrasonidos

C	Velocidad acústica (m/s)
E	Módulo de elasticidad (módulo de Young) ( $N/m^2$ )
G	Módulo transversal ( $N/m^2$ )
$E_e$	Energía acústica específica ( $W/m^2$ )
P	Presión acústica ( $Pa = N/m^2$ )
f	Frecuencia (Hz)
I	Intensidad acústica ( $W/m^2$ )
N	Campo cercano (m)
R	Coefficiente de reflexión (%)
T	Coefficiente de transmisión (%)
Z	Impedancia acústica ( $Ns/m^3$ )
$\alpha$	Coefficiente de atenuación (dB)
$\lambda$	Longitud de onda (mm)
$\rho$	Densidad ( $Kg/m^3$ )
P	Presión acústica ( $N/m^2$ )
$\omega$	Frecuencia angular (rad/s)

## LISTADO DE ECUACIONES

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (1)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (2)$$

$$I_i = I_r + I_t \quad (3)$$

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (4)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (5)$$

$$Z = \frac{P}{V} \text{ (kg/m}^2\text{s)} \quad (6)$$

$$Z = \rho C \quad (7)$$

$$P = ZV = Z\omega A = \rho C\omega A \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (8)$$

$$E_e = \frac{1}{2}\rho V^2 = \frac{1}{2}\rho\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\frac{P^2}{\rho C^2} = \frac{1}{2}\frac{P^2}{ZC} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{2}\rho CV^2 = \frac{1}{2}ZV^2 = \frac{1}{2}Z\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\frac{P^2}{Z} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (10)$$

$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{\frac{I}{2\pi^2\rho c^3}} \quad (11)$$

$$R' = \frac{P_r}{P_i} = \sqrt{\frac{2Z_1I_r}{2Z_1I_i}} = \sqrt{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (12)$$

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \sqrt{\frac{2Z_2 I_t}{2Z_1 I_i}} = \sqrt{T \frac{Z_2}{Z_1}} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (13)$$

$$P_i + P_r = P_t \quad (14)$$

$$1 + R' = T' \quad (15)$$

$$dB = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{P_1^2}{P_2^2} = 20 \log \frac{H_1}{H_2} \quad (16)$$

$$C = \frac{2e}{t} \quad (17)$$

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (18)$$

$$L'' = \frac{2\rho c^2 \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi}\right)}{\left[1 + \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi}\right)^2\right]^2} \quad (19)$$

$$L' = \frac{\rho c^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi}\right)^2\right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi}\right)^2\right]^2} \quad (20)$$

$$L' = \rho c^2 \quad (21)$$

$$L'' = 2\rho c^3 \alpha / \omega \quad (22)$$

$$L' = K' + 4/3 G' \quad (23)$$

$$L'' = K'' + 4/3 G'' \quad (24)$$

$$L^* = L' + L'' \quad (25)$$

$$L^* = K^* + \frac{4}{3} G^* = \frac{4G^* - E^*}{3 - \frac{E^*}{G^*}} \quad (26)$$

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} \quad (27)$$

$$\lambda = c/f \quad (28)$$

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (29)$$

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. a) Velocidad longitudinal y b) atenuación.....	16
Figura 2. Módulo L' medido a 2 MHz y a diferentes temperaturas .....	17
Figura 3. Módulo L'' medido a 2 Mhz. ....	17
Figura 4. Configuración del sistema.....	18
Figura 5. Disposición del sistema de medición por ultrasonidos .....	20
Figura 6. Curva de maduración ciclo completo.....	22
Figura 7. Inicio del registro de datos curva maduración a las 3 h .....	23
Figura 8. Ajuste ciclo de 15 días. ....	24
Figura 9. Ajuste ciclo de 12,5 días.....	25
Figura 10. Serie de probetas para calibración y ajuste equipo UT .....	35
Figura 11. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/Gain=53 dB.....	36
Figura 12. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=67 dB.....	37
Figura 13. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=2,25Mhz/G=63dB .....	38
Figura 14. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=55 dB.....	39
Figura 15. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=55 dB/R=10 mm.....	40
Figura 16. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=55 dB/R=12 mm.....	41
Figura 17. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f= 0,5 Mhz/G=33.5 Mhz.....	42
Figura 18. UT probeta nº 10: e= 3 mm/f=0,5 MHz/G=47 dB .....	43
Figura 19. UT probeta nº 11: e= 6 mm/f=2,25 Mhz /G=55 dB/R=12.....	44
Figura 20. UT probeta nº 11: e= 6 mm/f=2,25Mhz/G=55 dB/R=10.....	45
Figura 21. UT probeta nº 11: e= 6 mm/f==0,5 Mhz/G=34 dB .....	46
Figura 22. UT probeta nº 11: e= 6 mm/f=0,5 MHz/G=47 dB .....	47
Figura 23. UT probeta nº 11: e= 6 mm/f=0,5 MHz/G=44,5 .....	48
Figura 24. UT probeta nº 12: e= 9 mm/f=0,5 MHz/G=42,5 dB.....	49
Figura 25. UT probeta nº 12: e= 9mm/f=0,5 MHz/G=42,5 dB .....	50
Figura 26. UT probeta nº 12: e= 9 mm/F=0,5MHz/G=42,5 dB/delaminación ....	51
Figura 27. UT probeta nº 12: e= 9mm/f=0,5 MHz/G=55 dB.....	52
Figura 28. UT probeta nº 12: e= 9 mm/delaminación a 1,24 mm.....	53
Figura 29: UT probeta nº 9: e= 12 mm/f=0,5 MHz/G=42,5 dB.....	54
Figura 30. UT probeta nº 13: e= 18 mm/F=0,5 MHz/G=44,5 dB .....	55



Figura 31. Probetas para ensayo por UT .....	57
Figura 32. Disposición del ensayo con delay de 20 mm.....	58
Figura 33. Laminado del panel ensayo de dureza .....	62
Figura 34. Medición y registro de durezas Barcol.....	62
Figura 35. Mediciones dureza Barcol: 1.470 registros.....	64
Figura 36. Gráfica de caja para el registro nº 21 y estadísticos principales.....	65
Figura 37. Valores medios de dureza. ....	66
Figura 38. Secuencia del laminado paneles para ensayo de tracción .....	70
Figura 39. Número de capas del laminado paneles probetas tracción .....	71
Figura 40. Panel nº1 probetas de tracción .....	71
Figura 41. Panel nº 2 probetas de tracción .....	72
Figura 42. Máquina de ensayo y probetas .....	72
Figura 43. Gráfica de resistencia a la tracción versus tiempo maduración.....	74
Figura 44. Gráficas tracciones probetas 1.1 y 1.5.....	74
Figura 45. Gráficas tracciones probetas 3.1 y 3.4.....	75
Figura 46. Gráficas tracciones probetas 2.1 y 4.1.....	75
Figura 47. Graficas tracciones probetas 5.1 y 5.5.....	76
Figura 48. Gráficas tracciones probetas 6.1 y 8.....	76
Figura 49. Gráficas tracciones probetas 7.1 y 7.5.....	77
Figura 50. Gráfica tracción probeta 9.1 .....	77
Figure 51. Gráficas tracciones probetas 10.1 y 10.5.....	78
Figura 52. Programa de registro automático de archivos (Automate).....	80
Figura 53. Lectura de Ficheros VI Panel frontal y diagrama bloques.....	81
Figura 54. Visualización automática VI: Panel frontal y diagrama bloques .....	82
Figura 55. Visualización automática VI bis: Panel frontal/diagrama bloques ....	83
Figura 56. Lee fecha de grabación VI. Panel frontal y diagrama de bloques ....	84
Figura 57. Lee ficheros algms335 VI. Panel frontal y diagrama de bloques.....	85
Figura 58. Curva de maduración. Panel frontal y diagrama de bloques.....	86

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Datos probetas UT calibración y ajuste parámetros de ensayo .....	59
Tabla 2. Datos resina probeta dureza Barcol .....	60
Tabla 3. Datos de diseño probeta dureza Barcol.....	61
Tabla 4 Datos s/ UNE 53-270-76 .....	63
Tabla 5. Valores promedio dureza Barcol.....	65
Tabla 6. Datos resina .....	70
Tabla 7. Datos de fabricación paneles probetas de tracción .....	71
Tabla 8. Resumen de resultados ensayos de tracción.....	73

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

A diferencia de una estructura fabricada con planchas acero, aluminio o madera donde los materiales constituyentes o materias primas se aportan con una propiedades y características mecánicas predeterminadas y comprobadas previamente a su incorporación al buque en construcción, un casco de material compuesto logra su forma completamente al tiempo que se fabrica, por lo tanto el material base se va obteniendo tal y como se va desarrollando el casco. La principal peculiaridad de los termoestables es que, durante su fabricación, experimentan un proceso de entrecruzamiento de sus moléculas, denominado “curado”, durante el cual el cambio es irreversible desde que pasa de ser un líquido viscoso a un polímero sólido.

Se hace evidente, pues, que para controlar el proceso es necesario obtener información relevante durante todo el ciclo de curado y maduración completa del material durante su fabricación. Este conocimiento es esencial para prevenir casos de la obtención de material con un insuficiente curado o por el contrario con un curado excesivo.

El curado de los materiales compuestos viene determinado por complejos procesos dinámicos y la única herramienta práctica de que disponemos para optimizar tal proceso es el de prueba y error (1). El grado de curado del material es un parámetro determinante en los procesos de moldeo y sólo cuando el producto está totalmente curado se puede proceder a despegarlo del molde.

Es un error pensar que la resina que conforma la matriz de un material compuesto está completamente curada cuando ya se ha endurecido. A temperatura ambiente se necesitan varios días o semanas para que la reacción se complete y se adquieran las totales propiedades finales de curado\_(2). En el caso de que se proceda a desmoldar antes de que el material esté curado, el laminado puede sufrir deformaciones y no cumplir con los requerimientos de

calidad especificados, por otro lado, si el material está más tiempo del necesario en el molde, el ciclo productivo se alarga y la eficiencia del mismo disminuye.

Por lo tanto, la modelización del grado de curado es muy importante para reducir el número de defectos, controlar y optimizar dichos procesos.

Las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido dependen en gran medida del grado de curado. Un error típico durante el curado de los termoestables es dejar un tiempo de curado insuficiente, que se traducirá en la aparición de defectos y una degradación en sus propiedades mecánicas. En el caso de resinas fenólicas, un insuficiente curado y consecuentemente una temperatura de transición vítrea demasiado baja (el grado de curado aumenta con la temperatura de transición vítrea), origina la aparición de ampollas después del desmoldeo. La resistencia al impacto y a la rotura aumentan uniformemente con el tiempo de curado y con el grado de curado respectivamente (3) (4).

También la velocidad de crecimiento de una grieta disminuye según aumenta el grado de curado (5). Además un excesivo tiempo de gelificación, que depende de las condiciones (temperatura, humedad relativa) y de los aditivos necesarios para la polimerización es causa de una mala adherencia en el molde; dilución del gel coat por el estireno de la siguiente capa; desconchado al desmoldear; marcado de la fibras interiores; osmosis, fisuras y variaciones de espesor en la capa de gel coat.

Así pues, la constitución del laminado de un casco es un proceso dinámico y complejo en el que intervienen diversos factores interrelacionados, que es necesario controlar al objeto de que el producto final responda a las especificaciones y se establece que la mejor garantía de que el laminado responde a las características del proyecto es mediante un control riguroso de los componentes y del método de fabricación (6).

Como resultado, la integridad total de una estructura marina fabricada de PRFV depende en gran medida del programa de aseguramiento de la calidad (QAP) implementado por el astillero, cuyos elementos básicos incluyen: *la inspección y ensayo de las materias primas incluyendo refuerzos y núcleos; la inspección en proceso de fabricación y procesos de fabricación; y la evaluación destructiva y no destructiva* de la estructura de material compuesto (7). Las Sociedades de Clasificación (SSCC) establecen numerosos requisitos de calidad que responden en mayor medida a las fases inicial y final de la construcción de una embarcación de material compuesto.

Durante la *inspección en proceso de fabricación*, los requerimientos de calidad observan el control de variables de temperatura, humedad relativa, ventilación, condiciones de almacenamiento de las materias primas, etc; así como tiempos recomendados de curado, postcurado y valores mínimos de dureza Barcol que permitan el desmoldeo. No obstante, no se contempla la monitorización del proceso de curado y seguimiento posterior del tiempo de maduración completo del material, siendo este parámetro el resultado de datos empíricos del taller de laminado y cuya variabilidad obedece a las distintas materias primas empleadas, métodos de fabricación y condiciones ambientales.

Tal vez podamos caer en la complacencia y el error de creer que los materiales compuestos son materiales tan excelentes que nunca pueden fallar. Ya hay en el sector naval expertos (8) que opinan que es el momento de que las Sociedades de Clasificación (SSCC) revisen sus reglas y procedimientos de inspección para adaptarse a los continuos cambios tecnológicos que estos materiales y procesos asociados presentan y se incorporen los métodos de ensayos no destructivos (NDT-NDE) no sólo en las etapas finales del proceso, sino también durante la fase de fabricación, extendiendo la aplicación de los métodos NDE que incluyen la diagnosis y prognosis a los denominados con frecuencia *sistemas de monitorización del estado estructural (SHM)* (9 p. 1-11).

## CAPÍTULO 2. DESARROLLOS ACTUALES

Hay un creciente interés en métodos que guíen la reacción del curado y evalúen las propiedades durante el post-curado del componente formado. La monitorización del curado es de la mayor importancia para (i) proveer las condiciones necesarias para una correcto mojado o impregnación de la resina epoxy; (ii) distinguir las diferentes etapas de la formación de la estructura al objeto de determinar la “ventana” de tiempo del proceso; (iii) posibilitar la identificación del grado de curado que satisfaga los requerimientos mínimos y los ciclos óptimos de curado de resina de la matriz (10).

La monitorización del curado es una herramienta importante para asegurar la fiabilidad de la fabricación y reproducibilidad de los componentes de composites. Por último, y no menos importante, la monitorización del curado presenta el potencial para el futuro en la automatización de la fabricación de composites.

Existen varias técnicas para la monitorización del curado de materiales compuestos y adhesivos que se fundamentan en la determinación de propiedades térmicas; propiedades eléctricas; propiedades mecánicas y propiedades ópticas (11), (12).

En las últimas décadas, se han aplicado diferentes técnicas para la monitorización del curado de resinas termoestables, incluyendo la calorimetría diferencial de barrido (DSC) (13), análisis termo-mecánico-dinámico (DMTA) (14), análisis dieléctrico (DEA) (15) (16), espectroscopia infrarroja transformada rápida de Fourier FT-IR (17), espectroscopia infrarroja cercana (NI) (18) (19), y espectroscopia Raman (20). Sin embargo, muchos de estos métodos de curado son de laboratorio y no son adecuados para usos industriales, se requiere equipamiento caro, son destructivos y típicamente se utilizan para trabajar con pequeñas muestras de dimensiones restringidas.

El proyecto iReMo (21) impulsado por el la Comisión Europea<sup>1</sup> en el 2009 y participado por diez instituciones<sup>2</sup> pertenecientes a seis países europeos, han desarrollado un sistema fiable basado en PC de monitorización del proceso de curado, aplicado al método RTM de resinas de epoxi reforzadas con fibra de carbono. El sistema se basa en sensores de medida eléctrica (DC) y de temperatura, determinando la llegada de la resina al molde, los cambios de viscosidad, así como la transformación del material hasta el final del curado. Los logros se traducen en una reducción del tiempo de moldeo y como consecuencia una aceleración en la producción del orden de un 36% del ciclo de curado y un aumento del 80% del ratio de producción. Los datos obtenidos se han utilizado como datos de entrada para su aplicación en modelos de redes neuronales (1), (22), (23), (24).

Las redes neuronales aportan información para modelizar el grado de curado a partir de datos obtenidos en procesos industriales (25). Se utilizan técnicas de agregación o combinación de clasificadores, concretamente técnicas de remuestreo que pueden utilizarse para extraer muestras distintas a partir del conjunto de datos original, de tal forma que los clasificadores individuales entrenados en cada una de ellas sean utilizados posteriormente en la combinación. De entre las técnicas de remuestreo la que más se utiliza para este propósito es la técnica *bootstrap* para obtener muestras sin reemplazamiento del mismo tamaño que el conjunto de datos original, obteniéndose distintos conjuntos de entrenamiento. Dentro de estos métodos de combinación que utilizan el remuestreo lo más utilizados son los métodos *Bagging* y *Boosting* (26).

Por otro lado y en el campo de la biomedicina hay estudios basados en el

---

<sup>1</sup> European Seventh Framework Program (FP7)

<sup>2</sup> CEMCAT (Reserach Centre); SOTIRA (Automotive Industry); ATOUTVEILLE (Consulting); NTUA (Process monitoring, modeling&control); INASMET (Material and process modeling); BIBA (Wireless cominications and logistics); Newcastle University (Artificial Intelligence); ACCIONA (Constructions Group); Synthesites (Process monitoring and control); KARNIC (Boat industry).

método de ultrasonidos similares al que aquí se presenta, al objeto de monitorizar las reacciones de fraguado de cementos óseos de base cerámica, basándose en el análisis temporal del eco registrado tras el envío de pulsos ultrasónicos hacia el cemento (27). El método de los ultrasonidos ha demostrado su utilidad al monitorizar, en este caso por la técnica de transmisión, el proceso de fraguado de un cemento óseo comercial de base polimérica, así como, los procesos de degradación de ciertos polímeros biodegradables.

En el caso concreto de la monitorización del curado de materiales compuestos utilizando los ultrasonidos, son numerosos los estudios desarrollados publicados (28). Se han venido utilizando durante varias décadas técnicas para la medición de las propiedades del material por el método de transmisión de los ultrasonidos (29). Estas técnicas se basan en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico a través del material. La velocidad se determina a partir de precisas mediciones que tarda el pulso en viajar desde el emisor al receptor (tiempo de vuelo) de un espesor conocido de material (30).

La propagación del ultrasonido de baja intensidad en una resina curada, actuando como una excitación de oscilación de alta frecuencia, ha sido recientemente propuesta como análisis mecánico dinámico ultrasónico (UDMA) para la monitorización del curado (31). Esta técnica mide la velocidad ultrasónica y la atenuación, las cuales son muy sensibles a los cambios en las características viscoelásticas en el curado de una resina, ya que la velocidad está relacionada con el módulo de almacenamiento de la resina y su densidad, mientras que la atenuación está relacionada con la disipación de energía y la dispersión en el curado de la resina.

El estudio pone énfasis en la eficacia de la propagación de la onda ultrasónica para el monitoreo de los cambios físicos que tienen lugar durante el curado y el potencial para su monitorización durante el proceso de curado de resinas y materiales compuestos.



### CAPÍTULO 3. MONITORIZACIÓN DEL CURADO POR ULTRASONIDOS.

Las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas (en la región entre 20 KHz-100 MHz), las cuales se propagan a través de pequeños desplazamientos de los átomos y de las cadenas alrededor de sus posiciones de equilibrio.

En el caso de los polímeros, las fuerzas actúan a lo largo de los segmentos de cadenas y entre las cadenas de moléculas, creando desplazamientos entre las zonas adyacentes, por lo tanto creando ondas de presión a través del material.

Existen varios tipos de onda ultrasónica que pueden propagarse a través de materiales sólidos, las denominadas ondas longitudinales, ondas transversales, ondas superficiales o de Rayleigh y ondas de chapa o Lamb. En el modo de propagación longitudinal, el material está sometido a compresiones y dilataciones alternativas y las partículas vibran en la misma dirección de propagación de la onda. En el modo transversal, el sólido está sometido a fuerzas cortantes y el movimiento de las partículas es perpendicular al movimiento de propagación de la onda (32).

Como los gases y líquidos son prácticamente incapaces de transmitir ondas transversales, para la monitorización del curado por UT se prefieren normalmente las ondas longitudinales a las transversales, las cuales presentan una gran atenuación en líquidos y geles blandos. Las ondas ultrasónicas se caracterizan por su longitud de onda, amplitud de desplazamiento, y velocidad de propagación. En muchas aplicaciones, las ondas de UT se generan con transductores, los cuales convierten energía eléctrica en ondas ultrasónicas. El mismo transductor (o un segundo transductor) convierte el retorno de la onda UT en energía eléctrica para su posterior análisis.

En nuestros ensayos consideraremos el caso de incidencia perpendicular de la onda longitudinal en una superficie única y plana, obteniéndose los coeficientes de reflexión y transmisión respectivamente a partir de las siguientes expresiones (32) :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (23)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (24)$$

siendo  $I_i$  la intensidad de la onda incidente,  $I_r$  la de la reflejada,  $I_t$  la transmitida y  $Z_1$  y  $Z_2$  las respectivas impedancias acústicas de los dos materiales. Estos coeficientes expresan el porcentaje de intensidad reflejada y transmitida, respectivamente, en relación a la intensidad incidente y de cuyo balance de energía obtenemos que

$$I_i = I_r + I_t \quad (25)$$

De la teoría de propagación de las ondas acústicas, se obtiene:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (26)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (27)$$

La impedancia acústica en el caso de ondas planas y esféricas viene dada por:

$$Z = \frac{P}{V} \text{ (kg/m}^2\text{s)} \quad (28)$$

Siendo más práctica utilizar esta otra expresión:

$$Z = \rho C \quad (29)$$

Y la presión acústica:

$$P = ZV = Z\omega A = \rho C\omega A \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (30)$$

No obstante, al estar la altura del eco en la pantalla del equipo de ultrasonidos directamente relacionada con la presión acústica es preferible referenciar dichos coeficientes con ésta. Así pues y a partir de la energía acústica específica  $E_e$  que relaciona la amplitud  $A$  y la presión acústica  $P$  :

$$E_e = \frac{1}{2}\rho V^2 = \frac{1}{2}\rho\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\frac{P^2}{\rho C^2} = \frac{1}{2}\frac{P^2}{ZC} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (31)$$

También, la intensidad acústica  $I$  se obtienen a partir de:

$$I = \frac{1}{2}\rho CV^2 = \frac{1}{2}ZV^2 = \frac{1}{2}Z\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\frac{P^2}{Z} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (32)$$

y la amplitud máxima de oscilación  $A$  es:

$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{\frac{I}{2\pi^2\rho c^3}} \quad (33)$$

Finalmente los coeficientes de reflexión  $R'$  y transmisión  $T'$  de la presión acústica son respectivamente:

$$R' = \frac{P_r}{P_i} = \sqrt{\frac{2Z_1 I_r}{2Z_1 I_i}} = \sqrt{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (34)$$

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \sqrt{\frac{2Z_2 I_t}{2Z_1 I_i}} = \sqrt{T} \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (35)$$

En este caso el balance de la presión acústica, en contraste con el de la intensidad, será:

$$P_i + P_r = P_t \quad (36)$$

$$1 + R' = T' \quad (37)$$

En el caso que nos ocupa si consideramos una entrecara de material compuesto (medio 1) con una impedancia  $Z_1$  de 3,5 MRayls\* y el aire (medio 2) con una impedancia  $Z_2$  prácticamente cero, se cumple que  $R=R'=1$ ;  $T=T'=0$ , es decir que se refleja el 100 % de la presión acústica.

$$R' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0 - 3,5}{0 + 3,5} = -1 \text{ (-100 \%)} \quad \text{y} \quad T' = 0$$

Al ser  $Z_2 < Z_1$ ,  $R'$  es negativo, lo que indica una inversión de fase de la onda reflejada con relación a la onda incidente.

Una vez introducido el sonido dentro del material compuesto, la altura o amplitud del eco que obtenemos en un equipo de impulso-eco será proporcional a la presión acústica y la podemos referir a una parte o tanto por ciento de la altura total de la pantalla del equipo (% ATP). Esta medida relativa nos permite establecer un nivel de comparación entre señales que se corresponden con amplitudes, alturas de eco o presiones acústicas.

La relación entre amplitudes de los ecos que expresamos en decibelios (dB) se puede obtener a partir de las alturas de los ecos  $H_1$  y  $H_2$  representados en la pantalla, según la siguiente expresión:

$$dB = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{P_1^2}{P_2^2} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^2 = 20 \log \frac{P_1}{P_2} = 20 \log \frac{H_1}{H_2} \quad (38)$$

y a partir de aquí obtener el coeficiente de atenuación  $\alpha$ . El coeficiente de atenuación se determina por la variación de la amplitud de la señal acústica.

La señal obtenida del eco de fondo de la muestra corresponde a la reflexión especular de la onda y este valor permanecerá invariable para un material ya

completamente formado, a diferencia de lo que ocurre con el material compuesto mientras se va obteniendo.

La monitorización del curado por ultrasonidos se basa en la medición de la velocidad y atenuación de la onda ultrasónica, las cuales son muy sensibles a los cambios en las características viscoelásticas de formación de redes de macromoléculas. La velocidad del sonido en el material es dependiente de su densidad y módulo, por lo tanto muestra directamente el estado de curado y ofrece información inmediata de la rigidez mecánica del material (33).

Las características ultrasónicas de un material están determinadas por dos parámetros, la velocidad acústica,  $c$ , y el coeficiente de atenuación,  $\alpha$ . El primero es la velocidad de propagación de las ondas elásticas, la cual se puede determinar con los equipos de ultrasonidos a partir de la medición del “tiempo de vuelo” que tarda la onda ultrasónica en recorrer una distancia conocida, que es el tiempo en que tarda el sonido en propagarse a través del material, a partir de la expresión:

$$C = \frac{2e}{t} \quad (39)$$

Donde “ $e$ ” es el espesor de la muestra (para el método de impulso-eco es recorrido de ida y vuelta) y “ $t$ ” es el tiempo de tránsito. Con los equipos actuales se puede determinar la velocidad acústica desconocida de un material de forma automática a partir de dos distancias de referencia conocidas. De hecho esta funcionalidad del equipo de UT se ha utilizado para determinar la velocidad acústica de una probeta del mismo material y espesor conocido una vez ya ha estado completamente curado, para realizar las operaciones de ajuste y calibración del equipo de ultrasonidos necesarios previos a la monitorización.

Las mediciones de la velocidad acústica son frecuentemente utilizadas para determinar varias propiedades importantes de los materiales. Módulo de elasticidad de Young, relación de Poisson, impedancia acústica y otras propiedades y coeficientes utilizados pueden calcularse a partir de mediciones

de la velocidad acústica en sólidos siempre que la densidad del material sea conocida (34).

La velocidad del sonido en medios homogéneos está directamente relacionada con el módulo elástico y con la densidad; por lo tanto una variación en uno u otro afectará al tiempo de tránsito del pulso a través del material para un espesor dado. En el caso de sólidos la velocidad acústica para ondas longitudinales se determina por:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (40)$$

Siendo  $E$  el módulo de elasticidad y  $\mu$  la relación de Poisson.

La atenuación es una medida de la disipación de la energía y la mayor pérdida de energía resulta de la absorción y dispersión de las ondas ultrasónicas. La contribución de las pérdidas por dispersión son considerables cuando el medio es estructuralmente heterogéneo y el tamaño de las partículas son comparables a la longitud de onda de las ondas propagadas, como en el caso de plásticos reforzados, y algunos polímeros cristalinos.

La respuesta acústica de un polímero puede proveer información acerca de su comportamiento viscoelástico, debido a ello pueden utilizarse directamente para calcular los dos componentes del módulo complejo.

Cuando la dimensión de la probeta perpendicular a la dirección de la propagación de la onda acústica es grande comparado a su longitud de onda, la medición de la velocidad acústica y la atenuación pueden usarse para calcular los componentes de almacenamiento  $L'$  y pérdidas del módulo longitudinal  $L''$  a partir de las siguientes expresiones (35):

$$L'' = \frac{2\rho c^2 \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi}\right)}{\left[1 + \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi}\right)^2\right]^2} \quad (41)$$

$$L' = \frac{\rho c^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi}\right)^2\right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi}\right)^2\right]^2} \quad (42)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material;  $c$  es la velocidad ultrasónica;  $\alpha$  el coeficiente de atenuación; y  $\lambda$  es la longitud de onda, obtenida a partir de la ecuación de onda  $\lambda = c/f$  y  $\omega$  es la frecuencia angular ( $\omega = 2\pi f$ ).

Si  $\lambda/2\pi \ll 1$ , es decir que la atenuación por longitud de onda es pequeña, en muchas aplicaciones prácticas, se puede emplear la siguiente fórmula simplificada para calcular las dos componentes del módulo longitudinal complejo:

$$L' = \rho c^2 \quad (43)$$

$$L'' = 2\rho c^3 \alpha / \omega \quad (44)$$

En la elasticidad lineal, el módulo longitudinal es uno de los módulos disponibles para describir el comportamiento isotrópico de materiales homogéneos.  $L'$  y  $L''$  están relacionados con los módulos volumétricos  $K$  y transversales  $G$  a partir de las expresiones:

$$L' = K' + 4/3 G' \quad (45)$$

$$L'' = K'' + 4/3 G'' \quad (46)$$

$L'$  y  $L''$  pueden sumarse para formar el módulo complejo longitudinal  $L^*$

$$L^* = L' + L'' \quad (47)$$

Finalmente podemos relacionar el módulo complejo longitudinal  $L^*$ , con el módulo volumétrico  $K^*$  y módulo transversal  $G^*$  y también con módulo de elasticidad  $E^*$  y módulo transversal  $G^*$  mediante la siguiente expresión

$$L^* = K^* + \frac{4}{3} G^* = \frac{4G^* - E^*}{3 - \frac{E^*}{G^*}} \quad (48)$$

El proceso de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas causa un cambio característico en el módulo de elasticidad y en el módulo transversal y por tanto también en el módulo de la onda longitudinal que puede utilizarse para caracterizar el entrecruzamiento (9).

Durante el proceso de curado se presentan tres etapas: gelificación; vitrificación y maduración. En la gelificación, la resina pasa de un estado líquido viscoso a un gel blando y se define como la transformación de fase que tiene lugar durante el curado de la resina en la cual ésta pasa de ser un líquido viscoso a transformarse en un gel elástico, la viscosidad del sistema empieza a ser infinita y la respuesta a cortantes de la resina aumenta desde cero a valores finitos. Una vez la resina ha gelificado, no puede procesarse otra vez y las operaciones de impregnación de la fibra o la eliminación de burbujas no pueden prolongarse.

La vitrificación es la transformación de fase en el curado de una resina termoestable correspondiente a la formación en un vidrio sólido. En la vitrificación o endurecimiento la resina pasa de un gel blando a un sólido. En la vitrificación, la temperatura de transición vítrea de la resina, se incrementa continuamente durante el curado, aproximándose a la temperatura de curado. Como consecuencia la movilidad de grupos reactivos es altamente limitada, la polimerización comienza a ser una difusión controlada y puede continuar lentamente. En la fabricación de composites, es en la fase de vitrificación que el curado se considera prácticamente finalizado, siendo posible extraer el compuesto del molde sin dañar el componente.

No obstante, es en la fase de maduración donde la resina adquiere todas sus propiedades mecánicas y químicas. Las dos primeras etapas son relativamente cortas, al contrario de la última que puede durar varias horas si aportamos calor o bien varios días si se realiza a temperatura ambiente.



La mayoría de las piezas fabricadas en PRFV se pueden considerar aptas para su utilización una vez transcurridas 24 horas del tiempo previsto para su endurecimiento. En aplicaciones críticas, como es el caso de la construcción de embarcaciones, tanques de agua o petróleo, o bien componentes que deban ofrecer una gran resistencia química, se precisan varios días e incluso semanas. Para el caso de los tanques de combustible se recomienda como mínimo un tiempo de maduración de un mes para poder asegurar de que el material es estable y apto para el uso.

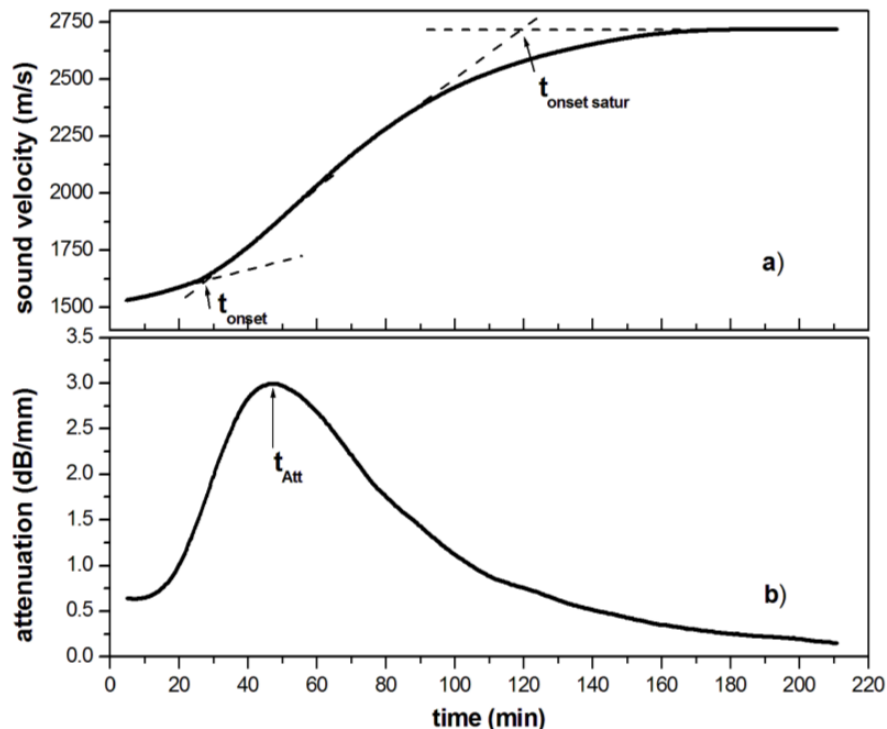
El trabajo experimental llevado a cabo mediante UDMA (31) centrado en evaluar la fiabilidad del UDMA en la monitorización de las transformaciones de fase, ha permitido registrar una típica curva de velocidad ultrasónica versus tiempo de curado de una resina de poliéster a 2 MHz durante el curado isotérmico de una resina de poliéster insaturado a 30 °C (**Figura 1**). La curva de velocidad obtenida tiene una forma sigmoide, caracterizada por tres zonas que pueden relacionarse con las diferentes etapas de la reacción de entrecruzamiento de las moléculas (36).

En una primera etapa del curado, la velocidad es aproximadamente constante porque la resina está todavía en estado líquido y no ha desarrollado todavía su carácter viscoelástico.

La segunda zona de la curva de velocidad empieza después del punto de gel, cuando la velocidad acústica se incrementa rápidamente debido a la formación de dominios de micro-gel grandes, suficientes para producir la medición de la respuesta viscoelástica a las ondas ultrasónicas.

La tercera zona de la curva de velocidad se caracteriza por el progresivo decrecimiento en el cambio de la velocidad longitudinal. Esta zona corresponde a la etapa de vitrificación y se consiguen valores estables en la velocidad acústica. El incremento total de la velocidad durante la medición ultrasónica es muy elevado (aprox. 1200m/s), indicando de que la transición desde un estado

de líquido viscoso a un estado de sólido vítreo está acompañado por grandes cambios en las propiedades acústicas.



**Figura 1.** a) Velocidad longitudinal y b) atenuación

Este aumento en la velocidad acústica puede verse en la **Figura 55** observando el desplazamiento de los ecos hacia la izquierda de la base de tiempos.

El módulo longitudinal  $L'$  sigue una curva sigmoide (**Figura 2**), con el máximo incremento después de la gelificación, y alcanza un valor estable al final del curado con un comportamiento típico de un mecanismo de curado auto catalítico, los cuales pueden deducirse por el rápido incremento del módulo después de la gelificación. Solo en correspondencia de la gelificación, el componente transversal empieza a contribuir al incremento de  $L'$  como consecuencia del desarrollo de las propiedades elásticas dadas por la reacción de entrecruzamiento.

Cuando la atenuación viscoelástica se hace máxima (**Figura 3**), el módulo de atenuación  $L''$  presenta un gran pico, el cual cae rápidamente cuando tiene lugar la vitrificación y la respuesta elástica empieza a ser significativa. A partir

de que la absorción ultrasónica disminuye entonces el material compuesto permite la transmisión de las ondas acústicas. (37).

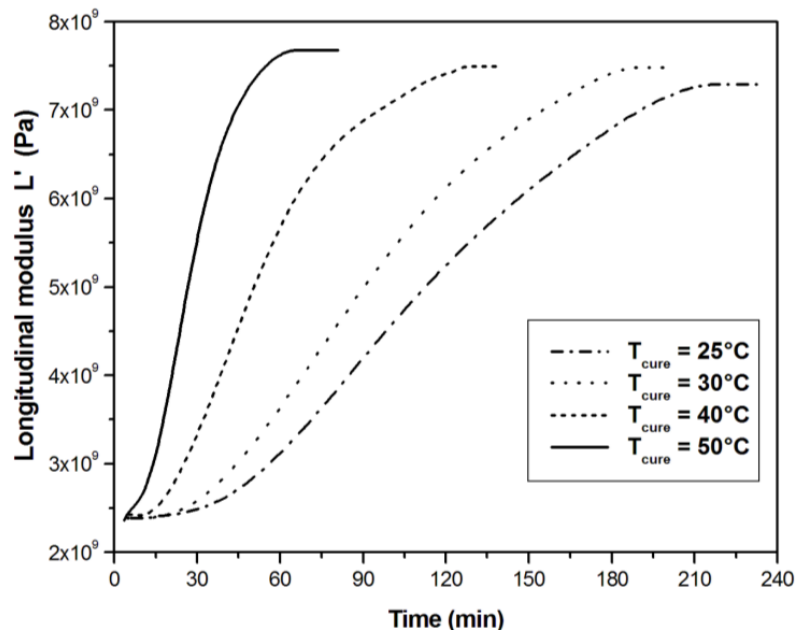


Figura 2. Módulo  $L'$  medido a 2 MHz y a diferentes temperaturas

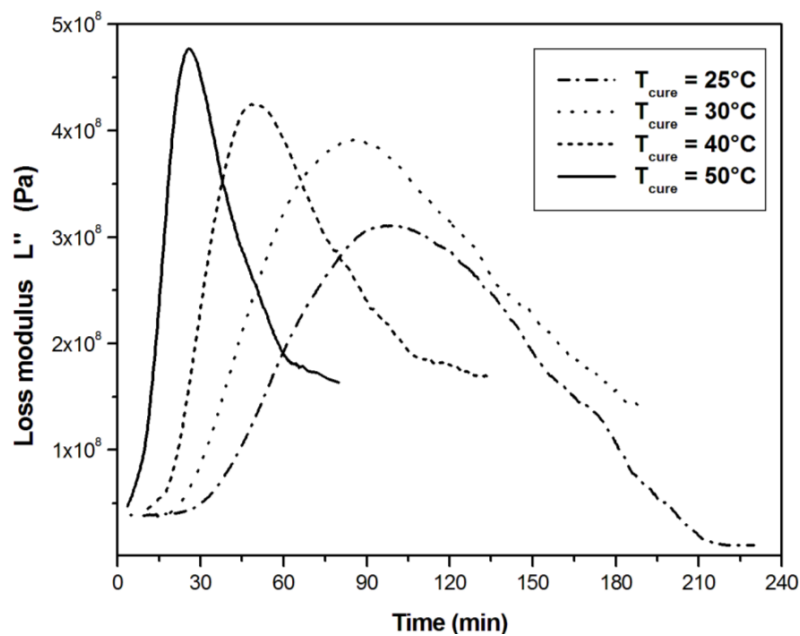


Figura 3. Módulo  $L''$  medido a 2 Mhz.

Nota: Las figuras 1, 2 y 3 son adaptadas de (31):

Lionetto, F y Maffezzoli, A. *Monitoring de Cure State of Thermosetting Resins by Ultrasounds. Materials*. **2013**. págs. 3783-3804.

### 3.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema propuesto está basado en un PC para la monitorización en tiempo real del proceso de curado de un casco de una embarcación construida en resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, mediante el método de ultrasonidos y utilizando la técnica de impulso-eco por contacto directo. En la monitorización del curado se registra de forma continua el aumento de la presión acústica que tiene lugar en el material compuesto durante el proceso de fabricación.



**Figura 4.** Configuración del sistema

A medida de que el material se va endureciendo, la atenuación ultrasónica decrece, la velocidad acústica y el módulo elástico aumentan, entonces el material permite la transmisión y la reflexión de las ondas acústicas.

Del registro en función del tiempo de los diferentes valores de presión acústicas o alturas de eco, finalmente obtenemos una curva característica de todo el proceso de curado-maduración del laminado que puede servir de referencia como curva patrón para ulteriores laminados y predecir la variabilidad del proceso mediante el ajuste matemático de la curva así obtenida.

La monitorización del curado del material compuesto se realiza mediante un equipo convencional de ultrasonidos utilizado para defectología de materiales metálicos y compuestos, usualmente utilizado en muchos astilleros. Así pues, al no requerir equipamiento sofisticado de laboratorio y la fácil accesibilidad de equipos y accesorios comercialmente disponibles en el mercado, junto con el cada vez menor coste, sería deseable incorporar su aplicación en la etapa de inspección en proceso en la construcción de embarcaciones.

La comunicación entre el PC y el equipo de ultrasonidos es a través puerto serie RS-232 y la adquisición y registro de señal se realiza de forma puntual mediante el software proporcionado por el fabricante del equipo de ultrasonidos (TELESCAN). La forma de onda representada en la pantalla del equipo de UT es de RF tipo A-Scan en modo de señal rectificadas de media onda [+VE HW], mostrando la amplitud de la onda acústica reflejada en el eje vertical de ordenadas (altura del eco) y el tiempo de recorrido en el eje horizontal de las abscisas (distancias de recorrido).

Al no disponer del instrumento controlador del equipo de UT, el registro en continuo se ha realizado mediante software (AUTOMATE), que previa escritura de una serie de macroinstrucciones, permite guardar los datos proporcionados por el equipo de UT automatizando así el proceso de grabación de los ficheros.

Finalmente, la transformación de archivos A-log proporcionados por el equipo de UT a archivos en formato [.txt] y posterior tratamiento y representación se realiza mediante LabVIEW, previa programación de una serie de VI's<sup>3</sup> que nos va a permitir una visualización automática del "paquete" de archivos, así como una representación de la evolución de la amplitud de la señal en función del tiempo, obteniéndose de esta forma una curva *sigmoide de crecimiento*, representativa del proceso de *maduración completo* del material ensayado durante su fabricación.

---

<sup>3</sup> Virtual instruments.

## 3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

El equipo de UT permite a través de software propio la comunicación con el PC y la adquisición de registros de la señal en ficheros de texto del tipo A-Logs de forma individual una vez congelada la imagen.

Para poder automatizar o el proceso de registro de datos en continuo y guardar los ficheros correspondientes que se van a ir generando durante todo el tiempo de adquisición de datos, se programa a través de software externo (AUTOMATE), varios programas que nos permitan ir registrando y guardando los datos en ciclos de tiempo predeterminados, mediante el movimiento y las acciones del puntero del ordenador.

En este caso se ha registrado hasta un total de 41.085 archivos de datos que corresponden a la monitorización del proceso de fabricación durante 15 días, obteniéndose un registro cada 30 segundos.



**Figura 5.** Disposición del sistema de medición por ultrasonidos

### 3.2.1 REGISTRO AUTOMÁTICO

El software utilizado nos permite automatizar de forma secuencial las rutinas o tareas repetitivas de guardar los archivos adquiridos por el equipo de ultrasonidos y otras acciones necesarias para poder registrar de forma continuada, tales como acciones de refresco automático de la señal, vaciado del portapapeles, apagado y encendido del equipo para resetear el sistema, etc.

La cadencia de registro programada permite guardar un archivo cada 30 segundos, es decir 2.880 registros/día si la adquisición fuera de forma ininterrumpida, pero debe tenerse en cuenta los tiempos de apagado y reinicio necesarios para no saturar los recursos del procesador.

En el Anexo A4.1 REGISTRO AUTOMÁTICO DE ARCHIVOS (Automate) se adjunta uno de los programas utilizados.

### 3.3 PROCESAMIENTO Y REPRESENTACIÓN DE DATOS

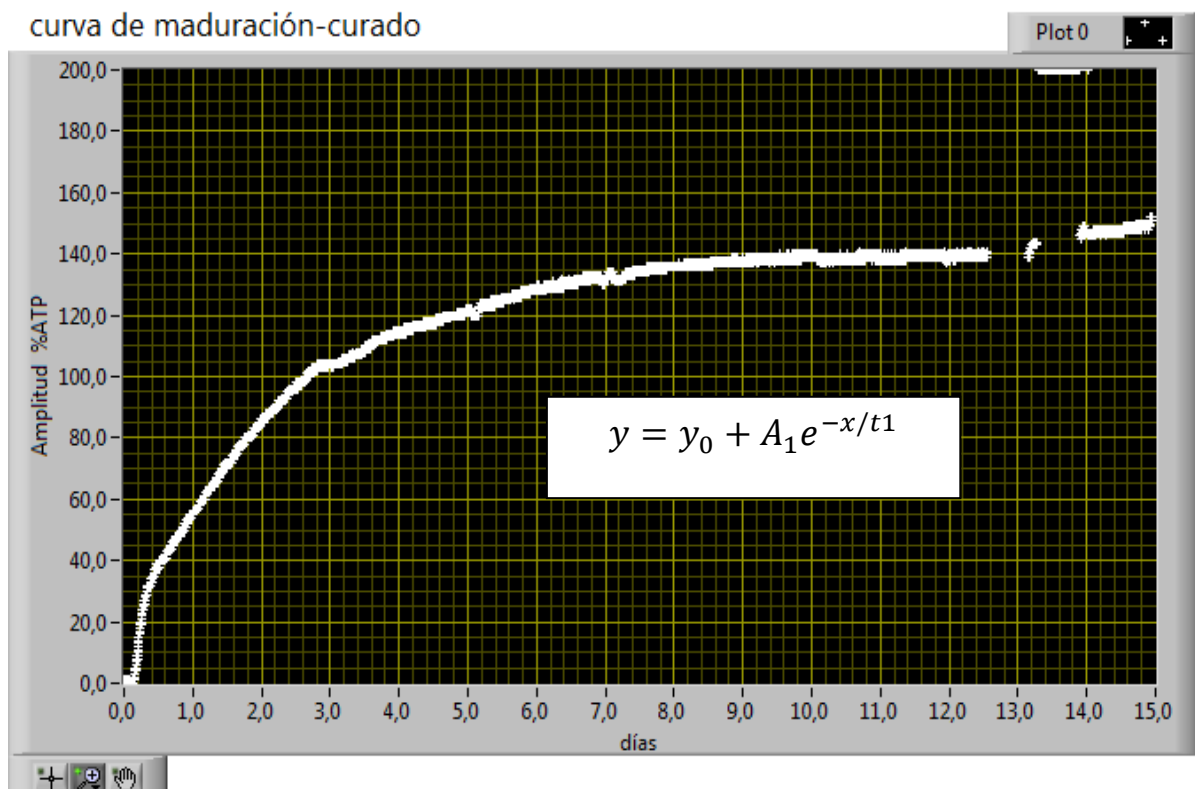
El fichero A-log, que representa la señal de UT obtenida en la pantalla del equipo de ultrasonidos, es un fichero de texto que contiene una serie de datos de los que entre ellos hay que discriminar los que van a ser de utilidad y los que no.

Primeramente el fichero guardado cuya extensión es “.ALGM335“ contiene una serie de dígitos que corresponden a los puntos de la gráfica sobre la pantalla que son los que vamos a utilizar para obtener la curva de maduración, seguidamente de una serie de ceros y otros valores como son velocidad acústica, campo de ensayo, frecuencia, ganancia, etc., son valores fijos que ya quedan definidos en las operaciones previas de calibración y ajuste del equipo de ultrasonidos.

El programa “Lectura de Ficheros.VI” se muestra en la **Figura 53** y es el que realiza estas funciones. La adquisición de señales (A-Scan) de forma continuada la realiza el programa “Visualización automática.VI” que se muestra en la **Figura 54**.

### 3.4 RESULTADOS

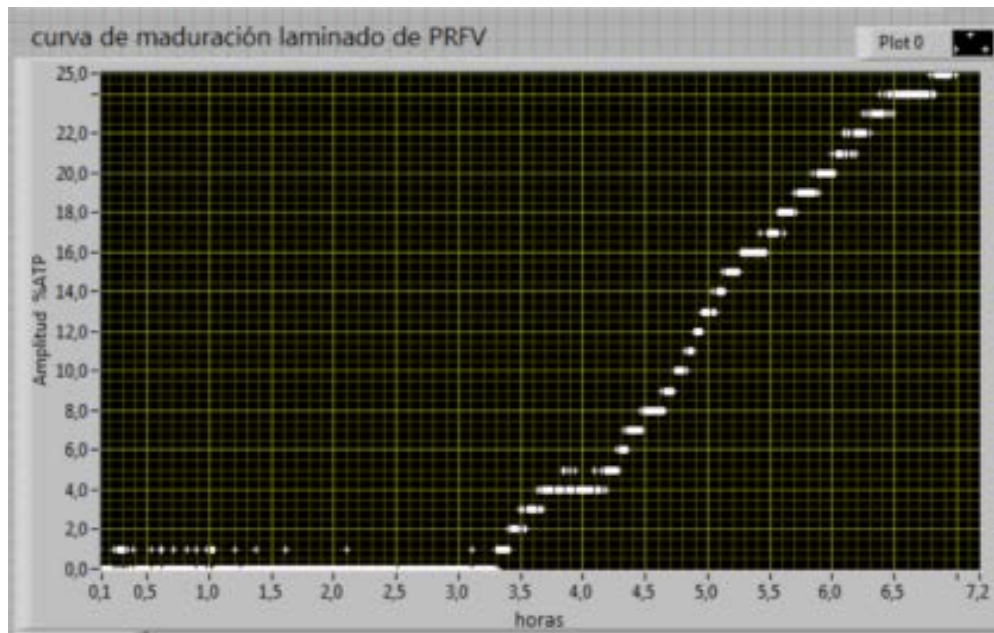
Finalmente para la obtención de la curva del ciclo completo de maduración, concretamente de los 41.085 archivos obtenidos durante los 15 días, se va a extraer el valor máximo de la amplitud de la señal o altura máxima del eco de cada uno de ellos y la fecha y hora de guardado del archivo, para poder de esta forma expresar la evolución de la señal ultrasónica respecto al tiempo. Los VI que realizan esta tarea figuran en el anexo 4, **Figura 56**, **Figura 57** y **Figura 58**.



**Figura 6.** Curva de maduración ciclo completo



La interrupción y los saltos en el registro de datos aproximadamente entre los días 12 y 14 son debidos a una inoportuna actualización automática del sistema operativo, por lo tanto en el ajuste de la curva obtenida se filtran los datos finales ya que no se contemplan como registros fiables resultando en un mejor ajuste y disminuyendo el error tal como pueden observarse en la **Figura 8** y **Figura 9**



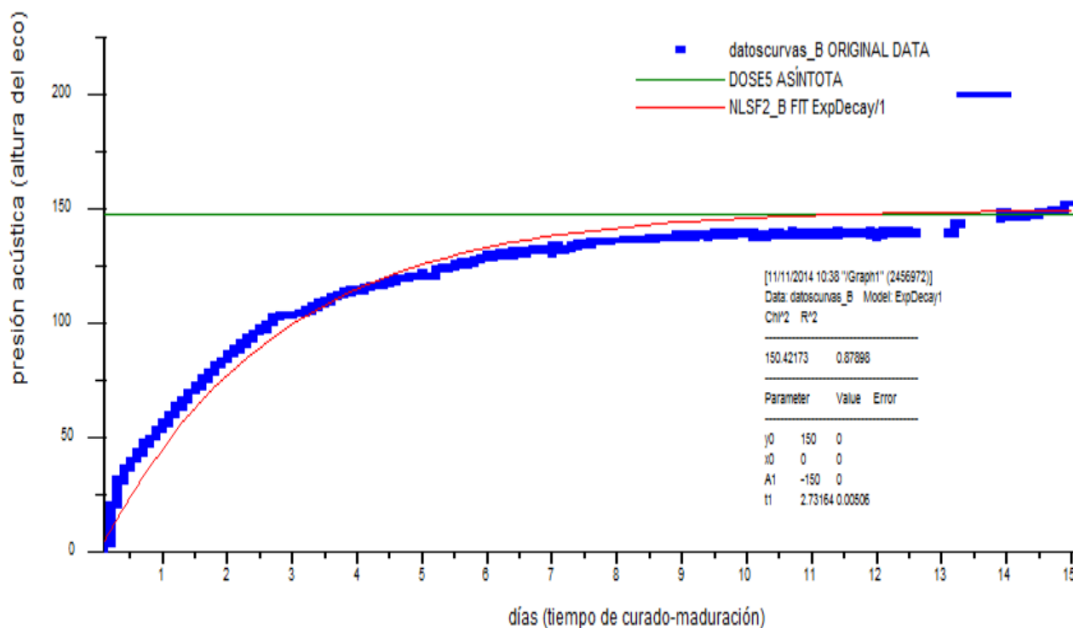
**Figura 7.** Inicio del registro de datos curva maduración a las 3 h

En la **Figura 7** puede observarse que a partir de las 3 horas aproximadamente el sistema de medición empieza a registrar las primeras deflexiones de la base de tiempos y obtenemos los ecos de inicio de registro de datos de la curva de maduración.

### 3.4.3 AJUSTE DE LA CURVA DE MADURACIÓN

Se realiza un ajuste no lineal utilizando el programa *MicroCal Origin* y obtenemos la ecuación de la curva de maduración a partir del modelo de la función “*Exponential Decay1*”:

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} \quad (49)$$

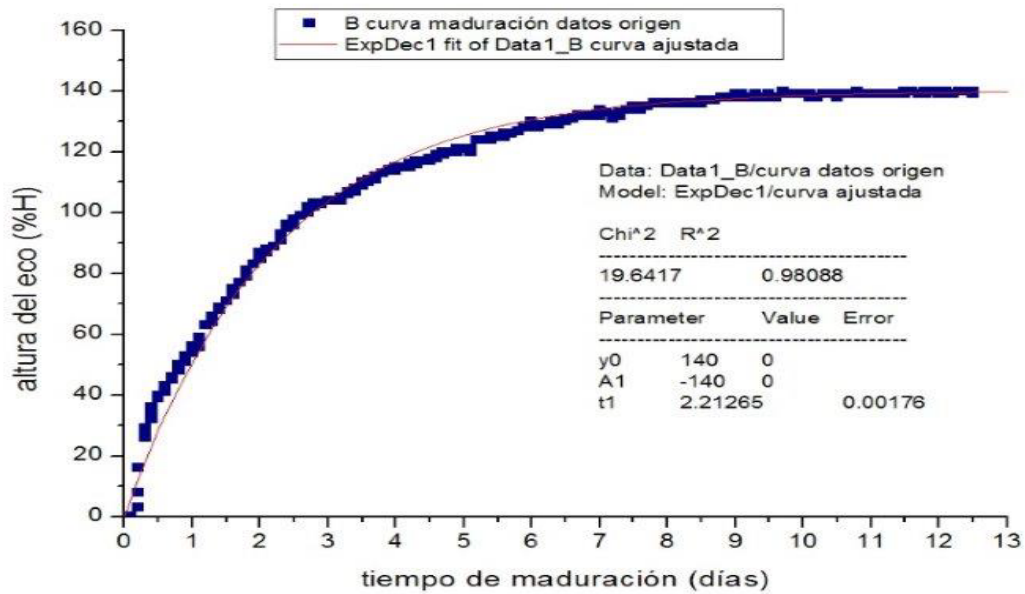


**Figura 8.** Ajuste ciclo de 15 días.

En el caso de ajustar la curva a un ciclo completo de los 15 días según muestra la **Figura 8** se obtienen los siguientes valores:

$$y = 150 - 150e^{-x/2.73164}$$

Con un  $R^2 = 0.87898$  y un error de 0.00506



**Figura 9.** Ajuste ciclo de 12,5 días

La **Figura 9** muestra el ajuste de la curva filtrando las interrupciones obteniendo los siguientes valores:

$$y = 140 - 140e^{-x/2.21265}$$

Con un  $R^2 = 0.98088$  y un error de 0.00176

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

- A medida de que el proceso de curado va avanzando y el material se va transformando desde un estado viscoelástico a un sólido rígido, la velocidad ultrasónica aumenta y la atenuación disminuye por lo que el material obtenido permite entonces la transmisión de las ondas acústicas a través del medio. Al tiempo de que la impedancia acústica del laminado va aumentando conforme el material va endureciendo, la altura del eco de la onda ultrasónica reflejada en la superficie límite del laminado va creciendo hasta alcanzar un valor máximo de saturación, lo cual puede utilizarse como indicador del grado de maduración final.
- La utilización de un equipo convencional de UT y la disponibilidad de palpadores comerciales puede facilitar en gran medida la inspección en el proceso de fabricación de embarcaciones.
- Con una frecuencia de 0,5 MHz se pueden obtener lecturas adecuadas sin necesidad de recurrir a aumentar la ganancia del equipo, desde espesores que van de 1 mm a 30 mm lo cual lo hace muy útil para medir en el rango de espesores de los cascos de las embarcaciones actuales, bien sea en la zona de quilla, pantoque, forro de costado o cubierta. El palpador de 2,25 MHz de frecuencia, a partir de los 6 mm de espesor ya presenta ecos de baja amplitud y a los 9 mm apenas alcanza una ATP de un 20%.
- La reutilización, la naturaleza no intrusiva del sensor, junto a la medición de la mayoría de las propiedades de materiales de espesores gruesos, presenta características únicas sobre otros sistemas de monitorización en proceso del curado.
- Las mayores ventajas del monitorizado del curado por ultrasonidos son debidas a (i) su carácter no destructivo, (ii) la posibilidad de

monitorización con elevada sensibilidad de todo el proceso de curado, y (iii) el potencial de usarlo durante el proceso e in situ para predecir sus propiedades finales de los materiales compuestos.

- La utilización de palpadores con acoplamiento en aire (NCU) eliminarán errores en las mediciones que inevitablemente presentan los medios de acoplamiento necesarios para el uso de transductores de contacto directo, sobre todo en sistemas basados en la medición de la atenuación ultrasónica.

## RECOMENDACIONES

- En el caso de registrar en continuo durante periodos largos es recomendable alternar el uso de los equipos de UT al objeto de no dañar la electrónica y no sobrecargar los circuitos internos (generador de impulsos).

## CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Pantelelis, N. Towards the dynamic optimization for the cure control of thermoset-matrix composite materials. s.l. : *Compos Sci Technol*, **2005**. págs. 1254-1263. Vol. 67.
2. Dorworth, L. C., Gardiner, G. L. y Mellema, G.M. Essentials of advances composite fabrication & repair. Newcastle, Washington : *Aviation Supplies & Academic, Inc.*, **2009**. págs. 26.
3. Wolfahrt, M., Pitz, G., Lang, R.W. Einfluss des Aushartegrades auf wesentliche Werkstoffeigenschaften eines Epoxidharz-Matrixwerkstoffes. [http://www.dgm.de/download/tg/706\\_78.pdf](http://www.dgm.de/download/tg/706_78.pdf). **2013**.
4. Jaunich, M. y Stark, W. Influence of curing on properties of urea resin. *Materials Testing-Materials and Components Technology and Application*. **2009**. 51(11-12). págs 828-834.
5. Trappe, V., Guenzel, S. y Jaunich, M. Correlation between crack propagation rate and cure process of epoxy resins. *Polymer Testing*. **2013**. 31(5).págs. 654-659.
6. Greene, Eric. *Marine Composites*. Maryland. : Eric Grenn Associates, Inc., **1999**. p. 300 - 308. [www.marinecomposites.com](http://www.marinecomposites.com).
7. Tejedor del Valle, Jorge. *Construcción de buques de pesca en poliéster reforzado con fibra de vidrio*. Madrid. Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos de España, **2001**. págs.41-62.
8. Scalvini, R. The Yacht report. Composite&Class. *The Yacht*. **2010**.
9. Karbhari, V. M. *The future of non-destructive evaluation (NDE) and structural health monitoring (SHM)*. [ed.] University of Tas. USA : s.n., **2013**. Chap 1.
10. Aggelis, D. G. y Paipetis, A. S. Monitoring of resin curing and hardening by ultrasound. *Const.Buid. Mater*. **2012**. 26, págs. 755 -760.
11. Mulligan, David R. *Cure Monitoring for Composites and Adhesives*. Kapra Review Reports. **2003**. Vol. 14.
12. Lodeiro, M.J y Mulligan, D. Cure Monitoring Techiques for Polymer Composites, Adhesives and Coatings. Measurement Good Practice

- Guide No. 75, Engineering and Process Control Division National Physical Laboratory National Physical Laboratory, **2005**.
13. Esposito Corcione, C. y Frigione, M. Characterization of Nanocomposites by thermal Analysis. s.l. : *Materials*, **2012**. págs. 2960-2980. Vol. 5.
  14. Stark, W, y otros, y otros. Online monitoring of termoset postcuring by dynamic mechanical thermal analysis DMTA. *Polym. Test*. págs. 561-566. Vol. 28.
  15. Esposito Corcione, C. y Maffezzoli, A. Transport properties of graphite/epoxy composites: Thermal, permeability and dielectric characteritaton. **2013**. *Polym. Test*. págs. 880-888. Vol. 32.
  16. Lionetto, F; Maffezzoli, A.;. Relaxations during the postcure of unsaturated polyester networks by ultrasonic wave propagation, dynamic mechanical analysis and dielectric analysis. *Polym. Sci. Polym. Phis*, **2005**. págs. 596-602. Vol. 43.
  17. Nikolic, G., y otros, y otros. Fast Fourier transform IR characterization of epoxy GY systems crosslinked with aliphatic and cycloaliphatic EH polyamide adducts. *Sensors*, **2010**. págs. 684-696. Vol. 10.
  18. Jiang, B. y Huang, Y. D. Near Infrared Spectroscopy for On-line Monitoring of Alkali-Free Cloth/Phenolic Resin Prepeg During Manufacture. *International Journal of Molecular Sciences*, **2007**. págs. 541-552. Vol. 8.
  19. Alig, I, y otros, y otros. Monitoring of photopolymerization kinetics and network formation by combined real-time near-infrared spectroscopy and ultrasonic reflectometry. *Reactive & Funtional Polymers. Elsevier*, **2013**.
  20. Merad, L., y otros, y otros. In situ monitoring of the curing of epoxy resins by Raman spectroscopy. *Polymer Test*. **2009**. págs. 42-45.
  21. iReMo. Intelligence REactive polymer composites Moulding. **2010**. [www.iemo.eu](http://www.iemo.eu).
  22. Danisman, M, y otros, y otros. Monitoring of resin flow in the resin transfer Moulding (RTM) process using point-voltage sensors. *Compos Sci Technol*. **2006**. págs. 367-379. Vol. 67

23. Mamalis A, Pantelelis, N y Spentzas, K. In situ process monitoring and reliable cure control applied in RTM production of epoxy/carbon fibre parts. *Comatcomp*. **2009**.
24. Ohlendorf, J. H, Hans, C. y Gharairi, Z. Intelligent Production of Rotor Blades using IT-aided Automation Approaches. *Dewi Magazin*, **2010**.
25. Zhang, J. y Pantelelis, N. Modeling and Optimization Control of Polymer Composite Moulding Processes Using Bootstrapp Agregated Neuronal Networks Models. *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*. **2009**.
26. Alfaro, E., Gámez, M y Garcia, N. Una revisión de los métodos de agregación de clasificadores. [ed.] Universidad de Castilla- La Mancha. Albacete: s.n., **2006**.
27. Vlad, M.D., Torres, E; Fernández E; Moreno J,A; López J; Barraco, M.. Does mixing affect the setting of injectable bone cement? An ultrasonic study. Barcelona. *J Mater Scie: Mater Med. Springer Science*, **2007**.
28. DeVries, D. Design of a cure Monitoring System for Composite Aircraft Repair Patches. Toronto National Library of Canada, **1996**.
29. Shepard, D.D.; Smith, K.R. A new ultrasonic measurement system for the cure monitoring of thermoseting resins and composite. *Journal of Thermal Analysis*. **1997**. Vol. 49.
30. Mulligan, D. *Cure Monitoring for Composites and Adhesives*..**2003**. pág.5-8. Cap.3.
31. Lionetto, F y Maffezzoli, A. Monitoring de Cure State of Termosetting Resins by Ultrasounds. *Materials*. **2013**. págs. 3783-3804.
32. Krautkrämer, J y Krautkrämer, H. *Ultrasonic Testing of Materials*. [ed.] Springer-Verlag. 4th. s.l. : Springer-Verlag, **1990**.
33. Lionetto, F, y otros, y otros. Phase transformations during the cure of unsaturated polyester resins. *Mater. Sci. Eng. A Struct.*, **2004**. págs. 284-287.
34. ASTM E 494-95. Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
35. Perpechko, I. *Acoustic Methods of Investigating Polymers*.Mir Publishers: Moscow. Rusia. **1975**.



36. Lionetto, F, Montagna, F y Maffezzoli, A. Ultrasonic Dynamic Mechanical Analysis of Polymers. *Applied Rheology*, **2005**.
37. Yahya Kadem, B. Study os Some Mechanical Properties of PVA/TiO<sub>2</sub> Composite by Ultrasonic Technique. *International Journal of Science and Technology*. **2011**. Vol. 1, 5.
38. Travis, J y Kring, J. *LabVIEW For Everyone*. Third Edition. **2007**.
39. Gonzalez Diez, J.L. *Materiales Compuestos. Tecnologia de los plásticos reforzados*. Madrid: Fondo editorial de Ingenieria Naval. Colegio Oficial de Ingenieros Navales, **1995**.
40. Kline, Ronald A. *Nondestructive Characterization of Composite Media*. **1992**.
41. Summerscales, John. *Non-Destructive Testing of Fibre-Reinforced Plastics Composites*. Elsevier Applied Science, **1987**. Vols.1-2.
42. Kundu, T y Kinra, V.K. On the Recent Advances od the Ultrasonic Nondestructive Evluation and Composite Material Chracterization. New York : ASME, **1999**.
43. Lionetto, F, Tarzia, A. y Maffezzoli, A. Air-coupled ultrasound: A novel technique for monitoring the curing of thermosetting matrices. *Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. IEEE Trans, **2007**. págs. 1437-1444.
44. Fomitchov, Pavel A., y otros Distributed photoacoustic system for cure monitoring of composites. *Advanced Nondestructive Evaluation for Structural and Biological Health Monitoring*. **2001**.
45. Lloyd's, Register. Rules and Regulations. *Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Hull Construction in Composite*. Section 2 Materials. **2005**.
46. Hegg, Michael C., y otros. Remote Monitoring of Resin Transfer Molding Processes by Distributed Dielectric Sensors. *Journal of Composite Materials*. **2005**. Vol. 39.
47. Fomitchov, Pavel A, y otros, y otros. Laser Ultrasonic Array System for Real-Time Cure Monitoring og Polymer-Matrix Composites. *Journal of Composite Materials*. **2002**. págs. 1809-1901. Vol. 36.

48. Kumar, Ramesh, y otros. Ultrasonic Nondestructive Optimization for Development of Resin Infusion Process Composite Co-Cured Wing. *Material Evaluation*. **2011**.
49. Partridge, Ivana. Monitoring Cure in High Performance Composites. Bristol. *University of Bristol. Advanced Composites Centre for Innovation & Science*. **2013**.
50. Pantelelis, N. y Maistros, G. Process monitoring for liquid composite moulding using durable sensors. *Proceedings of 27th Risoe International Symposium on Materials Science*. 2006. págs. 279-285.
51. Non-Contact Ultrasound. Composites Analysis Application. .2006. [www.ultrangroup.com](http://www.ultrangroup.com).
52. Bades, Alan. Ultrasonic Condition Monitoring. *Materials Evaluation* **2012**.
53. Shenoj, R.A. y Wellicome, J.F. *Composite Materials in Maritime Structures*. Cambridge Ocean Technology Series, **1993**.
54. Eurotherm. Instruction Manual for the Barber-Colman. Impressor Hand-Held Portable Hardness Tester.
55. Vun, Ronnie; Eischeid, T.; Bhardwaj, M. .Quantitative NON-Contact Ultrasound Testing and Analisis of Materials for Process and Quality Control. ECNDT. **2006**.
55. Bessednjak, Al. *Materiales compuestos: Procesos de fabricación*. **2005**. Ediciones UPC.
56. UNE 53-276-81. Plásticos. Preparación de estratificados de fibra de vidrio-resina, a baja presión, para la realización de probetas de ensayo.
57. UNE-EN ISO 527-4:1997. Plásticos. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras.
58. UNE 53-270-76. Materiales plásticos. Ensayo de dureza Barcol.
59. UNE-ISO 3534-1:2008. Estadística. Vocabulario y símbolos. Parte 1: Términos estadísticos generales y términos empleados en el cálculo de probabilidades
60. UNE-EN 583-1:1999. Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 1: Principios generales.

61. UNE-EN 583-2:1999. Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 2: Sensibilidad y rango de ajuste.
62. UNE-EN ISO 12215-1: 2001. Embarcaciones de recreo. Construcción de cascos y escantillones. Parte 1: Materiales: Resinas termoestables, refuerzos de fibra de vidrio, laminado de referencia.
63. UNE-EN ISO 12215-4: 2001. Embarcaciones de recreo. Construcción de cascos y escantillones. Parte 4: Talleres y fabricación.
64. UNE-ISO 3534-1:2008. Estadística. Términos estadísticos generales y términos empleados en el cálculo de probabilidades.
65. UNE 66040:2003. Interpretación estadística de los resultados de un ensayo. Estimación de la media. Intervalo de confianza.
66. EN-12668-1: 2000 Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen por ultrasonidos.
67. ASTM D2583-07. Standard Test Method for indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor.
68. ASTM E 494-95. Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
69. ASTM D-618-08. Standard Practice for Conditioning Plastics for testing.
70. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Hull Construction in Composite. Constriction Procedure. Materials. Rulefinder v9.4. 2005.
71. Rules for Classification and Construction Ship Technology. Germanischer Lloyd. 2002.
72. Offshore Racing Yachts. Guide for Building and Classing. 1995. Sec.5. Fabrication and Quality Control. American Bureau of Shipping. 1994.
73. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Hull Construction in Composite. Constriction Procedure. Materials. Rulefinder v9.4. 2005.

## ANEXOS

## ANEXO 1 ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

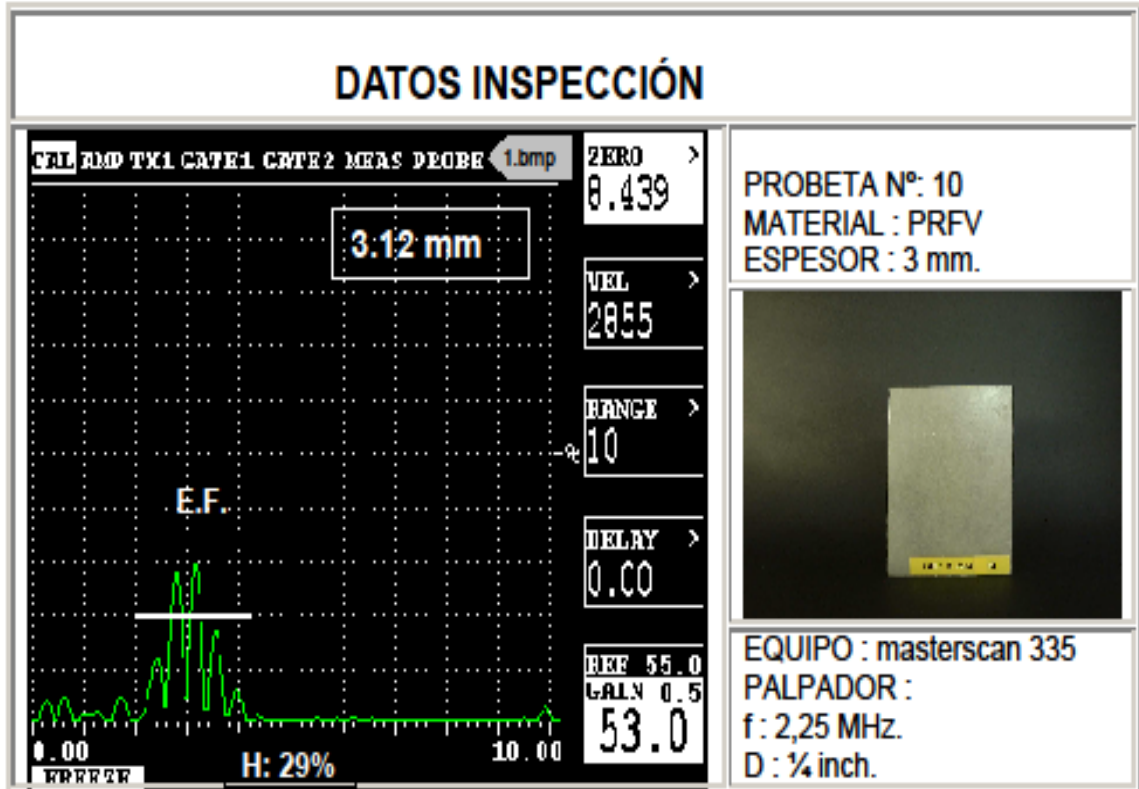
### A1.1 CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYO

Previo a la monitorización del curado y con la finalidad de seleccionar la frecuencia del palpador y parámetros ultrasónicos adecuados a los espesores a medir, que en nuestro caso se trata de probetas de 10 mm de espesor, se construyen una serie de probetas de PRFV de diferentes espesores: 3, 6, 9 y 18 mm. y se ensayan con palpadores de frecuencias 0.5 MHz y 2,25 MHz.

	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA N°10 .P.R.F.V. 3 mm</b></p> <p>Las dimensiones de diseño de la probeta son de 100x140mm y 3 mm. de espesor. En realidad, después del proceso de curado, las dimensiones son de 95 x 130 mm y un espesor medio de 3.2 mm.</p> <p>Consta de 4 capas de mat de 300 g. (0.8 mm x capa), con una cantidad de resina de 10.5 g. x capa y 2.62 gotes de catalizador x capa.</p> <p>Las condiciones ambientales del laboratorio son: 58% de humedad y 22 °C.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA N°11 .P.R.F.V. 6 mm</b></p> <p>Las dimensiones de diseño de la probeta son de 100x140mm y 6 mm. de espesor. Después del proceso de curado, las dimensiones son de 95 x 130 mm y un espesor medio de 6.1 mm.</p> <p>Consta de 8 capas de mat de 300 g. (0.8 mm x capa), con una cantidad de resina de 10.5 g. x capa y 2.62 gotes de catalizador x capa.</p> <p>Las condiciones ambientales del laboratorio son: 58% de humedad y 22 °C.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA N°12 .P.R.F.V. 9 mm</b></p> <p>Las dimensiones de diseño de la probeta son de 100x140mm y 9 mm. de espesor. Después del proceso de curado, las dimensiones son de 95 x 130 mm y un espesor medio de 8.4 mm.</p> <p>Consta de 11 capas de mat de 300 g. (0.8 mm x capa), con una cantidad de resina de 10.5 g. x capa y 2.62 gotes de catalizador x capa.</p> <p>Las condiciones ambientales del laboratorio son: 58% de humedad y 22 °C.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA N°9 .P.R.F.V. 12 mm</b></p> <p>Las dimensiones de la probeta son de 196x160mm y 12 mm. de espesor. (11,2 mm de espesor medio).</p>
	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA N°13 .P.R.F.V. 18 mm</b></p> <p>Las dimensiones de diseño de la probeta son de 100x140mm y 18 mm. de espesor. Después del proceso de curado, las dimensiones son de 100 x 150 mm y un espesor medio de 18.3 mm.</p> <p>Consta de 25 capas de mat de 300 g. (0.8 mm x capa), con una cantidad de resina de 10.5 g. x capa y 2.62 gotes de catalizador x capa.</p> <p>Las condiciones ambientales del laboratorio son: 58% de humedad y 22 °C.</p>

**Figura 10.** Serie de probetas para calibración y ajuste equipo UT

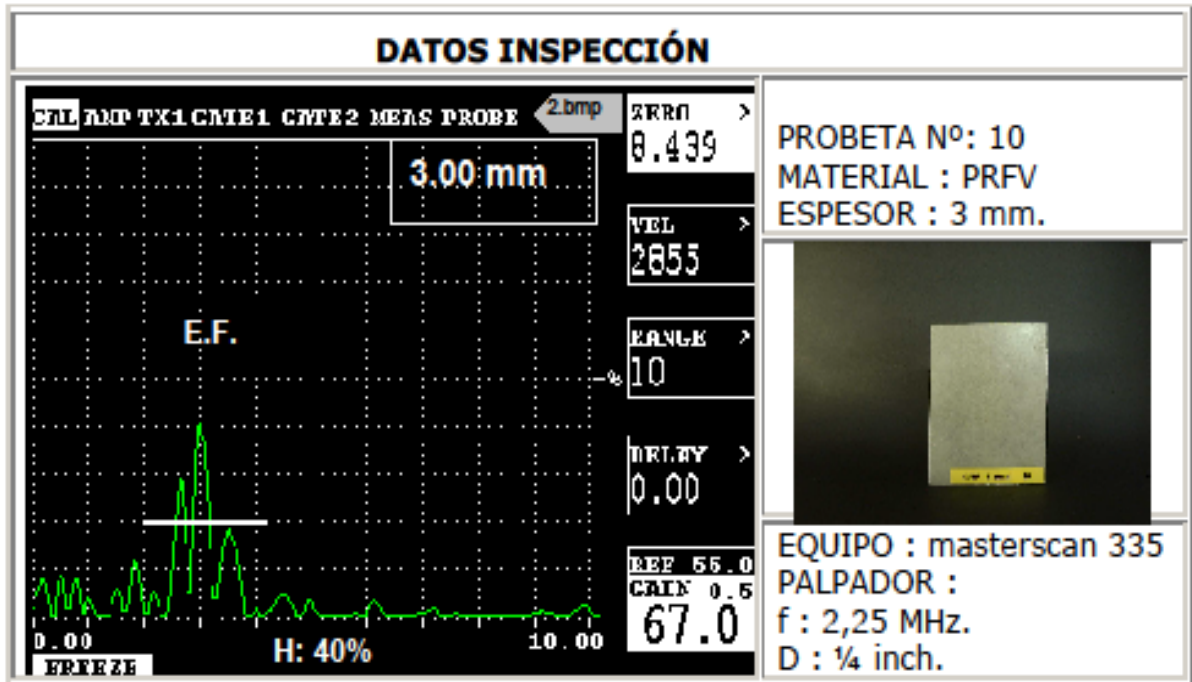
**1.1 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHz. A-SCAN.**



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 53.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 2.00	BLANK : 34.0
ZERO : 8.439	WIDTH : 2.16	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.855	LEVEL : 20.0	START : 2.00
RANGE : 10	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.68	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

**Figura 11.** UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/Gain=53 dB

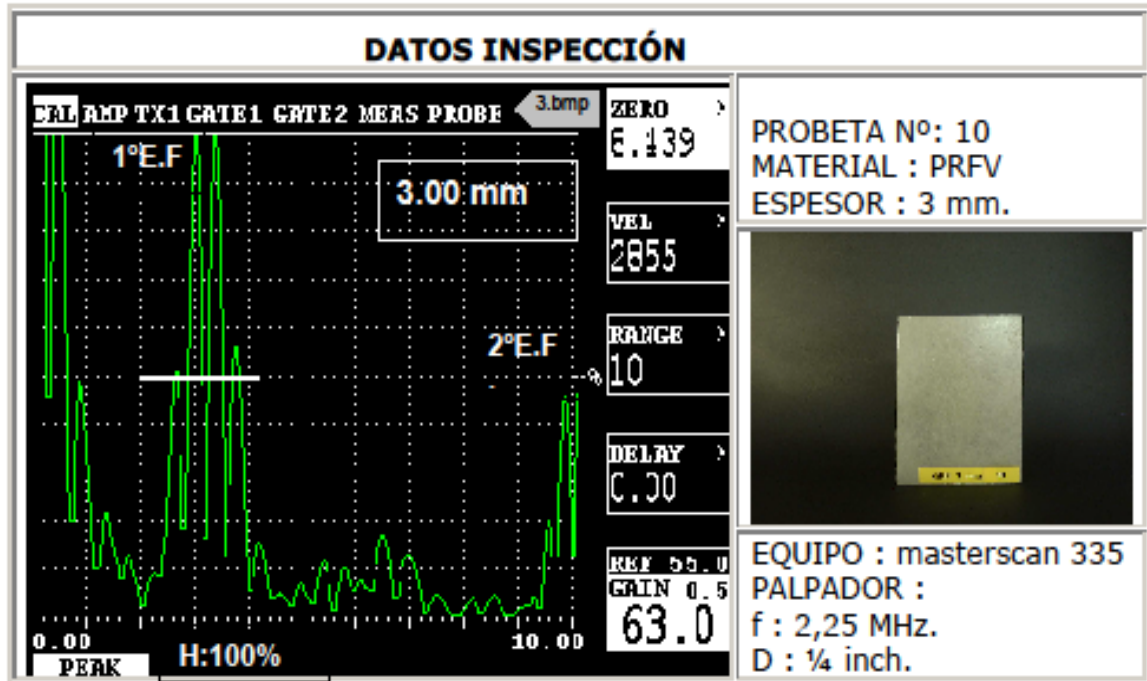
## 1.2 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHz. A-SCAN.



<b>DATOS CALIBRACION</b>		
<b>GAIN : 67.0 *</b>	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 2.00	BLANK : 34.0
ZERO : 8.439	WIDTH : 2.16	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.855	LEVEL : 20.0	START : 2.00
RANGE : 10	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
<b>FREQ : WIDE *</b>	WIDTH : 11.68	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
<b>TX WIDTH : 20 *</b>	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

Figura 12. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=67 dB

### 1.3 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.

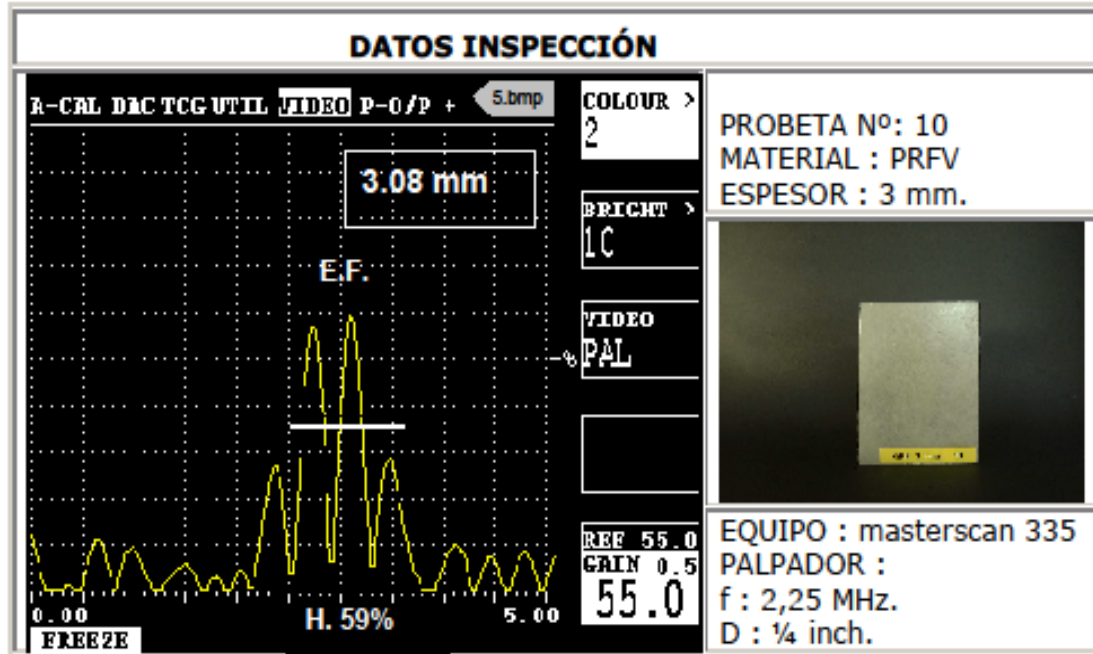


DATOS CALIBRACION		
GAIN : 63.0 *	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 2.00	BLANK : 34.0
ZERO : 8.439	WIDTH : 2.16	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.855	LEVEL : 20.0	START : 2.00
RANGE : 10	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz *	WIDTH : 11.68	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250 *	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

Figura 13. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=2,25Mhz/G=63dB



#### 1.4 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.

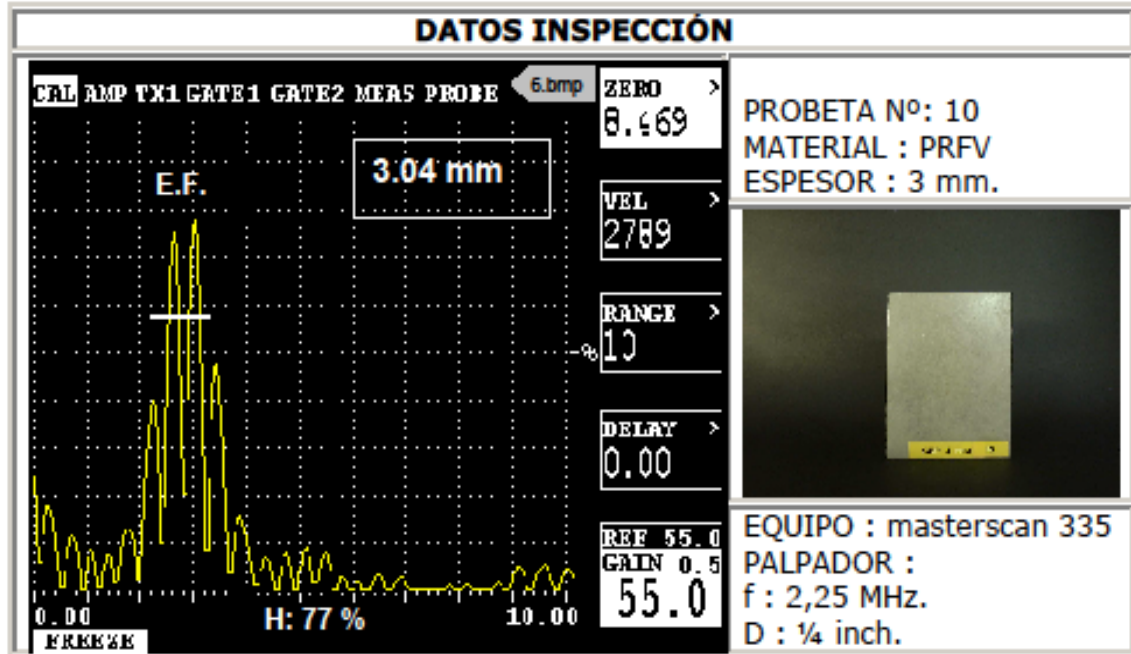


DATOS CALIBRACION		
GAIN : 55.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 2.52	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 1.08	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 35.5	START : 2.52
<b>RANGE : 5</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.44	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA: Campo de ensayo de 5 mm. con velocidad de referencia probeta n°11.

Figura 14. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=55 dB

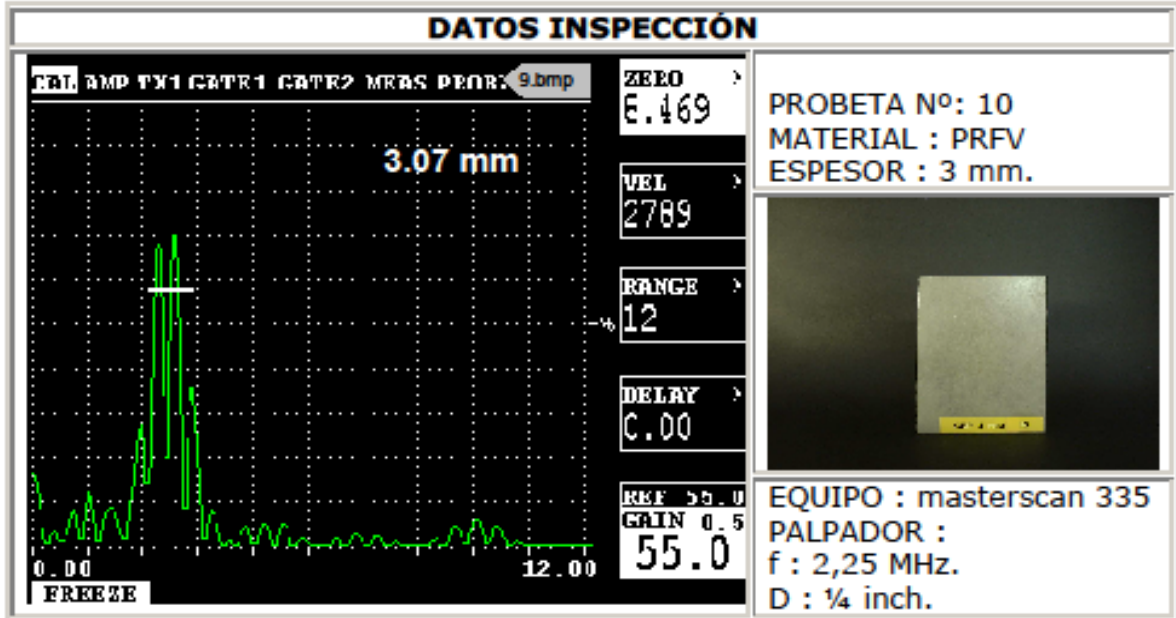
**1.5 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.**



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 55.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 2.52	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 1.08	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 35.5	START : 2.52
<b>RANGE : 10</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.44	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

Figura 15. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=55 dB/R=10 mm

**1.6 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHz. A-SCAN.**



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 55.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 2.54	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 0.91	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 58	START : 2.54
<b>RANGE : 12</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.42	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	



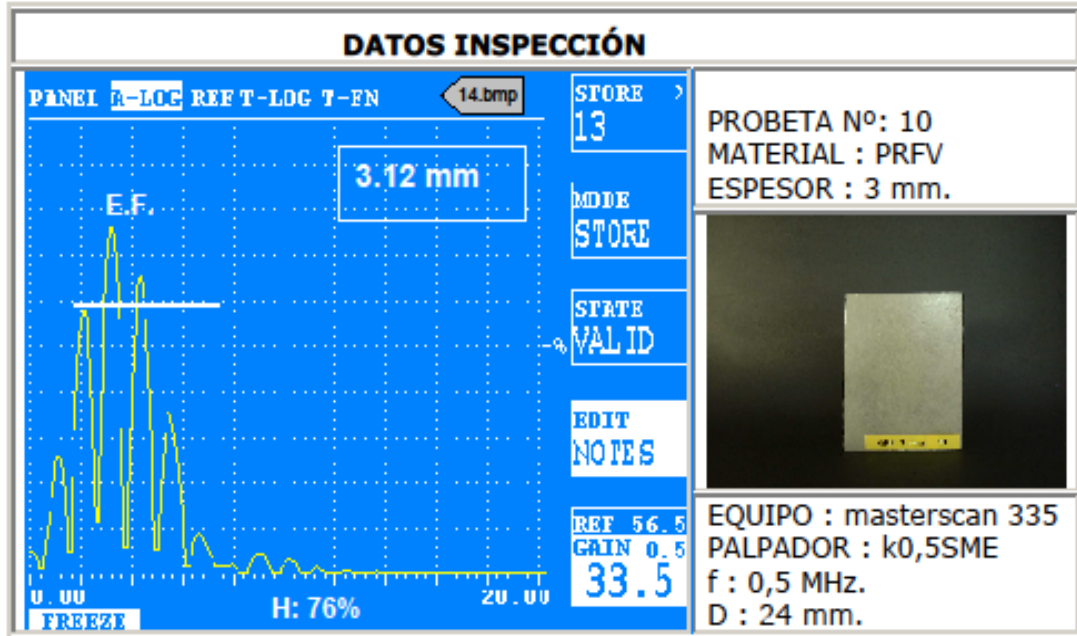
NOTA: Ver atenuación a 6 mm.(probeta n°11 ) y 9 mm. ( probeta n°12 )

Figura 16. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=2,25 MHz/G=55 dB/R=12 mm

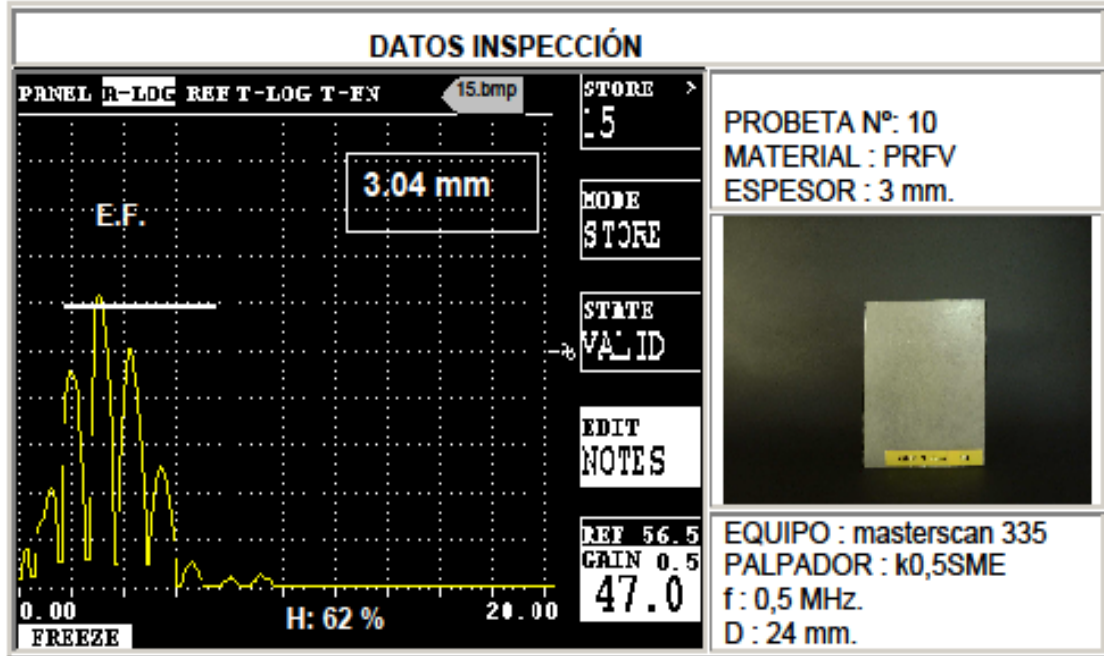
### 1.7 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHz. A-SCAN.



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 33.5	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 1.76	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 5.60	DIST 2 : 6
VEL : 2.361	LEVEL : 59.5	START : 1.76
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 1 MHz	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

Figura 17. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f= 0,5 Mhz/G=33.5 Mhz

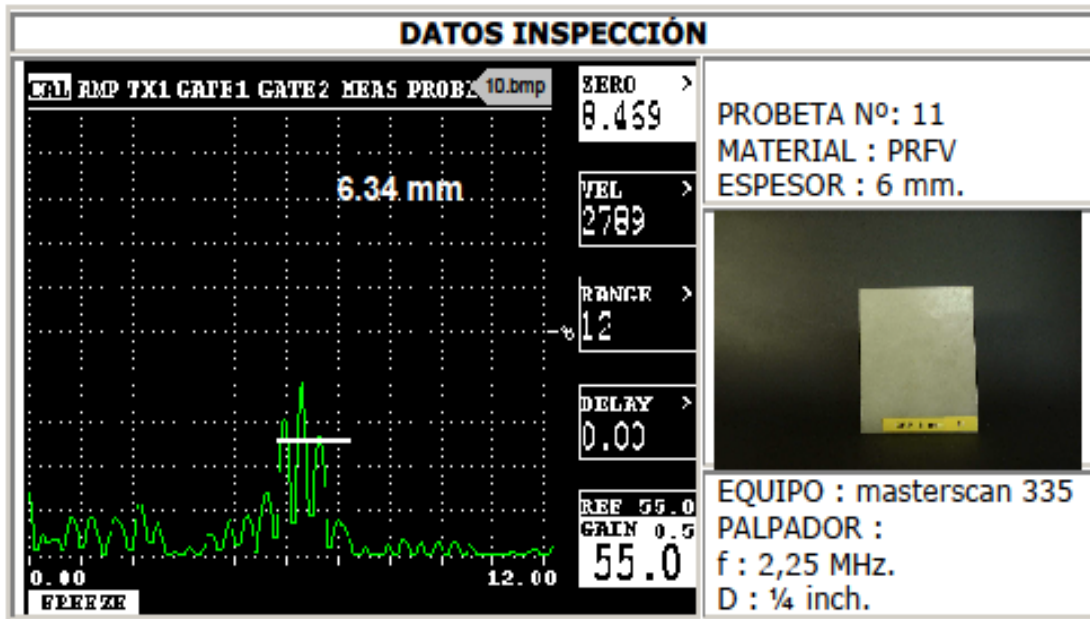
**1.8 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°10 DE P.R.F.V. DE 3 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.**



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 47.0 *	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 1.76	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 5.60	DIST 2 : 6
VEL : 2.361	LEVEL : 59.5	START : 1.76
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : WIDE *	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE : OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	



Figura 18. UT probeta n° 10: e= 3 mm/f=0,5 MHz/G=47 dB

## 2.1 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°11 DE P.R.F.V. DE 6 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.



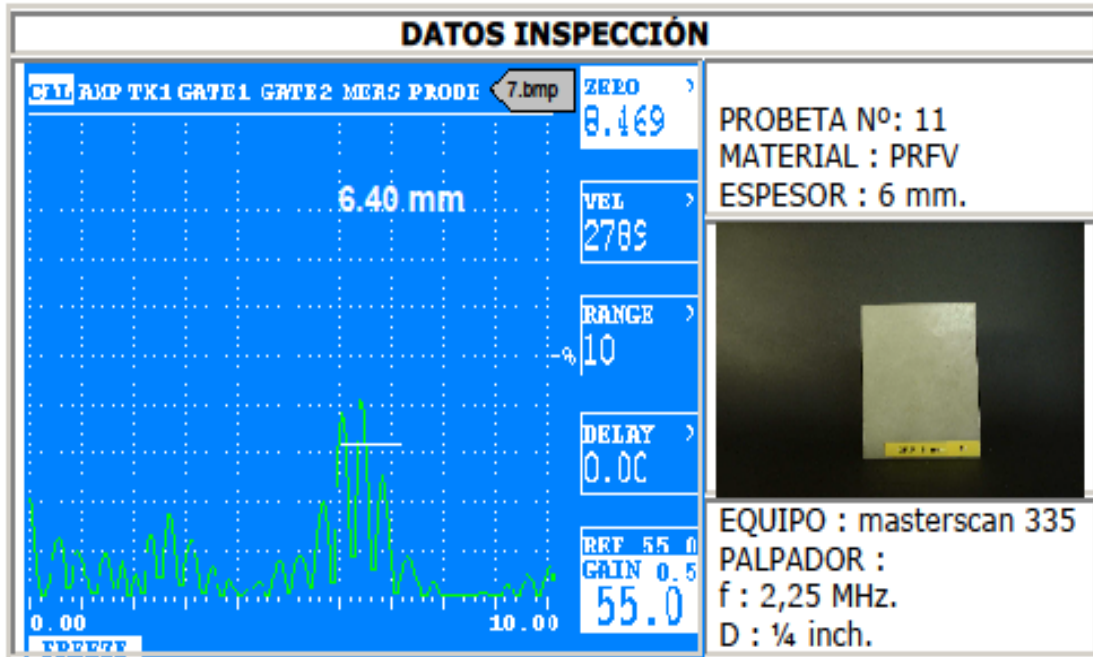
**DATOS CALIBRACION**

GAIN : 55.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 5.76	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 1.68	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 26.0	START : 5.76
<b>RANGE : 12</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.42	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA: Ver atenuación a 3 mm.(probeta n°10 ) y 9 mm. ( probeta n°12 )

**Figura 19.** UT probeta n° 11: e= 6 mm/f=2,25 Mhz /G=55 dB/R=12

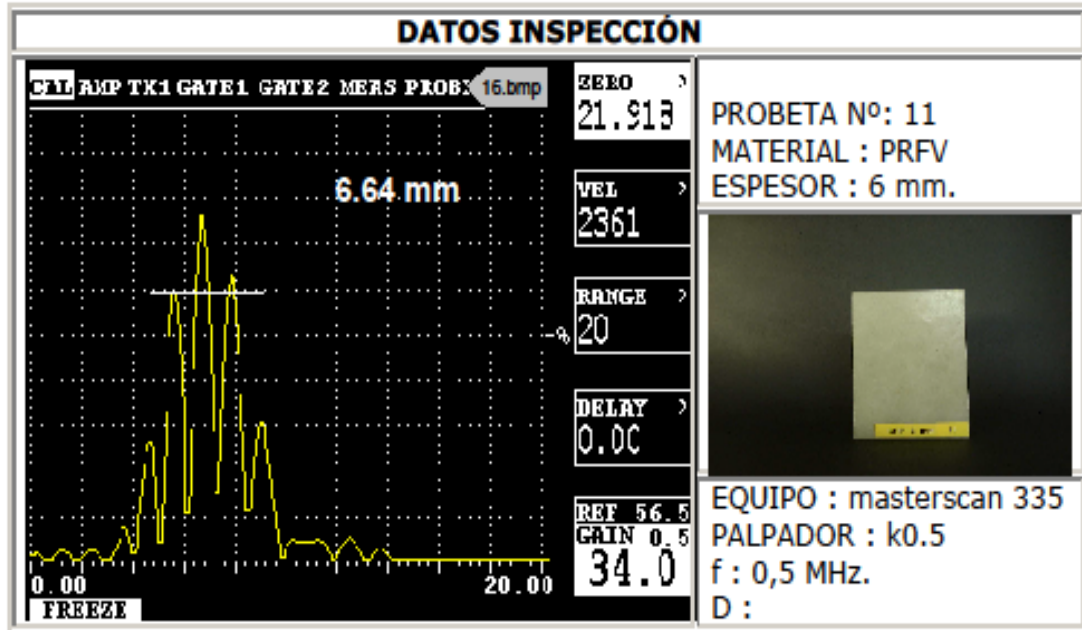
### 2.3 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°11 DE P.R.F.V. DE 6 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.



DATOS CALIBRACION		
<b>GAIN : 55.0</b>	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 6.04	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 1.08	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 32.0	START : 6.04
RANGE : 10	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.44	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

Figura 20. UT probeta n° 11: e= 6 mm/f=2,25Mhz/G=55 dB/R=10

## 2.4 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°11 DE P.R.F.V. DE 6 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHz. A-SCAN.



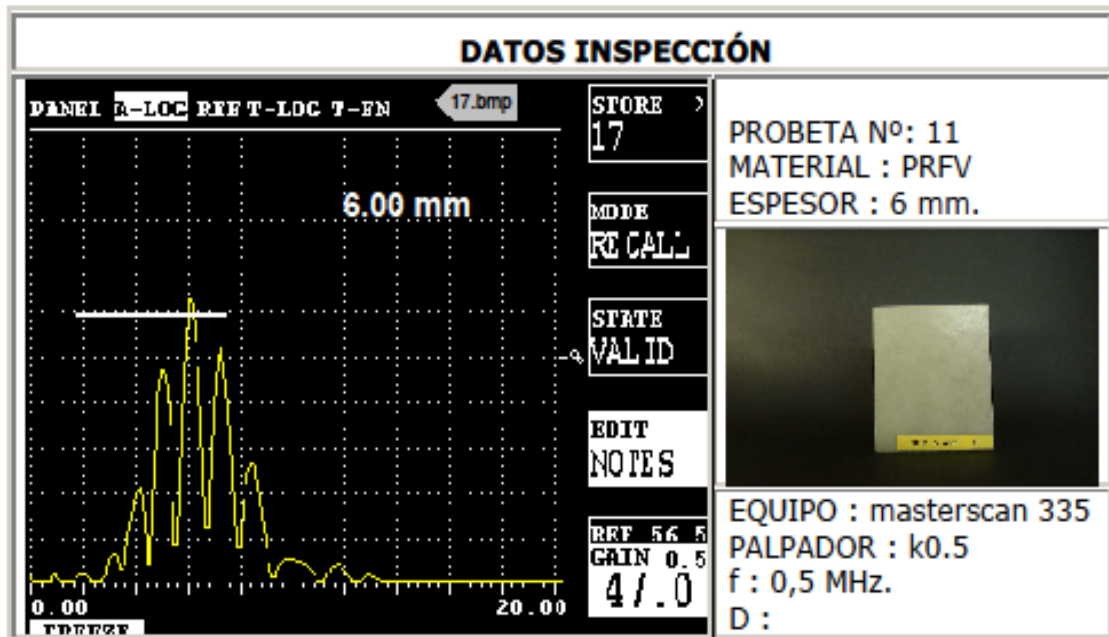
DATOS CALIBRACION		
<b>GAIN : 34.0</b>	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 4.72	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.32	DIST 2 : 6.0
<b>VEL : 2.361</b>	LEVEL : 59.5	START : 4.72
<b>RANGE : 20</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
<b>FREQ : 1 MHz</b>	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
<b>TX WIDTH : 500</b>	HUD : DIST	MODE : OFF
<b>DAMPING : 400</b>	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
<b>PRF MAX : 500 Hz</b>	TRIGGER : PEAK	

NOTA: Esta configuración puede dañar el cristal del palpador, por lo que deben modificarse alguno de los parámetros señalados en rojo. En el oscilograma 17.bmp se reduce el TXWIDTH a 100 y la FREQ: WIDE. En la 18.bmp se reduce el disparo de 400 V. a 200 V. compensando la disminución de la altura del eco aumentando la ganancia.

Figura 21. UT probeta n° 11: e= 6 mm/f==0,5 Mhz/G=34 dB



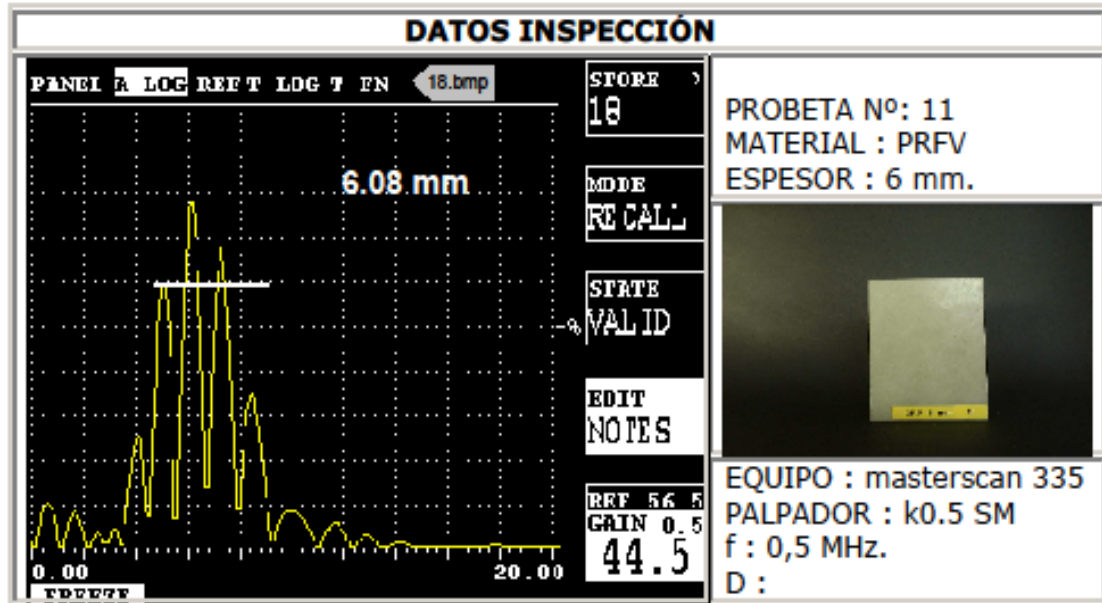
## 2.5 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°11 DE P.R.F.V. DE 6 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHz. A-SCAN.



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 47.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 1.76	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 5.60	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 59.5	START : 1.76
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : WIDE	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 100	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

Figura 22. UT probeta n° 11: e= 6 mm/f=0,5 MHz/G=47 dB

## 2.6 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°11 DE P.R.F.V. DE 6 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHZ. A-SCAN.

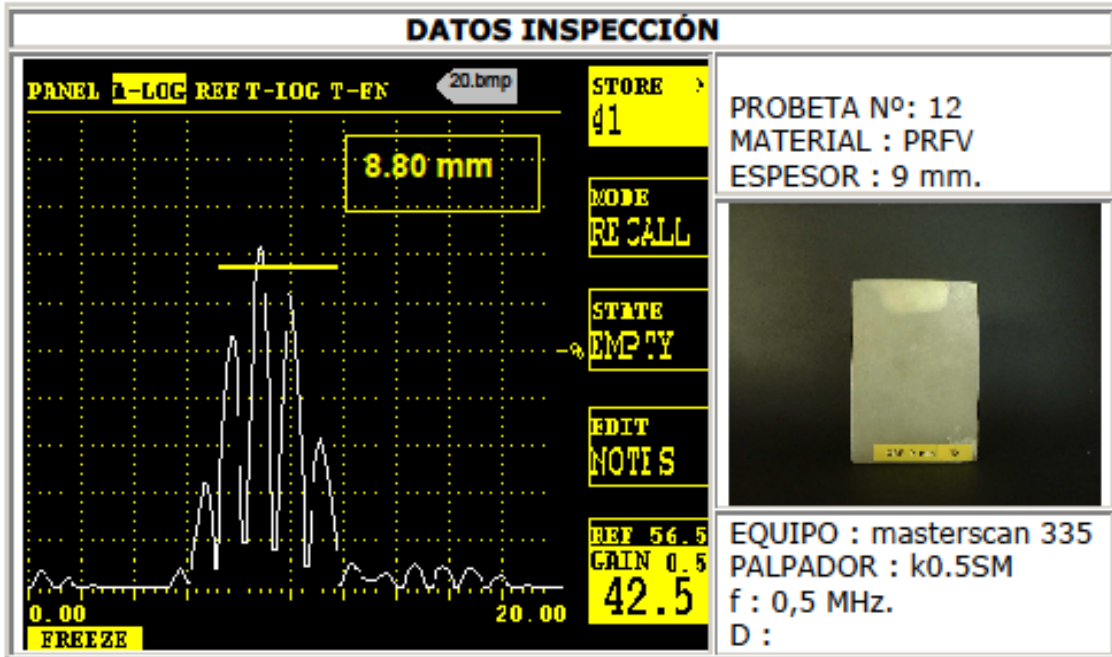


<b>DATOS CALIBRACION</b>		
<b>GAIN : 44.5</b>	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 4.72	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.32	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 59.5	START : 4.72
RANGE :20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
<b>FREQ : 1 Mhz</b>	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA: disparo a 200 V.

**Figura 23.** UT probeta n° 11: e= 6 mm/f=0,5 MHz/G=44,5

**3.1 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°12 DE P.R.F.V. DE 9 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHz. A-SCAN.**

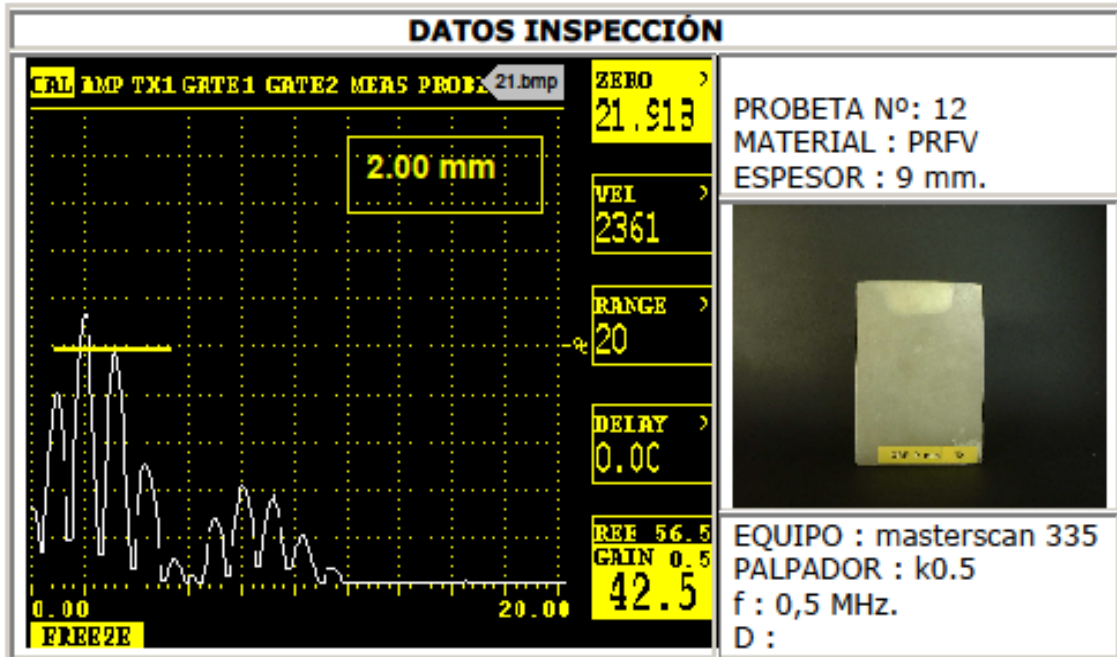


DATOS CALIBRACION		
GAIN : 42.5	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 7.28	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.32	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 67.5	START : 7.28
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 1 MHz	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA. Disparo a 200 V.

**Figura 24.** UT probeta n° 12: e= 9 mm/f=0,5 MHz/G=42,5 dB

### 3.2 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°12 DE P.R.F.V. DE 9 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHZ. A-SCAN.

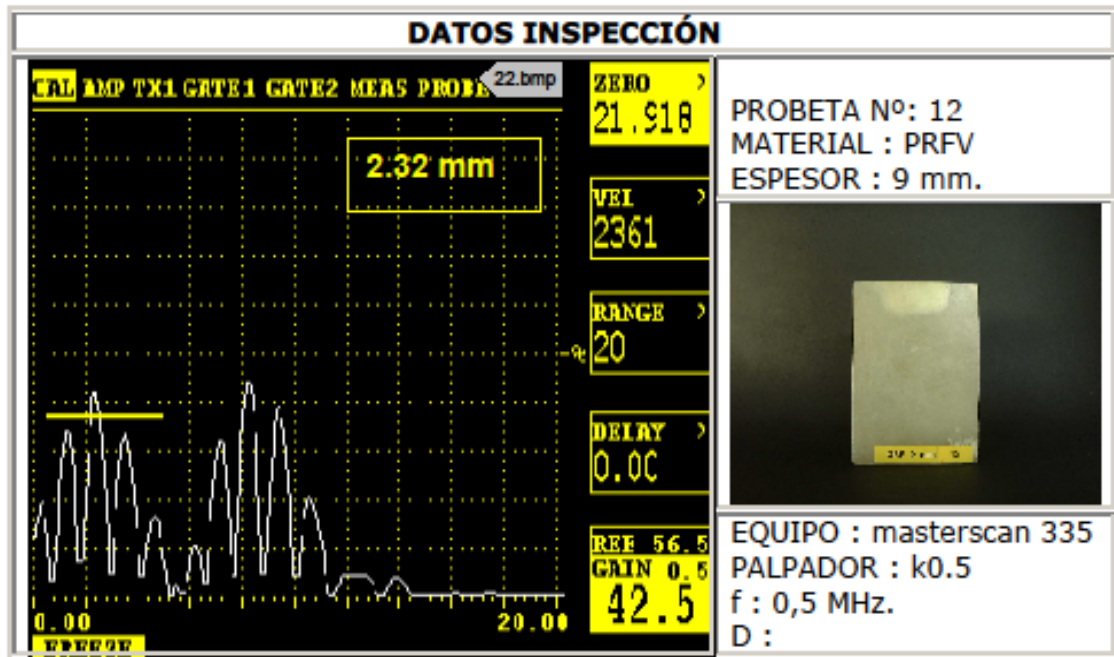


DATOS CALIBRACION		
GAIN : 42.5	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 0.88	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.32	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 67.5	START : 0.88
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 1 MHz	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA. Disparo a 200 V. Delaminación.

Figura 25. UT probeta n° 12: e= 9mm/f=0,5 MHz/G=42,5 dB

### 3.3 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°12 DE P.R.F.V. DE 9 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHZ. A-SCAN.

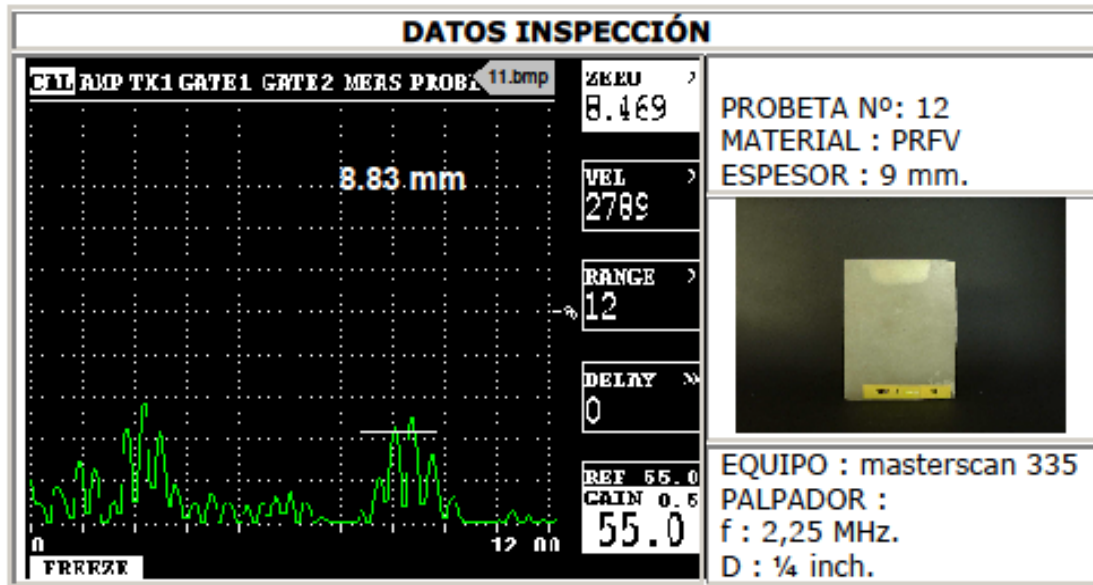


DATOS CALIBRACION		
GAIN : 42.5	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 0.56	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.32	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 37.5	START : 0.56
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 1 MHz	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA. Delaminación y eco de fondo al 50%.

**Figura 26.** UT probeta n° 12: e= 9 mm/F=0,5MHz/G=42,5 dB/delaminación

### 3.4 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°12 DE P.R.F.V. DE 9 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 55.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 7.68	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 1.68	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 22.0	START : 7.68
<b>RANGE : 12</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.42	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	



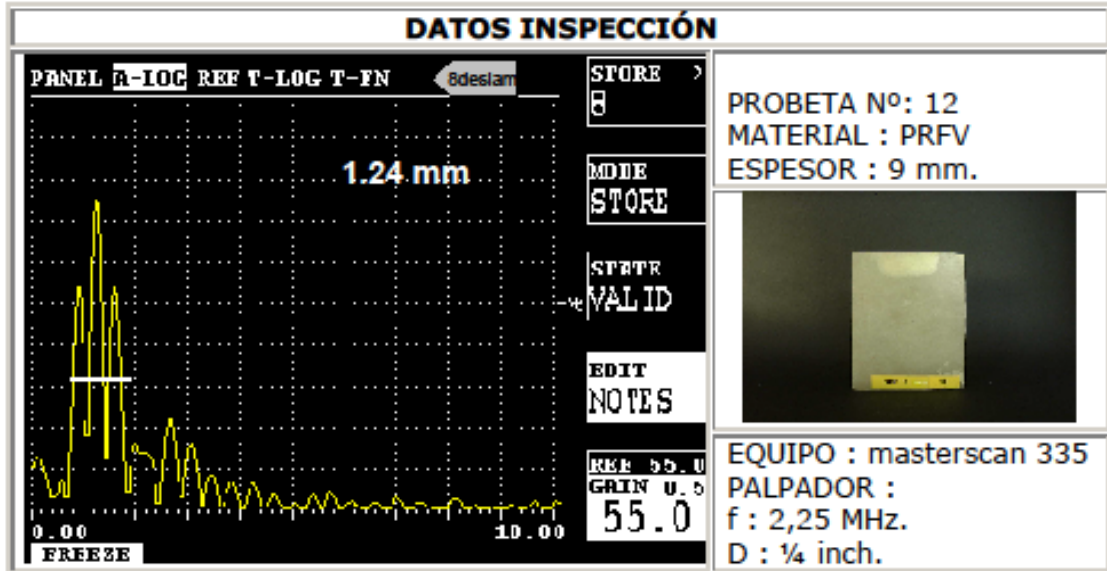
NOTA: Ver atenuación a 3 mm. (probeta n°10 ) y 6 mm. ( probeta n°11 )  
 NOTA: a 9 mm. límite con el palpador de 2.25 MHz.

Figura 27. UT probeta n° 12: e= 9mm/f=2,25 MHz/G=55 dB

### 3.5 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°12 DE P.R.F.V. DE 9 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 2.25MHZ. A-SCAN.

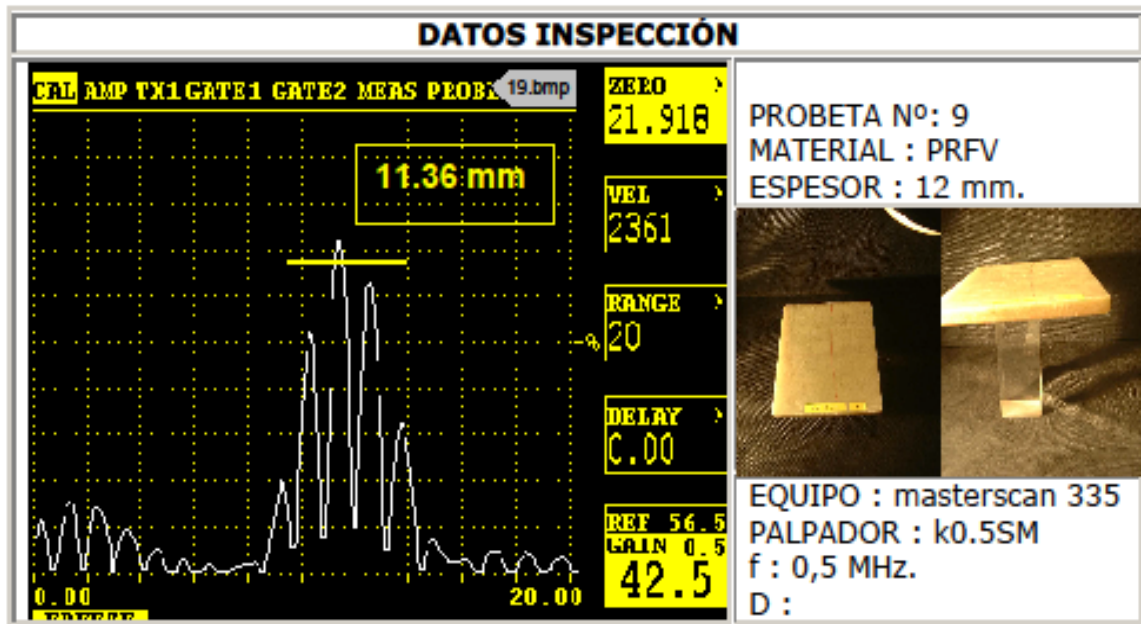


DATOS CALIBRACION		
GAIN : 55.0	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 55.0	START : 0.76	BLANK : 34.0
ZERO : 8.469	WIDTH : 1.08	DIST 2 : 3.2
VEL : 2.789	LEVEL : 32.0	START : 0.76
<b>RANGE : 10</b>	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 2 MHz	WIDTH : 11.44	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA: Delaminación

Figura 28. UT probeta n° 12: e= 9 mm/delaminación a 1,24 mm

#### 4.1 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°9 DE P.R.F.V. DE 12 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHz. A-SCAN.



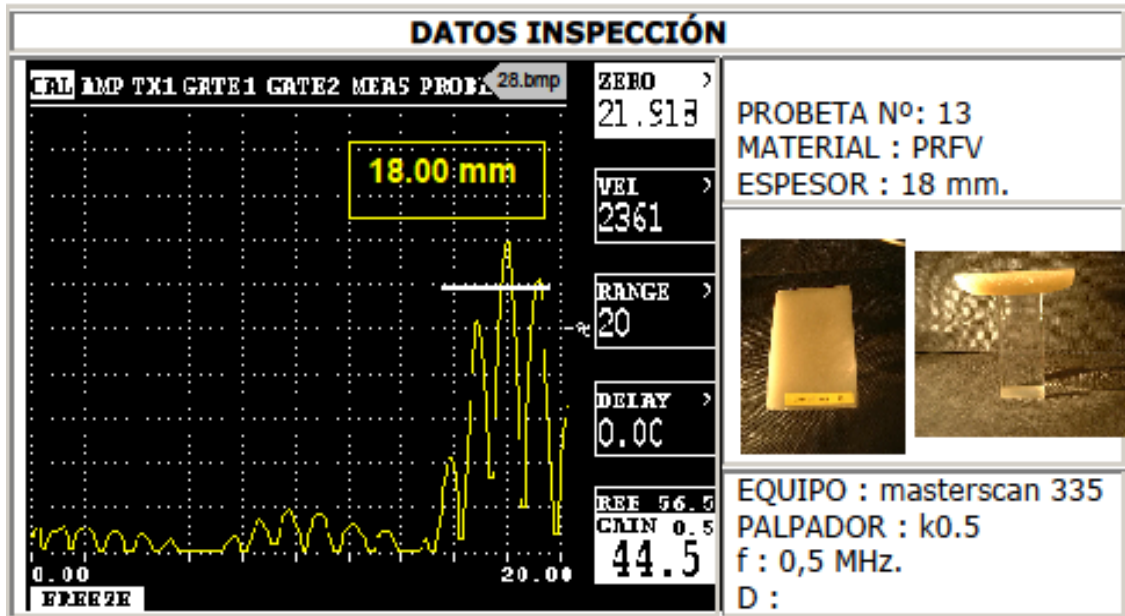
DATOS CALIBRACION		
GAIN : 42.5	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 9.52	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.32	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 67.5	START : 9.52
RANGE :20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 1 MHz	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 500	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

NOTA: Disparo a 200 V.

Figura 29: UT probeta n° 9: e= 12 mm/f=0,5 MHz/G=42,5 dB



### 5.1 MEDICIÓN PULSO-ECO PROBETA N°13 DE P.R.F.V. DE 18 mm. DE ESPESOR CON PALPADOR DE 0.5MHz. A-SCAN.



DATOS CALIBRACION		
GAIN : 44.5	STATE : ON+VE	HUD : DIST
REF : 56.5	START : 15.52	BLANK : 34.0
ZERO : 21.918	WIDTH : 4.00	DIST 2 : 6.0
VEL : 2.361	LEVEL : 59.5	START : 15.52
RANGE : 20	STATE : OFF	MODE : OFF
DELAY : 0.00	START : 0.00	CURVE : DAC
FREQ : 1 MHz	WIDTH : 9.60	TRIGGER : DAC
DETECT : FULL	LEVEL : 31.0	MODE : OFF
REJECT : 0	MODE : DEPTH	CURVE : DAC
CONTOUR : 0	TRIGGER : PEAK	TRIGGER : DAC
TX WIDTH : 250	HUD : DIST	MODE : OFF
DAMPING : 400	T-MIN : OFF	UNITS : METRIC
TX MODE : SINGLE	MODE : E-E	MODE: OFF
PRF MAX : 500 Hz	TRIGGER : PEAK	

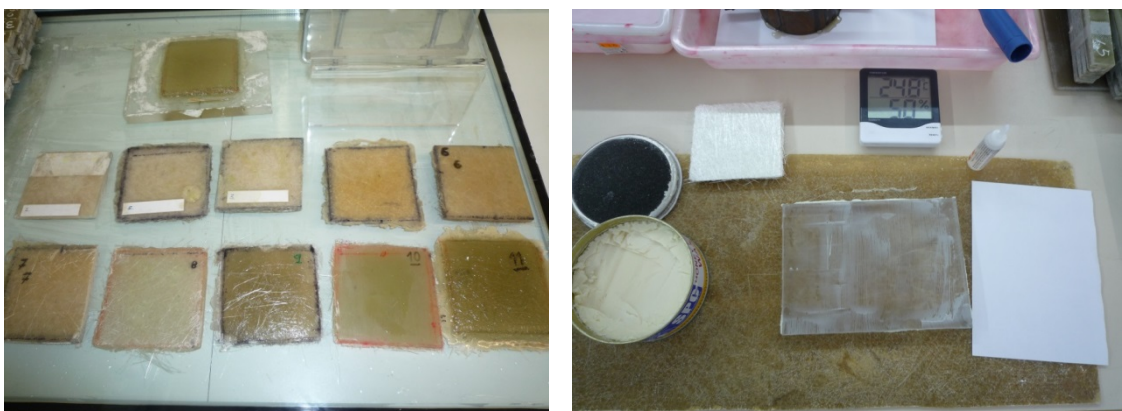
Figura 30. UT probeta n° 13: e= 18 mm/F=0,5 MHz/G=44,5 dB

A la vista de los resultados obtenidos finalmente se selecciona el palpador de 0,5 MHz de frecuencia ya que su respuesta es mejor para ensayar un espesor de 10 mm tal y como puede observarse los oscilogramas.

Con una frecuencia de 0,5 MHz se pueden obtener lecturas adecuadas sin necesidad de recurrir a aumentar la ganancia del equipo, desde espesores que van de 1 mm a 30 mm lo cual lo hace muy útil para medir en el rango de espesores de los cascos de las embarcaciones actuales, bien sea en la zona de quilla, pantoque, forro de costado o cubierta. El palpador de 2,25 MHz de frecuencia, a partir de los 6 mm de espesor ya presenta ecos de baja amplitud y a los 9 mm apenas alcanza una ATP de un 20% tal y como se observa en la **Figura 27**

## A1.2 DATOS DISEÑO PROBETAS; CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL EQUIPO

Para realizar la monitorización del curado por ultrasonidos se fabrican una serie de probetas de 10 mm de espesor, siendo la probeta nº 8 (**Tabla 1. Datos probetas UT calibración y ajuste parámetros de ensayo**) en la que finalmente se realiza la monitorización del curado durante 15 días registrándose un total de 41.085 archivos.



**Figura 31.** Probetas para ensayo por UT

La calibración y el ajuste del equipo se realizan según normas, siendo los parámetros ultrasónicos principales los siguientes:

**Campo de ensayo: 20 mm;** por lo tanto el eco de fondo de la probeta de 10 mm de espesor estará centrada aproximadamente en la mitad del eje de tiempos o distancia del equipo de ultrasonidos.

**Velocidad acústica: 2.686 m/s.** Se determina de forma automática mediante funcionalidades propias del equipo a partir de dos distancias conocidas. En nuestro caso la distancia 1 es cero ya que calibramos con un retraso de la cuña de metacrilato (soporte) y la distancia 2 es la correspondiente a una probeta de PRFV de espesor conocido y medido con pie de rey.

**Zero (delay): 19.383 mm.** Es el retraso que se corresponde con el espesor del soporte de PMMA.

**Frecuencia: 0,5 MHz.** A partir de la ecuación de onda calculamos  $\lambda$ . La longitud de onda  $\lambda$  calculada para esta frecuencia y velocidad acústica es de

$$\lambda = c/f \quad (28)$$

$$\lambda = \frac{2.686 \frac{m}{s} \times 10^3}{0,5 \text{ MHz} \times 10^6} = 5,372 \text{ mm}$$

**TX:**

W (ancho del pulso) = 250

D (Amortiguación) = 400  $\Omega$

V (Tensión de disparo) = 200 V

P (Frecuencia de repetición impulsos) = 35

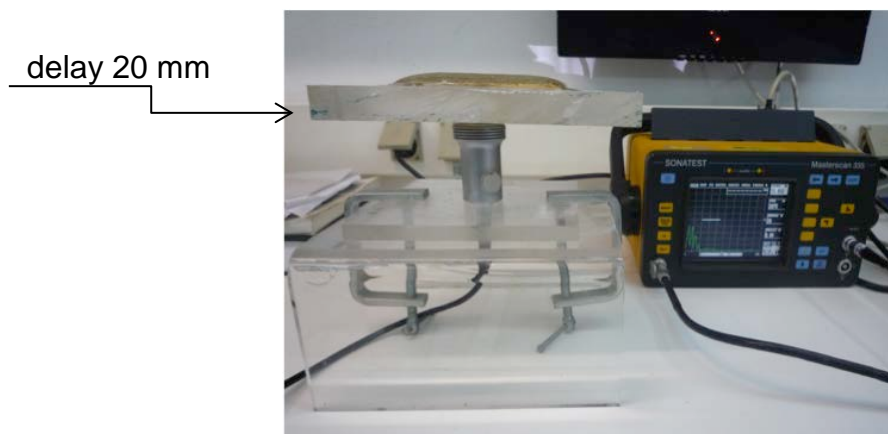
El campo cercano (N) del palpador se calcula a partir de la expresión:

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (29)$$

$$N = \frac{25^2 - \lambda^2}{4\lambda} = 28,84 \text{ mm}$$

Siendo (D) el diámetro del cristal del palpador que en este caso es de 25 mm. y ( $\lambda$ ) la longitud de onda. El palpador lleva de serie acoplado una cuña de metacrilato de 30 mm lo cual asegura la introducción de un haz ultrasónico libre de perturbaciones sin máximos y mínimos de presión acústica en el material.

En nuestro caso se ha sustituido la cuña por razones prácticas por el soporte-cuña de PMMA de 20 mm que además de hacer las funciones de “delay” sirve de pletina soporte para laminar las probetas.



**Figura 32.** Disposición del ensayo con delay de 20 mm

DATOS PROBETA DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN												
nº probeta	Pes vid g/m	pes resin g/m2	f v %	sup.prob	peso resina	gotas catalizador	e 1 capa	e mm	nºcapas	e fin	notas	
1	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	12	7-8 mm ext. Centro?	delay PMMA cil	
2	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	12	9,1,9,7,9,7,9,6	delay 19 mm PMMA plano	
3	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	13	11,5,11,8,10,89,10,68	delay 19 mm PMMA plano	
4	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	12	10,6	delay 19 mm PMMA plano	
6	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	12			
7	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	12			
8	MAT 300 g	750	30	100	7,5	1,875= 2	0,8	10	12			
nº probeta	Panel store	zero	vel m/s	rango	Amp (1MHz)	Tx: W/D/V/P	gain dB	H%	dist UT	notas		
2	19139	19139	2600	20	0.5	500/400/200/250	45.5	70				
3	22570	22570	2766	20	0.5	500/400/200/250	43.5	70		cal automática		
3 parte 2	1	19139	2938	20	0.5	500/400/200/250	43.5	70	12.24			
3 parte 1	20	19139	2938	20	0.5	500/100/200/250	57	72-80		aviso mal conf		
4	19	19139	2626	20	0.5	500/400/200/250	43.5	75	11,7	alib man grp 9 de 12 mm		
5	18	19383	2686	20	0.5	500/400/200/250	47	52	11,7	cal.aut.con prob.nº4		
6 abc	18	19383	2686	20	0.5	500/400/200/250	47	52	11,7			
7 ab	17	19383	2686	20	0.5	250/400/200/35	50,5					
8	16	19383	2686	20	0.5	250/400/200/35	46	70	12	Tª 25°C Hum. 42%		
31/10/2008	1	2	3	4	5	6						
13:39	←	17.264 archivos	→	14:29	14:37							
7	8	9	10	11	12	13						
←	18.657 archivos	→	03:08	17:14	→	11:15						
17.254	+ 23.821	= 41.085 archivos		18658 a 20806 archivos	21109 a 23833	11:19	→	13:54				

Tabla 1. Datos probetas UT calibración y ajuste parámetros de ensayo

## ANEXO 2 ENSAYOS DE DUREZA BARCOL

Se construyen probetas en series homólogas y se realizan ensayos de dureza Barcol y ultrasónicos de forma simultánea. Se registran datos de dureza durante 12 días a intervalos regulares de aproximadamente cada 4 horas y se toman 30 lecturas por cada registro obteniéndose un total de 1.470 mediciones.

Aunque el objetivo del ensayo en este caso es el de registrar la evolución de la dureza del material en función del tiempo de curado/maduración y no el de determinar el valor de dureza del material en su estado final, el ensayo se realiza tomando como referencia la norma *UNE 53-270-76: Materiales Plásticos. Ensayo de dureza Barcol* que concuerda parcialmente con la ASTM D-2583. La finalidad es validar este ensayo destructivo de dureza con el ensayo no destructivo de ultrasonidos y establecer una relación por observación directa de las curvas obtenidas.

Al objeto de sistematizar las mediciones se redacta un procedimiento normalizado de trabajo, en base a esta norma y al manual de instrucciones del fabricante y se calibra el instrumento de medida. Las mediciones se graban en video para una mejor visualización de las lecturas y registro de datos.



### A2.1 CÁLCULO DE LAS PROBETAS DE PRFV

Se ha utilizado una resina de poliéster insaturado, de tipo rígido, de baja reactividad, caracterizada por ser pre-acelerada y tixotrópica. Las propiedades y características principales son:

Tiempo de Gel: 25 min. (a 20°C).
Catalizador: MEKP al 1,5%.
Resistencia a tracción: 62 MPa. ASTM D-648.
Resistencia a flexión: 105 MPa. ASTM D-790.
Dureza Barcol: 43. ASTM D-2583.

**Tabla 2.** Datos resina probeta dureza Barcol

Para la construcción se han seguido las indicaciones de la Sociedad Clasificadora *Lloyd's Register*, siendo el material de fibra de vidrio utilizado para la fabricación de las probetas mat de hilos cortados (CSM) de 300 g. con un 30% de contenido en vidrio y un grosor aproximado de 0,8 mm por capa. Se laminan de forma manual 12 capas al objeto de obtener una probeta de aproximadamente 10 mm de espesor.

Material 	Nº capas	Peso de vidrio	Peso de la resina	Fibra de vidrio %	Peso del laminado g/m <sup>2</sup>	Grosor aprox.fibra vidrio en mm
CSM Mat de 300 g	1	300 g/m <sup>2</sup> 0,03 g/cm <sup>2</sup>	750 g/m <sup>2</sup>	30	1.050 g/m <sup>2</sup> 0,105 g/cm <sup>2</sup>	0,8
Sup. Panel	Peso resina/capa		Nº capas para un espesor de 10 mm		Peso total resina panel	
30 x 35 cm = 1.050 cm <sup>2</sup>	0,075 g/cm <sup>2</sup> x 1.050 cm <sup>2</sup> =78,75 g/capa		10 mm/0,8 mm= 12,5 ⇒12 capas		78,75 g x 12 = 945 g	
% catalizador MEKP	Peso catalizador/capa		Gotas catalizador/capa		Total gotas catalizador panel	
1,5	78,75 g (resina) x 1,5 g(MEKP)/100 g(resina) = 1,1812 g		1,5 % ⇒7,5 gotas/30g (resina) 78,75 g x 7,5 gotas/30 g resina = 19,687 gotas/capa		19,687 gotas x 12 capas = 236,244 gotas/panel	
						

**Tabla 3.** Datos de diseño probeta dureza Barcol

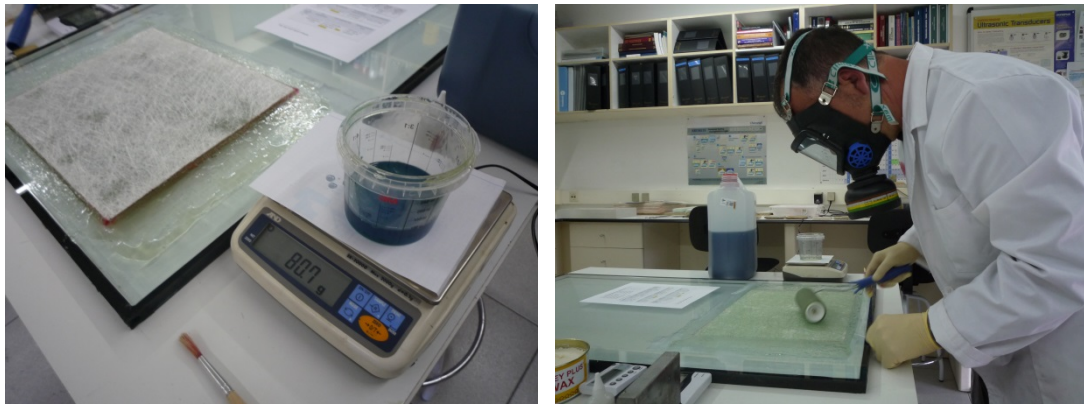


Figura 33. Laminado del panel ensayo de dureza

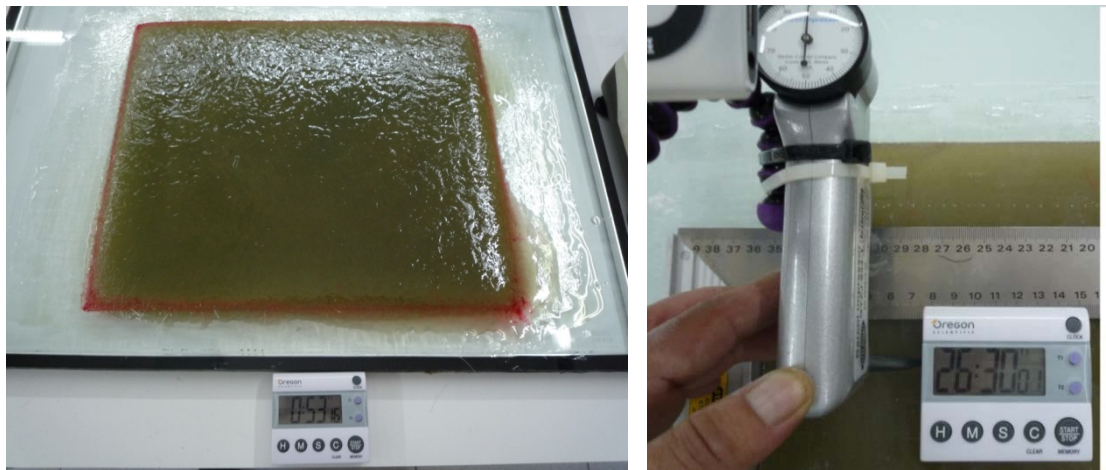


Figura 34. Medición y registro de durezas Barcol

## A2.2 MEDICIONES: LECTURAS DE DUREZA BARCOL

El número de lecturas mínimo a realizar s/UNE 53-270-76 se muestran en la **Tabla 4** que en nuestro caso se corresponde con una dureza Barcol de 40. Se registran un número de lecturas superior al mínimo especificado, concretamente 30 lecturas en cada serie en lugar de 22.



Valores de la dureza Barcol.	Varianza de la lectura	Coefficiente de variación %	Varianza de la media	Nº de lecturas recomendado
30	22,4	2,9	0,77	29
40	17,2	2,2	0,78	22
50	12	1,7	0,75	16
60	7,8	1,5	0,78	10
70	3,6	1,2	0,75	5

**Tabla 4** Datos s/ UNE 53-270-76

En la Tabla 5 se muestran las 1480 lecturas de dureza Barcol obtenidas durante 12 días a intervalos aproximados de 4 horas. Para cada serie (registro) se toman 30 lecturas y su valor se graba en vídeo. Los valores promedio de cada serie se muestran en la **Tabla 5**.

Observamos que durante las primeras 20 horas el ensayo es prácticamente inaplicable debido a que el material está todavía muy blando y no es sino hasta el inicio del 5º día donde el material empieza a presentar valores normalizados de dureza Barcol = 40 (registro nº21). En la Figura 36 se muestran los estadísticos principales del registro nº 21.

Los resultados finales obtenidos se muestran en la **Figura 37**. A partir del quinto día los valores de dureza varían muy poco y se aproximan a la asíntota correspondiente al valor estándar de referencia 40.

dia/fecha	t(h)	Nº DE LECTURAS																														desv	varianz	promed		
CURADO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
VALORES MEDIDOS																																				
1	15/03-10	20.44	2	0	0	7	21	0	0	1	0	0	0	17	15	0	15	0	6	6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5.993	37.154	3.1333		
2	15/03-10	20.5	11	14	0	12	15	12	8	14	4	10	21	5	15	5	5	11	11	12	22	13	22	25	18	14	4	6	12	14	22	22	6.2075	39.992	13	
3	15/03-10	26.3	8	16	20	20	19	15	12	15	15	30	25	29	16	8	24	25	20	17	11	9	27	26	19	14	33	33	24	13	31	7.2495	54.368	9.667		
4	15/03-10	29.24	29	15	11	15	15	9	15	20	25	17	35	15	35	22	22	15	25	32	32	7	15	18	14	28	18	28	16	26	24	40	8.1063	67.978	21.433	
5	20/04-10	33.38	32	36	22	33	27	27	36	15	20	15	23	15	34	16	16	14	16	12	34	40	18	22	12	26	28	33	18	22	23	14	8.0857	67.633	23.433	
6	20/04-10	40	37	15	20	26	21	29	24	24	21	15	29	40	16	23	8	21	16	40	14	25	26	21	29	28	26	19	21	22	36	16	7.5248	68.575	23.667	
7	20/04-10	43.46	22	15	24	32	32	16	25	39	24	26	27	25	14	22	26	18	16	18	9	32	24	24	24	24	32	16	25	28	28	30	6.3456	41.655	24	
8	20/04-10	45.37	22	24	29	28	29	16	16	14	26	16	20	26	18	24	16	10	15	25	22	35	28	37	29	39	32	34	30	37	38	8.0145	66.447	25.033		
9	20/04-10	48.41	35	17	27	26	31	25	38	37	34	37	24	18	25	25	35	25	32	34	28	31	41	35	26	30	32	35	14	38	40	27	6.7029	46.478	30.067	
10	20/04-10	50.27	35	24	36	31	48	10	22	30	30	23	32	34	23	10	28	23	23	39	27	22	35	37	42	42	30	23	42	26	#N/D	#N/D	8.9142	82.406	29.536	
11	20/04-10	54.05	27	27	20	32	30	14	34	25	24	23	32	22	32	43	20	36	33	28	22	28	29	24	32	29	42	38	32	40	29	29	6.5798	44.786	29.2	
12	30/2-04-10	56.35	24	29	32	21	25	32	22	40	30	40	36	28	22	22	32	39	30	35	23	37	32	33	35	33	42	40	30	27	41	38	6.3052	41.126	31.667	
13	30/2-04-10	65.01	37	36	34	22	38	32	40	26	32	32	42	33	36	37	32	23	20	38	34	41	52	24	38	38	42	25	19	28	19	36	7.7014	61.357	32.767	
14	30/2-04-10	70.12	36	27	32	41	30	30	38	34	20	50	34	24	30	33	25	47	44	26	32	27	46	38	38	31	34	16	24	29	35	42	7.9579	65.515	33.067	
15	30/2-04-10	73.44	41	39	32	36	24	44	25	43	25	25	40	31	30	44	28	32	30	31	35	35	35	33	33	23	30	32	29	40	23	42	6.3218	41.344	33.033	
16	30/2-04-10	76.41	36	32	30	29	45	38	25	25	32	30	38	32	16	36	28	37	36	42	32	28	37	26	34	30	31	25	36	46	41	28	6.4039	42.424	32.7	
17	4/3-04-10	80.42	35	37	30	40	30	37	29	20	40	22	30	25	24	29	40	29	35	15	36	28	36	31	22	24	21	38	38	38	26	36	6.8867	49.062	30.8	
18	4/3-04-10	89.04	24	10	22	32	30	39	35	24	36	32	24	32	31	28	26	42	20	42	25	30	32	33	25	40	26	33	43	25	35	43	7.5254	58.555	30.633	
19	4/3-04-10	91.51	44	38	33	20	45	36	32	20	44	30	25	24	31	28	29	29	32	32	35	19	39	28	25	26	30	36	28	20	35	32	6.8948	49.178	30.833	
20	4/3-04-10	95.05	43	32	44	36	30	30	28	28	34	32	40	41	35	35	32	32	25	28	32	28	42	34	34	14	32	30	34	23	37	35	6.1	38.493	32.7	
21	4/3-04-10	100.2	29	46	47	40	42	40	40	40	40	34	45	43	25	41	41	32	32	37	42	45	48	43	43	25	44	30	42	46	45	41	6.3806	42.116	39.767	
22	4/3-04-10	103.25	42	41	43	47	35	37	45	40	50	44	44	38	32	32	44	38	36	32	30	50	28	44	45	48	42	35	39	50	36	24	6.7247	46.782	39.667	
23	5/4-04-10	114.57	40	49	39	42	33	50	42	47	53	36	42	33	50	32	43	46	42	39	30	38	34	43	45	38	35	33	42	29	26	39	6.6098	45.195	39.667	
24	5/4-04-10	118.26	30	32	35	44	40	36	16	32	20	36	40	22	28	22	32	25	24	36	35	44	33	36	35	42	22	28	33	30	30	32	6.8407	48.409	31.733	
25	5/4-04-10	122.27	36	38	36	25	42	45	45	37	45	36	44	36	39	32	40	41	31	41	43	43	38	38	26	37	39	35	30	38	43	35	6.6388	32.892	38.067	
26	5/4-04-10	125.26	47	52	55	46	46	55	45	44	50	45	41	52	42	45	52	52	45	47	43	43	42	43	39	45	45	42	50	35	39	44	4.9845	25.702	45.233	
27	6/5-04-10	134.45	49	47	43	45	43	54	45	44	43	43	40	45	43	30	44	35	42	47	30	35	42	44	25	50	40	44	44	40	36	42	5.6064	32.515	42.033	
28	6/5-04-10	137.27	40	44	36	55	54	38	33	41	43	43	50	50	42	48	44	42	45	46	32	45	38	46	44	39	50	35	38	42	40	36	5.7512	34.217	42.7	
29	6/5-04-10	140.64	42	35	45	42	44	35	48	45	32	45	50	40	50	43	57	44	43	43	48	48	49	43	52	40	47	44	52	43	36	43	5.4573	30.809	44.467	
30	6/5-04-10	144.46	44	43	45	45	49	62	47	42	64	48	38	54	42	58	38	47	42	54	46	52	58	40	50	52	58	42	38	52	44	42	7.4517	57.597	48.3	
31	6/5-04-10	148.57	40	41	45	45	38	56	52	37	45	45	49	43	53	41	43	39	45	49	49	39	50	47	45	54	42	39	40	25	44	43	6.1188	35.731	44.4	
32	7/6-04-10	157.35	49	35	42	45	43	48	52	40	45	38	47	51	49	44	46	43	47	49	47	49	54	45	47	47	49	44	43	31	41	44	4.8093	23.926	45.267	
33	7/6-04-10	158.19	52	50	48	43	52	42	41	44	41	43	45	45	51	41	50	38	42	36	43	28	39	52	45	43	28	50	40	48	40	51	6.7778	47.533	43.167	
34	7/6-04-10	166.12	47	45	35	28	50	51	40	60	54	33	45	45	42	42	45	43	54	46	35	50	54	50	48	44	42	45	38	48	48	41	6.5612	44.534	45.5	
35	7/6-04-10	170.01	50	45	54	49	44	45	34	42	40	42	46	30	31	42	39	52	39	44	42	35	41	45	35	42	52	42	34	36	45	40	6.0689	38.102	42.033	
36	8/7-04-10	151.28	42	45	45	43	53	43	42	35	45	45	45	52	50	51	49	42	44	38	45	51	33	41	41	35	43	38	36	42	46	41	43	5.075	26.554	43.367
37	8/7-04-10	159.15	52	35	44	38	41	51	34	42	46	40	40	38	47	45	44	59	51	43	45	49	35	41	42	53	30	44	42	38	40	37	6.7788	47.566	43.3	
38	8/7-04-10	165.2	37	40	34	47	43	40	40	42	38	38	43	42	47	35	42	48	38	35	42	31	43	34	42	38	45	55	39	44	44	47	5.0112	25.978	41.233	
39	9/9-04-10	203.28	57	47	43	41	36	30	50	43	44	40	51	40	51	40	50	48	40	35	39	41	51	44	35	35	48	39	49	32	47	38	6.3827	42.144	42.833	
40	9/9-04-10	210.38	47	51	43	43	44	45	41	25	38	38	35	39	32	37	35	35	45	45	48	42	35	40	34	52	43	35	31	31	39	38	6.0451	37.515	39.667	
41	9/9-04-10	218.38	43	45	35	43	43	44	38	43	43	38	44	49	39	48	53	43	42	48	44	45	39	38	46	40	35	35	30	36	40	42	4.8038	23.872	41.7	
42	10/09-04-10	227.34	43	42	50	38	35	45	45	46	36	49	49	51	43	43	34	41	44	38	34	32	35	43	33	37	34	35	32	35	45	54	6.238	40.254	40.567	
43	10/09-04-10	235.47	50	51	47	43	43	41	43	33	52	39	35	41	50	42	43	32	41	43	43	48	45	41	40	48	40	34	49	31	38	44	5.5599	31.975	42.433	
44																																				

Nº de registro	Tiempo (h)
	Valor medio dureza Barcol

1	20,44	2	20,50	3	26,30	4	29,24	5	38,40	6	40,00
	3,13		13		19,67		21,43		23,43		23,67
7	43,46	8	45,37	9	48,41	10	50,27	11	54,05	12	56,35
	24		25,03		30,07		29,54		29,20		31,67
13	65,01	14	70,12	15	73,44	16	76,41	17	80,42	18	89,04
	32,77		33,07		33,03		32,70		30,08		30,63
19	91,51	20	95,05	21	100,2	22	103,2	23	114,5	24	118,2
	30,83		32,70		39,77		39,67		39,67		31,73
25	122,2	26	125,2	27	134,4	28	137,2	29	140,6	30	144,4
	38,07		46,23		42,03		42,70		44,47		48,30
31	148,5	32	157,1	33	161,1	34	166,1	35	171,0	36	181,2
	44,40		45,27		43,17		45,50		42,03		43,37
37	189,1	38	195,2	39	203,2	40	210,3	41	218,3	42	227,3
	43,30		41,23		42,83		39,67		41,70		40,57
43	238,4	44	242,2	45	254,3	46	258,3	47	267,2	48	286,0
	42,43		41,17		39,87		38,53		38,70		39,07
49	297,3										
	30,07										

Tabla 5. Valores promedio dureza Barcol

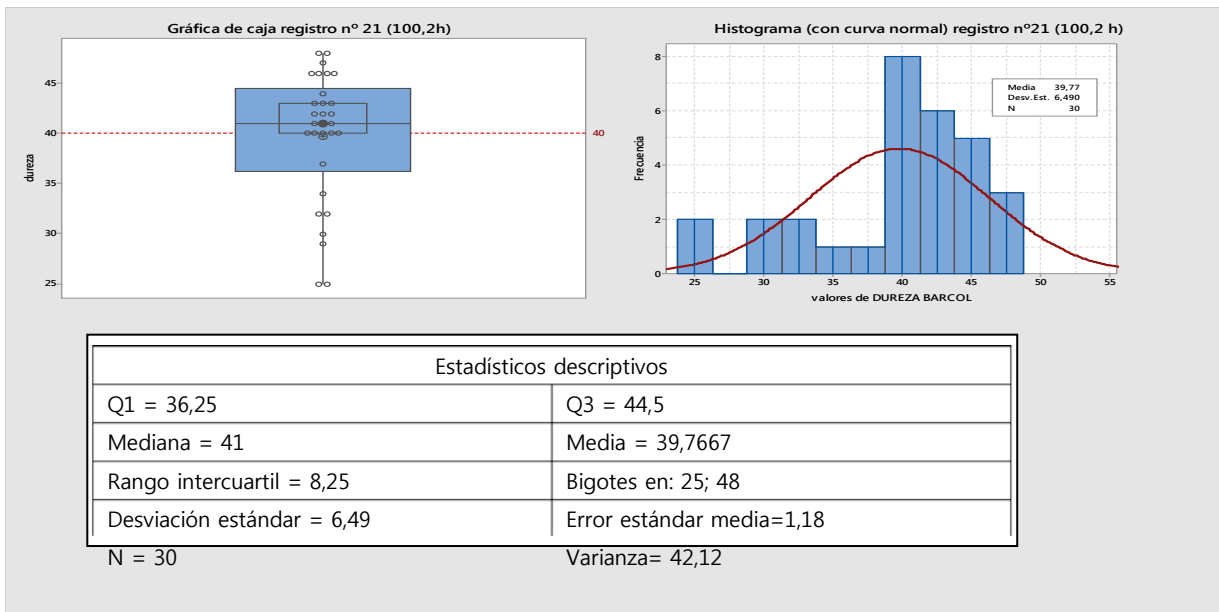


Figura 36. Gráfica de caja para el registro nº 21 y estadísticos principales.

A2.3 RESULTADOS CURVA DE DUREZA BARCOL

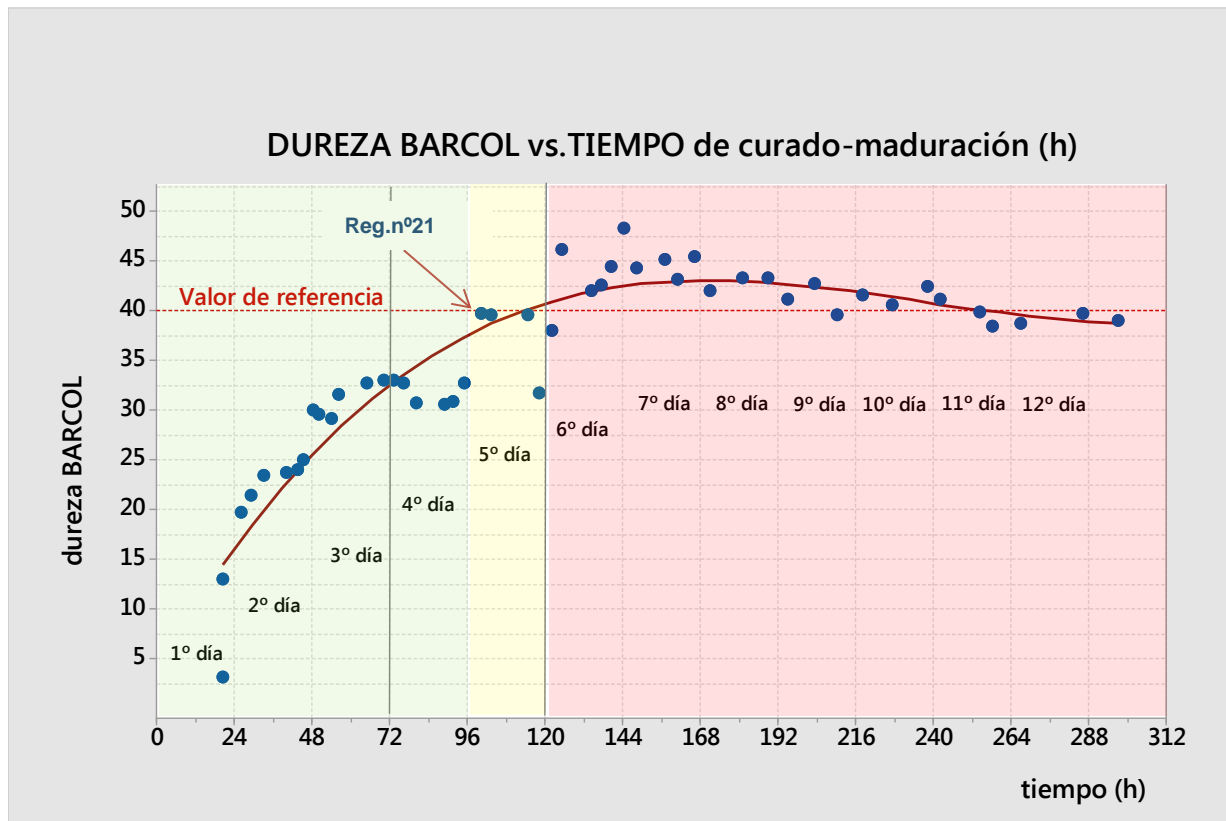


Figura 37. Valores medios de dureza.

## A2.4 PROCEDIMIENTO NORMALIZADO DE TRABAJO

### OBJETO

Este procedimiento tiene por objeto describir el método de ensayo manual para medir la dureza de la probeta de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio con el durómetro BARCOL y desarrollar el método operativo a seguir para la obtención de medidas durante el tiempo de curado de la muestra de ensayo, registro de medidas y tratamiento estadístico de los valores obtenidos.

### REFERENCIAS

- UNE 53-270-76. Materiales plásticos. Ensayo de dureza Barcol.
- UNE-ISO 3534-1:2008. Estadística. Términos estadísticos generales y términos empleados en el cálculo de probabilidades.
- UNE 66040:2003. Interpretación estadística de los resultados de un ensayo. Estimación de la media. Intervalo de confianza.
- ASTM D2583-07. Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor
- EUROTHERM. Instruction Manual for the Barber-Colman. Impressor Hand-Held Portable Hardness Tester.

### MATERIAL Y EQUIPO

Las probetas deberán tener un espesor mínimo de 0,8 mm y una anchura tal que permita realizar cualquier medida de la penetración a una distancia mínima de 3 mm de los extremos de las probetas.

Las probetas se acondicionarán antes del ensayo a  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $50 \pm 5 \%$  de humedad. El material de la probeta de ensayo será un panel de 300 x 350 x 10 mm de resina de poliéster insaturada reforzada con fibra de vidrio E (CSM).

El equipo utilizado para medir la dureza será un durómetro portátil Barcol, marca Barber-Colman, modelo GYZJ-934-1 con discos de comprobación para la calibración del mismo.

Para el registro de las lecturas y facilitar la determinación del valor de pico se grabarán en vídeo los valores leídos.

### CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR

Antes de proceder a obtener una serie de medidas se calibrará el aparato según el procedimiento de calibración del fabricante, utilizando los discos de comprobación de aluminio GYZJ 250 marcados con los números 87/89 y los discos GYZJ 78 marcados con los números 43-48. Se iterará las lecturas sobre estos dos discos hasta obtener una lectura óptima para ambos proporcionando así una exactitud en las lecturas sobre todo el rango de medida del durómetro. En caso de no poder optimizar las lecturas para ambos discos deberemos proceder a la sustitución de la punta del buril (indentador).

### MÉTODO OPERATORIO

Una vez calibrado el equipo y acondicionada la probeta se colocará ésta sobre una superficie dura, de tal forma que la punta del buril deberá estar siempre perpendicular a la superficie a ensayar y el pie del medidor deberá estar en el mismo plano que la punta, con ambas superficies de apoyo del pie tocando la misma superficie al objeto de mantener la perpendicularidad. Sin perpendicularidad, no puede asegurarse la exactitud de las lecturas.

A continuación se presionará el aparato de forma firme pero cuidadosa y evitando el deslizamiento lateral de la punta del buril. Tomaremos nota del pico de la lectura que leeremos directamente en el cuadrante del aparato. El cuadrante tiene 100 divisiones lo cual significa que cada una de ellas equivale a una profundidad de penetración de 0,0076 mm.

El número de lecturas mínimo recomendado para el modelo 934-1 a realizar se da en la tabla siguiente:

Valores de la dureza Barcol.	Varianza de la lectura	Coefficiente de variación %	Varianza de la media	Nº de lecturas recomendado
40	17,2	2,2	0,78	22

## ANEXO 3 ENSAYOS DE TRACCIÓN

### A3.1 CÁLCULO DE PANELES DE PRFV PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

Ese trata de una resina de poliéster insaturado, de tipo rígido, de baja reactividad, caracterizada por ser pre-acelerada y tixotrópica.

#### PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS DE LA RESINA CURADA

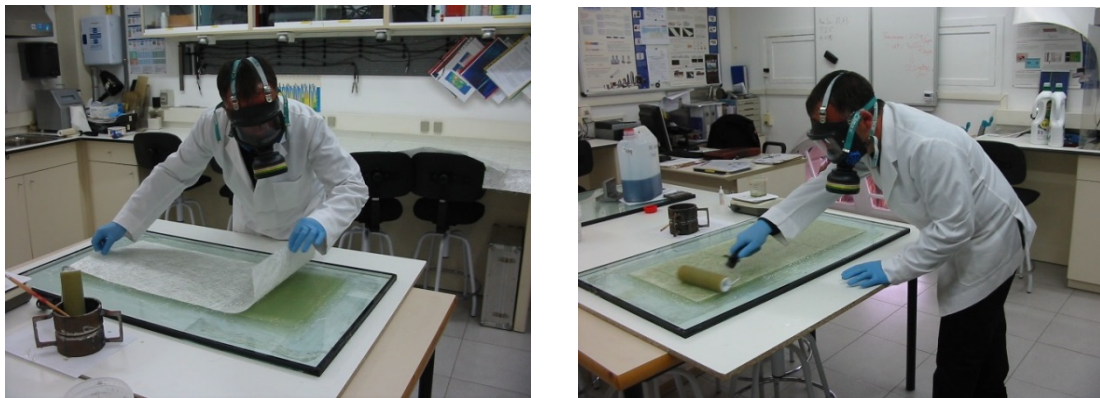
Temperatura Distorsión, ° C	ASTM D-648	67
Resistencia a Tracción, MPa	ASTM D-638	62
Resistencia Flexión, MPa	ASTM D-790	105
Dureza Barcol	ASTM D-2583	43
Alargamiento a Rotura, %	ASTM D-638	1,9

#### CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE CURADO A 20 ° C

Catalizador PMEK (50%), %	1,5
Tiempo de Gel, minutos	25
Tiempo Gel a Tª Máxima, min.	15
Temperatura de máxima, ° C	130

**Tabla 6.** Datos resina

Las probetas para realizar los ensayos de tracción se extraen a partir de la laminación de 2 paneles de dimensiones 350x800 mm y de 12 capas de CSM cada uno. Laminación manual sobre superficie de vidrio y desmoldeante de cera de abeja.



**Figura 38.** Secuencia del laminado paneles para ensayo de tracción



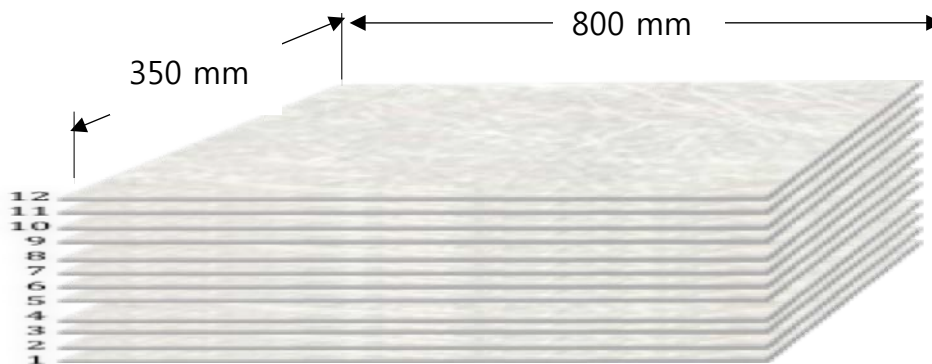
Los datos relativos al peso de resina y catalizador son los siguientes:

Material	Nº capas	Peso de vidrio	Peso de la resina	Fibra de vidrio %	Peso del laminado g/m <sup>2</sup>	Grosor aprox.fibra vidrio en mm
CSM Mat de 300 g	1	300 g/m <sup>2</sup> 0,03 g/cm <sup>2</sup>	750 g/m <sup>2</sup>	30	1.050 g/m <sup>2</sup> 0,105 g/cm <sup>2</sup>	0,8
Sup. Panel	Peso resina/capa		Nº capas para un espesor de 10 mm		Peso total resina panel	
35 x 80 cm = 2.800 cm <sup>2</sup>	0,075 g/cm <sup>2</sup> x 2.800 cm <sup>2</sup> = 210 g/capa		10 mm/0,8 mm = 12,5 ⇒ 12 capas		210 g x 12 capas = 2.520 g/panel	
% catalizador MEKP	Peso catalizador/capa	Peso catalizador/panel	Gotas catalizador/capa		Total gotas catalizador panel	
1,5	210 g (resina) x 1,5 g(cat)/100 g(resina) = 3,15 g/capa	3,15 g x 12 capas = 37,8 g	1,5 % ⇒ 7,5 gotas/30g (resina) 210 g x 7,5gotas/30g resina = 52,5		52,5 gotas x 12 capas = 630 gotas/panel	

**Tabla 7.** Datos de fabricación paneles probetas de tracción

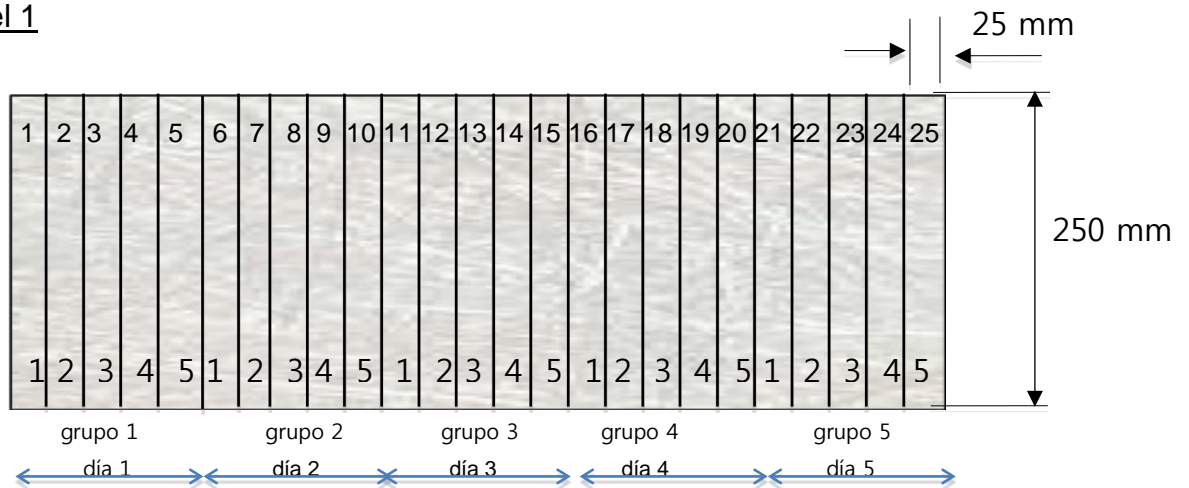
### A3.2 SECUENCIA DE LAMINACIÓN Y DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

Espesor lámina = 0,8 mm	Espesor total= 10 mm	dim.bruto: 350 x 800 mm
-------------------------	----------------------	-------------------------



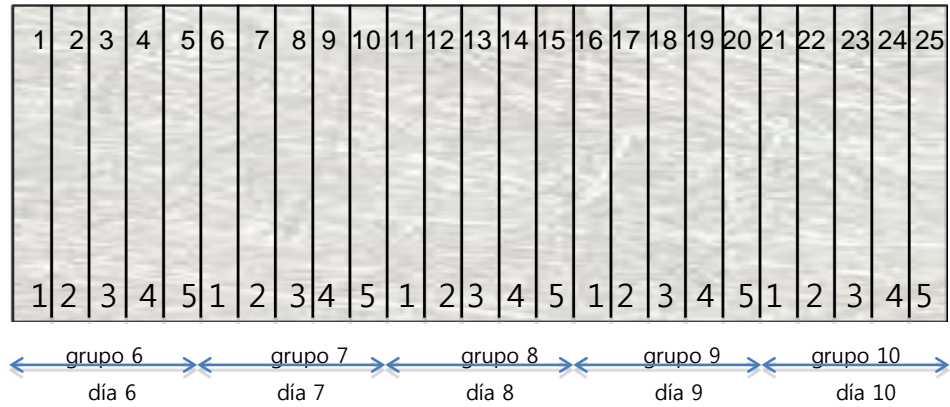
**Figura 39.** Número de capas del laminado paneles probetas tracción

#### Panel 1



**Figura 40.** Panel nº1 probetas de tracción

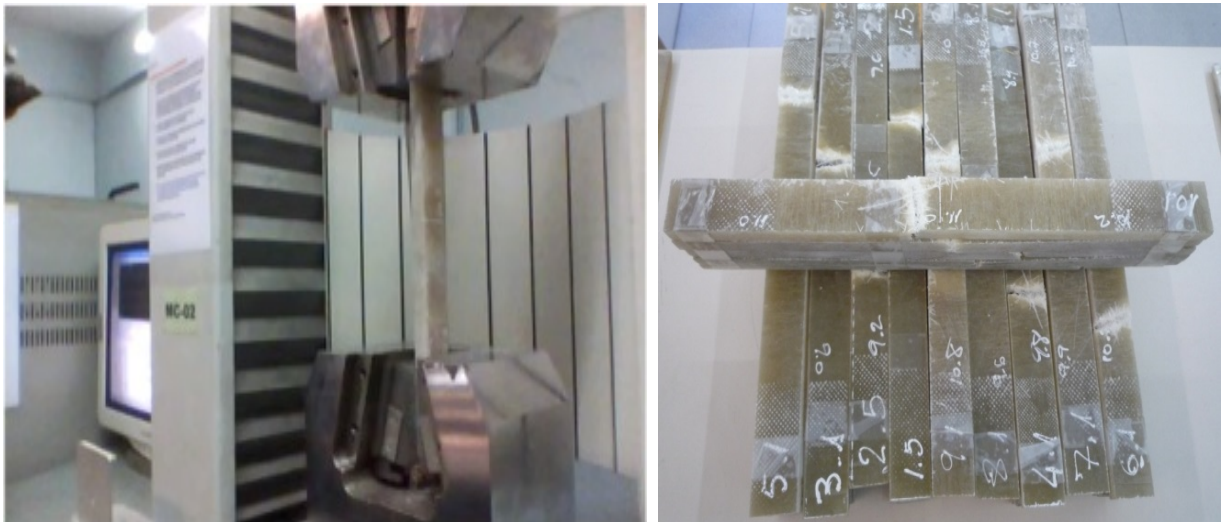
Panel 2



**Figura 41.** Panel nº 2 probetas de tracción

A3.3 RESULTADOS

Por cada panel se mecanizan 25 probetas planas s/Norma de 250x25x10 mm y se hacen cinco ensayos de tracción por día a intervalos regulares.

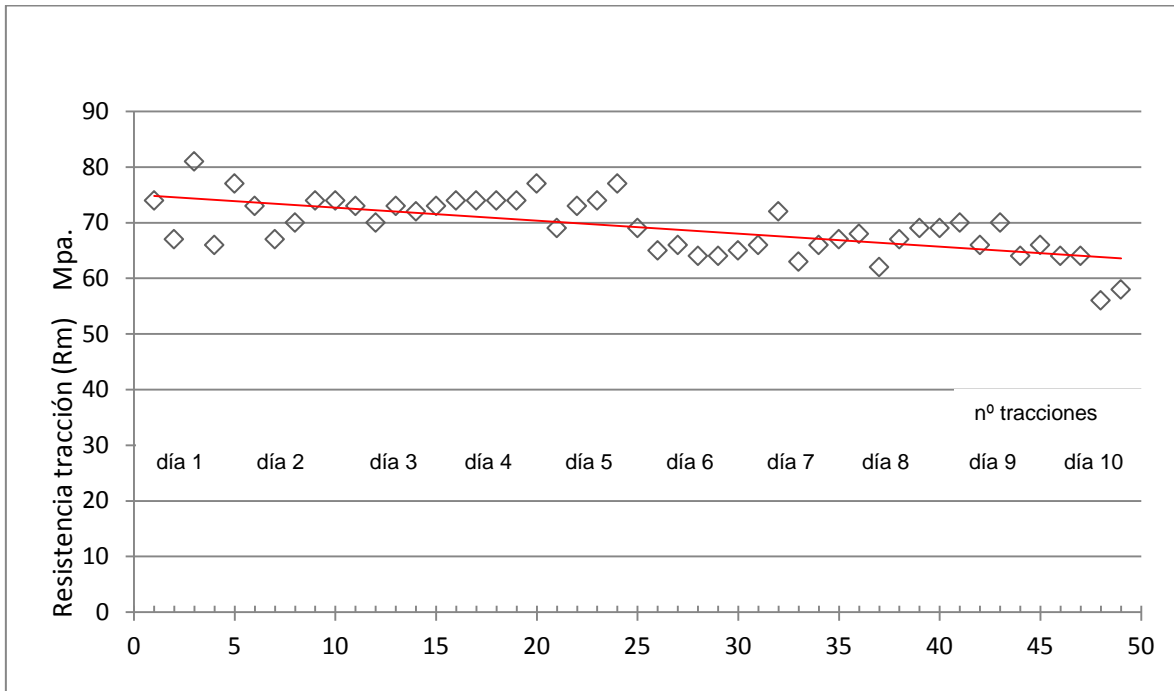


**Figura 42.** Máquina de ensayo y probetas

DIA 1						
Grupo 1. Probetas:	1*	2	3	4	5*	promedio
Res.tracción [MPa]	73	74	67	81	66	72
DIA 2						
Grupo 2. Probetas:	1*	2	3	4	5	promedio
Res.tracción [MPa]	77	73	67	70	74	72
DIA 3						
Grupo 3. Probetas:	1*	2	3	4*	5	promedio
Res.tracción [MPa]	74	73	70	73	72	72
DIA 4						
Grupo 4. Probetas:	1*	2	3	4	5	promedio
Res.tracción [MPa]	73	74	74	74	74	74
DIA 5						
Grupo 5 probetas:	1*	2	3	4	5*	promedio
Res.tracción [MPa]	77	69	73	74	77	74
DIA 6						
Grupo 6. Probetas:	1*	2	3	4	5	promedio
Res.tracción [MPa]	69	65	66	64	64	66
DIA 7						
Grupo 7. Probetas:	1*	2	3	4	5*	promedio
Res.tracción [MPa]	65	66	72	63	66	66
DIA 8						
Grupo 8. Probetas:	1*	2	3	4	5	promedio
Res.tracción [MPa]	67	68	62	67	69	67
DIA 9						
Grupo 9. Probetas:	1*	2	3	4	5	promedio
Res.tracción [MPa]	69	70	66	70	64	68
DIA 10						
Grupo 10. Probetas:	1*	2	3	4	5*	promedio
Res.tracción [MPa]	66	64	64	56	58	62

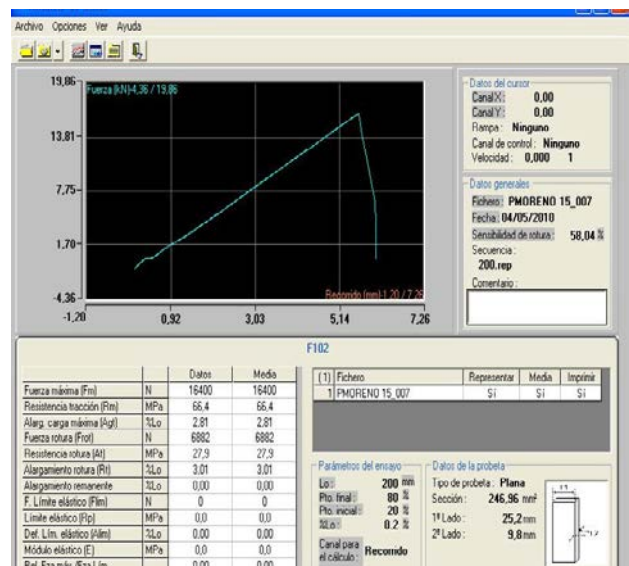
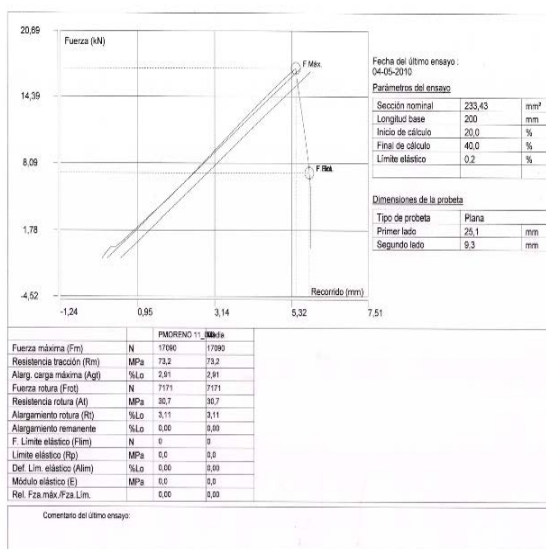
**Tabla 8.** Resumen de resultados ensayos de tracción

Una vez que la resina ha endurecido y permite entonces una sujeción adecuada de las mordazas de la máquina de tracción, observamos que los valores medidos de la resistencia a la tracción muestran que se mantienen casi constantes e incluso descienden ligeramente a partir del sexto día. Se hace evidente de que las telas de mat de fibra de vidrio son las que contribuyen a estos resultados y no obtenemos información útil sobre el estado de maduración del laminado mediante este ensayo.



**Figura 43.** Gráfica de resistencia a la tracción versus tiempo maduración

A continuación se adjuntan algunas de las gráficas de los resultados de tracción de las probetas de ensayo.



**Figura 44.** Gráficas tracciones probetas 1.1 y 1.5

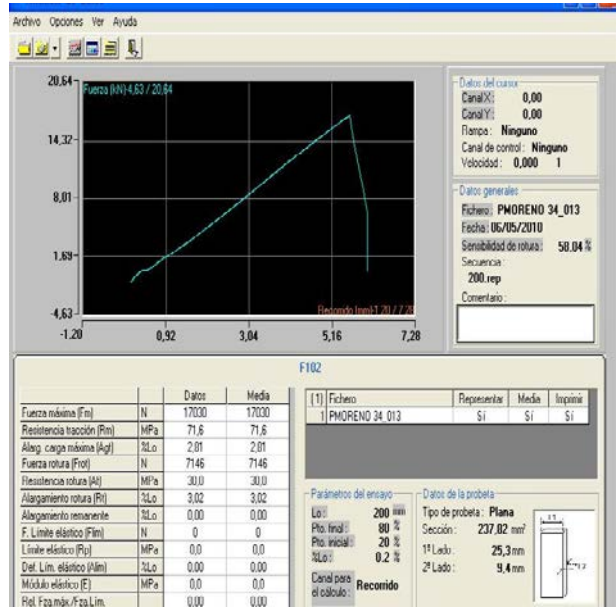
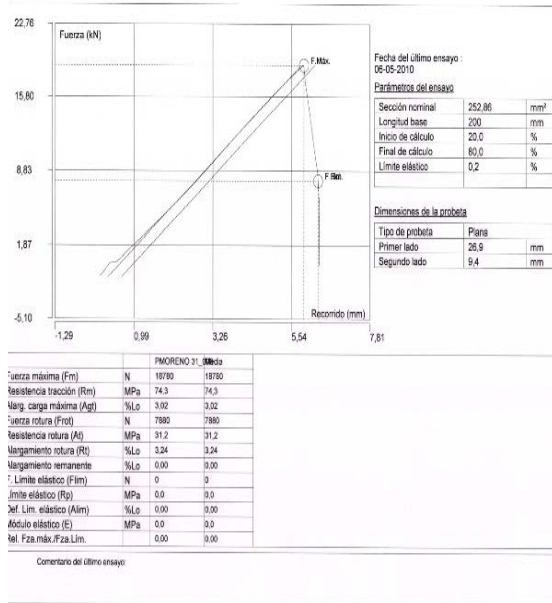


Figura 45. Gráficas tracciones probetas 3.1 y 3.4

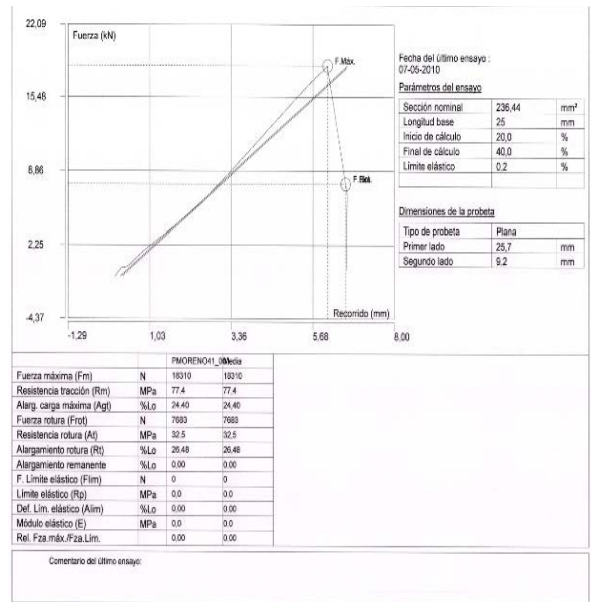
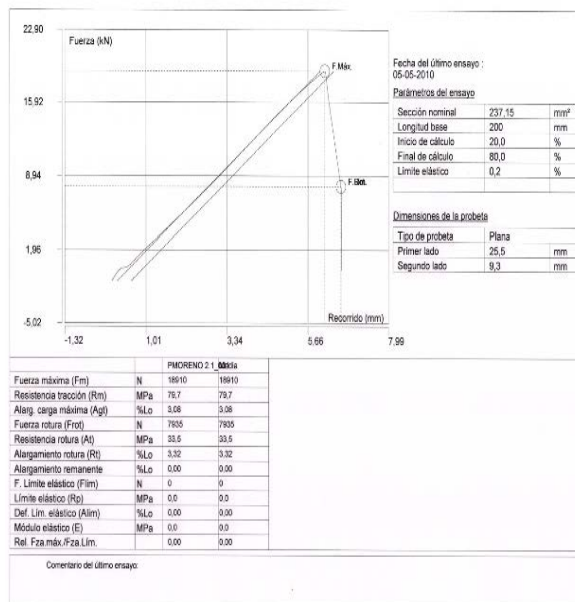


Figura 46. Gráficas tracciones probetas 2.1 y 4.1

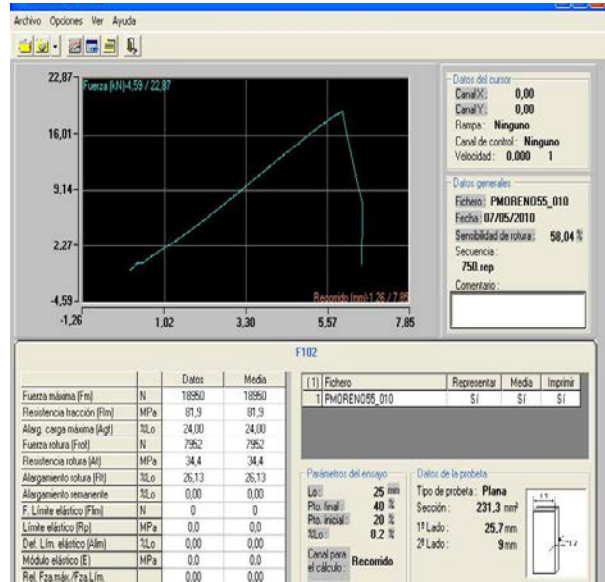
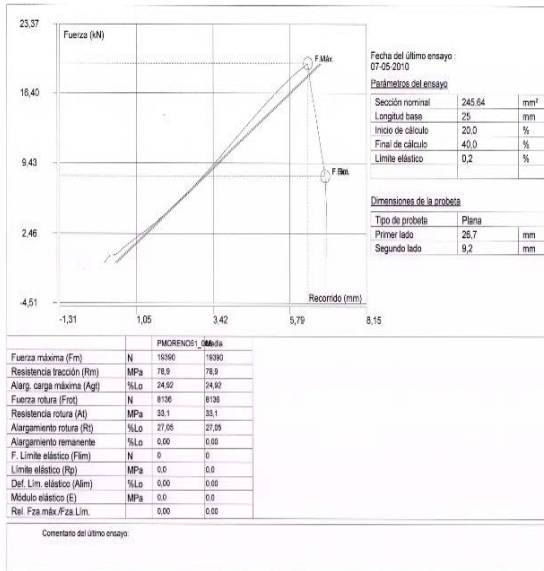


Figura 47. Gráficas tracciones probetas 5.1 y 5.5

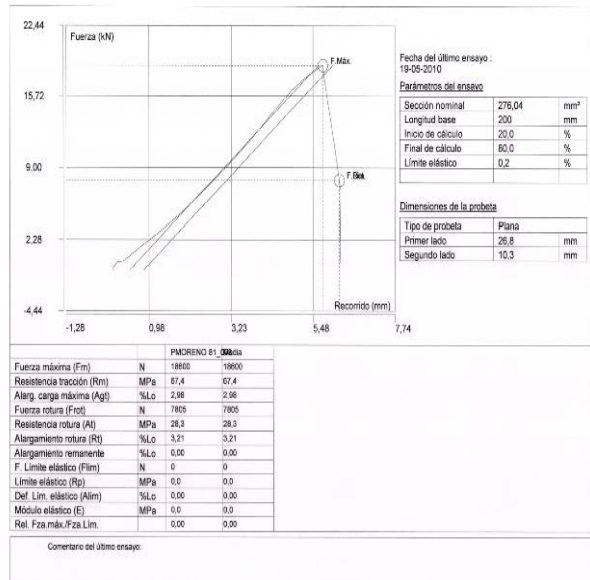
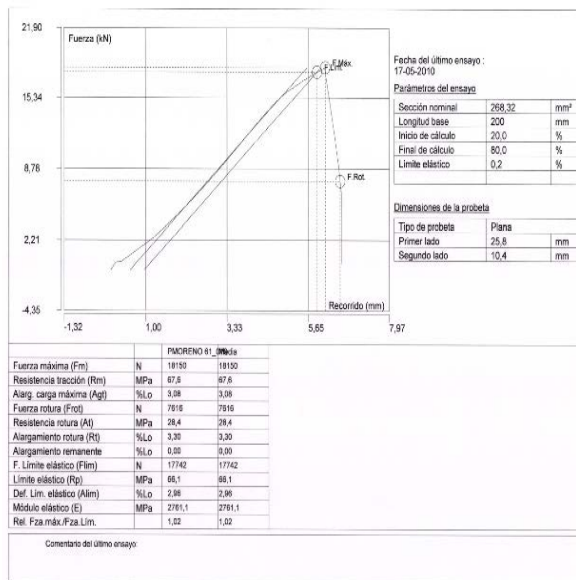


Figura 48. Gráficas tracciones probetas 6.1 y 8.

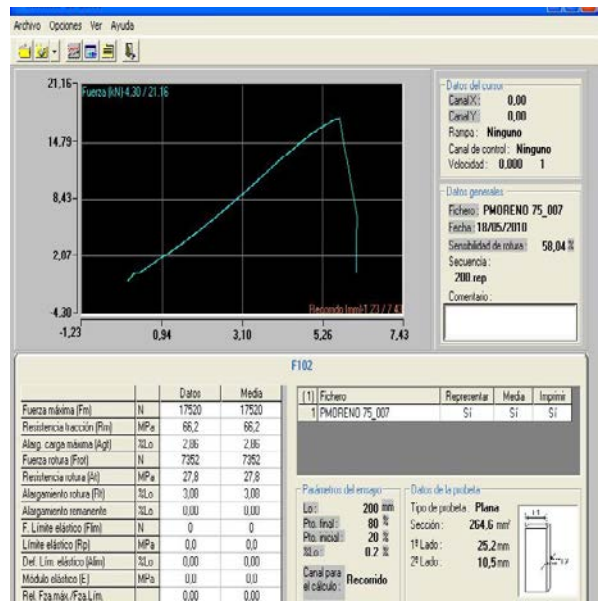
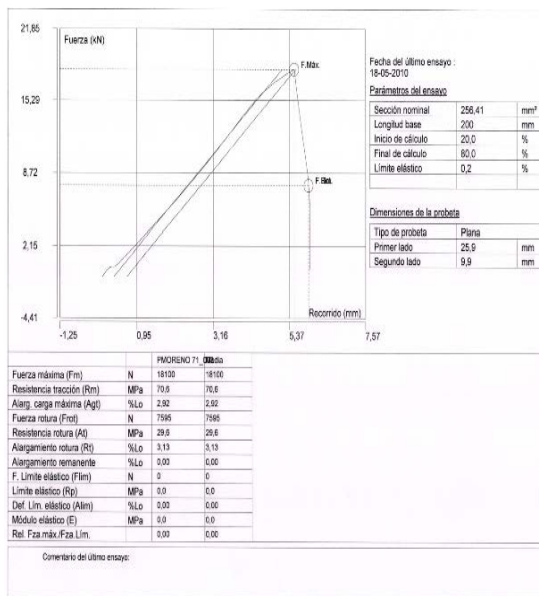


Figura 49. Gráficas tracciones probetas 7.1 y 7.5

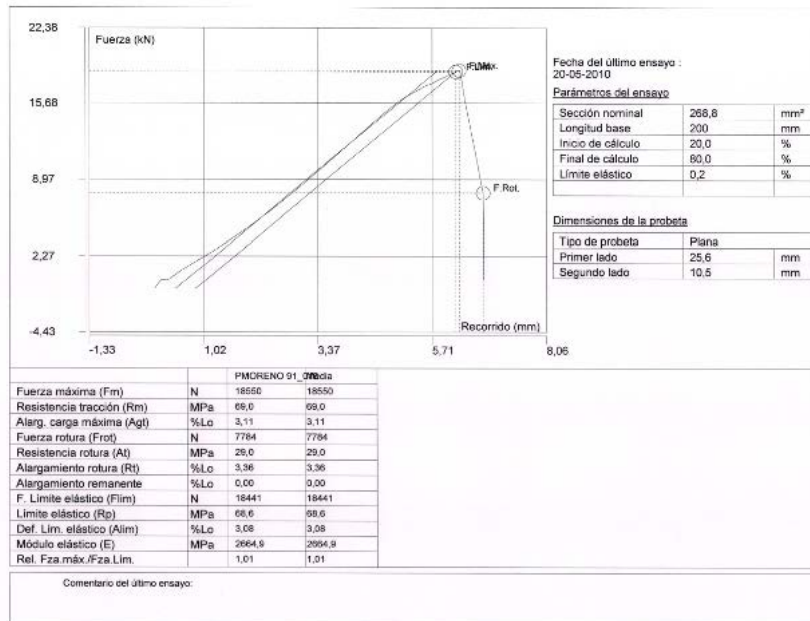


Figura 50. Gráfica tracción probeta 9.1

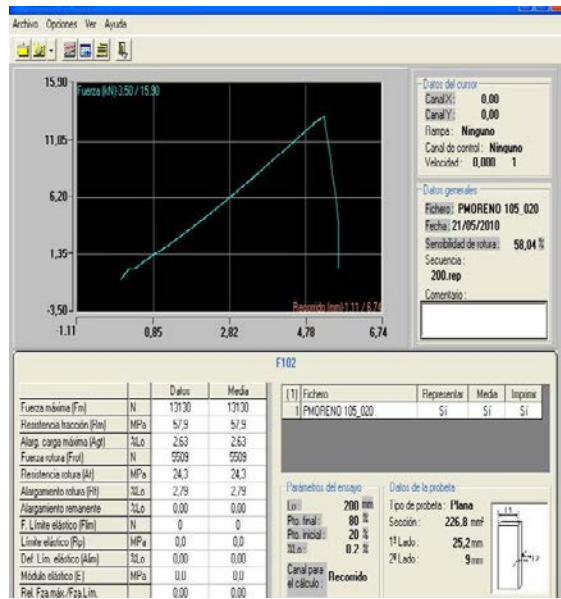
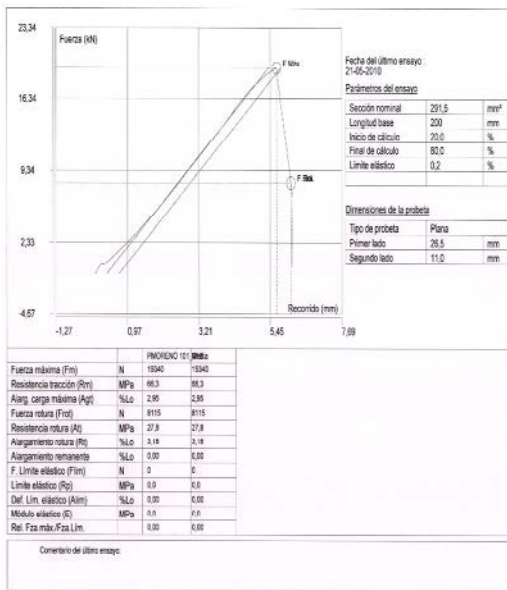


Figure 51. Gráficas tracciones probetas 10.1 y 10.5



## ANEXO 4 PROGRAMACIÓN

### A4.1 REGISTRO AUTOMÁTICO DE ARCHIVOS (Automate).

A continuación se describe de forma resumida una macroinstrucción de las varias utilizadas para el registro y guardado de archivos durante un período de tiempo programado.

En primer lugar se crea la variable denominada “paso” con un valor inicial de 1 que se irá incrementando y guardando archivos con un nombre diferente conforme el programa vaya guardando datos. Seguidamente se escribe el bucle principal que se repite “n” veces y el bucle de guardado del archivo que se repetirá “m” veces. Los valores de las iteraciones se pueden variar en función del período de tiempo a controlar.

La cadencia de guardado de archivos es fija y según los tiempos determinados en este bucle es de 2 archivos por minuto, lo cual generará 2.880 archivos al día. Las instrucciones que siguen se encargan de apagar y reiniciar el programa de comunicación con el equipo de ultrasonidos.

Para la monitorización del curado en períodos largos de tiempo deben tenerse en cuenta la frecuencia de verificación de funcionamiento del equipo y del palpador así como la comprobación del ajuste de la sensibilidad y linealidad de la base de tiempos.

1	Crear variable llamada PASO	31	Pulsa ICONO Telescan de Escritorio
2	Create a variable named "PASO" with an initial value of "1".	32	Move the mouse to screen coordinates (230,1008).
3	Loop the following steps 4 times.	33	Single click the mouse button: left.
4	Focus the window with the title "SDMSLite".	34	Pause task for 2 seconds.
5	Loop the following steps 150 times.	35	Pulsa CONTINUAR
6	FICHERO/SALVAR A LOG/GUARDAR COMO	36	Move the mouse to screen coordinates (442,702).
7	Single click the mouse button: left.	37	Single click the mouse button: left.
8	Move the mouse to screen coordinates (112,124).	38	Pause task for 2 seconds.
9	Pause task for 1 seconds.	39	Pulsa CONTROL REMOTO
10	Send keystrokes "{ENTER}".	40	Move the mouse to screen coordinates (331,262).
11	Pause task for 1 seconds.	41	Single click the mouse button: left.
12	Send keystrokes "%PASO%".	42	Send keystrokes "{DOWN}".
13	Send keystrokes "{ENTER}".	43	Send keystrokes "{ENTER}".
14	Pause task for 5 seconds.	44	Pause task for 2 seconds.
15	Increment Variable "PASO" by 1	45	CONECTAR/RECIBIR datos
16	Pause task for 5 seconds.	46	Move the mouse to screen coordinates (432,604).
17	End Loop	47	Single click the mouse button: left.
18	Clear the contents of the clipboard.	48	Pause task for 12 seconds.
19	DESCONECTAR CONTROL REMOTO	49	Pulsa REFRESCAR PANTALLA
20	Move the mouse to screen coordinates (328,260).	50	Move the mouse to screen coordinates (424,260).
21	Single click the mouse button: left.	51	Single click the mouse button: left.
22	Send keystrokes "{DOWN}{DOWN}".	52	Send keystrokes "{DOWN}{DOWN}".
23	Send keystrokes "{ENTER}".	53	Send keystrokes "{ENTER}".
24	Pause task for 2 seconds.	54	Pause task for 1 seconds.
25	APAGA Telescan	55	Marcar tiempo de refresco
26	Move the mouse to screen coordinates (265,261).	56	Move the mouse to screen coordinates (485,571).
27	Single click the mouse button: left.	57	Single click the mouse button: left.
28	Send keystrokes "{UP}".	58	Pause task for 2 seconds.
29	Send keystrokes "{ENTER}".	59	CONECTAR/RECIBIR datos
30	Pause task for 2 seconds.	60	Move the mouse to screen coordinates (224,600).
		61	Single click the mouse button: left.
		62	Fin levantar Telescan
		63	Pause task for 15 seconds.
		64	Focus the window with the title "MASTERSCAN 335".
		65	End Loop
		66	Move the mouse to screen coordinates (111,605).
		67	Pause task for 1 seconds.
		68	Single click the mouse button: left.

Figura 52. Programa de registro automático de archivos (Automate).



A4.3 VISUALIZACIÓN AUTOMÁTICA (LabVIEW)).

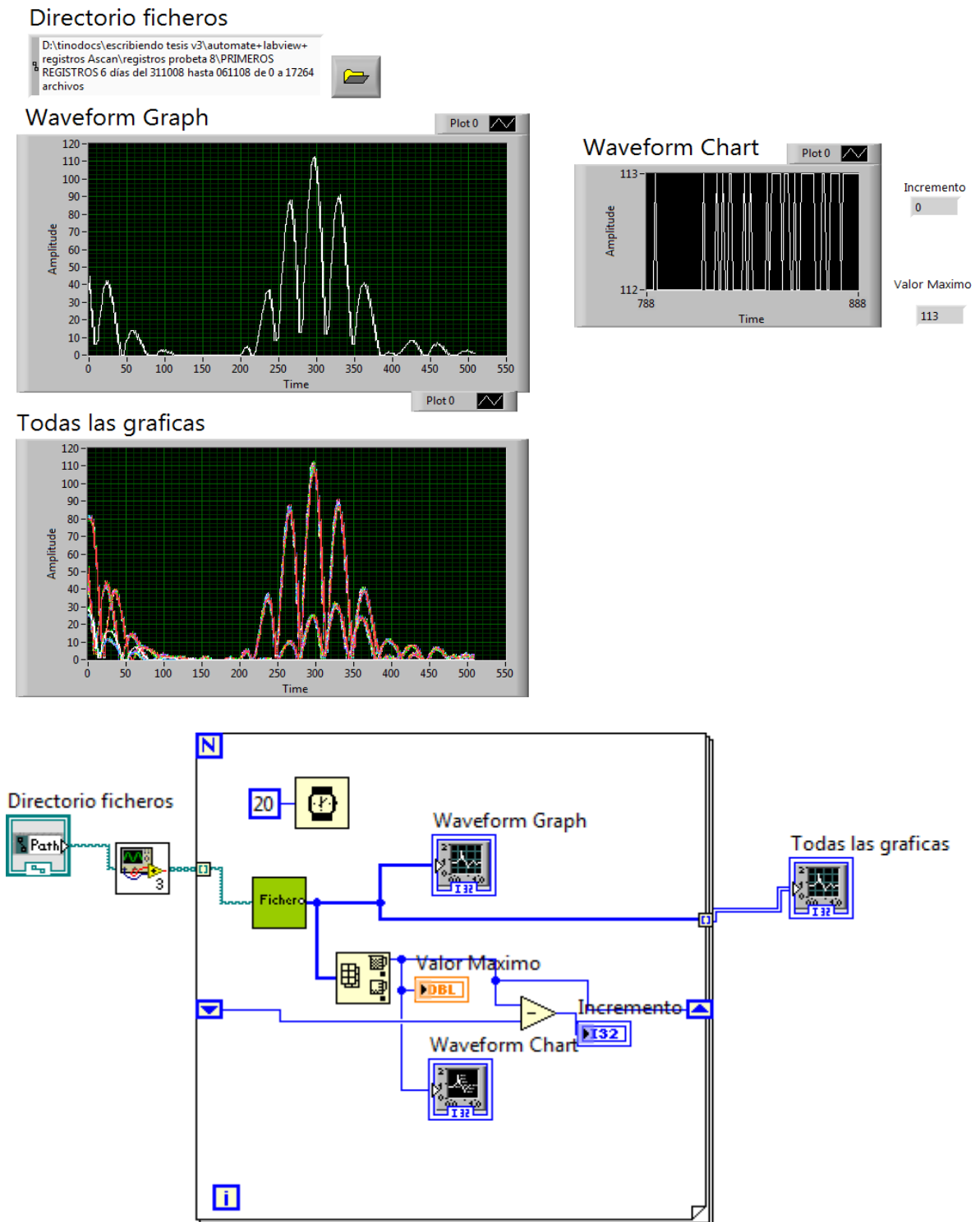
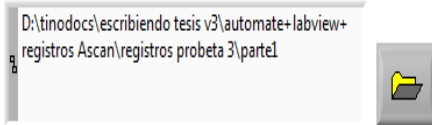
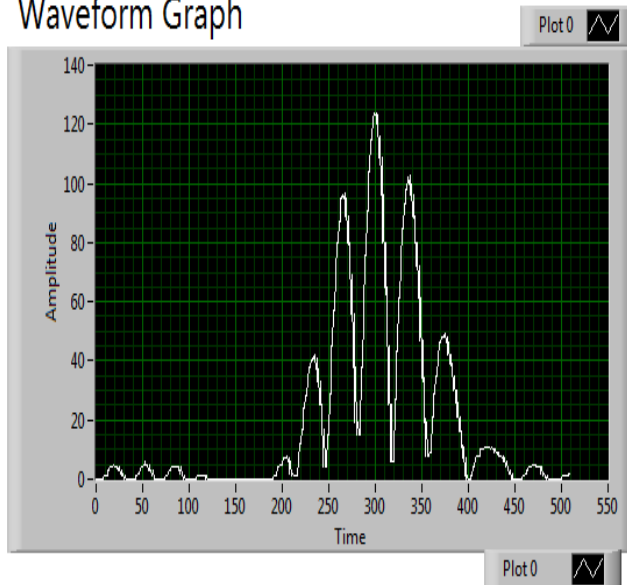


Figura 54. Visualización automática VI: Panel frontal y diagrama bloques

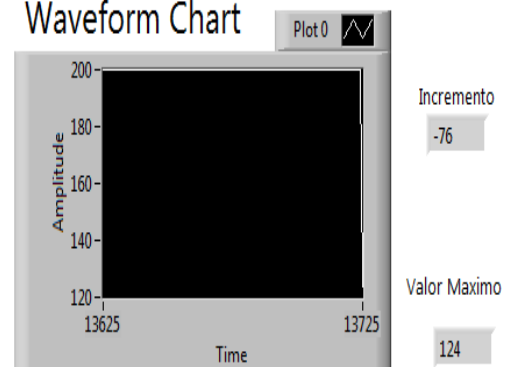
### Directorio ficheros



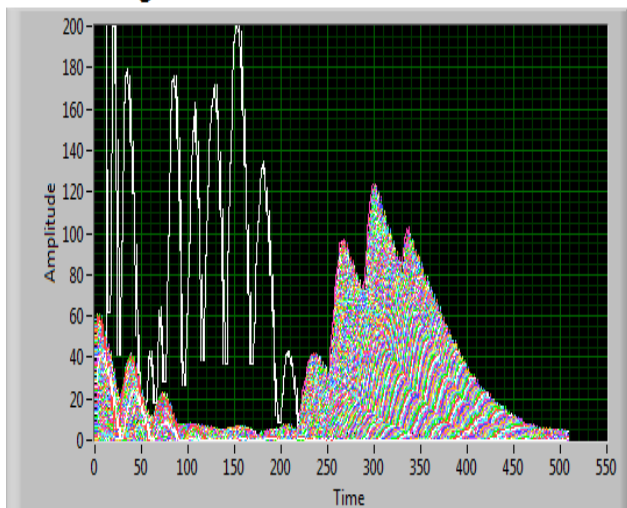
### Waveform Graph



### Waveform Chart



### Todas las graficas



**Figura 55.** Visualización automática VI bis: Panel frontal/diagrama bloques

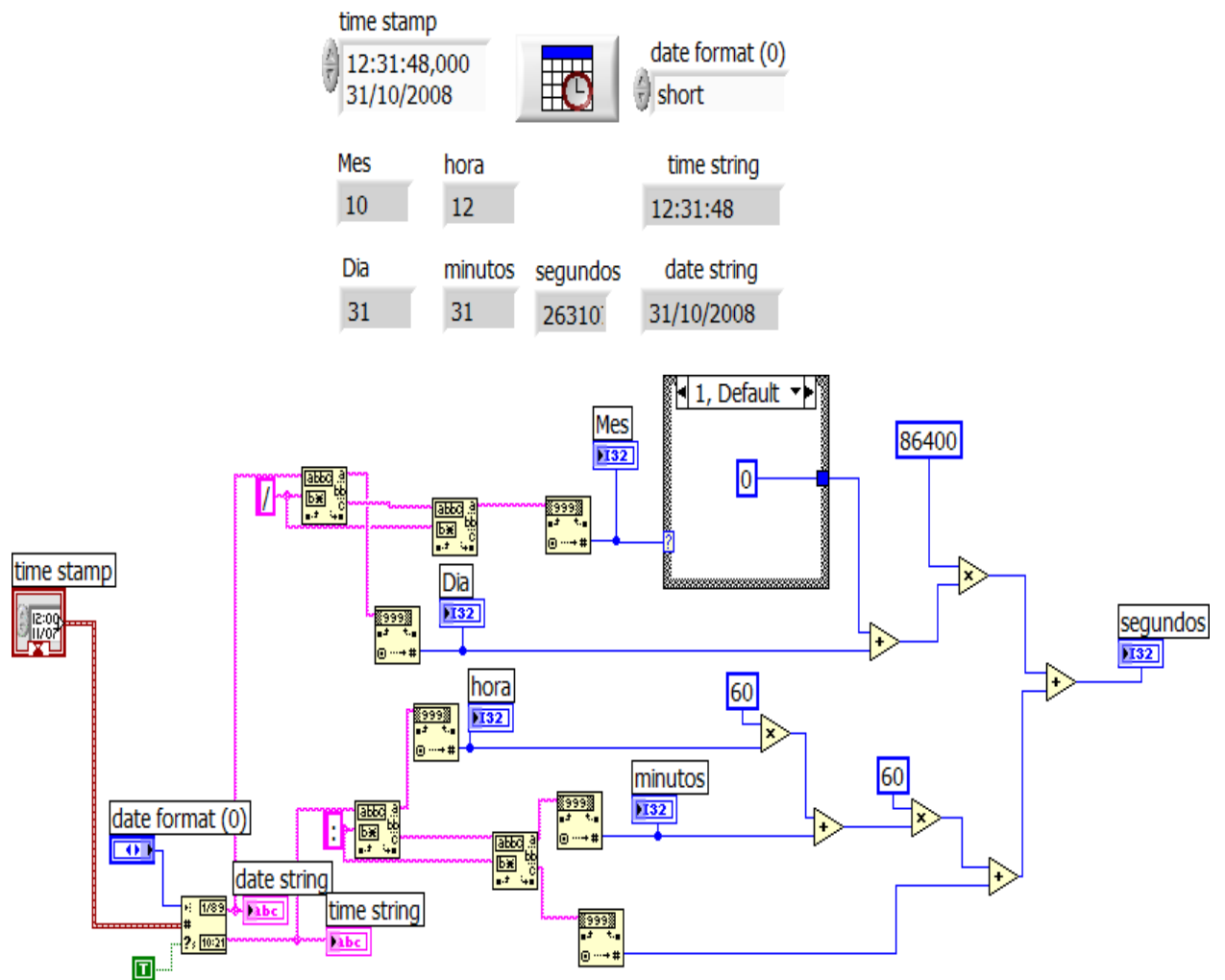


Figura 56. Lee fecha de grabación VI. Panel frontal y diagrama de bloques



A4.4 CURVA DE MADURACIÓN (LabVIEW).

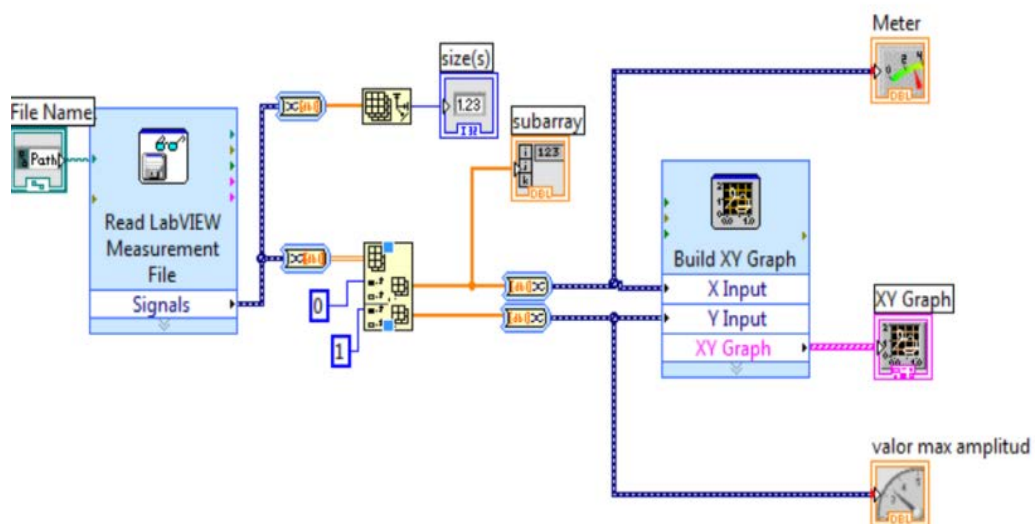
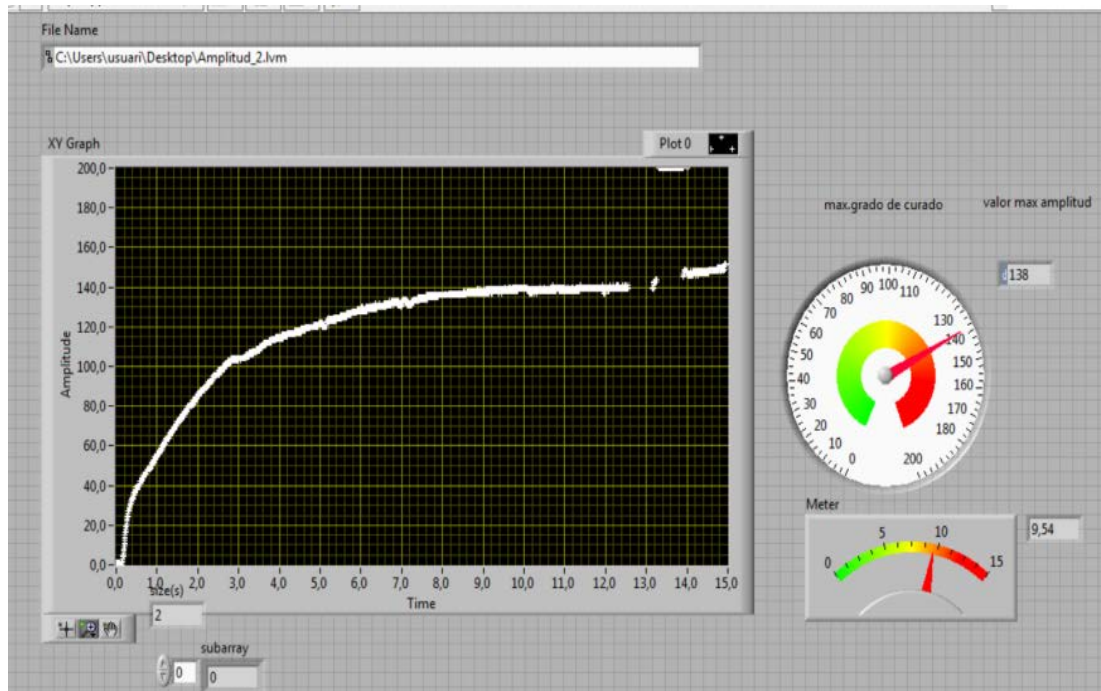


Figura 58. Curva de maduración. Panel frontal y diagrama de bloques



## ANEXO 5. PUBLICACIONES EN REVISTAS INDEXADAS

---

Autores: M.D.Vlad, R. Torres, J. López, M. Barracó, Juan A. Moreno, E. Fernández.

Título: DOES MIXING AFFECT THE SETTING OF INJECTABLE BONE CEMENT? AN ULTRASOUND STUDY

Referencia revista / libro: Journal of Materials Science: Materials in Medicine

Clave: A Volumen: 18,nº2 Páginas, inicial: 347 final: 352 Fecha: 25 febrero 2007

Editorial (si libro): Springer Netherlands. Springer Science. Lugar de publicación: Netherland

---

Autores: Rafael S. Peres, Elaine Armelin, Juan A. Moreno-Martínez, Carlos Alemán, Carlos A. Ferreira.

Título: TRANSPORT AND ANTIFOULING PROPERTIES OF PAPAIN-BASED ANTIFOULING COATINGS.

Referencia revista: Applied Surface Science. Elsevier. March 2015.

---

ATENCIÓN ¡

Las páginas 88 a 103 de la tesis el contienen las publicaciones citadas, que pueden consultarse en la web de los respectivos editores

<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10856-006-0699-0>  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433215005309>

Servei de Biblioteques. Universitat Politècnica de Catalunya