

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica



**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE
ULTRASONIDOS EN PROBETAS DE HORMIGÓN CON
DISTINTOS GRADOS DE HUMEDAD**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

José Antonio Benítez Herreros

2011

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Máster Universitario en Innovación Tecnológica en Edificación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**“ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE
ULTRASONIDOS EN PROBETAS DE HORMIGÓN CON
DISTINTOS GRADOS DE HUMEDAD”**

Autor

José Antonio Benítez Herreros

Ingeniero de Edificación, Arquitecto Técnico

Director/a o Directores/as

Alfonso Cobo Escamilla

Dr. Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arquitecto Técnico

Esther Moreno Fernández

Dra. en Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química

Licenciada en Ciencias Químicas

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2011

A mis padres, a mi hermano Javi y a mi familia.

A Sara.

A mis amigos Álvaro C., Álvaro R., David, Guille, Paco y Roberto.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar mi más humilde gratitud a mis directores de trabajo, el Dr. Alfonso Cobo Escamilla y la Dra. Esther Moreno Fernández. Sin su inestimable y desinteresada guía, ayuda, apoyo, comprensión y paciencia, sobre todo paciencia, durante todo el curso jamás hubiera llegado hasta aquí. Muchas gracias por haberme brindado la oportunidad de trabajar con vosotros.

Agradezco al departamento de Materiales de Construcción la posibilidad de utilizar las instalaciones del Laboratorio de la escuela, en especial al responsable, el Dr. Mariano González Cortina. No puedo olvidar los consejos y la ayuda de los técnicos del laboratorio, D. Santiago Villa y D. Javier Acirón, con los que he pasado muchas horas de duro trabajo.

Le doy las gracias a la Dra. Carmen Viñas, que me cedió esa sala que ha sido prácticamente mi segunda casa.

He de mostrar mi gratitud a D. Fernando Macho y a D. Francisco Javier López-Asiaín por no dudar en prestarme su ayuda desinteresada recomendándome para este curso.

RESUMEN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo de la construcción y la ingeniería a lo largo de la Historia.

El estudio del comportamiento y las propiedades de este material a lo largo del tiempo es fundamental gracias a las características monolíticas y mecánicas que presenta y a la abundancia de sus componentes en la naturaleza.

Hay numerosos documentos técnicos y normativos que rigen los procedimientos y criterios necesarios para dicho estudio. Atendiendo a qué características se pretenden estudiar se emplean distintos métodos, más o menos destructivos, con las ventajas e inconvenientes que implica.

Las técnicas ensayo no destructivas se emplean en prácticamente la totalidad de estudios del hormigón gracias a las posibilidades que ofrecen de examinar un producto si alterar sus propiedades.

El presente trabajo muestra el estudio experimental realizado sobre probetas cúbicas de hormigón en masa de la evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos a través del hormigón y el grado en que afectan distintas variables a dicha velocidad, y su posible relación con su resistencia a compresión.

Se ha examinado el material por medio de métodos destructivos y no destructivos empleando distintas dosificaciones y distintos materiales con el fin de obtener conclusiones acerca de la influencia de los mismos en la propagación de ondas acústicas.

Los resultados de los ensayos determinan la importancia de la dosificación empleada, siendo más determinante el contenido de agua durante la fabricación de la mezcla que el tipo de árido empleado, así como la importancia del medio al que están expuestas las muestras.

Palabras Clave:

Ensayos No Destructivos, Impulso ultrasónico; Velocidad de propagación de ondas; Hormigón; Resistencia a compresión.

ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials in the world of construction and engineering throughout History.

The study of the behavior and properties of this material during the time is essential due to the monolithic and mechanical characteristics that it shows, and because of its components abundance in nature.

There are numerous technical and legal documents that set the procedures and criteria need to carry out that study. Attending to which characteristics that are pretended to be investigated, different methods are used more or less destructive, presenting advantages and disadvantages between each other.

Nondestructive techniques are used in practically the whole concrete studies all over the world because of the possibilities that offer by testing a product without modifying its properties.

The present work shows the experimental study, practiced on mass concrete cubic probes, of the evolution of the ultrasonic propagation speed through concrete and the degree in which different factors can affect that velocity, and the mighty relation with the compression resistance.

This material has been examined by destructive and nondestructive methods, using different elements and component dosages in order to obtain conclusions about the influence of them on the acoustic wave propagation.

Test results determine the importance of component proportion used. It is more important the water and moisture content used during the manufacturing process than the type of gravel added. It is also relevant the environment in which the concrete probes is exposed to.

Keywords:

Nondestructive Tests; Ultrasonic pulse; Wave propagation speed; Concrete; Compression resistance.

INTRODUCCIÓN

El empleo del hormigón está muy extendido en el sector de la construcción y la ingeniería a nivel mundial, es uno de los materiales más empleados a lo largo de la Historia. Su uso se extiende desde fines estructurales hasta meramente decorativos.

Se trata de un material de construcción constituido fundamentalmente por rocas, de tamaño máximo limitado, unidas por una pasta aglomerante formada por un conglomerante, cemento, y por agua.

Debido a la capacidad de adaptación a prácticamente cualquier forma, su comportamiento monolítico con buenas características mecánicas y a la abundancia de los elementos que lo componen en la naturaleza, es un material fundamental en la construcción de estructuras, por lo que el estudio del comportamiento de este material se presenta clave para su utilización.

Existen desde hace décadas numerosas técnicas muy precisas de estudio y evaluación del hormigón, con el propósito de conocer el comportamiento de este material según las condiciones a las que se encuentre sometido.

Atendiendo a la clasificación más completa y aceptada de los métodos de ensayo que se pueden llevar a cabo en un material, radica en los efectos que puedan ocasionarles: Técnicas de Ensayo Destructivas y No Destructivas.

Las primeras son las más precisas y las que permiten obtener mayor información a partir de una muestra. Sin embargo, los avances tecnológicos y las prestaciones que ofrecen las segundas, las han hecho más presentes en ámbitos como el del estudio de la calidad en los procesos de fabricación o el mantenimiento y rehabilitación de estructuras en edificación.

Los métodos no destructivos permiten el estudio de un material manteniendo un control uniforme en el nivel de calidad, tanto en su fabricación

como durante su funcionamiento. Mediante estas técnicas es posible hallar parámetros muy próximos a los resultantes de las destructivas con un alto grado de fiabilidad, sin ocasionar perjuicio alguno en la muestra examinada.

Las posibilidades que presentan las técnicas no destructivas permiten un gran número de ensayos. Reduce tiempos de extracción, reparación y fabricación de muestras, se optimizan los tiempos de dedicación y se obtiene un mayor número de observaciones.

El trabajo que se presenta bajo el título “**Estudio de la evolución de la velocidad de ultrasonidos en probetas de hormigón con distintos grados de humedad**” pretende compilar los métodos de ensayo no destructivo empleadas en materiales más relevantes, así como el desarrollo de la técnica de propagación de ultrasonidos en hormigón.

Es objeto de estudio el comportamiento de la propagación de ondas ultrasónicas en el hormigón combinando distintas variables, para hallar la influencia que mantienen éstas.

El conjunto de actividades relativas a la realización del presente trabajo fin de máster ha sido realizado en el laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, de la Universidad Politécnica de Madrid.

OBJETIVOS

El hormigón es uno de los materiales más empleados en la construcción y la ingeniería a nivel mundial. Una de las partes más importantes es el estudio del comportamiento del material según las condiciones en las que se ha fabricado y el ambiente al que se encuentra expuesto. Para ello, se emplean diferentes técnicas, destructivas y no destructivas.

Los objetivos que se plantea el presente trabajo son los siguientes:

- Estudio de las principales técnicas no destructivas empleadas en la inspección de materiales, en especial sobre el hormigón.
- Desarrollo de las técnicas no destructivas basadas en la transmisión de ondas acústicas ultrasónicas en el hormigón.
- Obtención de los principales factores que determinan la velocidad de propagación de ultrasonidos en hormigón.
- Análisis de la posible correlación lineal entre la velocidad de propagación y el peso de las muestras ensayadas.
- Influencia del empleo de distintas dosificaciones y materiales durante la fabricación del hormigón en la velocidad de transmisión de ondas acústicas y en la resistencia a rotura por compresión del material.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se compone de cinco apartados bien diferenciados:

En el **primer capítulo** se estudia qué son los ensayos no destructivos y qué características presentan. Se reúnen los principales métodos en materiales atendiendo a diferentes clasificaciones, haciendo mención especial a los más empleados en hormigón.

El **segundo capítulo** detalla las técnicas de ensayo basadas en la propagación de ultrasonidos en hormigón.

- Se hace un breve recorrido por la evolución cronológica de estos métodos; se definen los principios fundamentales en los que se basan estos ensayos.
- Se determinan los componentes que integran un equipo de ultrasonidos común, y su funcionamiento; y los diferentes métodos de ensayo posibles en elementos de hormigón.
- La obtención de la velocidad de propagación de ondas, valorando los factores que pueden influir en dicha medida.
- Las posibles aplicaciones directas y extrapolables que presentan los ultrasonidos en el estudio del comportamiento de elementos de hormigón.
- Las limitaciones derivadas del empleo de éste método, y la medida en que se pueden evitar.

En el **tercer capítulo** se detalla el planteamiento del proceso experimental y analítico, el desarrollo y el fundamento de las técnicas empleadas. Las características de los materiales empleados.

El **cuarto capítulo** refleja el conjunto de resultados obtenidos en cada una de las fases de trabajo, así como la discusión de los mismos.

En el **quinto capítulo** se exponen las conclusiones y líneas a seguir en futuras investigaciones resultantes de los estudios desarrollados.

ÍNDICE

1	TÉCNICAS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO (E. N. D.).....	1
1.1	MÉTODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVOS.....	3
1.2	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN HORMIGÓN.....	5
1.2.1	Reconocimiento superficial.....	5
1.2.1.1.	Determinación de la dureza superficial.....	5
1.2.1.2.	Determinación de la resistencia a arrancamiento del hormigón (“Pull-out”)	7
1.2.1.3.	Emisión de Ondas Electromagnéticas: Rayos Infrarrojos (Termografía).	7
1.2.1.4.	Métodos ópticos.....	8
1.2.2	Reconocimientos internos.....	9
1.2.2.1.	Métodos basados en la emisión de ondas acústicas.....	10
1.2.2.2.	Métodos basados en la emisión de ondas electromagnéticas.....	12
1.2.2.3.	Métodos de Inducción Electromagnética. Corrientes inducidas.....	13
2	TÉCNICAS DE ENSAYO MEDIANTE ULTRASONIDOS. APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN EL HORMIGÓN	14
2.1	EVOLUCION HISTÓRICA DEL EMPLEO DE LAS TÉCNICAS BASADAS EN LA PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS	15
2.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS. NATURALEZA Y TIPOS.....	18
2.2.1	Propagación de los ultrasonidos.....	23
2.2.1.1	Velocidad de propagación.....	23
2.2.1.2	Impedancia acústica.....	24
2.2.2	Reflexión y refracción de las ondas elásticas.....	25
2.2.3	Atenuación de ondas ultrasónicas.....	28
2.3	EQUIPO DE ENSAYO MEDIANTE ULTRASONIDOS. COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO.....	30
2.3.1	Componentes del equipo de ultrasonidos.....	31
2.3.2	Funcionamiento.....	32
2.3.3	Palpadores.....	34

2.4	CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO	46
2.4.1	Método de ensayo por Impulso-eco.....	46
2.4.2	Método por transmisión.....	47
2.4.3	Método por resonancia	48
2.4.4	Ensayos por contacto y en inmersión.....	49
2.4.5	Ensayos manuales y automáticos.....	51
2.5	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPULSOS. PROCEDIMIENTOS Y FACTORES QUE INFLUYEN EN ELLA	53
2.6	CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL IMPULSO Y LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.....	63
2.7	INCONVENIENTES DEL MÉTODO	66
3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO	68
3.1	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	68
3.2	MATERIALES EMPLEADOS.....	69
3.3	FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN. PROBETAS CÚBICAS ...	73
3.4	TÉCNICAS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICAS	74
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	81
	FASE DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	82
	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	93
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS A SEGUIR EN FUTURAS INVESTIGACIONES.....	96
6	BIBLIOGRAFÍA	98
7	ANEXOS	104
7.1	ANEXO I.....	105
7.2	ANEXO II.....	138
7.3	ANEXO III	145
7.4	ANEXO IV	147

1 TÉCNICAS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO (E. N. D.)

Ensayos No Destructivos (END), en inglés Nondestructive Testing (NDT), son aquellos que permiten inspeccionar la calidad de un objeto sin dañarlo, de manera que pueda ser utilizado posteriormente en las funciones para las que fue diseñado (Dávila Ruiz. 2010).

Se definen como los que se realizan sobre elementos acabados o semiacabados, sin interferir con el uso futuro de las mismas (ASME Boiler and Pressure Vessel Code 1998).

Se puede decir que los métodos de END son una modalidad de inspección y análisis de una pieza que permite la aplicación o utilización de la misma si la modificación en sus características físicas, químicas o mecánicas, que puedan alterar su posterior uso, de forma independiente o como parte de un equipo o estructura (Soria Lemus. 2004).

Los métodos de END de materiales surgieron como consecuencia de la necesidad de definir la calidad intrínseca de un producto sin deteriorarlo, es decir, sin perjudicar su ulterior empleo (F. Ramírez Gómez, M. Fernández Soler, y otros 1996).

Permiten el control del 100 % de una producción y pueden obtener información de todo el volumen de una pieza, con lo que contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme, con la consiguiente conservación y aseguramiento de la calidad funcional de los sistemas y elementos (Berganza y Hernández 2007).

Se trata de técnicas que ayudan a prevenir fallos y roturas en los componentes examinados, que podrían dar origen a accidentes o pérdidas de operatividad de instalaciones, lo que representa beneficios económicos.

Mediante END es posible realizar numerosas pruebas sobre las piezas, simulados en laboratorio o extraídos del elemento original.

Los ensayos no destructivos ofrecen la posibilidad de medir un parámetro característico del material ensayado, en el caso de este trabajo el hormigón, (dureza superficial, módulos elásticos, etc.) que se puede relacionar con su resistencia a compresión.

Como principales aplicaciones de los ensayos no destructivos, cabe destacar (Cañas Guerrero y Fuentes Pardo 2001):

- a) Medida de uniformidad del material en una estructura.
- b) Medida del grosos de una capa de hormigón (suelo, forjado, etc.).
- c) Monitorización en el tiempo de cambios en las propiedades del hormigón.
- d) Evaluación de sistemas estructurales y detección de defectos.
- e) Medida de la resistencia o del módulo de deformación del hormigón.
- f) Estudio del proceso de fraguado y endurecimiento del material.

De acuerdo con la Norma de Ensayos de Hormigón, los END no son sustitutivos de los métodos destructivos que se emplean para determinar la resistencia del hormigón, sino complementarios. Estos métodos sólo permiten una estimación de la resistencia, si es posible establecer para cada hormigón ensayado una correlación fiable, mediante la extracción de una serie de probetas-testigo en las zonas en que esto sea posible o bien con probetas representativas realizadas durante la construcción y curadas en las mismas condiciones (UNE-EN12504-4 2006).

A pesar de esto, los ensayos que conllevan la destrucción total o parcial del elemento examinados también generan una serie de inconvenientes respecto a la necesidad de personal especializado que realice las pruebas, la realización imprescindible de numerosos ensayos sobre piezas que se han de extraer del elemento original, y que no van a poder ser repuestas en las mismas condiciones a como se encontraban anteriormente, un aporte de tiempo mayor debido a la mayor dificultad, y en definitiva, un coste económico.

1.1 MÉTODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVOS

En el estudio de las propiedades y características de los materiales se suelen emplear numerosas técnicas de END, dependiendo del elemento a evaluar y los factores a determinar. Los ensayos empleados, pueden distinguirse, según (F. Ramírez Gómez, M. Fernández Soler, y otros 1996) (Sirvent Casanova y García Barreira 1994) atendiendo a:

a) El fundamento físico empleado:

- **Ondas electromagnéticas.**

Fenómenos basados en las propiedades eléctricas y/o magnéticas de las muestras (Rayos γ ; Rayos X; Rayos Ultravioleta; Espectro visible; rayos infrarrojos; microondas; radioondas; de propiedades eléctricas; de propiedades magnéticas).

- **Ondas elásticas o acústicas.**

En función de la frecuencia acústica empleada:

- **Ultrasónicos** (Impulso-eco; Transparencia; Resonancia; Espectroscopía ultrasónica; Emisión acústica).
- **Sónicos** (Resonancia; Impacto acústico sónico; Corrientes Inducidas; Tap-Coin; Impedancia Mecánica).

- **Emisión de partículas subatómicas.**

Análisis por activación por neutrones; Protones; Partículas β .

- **Otros fenómenos.**

Líquidos penetrantes, partículas filtradas, ensayos de fugas de fluidos, recubrimientos frágiles; que se basan en los fenómenos de capilaridad, estanqueidad, absorción, etc.

b) Las aplicaciones del ensayo.

Las técnicas basadas en END desarrolladas a lo largo de la historia han ido satisfaciendo una serie de necesidades en función de los materiales empleados y el uso al que se éstos se han ido destinando. Por lo tanto, además del fundamento físico en el que se basan dichos ensayos es imprescindible conocer qué principales aplicaciones presentan (F. Ramírez Gómez, M. Fernández Soler, y otros 1996, F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Radiología Industrial 1996) (Berganza y Hernández 2007).

- **Determinación de defectos.**

Detección, ubicación y evaluación de heterogeneidades, discontinuidades, impurezas; evaluación de la corrosión y deterioración por agentes ambientales; determinación de tensiones; detección de fugas; defectos en maquinaria en movimiento; puntos calientes, etc.

- **Metrología.**

Medición de espesores de material base de ambos lados y de un solo lado, de recubrimientos, de dureza, controles de nivel, etc.

- **Caracterización de materiales.**

Características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencia de calor y trazado de isoterms.

c) La zona de intervención y evaluación en el elemento, que se detalla en el apartado 1.2.

1.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN HORMIGÓN.

Los métodos de END empleados normalmente en la inspección de la calidad de un elemento o estructura de hormigón se basan en múltiples fundamentos físicos. Los principales estudios tienen lugar a partir de técnicas basadas en la propagación de ondas acústicas a través del material, debido a la heterogeneidad que presenta.

Deben diferenciarse las técnicas que se emplean según la zona de intervención y evaluación que se desarrolla en el elemento: Reconocimiento Superficial o Interno (Sirvent Casanova y García Barreira 1994).

1.2.1 Reconocimiento superficial.

Son aquellos realizados en la capa superficial del elemento a examinar. Se basan fundamentalmente en la resistencia del hormigón a ser atravesado por perforación o hincas de determinados elementos, hendimiento o marca que una masa conocida provoca al golpear con una determinada energía en la superficie del hormigón.

1.2.1.1. Determinación de la dureza superficial.

Pretenden hallar la resistencia del objeto examinado a ser rayado, correspondiéndose con la escala de Mohs. Se pueden distinguir tres formas principales de medida:

a) Esclerómetro o martillo de Schmidt.

Método que permite estimar la dureza superficial y su correlación con la resistencia del hormigón a partir del rebote del mismo sobre el elemento examinado. No es un método muy exacto ya que los resultados se encuentran

muy influenciados por numerosas variables, aunque se presenta muy útil a la hora de comprobar la calidad del hormigón entre distintas zonas de la misma obra. Posee un manejo sencillo y de bajo coste (UNE-EN12504-2 2002). En la Figura 1.1 se muestra el modo de aplicar la herramienta sobre la superficie a examinar.



Figura 1.1 Martillo de Schmidt aplicado sobre superficie de hormigón.

b) Martillo de Frank (Frank Spring Hammer).

Técnica empleada para determinar la resistencia superficial de un elemento a partir de la huella impresa por una esfera de acero que impacta sobre dicho objeto.

c) Pistola de Windsor (Windor Probe).

Consiste en un dispositivo que proyecta sondas. Se basa en la medida de la profundidad en que penetran dichos clavos en la superficie del elemento a examinar (Pucinotti 2009). En la Figura 1.2 se presenta el equipamiento básico de un ensayo de estas características (1.- Pistola; 2.- Sonda; 3.- carga balística).

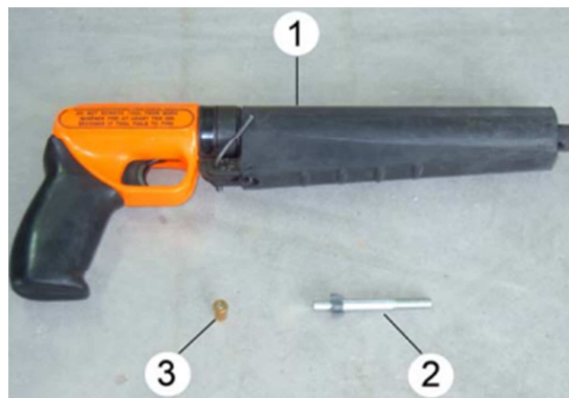


Figura 1.2 Equipo de ensayo con pistola Windsor.

1.2.1.2. Determinación de la resistencia a arrancamiento del hormigón (“Pull-out”).

Técnica que consiste en determinar la fuerza de arrancamiento del hormigón necesaria a partir de una placa, o disco, y una barra introducidas previamente al hormigonado. No se trata de un método alternativo para la obtención de la resistencia a compresión del hormigón, pero con correlaciones analíticas puede dar un valor estimado de resistencia in situ (UNE-EN12504-3 2006), (Carino 2004).

1.2.1.3. Emisión de Ondas Electromagnéticas: Rayos Infrarrojos (Termografía).

Técnica que radica en la conductividad térmica, o la capacidad para transmitir el calor de los materiales, entre un objeto y el ambiente en el que se encuentra (Weil 2004). Se realiza mediante una cámara sensible a la radiación infrarroja, lo que permite captar el flujo de energía emitido por una superficie y transformarlo inicialmente en una señal eléctrica y posteriormente en imágenes, Figura 1.3.

Hace posible la localización de humedades y defectos, y determinar el avance del frente carbonatado en los ensayos colorimétricos, lo que permite extrapolar a la detección de elementos ocultos como conducciones y armaduras en el hormigón.

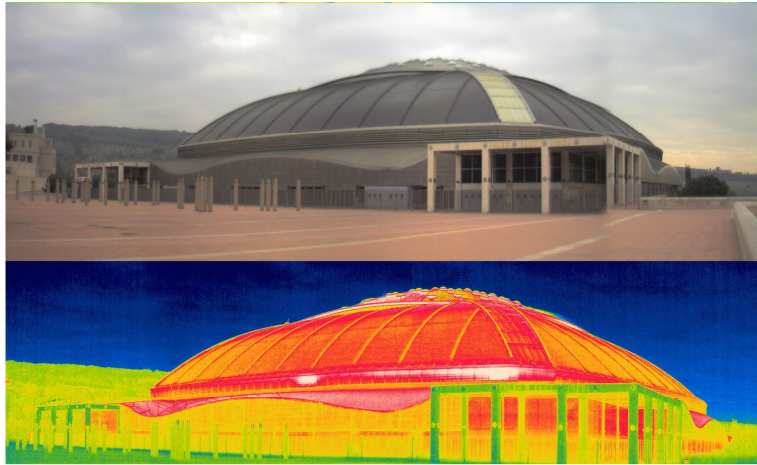


Figura 1.3 Ejemplo de imagen por termografía.

1.2.1.4. Métodos ópticos.

a) Inspección visual.

Método empleado principalmente en estructuras. Representa una fase previa a otros ensayos más sofisticados, y más costosos. Pueden llevarse a cabo bien a simple vista o con ayuda de elementos de aumento de visión (un microscopio, una lupa, etc.) (Dávila Ruiz. 2010).

Llevar a cabo una inspección visual regularmente y en profundidad facilita cualquier tipo de trabajo posterior ya que permite la prevención de cualquier fallo. Se trata del método más empleado dada su sencillez, rapidez y economía de aplicación. En el caso del hormigón se trata de una técnica fundamental para el mantenimiento periódico de estructuras. Aunque sólo permite observar las características exteriores o superficiales del mismo un observador con conocimientos adecuados puede anticipar potenciales fallos.

b) Líquidos penetrantes.

Técnica que se basa en la evaluación visual de la existencia de fisuras o de la reacción que experimenta un material tras la aplicación de un líquido reactivo en la superficie del elemento (Duffó, Farina y Schulz R. 2010).

Un ejemplo habitual es la **fenolftaleína**: la sustancia penetra en la capa más superficial de la pieza examinada debido a la porosidad del hormigón reaccionando con éste según sean las condiciones de acidez del material (se tiñe de color púrpura si la situación es correcta, $\text{pH} > 9,5$), pudiéndose relacionar con el grado de carbonatación de un elemento de hormigón armado y con el grado de corrosión de la armadura de dicha muestra ($\text{pH} < 8$).



Figura 1.4 Probeta de hormigón carbonatado.

Mediante la obtención de probetas a partir de elementos estructurales se puede determinar la profundidad de la franja de hormigón carbonatada (Figura 1.4).

1.2.2 Reconocimientos internos.

Además de las técnicas que permiten examinar las condiciones superficiales de los materiales, es imprescindible conocer las propiedades y las características de los elementos a nivel interno. La capacidad de evaluar el estado en que se encuentra un objeto o una estructura de hormigón en toda su volumetría proporciona una información mucho mayor que la que ofrecen los ensayos superficiales. Dependiendo de la naturaleza de los mismos se emplean diferentes métodos, en el caso del hormigón, los más habituales son:

1.2.1.1. Métodos basados en la emisión de ondas acústicas.

Técnicas basadas en el principio de transmisión de ondas acústicas a través de medios físicos. Se pueden diferenciar distintos tipos de ensayo en función de la frecuencia de onda empleada.

a) Métodos basados en la medida de la velocidad de propagación del sonido.

Técnica que se fundamenta en la medida y determinación de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales a través del hormigón.

Ésta técnica se detalla en mayor profundidad en el apartado 2 del presente trabajo.

b) Métodos basados en la reflexión de sonido.

Son aquellos que consisten en la generación de un pulso de ondas acústicas, originadas por un transmisor de alta frecuencia, 200-25 MHz (impulso-eco) o por un golpe mecánico, de 4 a 25 KHz (impacto acústico), que se propagan a través del hormigón experimentando reflexiones ante un cambio en las características del material, como la densidad, el módulo elástico, etc.

- **Impulso-eco:** originadas por un transmisor de alta frecuencia (200 KHz – 25 MHz).
- **Impacto acústico o Impacto-eco:** mediante golpes mecánicos (con frecuencias comprendidas entre 4 y 25 KHz).
- **Impedancia mecánica:** técnica que combina impactos mecánicos con un martillo con un sensor de la fuerza de impacto junto con un geófono, que mide la velocidad de respuesta. Es muy empleada en ensayos de integridad de cimentaciones profundas de hormigón armado (Bounatian Benatov, Faraco Muñoz y Nouet 1991) (Figura 1.5).



Figura 1.5 Instrumentos de medida de impedancia mecánica.

Como principal ventaja respecto de la técnica basada en ultrasonidos se encuentra en que necesita únicamente una cara accesible para tomar los datos.

Éste método puede aplicarse para la obtención de:

- Medida del espesor del hormigón (el método de impacto-eco genera ondas de baja frecuencia, lo que permite inspeccionar dimensiones grandes, en el hormigón hasta dos metros).
- Localización de huecos internos (coqueras, delaminaciones, fisuras).
- Determinar la extensión del deterioro producido en la cara oculta de los elementos, bien por ataque químico, corrosión de armaduras, etc.

c) Emisión acústica.

Consiste en la detección de energía liberada, de manera brusca, en forma de ondas elásticas durante el proceso en que se agrieta un material. Las señales se analizan por métodos analógicos o digitales (Moreno Fernández. 2008). Esta técnica se emplea en el estudio de:

- Nuevos materiales de base cementosa.
- Fisuración a causa de ciclos de hielo-deshielo.
- Monitorización de grietas activas.
- Localización preventiva de puntos de la fractura.

1.2.1.2. Métodos basados en la emisión de ondas electromagnéticas.

a) Método de inspección basado en la emisión de Rayos X o Rayos γ .

Consiste en la emisión de radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia, denominados Rayos X y Rayos γ (gamma), con energía superior que los ultravioletas, que poseen la capacidad de pasar a través de diferentes materiales.

Mediante esta técnica se emiten radiaciones con una fuente desde un lado de la superficie a partir de la excitación de electrones. Las lecturas de energía dependerán de la densidad del medio que atraviesa, sirviendo para determinar la posición de armaduras, vainas, grietas, coqueras y variaciones de compactación dentro de un material (Moreno Fernández. 2008).

La radiografía con Rayos X tiene limitaciones debidas a la necesidad de equipos costosos y peligrosos de alto voltaje, lo que dificulta su aplicación in situ.

La radiografía por Rayos γ se emplea en el estudio de elementos de hormigón hasta de 450 mm. de espesor, ya que por encima de estas dimensiones, los tiempos de exposición necesarios se hacen antieconómicos (Henry y Aguado de Cea 2009).

b) Métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas de detección y localización por radio (Radio Detecting and Ranging, RADAR).

Esta técnica se basa en la propagación y reflexión de ondas electromagnéticas de frecuencia excesivamente alta (20 MHz y 2 GHz). Se desarrolla mediante el envío de impulsos cortos de energía electromagnética a

través de la estructura hasta encontrar discontinuidades entre materiales con propiedades dieléctricas diferentes (Gacitúa Lovera 2006).

Permite localizar y determinar el espesor del elemento auscultado y la profundidad de las discontinuidades detectadas, mediante reflexión de parte de la energía incidente sobre la pieza, que es recogida por un receptor.

Se emplea normalmente a localizar grandes oquedades, vainas de otros edificios, medición de espesores, detección de armaduras, vainas u otros elementos embebidos y determinación del contenido de agua en el hormigón fresco.

1.2.1.3. Métodos de Inducción Electromagnética. Corrientes inducidas.

Técnica que ofrece la capacidad de medida de distintos factores de gran versatilidad. Se sustenta en el principio de inducción electromagnética, es decir, cuando una espira conductora (en el caso de los ensayos la muestra) se sitúa bajo la acción de un campo magnético variable se genera en ella una fuerza electromotriz inducida, que da lugar a un flujo de corriente eléctrica en la espira (muestra), de intensidad inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del conductor (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Métodos de inducción electromagnética. Corrientes inducidas. 1996).

Como principales aplicaciones cabe destacar:

- Medición de parámetros físicos (conductividad eléctrica, tamaño de grano, dureza, etc.);
- Detección de heterogeneidades o discontinuidades;
- Separación de materiales mezclados (composición química, etc.);
- Medición de diámetros de barras, espesores de láminas, espesores de recubrimientos, etc.

2 TÉCNICAS DE ENSAYO MEDIANTE ULTRASONIDOS. APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN EL HORMIGÓN

Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas, diferenciándose de éstas en que su campo de frecuencias se encuentra por encima de la zona audible y son, por tanto, mecánicas como ellas, que necesitan para su transmisión un medio material (Moreno Fernández. 2008).

Las técnicas de Ultrasonidos (US) se basan en el fenómeno físico de la propagación de ondas acústicas a través de los sólidos, líquidos y gases, dando lugar a numerosas aplicaciones técnicas y científicas, siendo la más significativa el control no destructivo de la calidad de los materiales estructurales (UNE-EN583-1 1999).

Se utiliza frecuentemente para tratar de determinar la uniformidad de un elemento, su espesor, su módulo elástico de Young.

Se emplean frecuentemente en el análisis de defectos en elementos homogéneos, tanto superficial como interiormente. En materiales homogéneos, se emplea para definir las diferentes fases que los componen debido a las propiedades elásticas de propagación de ondas que puedan presentar.

Estas técnicas consisten en mantener un palpador electroacústico en contacto con la superficie del material a ensayar. Éste emite impulso de vibraciones longitudinales que, después de atravesarlo siguiendo una trayectoria de longitud conocida. Llega a un segundo palpador que convierte las vibraciones en una señal eléctrica, mientras una serie de circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso.

2.1 EVOLUCION HISTÓRICA DEL EMPLEO DE LAS TÉCNICAS BASADAS EN LA PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS

En la naturaleza hay animales que utilizan los ultrasonidos como medio de orientación, comunicación, localización de alimentos, defensa, etc. (murciélagos, delfines, perros, pájaros, etc.) (Díaz M. 2010) (Dulia Ortega 2004).

A lo largo de la historia, el hombre ha ido marcando hitos en su descubrimiento, que se desarrolla mediante un breve recorrido histórico por los principales acontecimientos que han marcado el progreso del ultrasonido en el campo de la ingeniería.

En 1881, los hermanos Curie, Jacques y Pierre, publicaron los resultados obtenidos al experimentar la aplicación de un campo eléctrico alternante sobre cristales de cuarzo, dando lugar a ondas mecánicas de alta frecuencia.

En 1883 apareció el Silbato de Galton, que se empleaba para controlar perros por medio de un sonido inaudible a los humanos.

En 1912, poco después del hundimiento del Titanic, L. F. Richardson, sugirió la utilización de ecos ultrasónicos para detectar objetos sumergidos a grandes profundidades.

Entre 1914 y 1918, durante la Primera Guerra Mundial, se desarrolló la técnica intentando detectar submarinos. Fessenden fue capaz de detectar un iceberg bajo el agua a 2 Km de distancia.

En 1917, Langevin y Chilowsky fabricaron el primer generador piezoeléctrico de ultrasonidos, cuyo cristal servía también como receptor. El aparato fue utilizado para estudiar el fondo marino, como una sonda ultrasónica para medir profundidad.

En 1929, Sergei Sokolov propuso el uso del ultrasonido para detectar defectos superficiales en metal, y también para microscopía.

Entre 1939 y 1945, durante la Segunda Guerra Mundial, el sistema inicial desarrollado por Langevin, fue desarrollado para elaborar un detector de submarinos conocido como ASDIC (Allied Detection Investigation Committes). Además se colocaron sondas ultrasónicas en los torpedos, que los guiaban hacia sus blancos. Más adelante, el sistema se convertiría en el SONAR (Sound Navegation and Ranging), precursor de los sistemas de navegación actuales.

En 1940, Firestone desarrolló un reflectoscopio que producía pulsos cortos de energía que se detectaba al ser reflejada en grietas y fracturas.

En 1942 Dussik consigue detectar masas tumorales en el cerebro. En este periodo se consigue la posibilidad de controlar la homogeneidad de diversos materiales.

A partir de 1945 se produce un gran desarrollo de los aparatos y técnicas de ultrasonidos en el campo de la medicina.

En los años 50 los ultrasonidos son aceptados por las sociedades médicas como instrumento de diagnóstico en medicina, por lo que proliferaron los avances.

En 1951 hizo su aparición el Ultrasonido Compuesto, en el cual un transductor móvil producía varios disparos de haces ultrasónicos desde diferentes posiciones, y hacia un área fija. Los ecos emitidos se registraban e integraban en una sola imagen.

En 1952, Howry y Bliss publicaron imágenes bidimensionales en tiempo real.

En 1956, Wild y Reid publicaron 77 casos de anomalías de seno palpables y estudiadas además por ultrasonidos, obteniendo un 90% de certeza en la diferenciación entre lesiones quísticas y sólidas.

En 1959, Satomura difundió el uso, por primera vez, del Doppler ultrasónico en la evaluación del flujo de las arterias periféricas.

En los años 60 se descubren nuevos materiales piezoeléctricos. Se desarrollan nuevos equipos mucho más pequeños. Se incorporan como medios médicos de interpretación de información.

En 1965 La firma austriaca Kretztechnik, junto con el oftalmólogo Dr Werner Buschmann, fabricó un transductor de 10 elementos dispuestos en fase, para examinar el ojo, sus arterias, etc.

En 1968, Sommer reportó el desarrollo de un escáner electrónico con 21 cristales de 1.2 MHz, que producía 30 imágenes por segundo y que fue realmente el primer aparato en reproducir imágenes de tiempo real, con resolución aceptable.

Durante la segunda mitad del siglo, las técnicas de ultrasonidos han ido mejorando sus prestaciones y los equipos de medida han ido reduciendo de tamaño, lo que permitió la extrapolación de los avances en medicina a campos como el del estudio de la calidad en la fabricación de materiales.

En los últimos años del siglo XX, el progreso de los ultrasonidos se ha combinado con las tecnologías informáticas, obteniendo grandes beneficios.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS. NATURALEZA Y TIPOS

Una onda acústica tiene lugar a causa de una serie de vibraciones mecánicas, fluctuaciones de presión que provocan movimientos en las partículas del medio en que se propagan, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Estas vibraciones se caracterizan por los siguientes parámetros: (Figura 2.1)

- **Frecuencia (ν)**, que es el número de impulsos o ciclos por segundo (se mide en hertzios, Hz).

Depende de la naturaleza y dimensiones del cristal piezoeléctrico empleado.

- **Amplitud de onda (A)**, que equivale a la intensidad de emisión (se mide en metros, m).
- **Longitud de onda (λ)**, que es la distancia longitudinal que necesita una onda para completar un ciclo (se mide en metros, m).

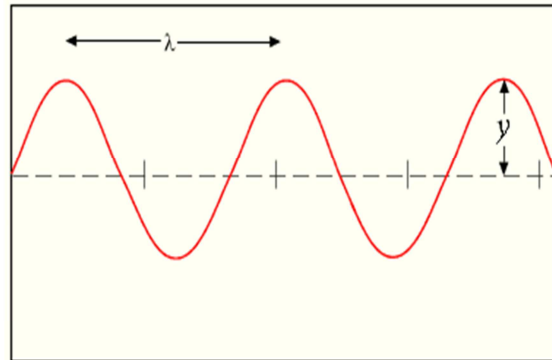


Figura 2.1 Representación esquemática de una onda.

¡Error! No se le ha dado un nombre al marcador. Estos tres primeros parámetros se encuentran relacionados entre sí mediante la siguiente expresión (Ecuación 2.1):

$$\lambda = \frac{\nu}{f}$$

Ecuación 2.1 Relación de los parámetros característicos de una onda.

- **Velocidad de propagación (C)**: corresponde a la distancia recorrida por una onda en un segundo en un medio dado (se mide en m/s).

Es una característica del material, generalmente constante para un material dado. Influyen la elasticidad y la inercia que la pieza presente. Las diferentes velocidades de las ondas dependen de las características del material, como su módulo elástico (E), su coeficiente de Poisson, su módulo dinámico de cizalladura o de Coulomb (G), y su densidad.

- **Presión acústica (P):** es la alternancia de presiones altas y bajas que experimentan las partículas situadas en el campo de una onda elástica.

Las ondas se pueden situar dentro de un espectro según la frecuencia a la que son emitidas (Figura 2.2), estableciendo tres franjas:

- **Infrasonidos:** no audibles por baja frecuencia (inferiores a 10 Hz).
- **Sonidos (franja media o acústica):** audibles por el oído humano (entre 10 y 16.000 Hz).
- **Ultrasonidos:** frecuencias superiores a los 16.000 Hz. En el caso de ensayos mediante esta técnica, se emplean frecuencias de onda comprendidas entre los 0,5 y 15 MHz (UNE-EN12688-1 2010).

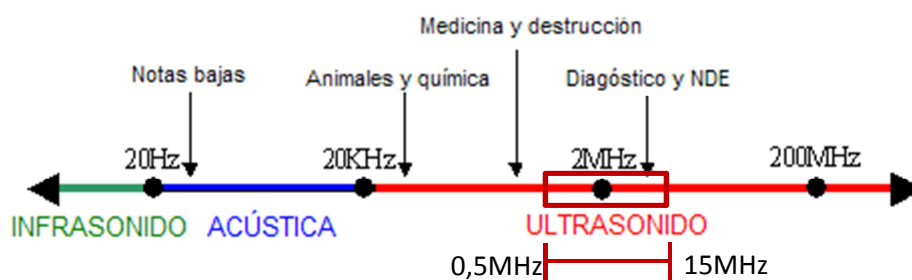


Figura 2.2 Representación esquemática del espectro de ondas acústicas atendiendo a la frecuencia.

La transmisión de ondas mecánicas es un proceso que requiere de la presencia de un medio material para producirse. Pueden diferenciarse distintos tipos de onda dependiendo de su dirección, velocidad y energía transportada (relacionada con la dirección de oscilación de las partículas en función de la dirección de propagación de la onda) (UNE-EN583-1 1999) (Naik, Malhotra y Popovics 2004).

A continuación se detallan los distintos tipos de onda elástica en función del tipo de vibraciones que tienen lugar en el medio en que se propagan:

a) Ondas longitudinales o de compresión.

Son ondas que se propagan perpendicularmente al plano del transductor emisor. Las oscilaciones de las partículas ocurren en la dirección de propagación de la onda.

Pueden darse en cualquier medio material, ya sea sólido, líquido o gaseoso. El elemento generador de ondas transmite a las partículas más inmediatas del medio un movimiento alternativo que provoca una compresión en el sentido de avance, seguido de una extensión de las partículas o enrarecimiento, lo que produce una sucesión de zonas de compresión alternadas con otras en sentido opuesto, separadas entre sí $\lambda/2$, produciendo variaciones en el volumen del objeto, comportándose a modo de muelle (Figura 2.3).

La energía transportada por esta onda es la más importante con respecto a los otros tipos de ondas. También se denominan como ondas de presión o de densidad.

b) Ondas transversales o de cizalladura, o cortante.

Las partículas afectadas por este tipo de onda sufren una oscilación en dirección transversal a la dirección de propagación, dando lugar a desplazamientos de tipo serpenteante.

Sólo pueden darse en materiales que presentan elasticidad a la cizalladura, es decir, aquellos que estén en estado sólido. Su propagación (Figura 2.3) produce distorsión en el cuerpo por el que se propagan, pero no se dan cambios de volumen.

Este tipo de onda es muy empleado en el ensayo de inspección de soldaduras.

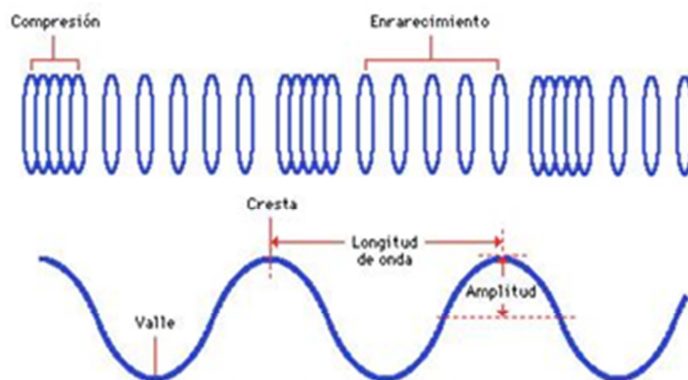


Figura 2.3 Esquema de comportamiento de una onda longitudinal y una onda transversal.

c) Ondas superficiales o de Rayleigh.

Se trata de ondas superficiales que se propagan sólo en la capa más externa, plana o curva, de un sólido. Las oscilaciones de las partículas forman trayectorias elípticas atenuadas en dirección normal a la superficie, similares al efecto de una ola, lo que le da una velocidad menor que las dos anteriores.

El carácter superficial de esta clase de onda hace que el tiempo de recorrido de una cierta distancia dependa de las irregularidades que puedan presentarse en la superficie que sigue la onda. Sufren una gran atenuación si existe un segundo medio, líquido o sólido, en contacto con la superficie, lo que permite detectar su trayectoria. Son muy sensibles y adecuadas para la detección de defectos en superficies de escasa rugosidad.

En la siguiente imagen (Figura 2.4) se incluye una comparación esquemática de estos tres tipos de onda:

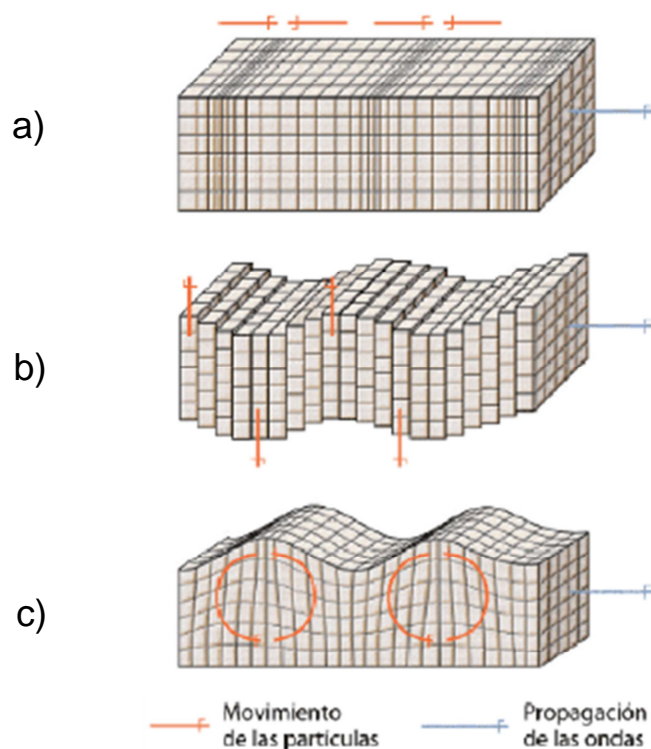


Figura 2.4 Esquema de comportamiento de

a) onda longitudinal, b) onda transversal y c) onda de Rayleigh.

d) Ondas laminares o de Lamb.

Tienen lugar cuando el sólido tiene un espesor mucho menor que su ancho o su longitud. Se puede dar en tubos o láminas de muy poco espesor, en los que una onda de superficie posee una longitud de onda del mismo orden que el propio espesor.

Las ondas de Lamb presentan componentes de la oscilación de partículas perpendiculares a la superficie. Se podría decir que se generan de forma similar a las ondas superficiales, propagándose a lo largo de las dos superficies de la pieza, en láminas (Figura 2.5).

Este tipo de onda se puede clasificar en dos grandes grupos: simétricas y asimétricas. Aunque éstas, a su vez, pueden desglosarse en diferentes modos, por lo que existe un gran número de clases de ondas de Lamb, con

características de atenuación, velocidad de propagación y ángulos de generación distintos entre sí.

En ensayos de materiales, las ondas más empleadas son las longitudinales y las transversales.

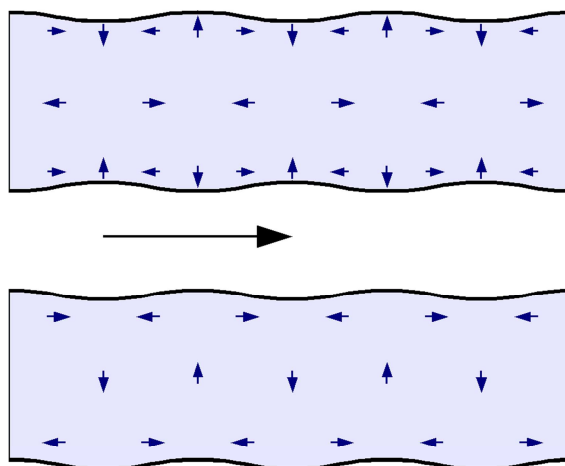


Figura 2.5 Esquema de comportamiento de una onda laminar o de Lamb.

Una vez determinados los parámetros y la naturaleza de las ondas elásticas, se definen los fenómenos asociados a su aplicación en ensayos de materiales: Propagación, Impedancia y Atenuación.

2.2.1 Propagación de los ultrasonidos.

La propagación es el fenómeno por el cual una onda se desplaza por un medio material, sólido, líquido o gaseoso. Depende de una serie de factores basados en la interacción entre las propias ondas acústicas y dicho medio.

En este apartado se contempla la dependencia que presentan la velocidad de propagación, la intensidad, presión, etc.

2.2.1.1 Velocidad de propagación.

La velocidad de propagación de las ondas emitidas depende de las constantes elásticas de los sólidos por los que se desplazan.

En el caso de las ondas longitudinales y de ondas transversales, que se propagan en un medio de dimensiones superiores a una longitud de onda, la velocidad de propagación para cada tipo se expresa de la siguiente manera (Ecuación 2.2, Ecuación 2.3) (Henry y Aguado de Cea 2009) (Urtubey, Schiava y Etse 2003):

$$C_L^2 = \frac{E(1-r)}{\rho(1+r)(1-2r)}$$

Ecuación 2.2

$$C_T^2 = \frac{G}{\rho}$$

Ecuación 2.3

Donde C_L es la velocidad de propagación de ondas longitudinales, C_T la velocidad de ondas transversales, E es el módulo de Young, ρ la densidad, r el coeficiente de Poisson y G el módulo de rigidez.

La velocidad de las ondas transversales es inferior que la de las ondas longitudinales. Mientras que la velocidad de las ondas superficiales es algo inferior a la de las transversales en el mismo medio ($C_S = 0,93 C_T$). Por otro lado, las ondas de Lamb poseen una velocidad variable según los diferentes modos.

2.2.1.2 Impedancia acústica.

Se entiende impedancia acústica por la resistencia que oponen los materiales a la propagación del sonido. Cuando la onda longitudinal se propaga a través de un medio, la relación existente entre la amplitud de onda (A) y la **sobrepresión** creada en el medio (P) se expresa por la Ecuación 2.4 (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Ultrasonidos 1996):

$$P = \rho \cdot C \cdot w \cdot A$$

Ecuación 2.4

Donde c es la velocidad de propagación y w la frecuencia angular ($w = 2\pi f$). Al producto " $\rho \cdot C$ " se le denomina impedancia, que afecta a los fenómenos de reflexión y refracción en la superficie de separación de los medios.

La **intensidad ultrasonora** (Ecuación 2.5) es la energía que pasa por unidad de superficie y tiempo. Viene determinada por la siguiente expresión (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Ultrasonidos 1996):

$$I = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho \cdot C}$$

Ecuación 2.5

De donde deducimos, finalmente, que la intensidad ultrasonora puede simplificarse de la manera que aparecen en la Ecuación 2.6:

$$I = \frac{1}{2} \rho \cdot C \cdot w^2 \cdot A^2$$

Ecuación 2.6

Lo que indica que la intensidad es proporcional al cuadrado de la sobrepresión y la amplitud de onda.

2.2.2 Reflexión y refracción de las ondas elásticas.

Los fenómenos de reflexión y refracción de ondas ultrasónicas en una superficie de separación entre dos medios, es decir, una superficie límite, se rigen por la Ley de Snell (Veloso Alarcón 2007).

Ésta describe la refracción de las ondas sonoras en un medio donde su velocidad varía. Viene dada por la siguiente expresión Ecuación 2.7:

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2} = a$$

Ecuación 2.7

En la que C_i es la velocidad de propagación en el medio i (1 para el medio 1 y 2 para el medio 2); θ_1 es el ángulo de incidencia en el medio 1 con respecto de la normal a la interfase entre los dos medios; θ_2 es el ángulo de la onda refractada con la normal a la interfase; a es el parámetro de la onda.

De esta ley se puede deducir que:

- En el caso de incidir un haz ultrasónico (tanto longitudinal como transversal) se produce un haz de energía reflejado que debe estar en el mismo plano (junto con la recta normal), con respecto a la superficie de reflexión en el punto de incidencia.
- El ángulo formado entre el rayo incidente y la recta normal es igual al ángulo que existe entre el haz reflejado y la recta normal.
- En el caso de la refracción, ésta se produce cuando un haz ultrasónico pasa de un medio de propagación a otro con una impedancia acústica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si el haz no incide perpendicularmente en la superficie.

Si se añade el principio de Huygens (que establece que todo punto de un frente de onda puede considerarse como una fuente de pequeñas ondas esféricas secundarias que forman un plano paralelo), que rige el movimiento ondulatorio, se obtiene que los haces incidente y reflejado, junto con el refractado, se encuentran en el mismo plano; y que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, entendiendo por tales los que forman respectivamente el haz incidente y el reflejado con la perpendicular (normal) a la superficie de separación trazada en el punto de incidencia (Kane y Sternheim 2000).

A modo simplificado cuando una onda incide de manera normal sobre una superficie, parte de ésta vuelve en la misma dirección (Figura 2.6).

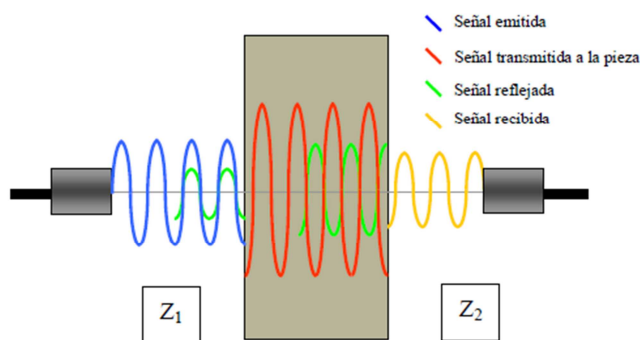


Figura 2.6 Esquema de interacción de una onda con incidencia normal.

En el caso de incidencia oblicua de un haz de ondas longitudinales, con un ángulo θ , este haz se descompone, en general en cuatro haces:

- L_1 = haz longitudinal reflejado.
- T_1 = haz transversal reflejado.
- L_2 = haz longitudinal refractado.
- T_2 = haz transversal refractado.

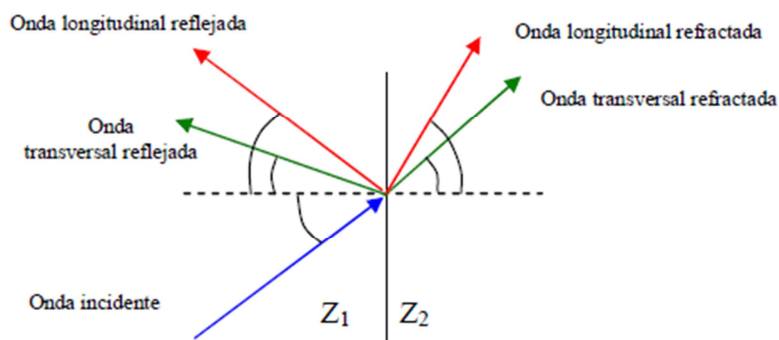


Figura 2.7 Esquema de interacción de una onda con incidencia oblicua.

La relación geométrica entre los ángulos y velocidades de cada tipo de onda y en cada medio viene dada por la Ecuación 2.8:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{V_L} = \frac{\text{sen } \alpha_{L1}}{V_{L1}} = \frac{\text{sen } \alpha_{T1}}{V_{T1}} = \frac{\text{sen } \alpha_{L2}}{V_{L2}} = \frac{\text{sen } \alpha_{T2}}{V_{T2}}$$

Ecuación 2.8

Mediante la ley de Snell es posible observar que cuando se da la condición que aparece en la Ecuación 2.9:

$$\text{sen } \alpha_1 = \frac{V_L}{V_{L2}}$$

Ecuación 2.9

Se obtiene como resultado (Ecuación 2.10):

$$\alpha_{L2} = 90^\circ$$

Ecuación 2.10

Por tanto, sólo existe una onda refractada (transversal). Cuando α_1 cumple con la condición anterior se denomina Ángulo límite para las ondas longitudinales.

La transformación de un tipo de ondas en otro en el proceso de reflexión y refracción, se denomina Modos de conversión.

2.2.3 Atenuación de ondas ultrasónicas.

Es la interferencia que se produce entre las ondas y el material por el que se propagan. La atenuación se debe a la aparición de dos factores simultáneos: Absorción y Dispersión, además de la Divergencia que sufre en su recorrido (Molero Armenta 2009).

$$\text{[Pérdida de intensidad = Absorción + Dispersión + Divergencia]}$$

Absorción de ondas ultrasónicas: se trata de una conversión de la energía mecánica de las mismas en calor, por efectos termo-elásticos. Puede darse por diferentes causas, estando condicionado principalmente por las características del medio de propagación y la frecuencia de las ondas. En la franja de frecuencias que se emplean en los ensayos no destructivos, la

absorción es directamente proporcional a la frecuencia, siendo su contribución a la pérdida de intensidad menor que la producida por la dispersión.

Desde el punto de vista ultrasónico, los materiales no son homogéneos, presentan discontinuidades de impedancia acústica, dando lugar al **efecto de dispersión**, basado en la transmisión y reflexión del frente de pulsos en incidencia con esas heterogeneidades del material.

El fenómeno de dispersión establece que las ondas que se propagan a diferentes frecuencias tienen diferentes velocidades. La presencia de pequeños defectos (poros, segregaciones, inclusiones, etc.), al igual que los granos de una estructura policristalina, como es el caso de los metales, actúan como focos de dispersión, por la distinta impedancia acústica que presentan según su orientación (dada su anisotropía elástica).

Los factores que más influyen en la dispersión ocasionada son el tamaño del grano (mayor cuanto más grandes), la naturaleza del material (que determina su anisotropía elástica) y la frecuencia de las ondas.

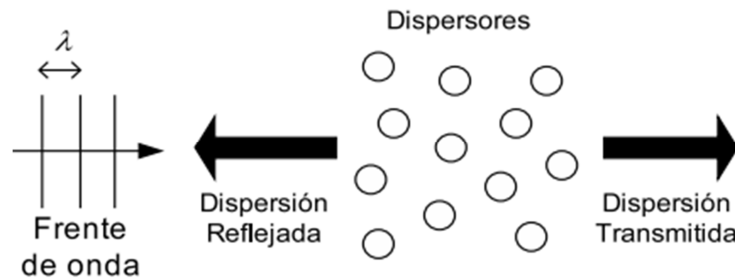


Figura 2.8 Esquema de diferentes tipos de energía dispersada.

Las pérdidas por atenuación determinan una variación de la intensidad acústica, mencionada anteriormente, con la distancia que recorren las ondas en un medio, representándose por la Ecuación 2.11:

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha x}$$

Ecuación 2.11

En la que I_0 es la intensidad inicial e I_1 la intensidad después de un determinado recorrido, x , y α el coeficiente de atenuación del medio.

Al término “ αx ” (Ecuación 2.12) se le denomina “atenuación”, medida en decibelios (dB), que mide el número de decibelios por milímetro que se atenúa un haz en el medio dado. Si se despeja de la anterior fórmula, y teniendo en cuenta que las intensidades son proporcionales a los cuadrados de las presiones acústicas y voltajes generados, queda, atendiendo a la Ley de Ohm ($V=I \cdot R$) las dos versiones de la Ecuación 2.13:

$$\alpha x = 10 \log \frac{I_0}{I_1}$$

Ecuación 2.12

$$\alpha x = 20 \log \frac{P_0}{P_1} \quad \alpha x = 20 \log \frac{V_0}{V_1}$$

Ecuación 2.13

A pesar de que este factor pueda representar un obstáculo en la propagación de ondas acústicas a través de un material, es posible emplear la atenuación para caracterizar materiales mediante la ultrasonidos (Vergara, y otros 2000).

2.3 EQUIPO DE ENSAYO MEDIANTE ULTRASONIDOS. COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO

Los ensayos basados en la propagación de ultrasonidos se realizan por medio de un equipo que consta de un sistema de emisión y recepción de ondas y un sistema de medida de tiempo y/o velocidad de transmisión de esas ondas.

2.3.1 Componentes del equipo de ultrasonidos

Dadas las múltiples aplicaciones que presenta esta técnica, se pueden encontrar desde pequeños aparatos portátiles, para ensayos manuales, hasta grandes máquinas automáticas, pero todas ellas cuentan con una serie de **componentes** básicos comunes (Figura 2.9).



Figura 2.9 Equipo genérico de medida mediante ultrasonidos, junto con un envase que contiene vaselina.

Los elementos de los que consta un equipo de ensayos son, básicamente:

- **Generador de impulsos eléctricos:** emite impulsos al palpador emisor.
- **Palpadores:** llevan a cabo la conversión de los impulsos eléctricos en impulsos mecánicos. En el apartado 2.3.3. se detallan en mayor profundidad.
- **Amplificador:** recibe los impulsos eléctricos procedentes del palpador receptor y los registra.
- **Temporizador electrónico:** mide el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de un impulso eléctrico.

Existen dos tipos de aparatos electrónicos para la medida del tiempo:

- a) **Cronómetro** de intervalos de lectura digital directa.
- b) **Osciloscopio**, que muestra el primer frente del impulso respecto de una escala de tiempos adecuada. Ofrece la posibilidad de examinar la forma de la onda del impulso.

- **Barra o bloque de calibración:** sirve para proporcionar un dato estandarizado para la medida de la velocidad. Aplicando éste componente el equipo de emisión y medida se ajusta a la medida de tara que indica la barra.

2.3.2 Funcionamiento

El **funcionamiento** de un equipo de ensayos por ultrasonidos, se basa en el efecto piezoeléctrico. Los hermanos Jaques y Pierre Curie observaron que en determinadas caras de ciertos cristales aparecían cargas eléctricas cuando se sometía a presión mecánica. Se trata en que ante un proceso de deformación en un material se induce una polarización eléctrica que crea una diferencia de potencial eléctrico. Éste fenómeno también ocurre en el sentido contrario (Figura 2.10) (López García, Carnicero López y Ruiz Pablos 2003) (Venet y Pereira 2004).

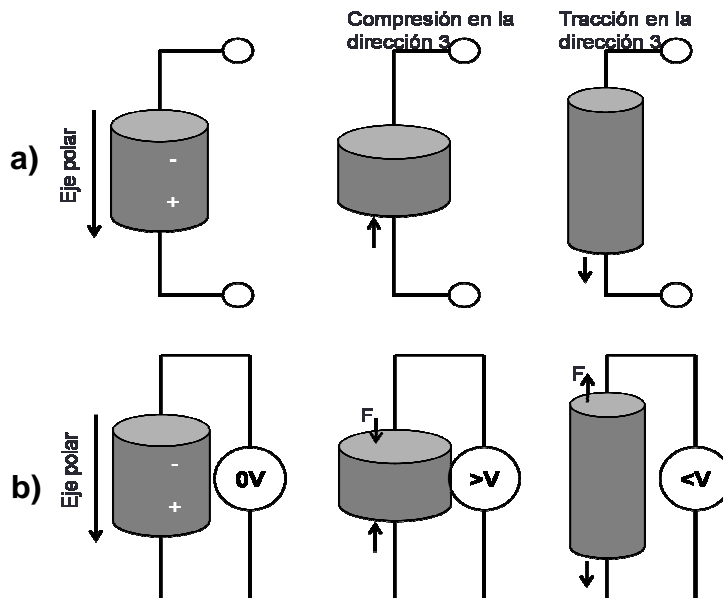


Figura 2.10 Comportamiento estático de una cerámica piezoeléctrica.

- Acción de una deformación mecánica (efecto piezoeléctrico directo).
- Acción de una tensión eléctrica (efecto piezoeléctrico inverso).

Los impulsos eléctricos generados por el equipo son aplicados al palpador, que los transforma en impulsos mecánicos de duración muy breve. Éstos se transmiten a la pieza a examinar, donde se propagan y reflejan en la superficie opuesta o en los defectos que pudiera haber en su trayectoria (Figura 2.11).

Estos estímulos reflejados son recogidos por otro palpador de nuevo y, por efecto piezoeléctrico inverso, transformados en impulsos eléctricos de la misma frecuencia. Son analizados y registrados en el equipo por el amplificador, recogiendo la información necesaria para conocer las incidencias de los impulsos ultrasónicos a través del material, cerrándose así el ciclo de emisión-recepción.

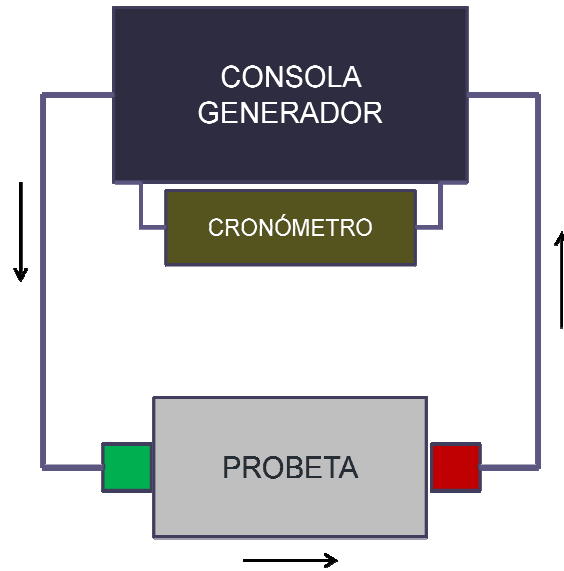


Figura 2.11 Esquema de funcionamiento de un equipo de ultrasonidos.

En la pantalla de un tubo osciloscopio, o en el cronómetro de la consola, se puede visualizar en tiempo real el impulso inicial, el impulso de reflexión de la superficie opuesta y los posibles ecos de discontinuidades o defectos (entre el eco inicial y el de fondo).

Los equipos de ultrasonidos específicos para medidas de espesores, bien por resonancia o por reflexión son en general más sencillos y ligeros. En su mayoría carecen de tubo de rayos catódicos, registrando la señal ya calibrada en espesores, en amperímetro o de forma digital (Venet y Pereira 2004).

Una vez definido el funcionamiento de un equipo básico de ensayo mediante emisión de ultrasonidos y los componentes que lo integran, se desarrollan a continuación las características, tipos y funcionamiento de los **palpadores** que se utilizan en estos equipos:

2.3.3 Palpadores

Un aparato de ultrasonidos cuenta con uno o más palpadores (Figura 2.14). Juegan un papel fundamental en el ensayo ya que es el elemento que entra en contacto más directo con el material a observar.



Figura 2.12 Ejemplo de palpadores de diversos tipos.

Cada pieza consta de un cristal piezoeléctrico, natural o artificial, recubierto por una fina capa metálica a cada lado (generalmente de plata), un amortiguador o pieza de respaldo, una carcasa, una zapata y un conector (Figura 2.13) (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Ultrasonidos 1996) (UNE-CEN/TR15134-IN 2011).

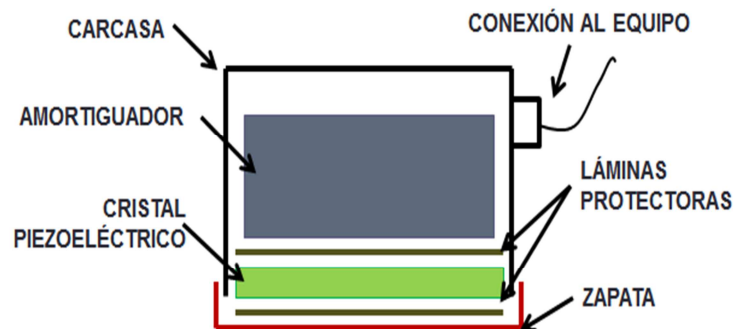


Figura 2.13 Sección esquemática de un palpador de tipo normal.

Las características del palpador dependerán del tipo de cristal seleccionado y de la forma de realizar el montaje de los mencionados elementos.

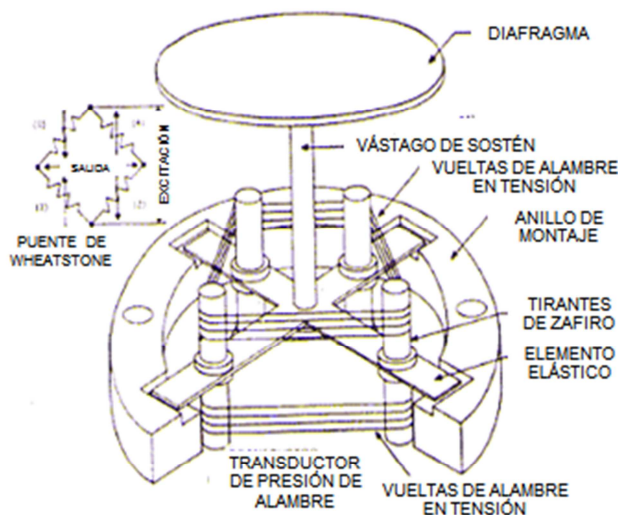


Figura 2.14 Representación esquemática de un palpador.

Como se muestra en la Figura 2.14, un transductor cuenta con un diafragma en lo alto del circuito eléctrico. Al golpear las ondas de presión contra éste, circula una corriente eléctrica por los conductores. Gracias al efecto piezoeléctrico, los palpadores son capaces de reproducir este fenómeno tanto en este sentido como a la inversa.

Los amortiguadores se disponen junto al material piezoeléctrico por la cara opuesta a la que éste entra en contacto con el elemento a observar, debido a dos causas:

- a) Absorber las oscilaciones del cristal al recibir las diferencias de potencial y que no vibre libremente, obteniendo impulsos con una buena resolución para detectar mejor posibles defectos.
- b) Amortiguar las vibraciones producidas por las ondas emitidas por la cara opuesta, para así no tener interferencias y ecos que puedan dificultar la interpretación de los resultados.

La zapata se trata de una lámina de plástico u otro material similar adherido a la cara útil de emisión del cristal, empleada para proteger al cristal del roce con el elemento a ensayar.

Se pueden establecer tres niveles de frecuencias de onda a emplear en función de los casos que puedan darse en cuanto a las dimensiones de los objetos a ensayar (UNE-EN12504-4 2006):

- a) **Frecuencias altas** (entre 60 KHz y 200 KHz), que poseen un comienzo de onda bien definido, pero a medida que atraviesan el hormigón, se atenúan más rápidamente que los impulsos de frecuencia baja. Son utilizados en longitudes de recorrido corto (hasta 50 mm.).
- b) **Frecuencias medias** (desde 40 KHz a 60 KHz), que son adecuados para la mayoría de aplicaciones.
- c) **Frecuencias bajas** (de 10 KHz hasta 40 KHz), que se emplean para casos de longitudes de recorrido largo, hasta un máximo de 15 m.

La frecuencia habitual de los palpadores se sitúa normalmente entre 1MHz y 10MHz (UNE-EN583-1 1999), aunque en las técnicas se pueden emplear entre 0,5 y 15 MHz (UNE-EN12688-2 2010) .

Todos los palpadores poseen un elemento formado **material piezoeléctrico**. Es la pieza sobre la que se sustenta el fundamento de los ensayos. Los hermanos Curie descubrieron el efecto piezoeléctrico en fragmentos de cuarzo, los más empleados en los inicios de las técnicas basadas en este principio, pero al tratarse de un material que necesita una gran diferencia de potencial para reaccionar, se ha ido evolucionando hacia otros materiales. Los más habituales en los ensayos mediante ultrasonidos son (Escalona s.f.) (Tabla 2.1):

Tabla 2.1 Tipos y características de los materiales piezoeléctricos más empleados.

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CUARZO	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene a partir de cristales naturales. • Excelentes características estabilidad térmica, química y eléctrica. • Muy duro y resistente al desgaste y envejecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sufre interferencias en conversión • El menos eficiente. • Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias. • Temperaturas >550 °C pierde sus propiedades piezoeléctricas.
SULFATO DE LITIO	<ul style="list-style-type: none"> • Más eficiente, mejor resolución. • Facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima. • No envejece. • Pocas interferencias en conversión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy frágil • Soluble en agua • Emplear a temperaturas <75 °C.
CERÁMICOS POLARIZADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación. • Los más eficientes a bajos voltajes de excitación. • No les afecta la humedad • Algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300 °C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia mecánica baja, • En ocasiones, interferencias. • Tendencia al envejecimiento. • Menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.
TITANATO DE BARIO	<ul style="list-style-type: none"> • Buen emisor debido a su elevado modulo piezoeléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de acoplamiento y amortiguación. • Baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica. • Limitado a frecuencias <15 MHz. • Presenta interacción entre varios modos de vibración.
METANIOBATO DE BARIO	<ul style="list-style-type: none"> • Buen emisor (Alto módulo piezoeléctrico). • Estabilidad térmica similar al cuarzo (Uso en altas temperaturas). • El mejor para impulsos cortos (Alto coeficiente de amortiguación interna). 	<ul style="list-style-type: none"> • Mala resistencia mecánica (se aplica en frecuencias altas). • Presenta interacción entre varios modos de vibración.
ZIRCONATO TITANATO DE PLOMO	<ul style="list-style-type: none"> • El mejor emisor (Alto modulo piezoeléctrico). 	<ul style="list-style-type: none"> • El más difícil de amortiguar (alto coeficiente de deformación). • Se recomienda ante problemas de penetración.

Atendiendo al modo de utilización, se pueden **clasificar los palpadores** en dos grupos principales: por contacto y de inmersión (Gómez de León 2006) (UNE-EN12688-2 2010) (UNE-CEN/TR15134-IN 2011).

a) Palpadores por Contacto

Son aquellos que necesitan estar en contacto físico con el elemento a examinar, empleando un material de acoplamiento. Se pueden distinguir:

- **Palpadores de Incidencia Normal**

Emiten un haz de ondas longitudinales perpendicular a la superficie de contacto. El cristal suele ser un disco piezoeléctrico de 5 a 40 mm. de diámetro.

Las frecuencias empleadas suelen ser 2 MHz y 4 MHz, aunque existen otros del rango de 1 a 10MHz (UNE-EN583-1 1999).

Se emplean normalmente en problemas de defectología, metrología y caracterización de materiales, principalmente en metales.

Se pueden distinguir diferentes tipos de según el número y la disposición del material piezoeléctrico:

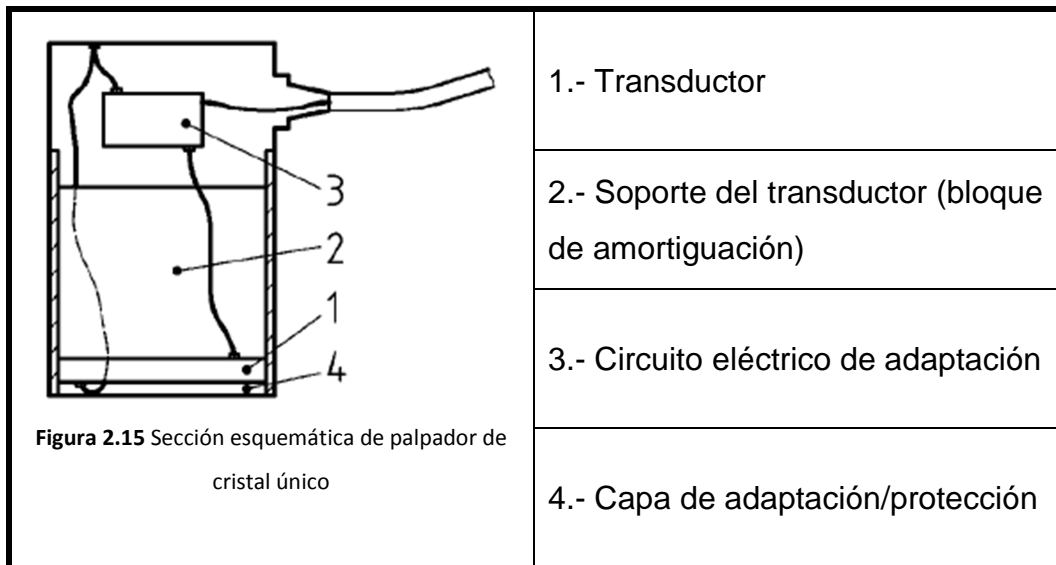
- Palpador de cristal único, emisor y receptor (E+R).
- Palpador con doble cristal, uno emisor y otro receptor (E-R).
- Palpador con cristales múltiples.

- **Palpadores de cristal único, Emisión – Recepción (E+R)**
(Figura 2.15) (Tabla 2.2)

Presentan un solo cristal piezoeléctrico. Realizan la función de emisión y de recepción de impulsos mecánicos indistintamente, según su posición

en el circuito del equipo de ultrasonidos. Son los más sencillos y habituales en los ensayos de transmisión.

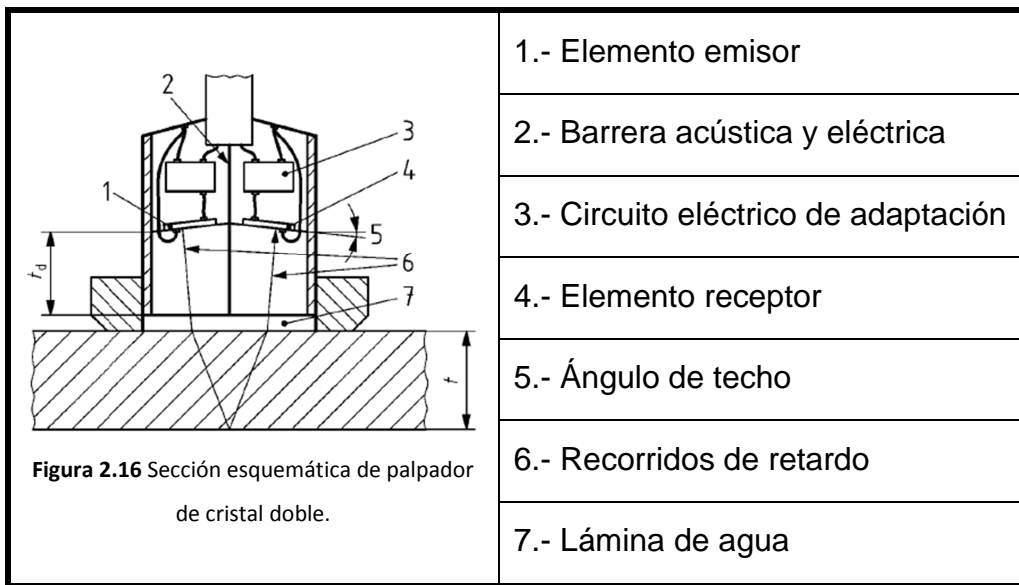
Tabla 2.2 Esquema de composición de palpador de cristal único.



- Palpadores de Emisión – Recepción independiente (E-R)
(Figura 2.16) (Tabla 2.2)

Éstos poseen dos cristales independientes, uno emisor y otro receptor, sobre dos bloques separados por una pantalla acústica, una delgada lámina de material de gran absorción.

Los bloques presentan una ligera inclinación respecto de la normal, dando lugar a una convergencia de los haces a lo largo del espesor de la pieza, sin que el reflejado se salga fuera del área del elemento receptor. De esta manera se evita el problema de la zona muerta que presenta el campo ultrasónico generado por un palpador de cristal único. Se emplean normalmente para la medida de espesores y la detección de defectos próximos a la superficie de medida.

Tabla 2.3 Esquema de composición de un palpador de cristal doble.

- Palpadores de Cristales Múltiples

Son aquellos que poseen numerosos cristales dispuestos a modo de “mosaico”. Para evitar divergencias en el haz ultrasónico, se colocan sobre un adaptador con forma de lente. Se emplean en casos especiales.

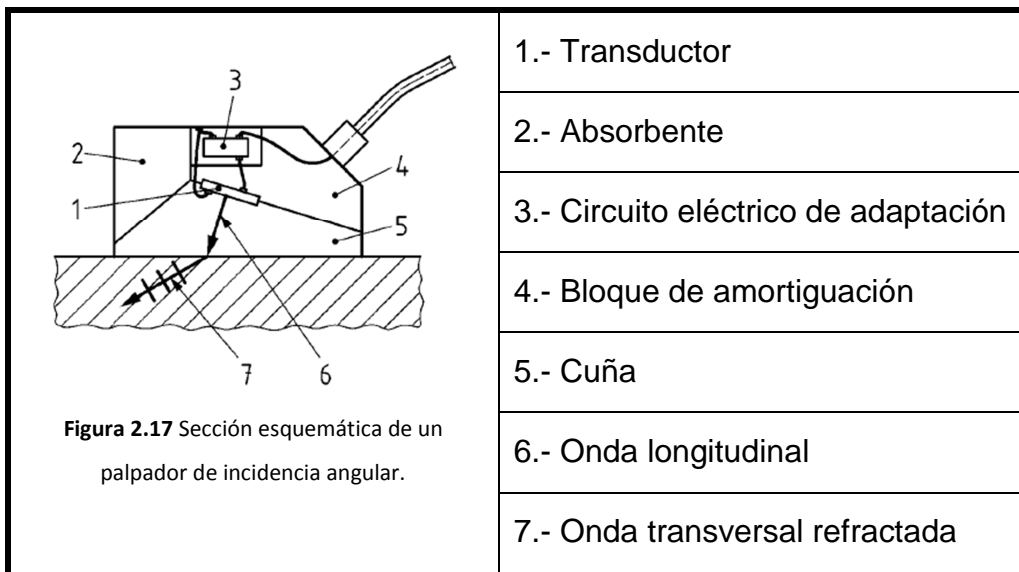
• Palpadores de Incidencia Angular (Figura 2.17) (Tabla 2.4)

Este tipo de elementos presenta el cristal piezoeléctrico adherido a una cuña. Así, el haz emitido incide sobre la superficie del material ensayado formando un ángulo determinado.

Tiene lugar la transformación en un haz de ondas transversales, cuyo ángulo de refracción depende del triángulo de la cuña y de los materiales de la misma y de la pieza a ensayar.

Dado que las ondas longitudinales tienen un mal comportamiento cuando su reflexión se produce bajo ángulos que se apartan de la perpendicular, los ensayos han de hacerse con reflexión directa, nunca en zigzag.

Muy empleado en el ensayo soldaduras de piezas.

Tabla 2.4 Esquema de composición de un palpador de incidencia angular.

- **Palpadores para aplicaciones especiales**

Bien por su geometría o la disposición de los cristales, etc. pueden presentar configuraciones especiales. Es el caso del palpador de gran retardo (similar al de cristal único pero con una zapata de gran espesor), de rueda, el palpador angular emisor-receptor independiente, etc.

b) Palpadores de Inmersión.

Son similares a los normales, pero se trata de elementos totalmente estancos. Los ensayos pueden ser por inmersión total en un tanque o local (en exploraciones de gran extensión).

No requieren contacto físico con la pieza a ensayar, por lo que la zapata indica, en ensayos de inmersión. Esto permite:

- Eliminar riesgos de rotura y desgaste de los palpadores.
- Modificar fácilmente el ángulo de incidencia del haz.
- Aumentar la velocidad del ensayo, especialmente para ensayos automáticos, manteniendo la constancia de las condiciones de acoplamiento.

Las **características** básicas más importantes para determinar la calidad y aplicaciones **de un palpador** son (UNE-EN12688-2 2010):

a) Frecuencia.

Corresponde con la frecuencia de ondas emitidas por el transductor. Depende del espesor y la naturaleza del cristal empleado.

Los valores de frecuencia más empleados son de 1MHz y 10MHz, aunque también se emplean frecuencias dentro del rango de 0,5 MHz y 15 MHz.

A mayor frecuencia del palpador, mayor poder de resolución, mayor sensibilidad de detección, menor divergencia y menor penetrabilidad de ondas (mayor atenuación).

La determinación de la frecuencia fundamental del palpador se puede realizar mediante un osciloscopio y un oscilógrafo auxiliar que permita observar los impulsos de radiofrecuencia y también examinar los diferentes tiempos de barrido (UNE-EN583-1 1999).

b) Resolución

Permite determinar la posibilidad de diferenciar los ecos procedentes de defectos próximos a la superficie de los situados en profundidad.

Por lo tanto, se presentan dos clases:

- **Resolución en campo lejano:** ligada íntimamente a la anchura del impulso y a la frecuencia. La resolución de un palpador depende del amortiguador, zapata, naturaleza de elemento piezoeléctrico y la frecuencia.
- **Resolución en campo próximo:** efecto producido al recibir el palpador un impulso eléctrico del generador.

c) Sensibilidad

Determina la capacidad de un palpador para transformar energía eléctrica en mecánica, y viceversa. Depende fundamentalmente de la naturaleza del cristal.

No debe confundirse con la sensibilidad de detección que se expresa en base al tamaño del defecto mínimo detectado.

Un palpador de alta sensibilidad permite disponer de un margen de amplificación adicional en el equipo, lo que facilita los ensayos de materiales de fuerte espesor o alta atenuación.

d) Punto y ángulo reales de salida

En todo palpador angular hay un punto de salida del haz de ultrasonidos marcado por el fabricante, pero no siempre coincide debido al desgaste de la zapata.

A medida que ésta ve cómo se reduce su espesor el punto de salida va desplazándose hacia atrás, mientras que al colocar una nueva zapata, el punto de salida se mueve en sentido contrario.

Respecto del ángulo de salida del haz, éste no siempre coincide debido al desgaste irregular de la zapata del palpador.

Si ésta se desgasta más por su parte trasera, el ángulo de entrada será ligeramente mayor, y si estuviera más desgastada por la parte delantera, el ángulo de entrada sería menor.

El **campo emitido por un palpador** depende de la geometría y la frecuencia del cristal que contiene. Como se puede observar en la Figura 2.18 y en la Figura 2.19 se distinguen dos zonas bien definidas, con distintas características (Gómez de León 2006) (Dasel Sistemas e Instituto de Automática Industrial (IAI), CSIC 2009):

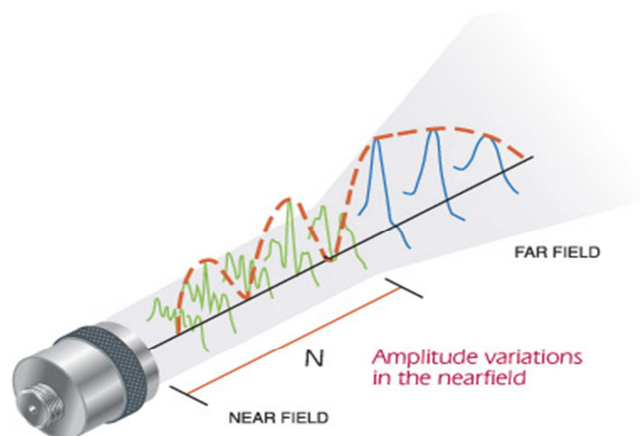


Figura 2.18 Zonas de campo sonoro: Campo cercano y Campo lejano

Campo próximo o de Fresnel: En esta zona no existe divergencia del haz. Se dan interferencias muy acusadas en el caso de ondas continuas o impulsos muy largos, y de menor importancia en el caso de breves impulsos. La longitud de este campo viene dada por la Ecuación 2.14:

$$N = k \frac{D^2}{4\lambda}$$

Ecuación 2.14

Existe un breve periodo de tiempo en el que el cristal, al estar oscilando, y el amplificador se encuentran saturados al pasar el impulso de excitación a través de éste, no detecta las posibles señales reflejadas durante un tiempo “muerto”. Éste fenómeno se da en una zona superficial del material, situado entre 5 mm. y 15 mm .

Campo lejano o de Fraunhofer: se da divergencia en esta zona pero no hay interferencias. Además, la intensidad de la energía disminuye proporcionalmente a la distancia recorrida. La divergencia de la onda producida viene expresada por la Ecuación 2.15:

$$\text{sen } \gamma = k \frac{\lambda}{D}$$

Ecuación 2.15

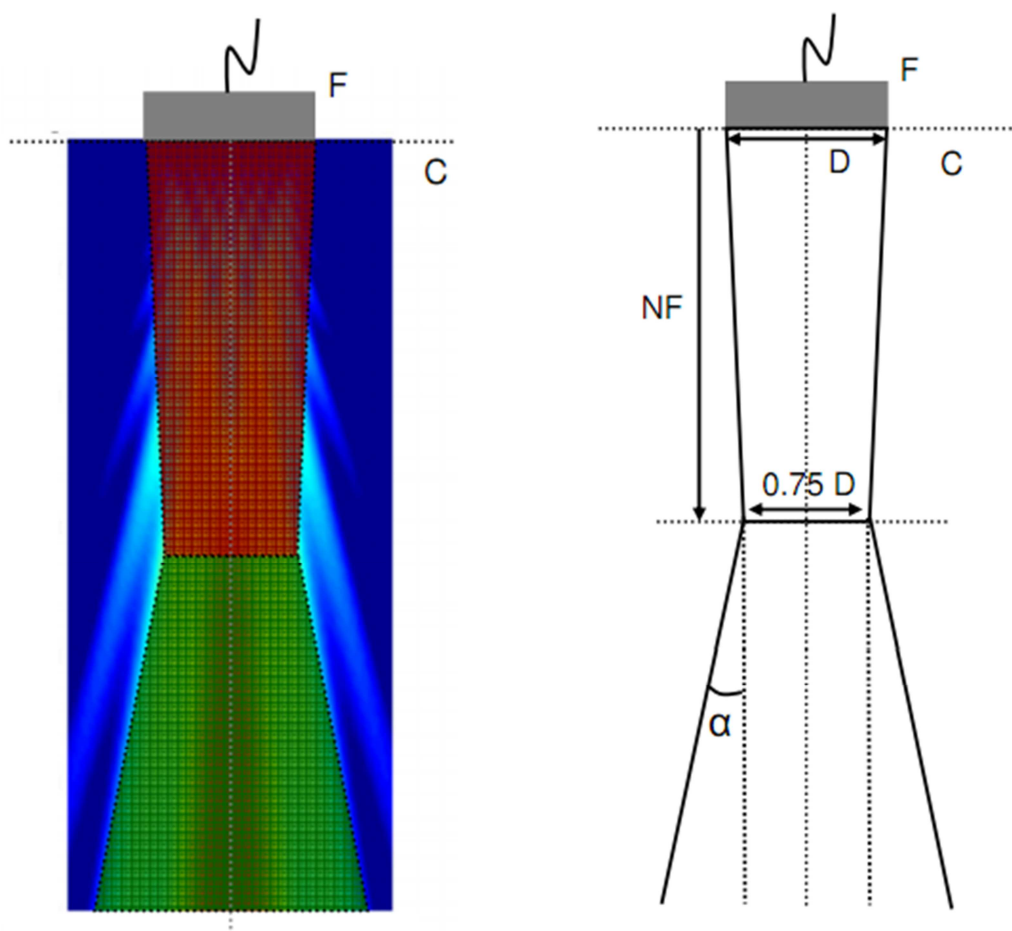


Figura 2.19 Esquema de zonas de campo sonoro, diferenciadas por colores y acotadas en función del tamaño del palpador empleado.

En la medida de la anchura de los haces, es necesario tener en cuenta la línea perpendicular de la energía conforme disminuye a lo largo de su distribución, dando lugar a la presencia de lóbulos laterales.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO

Los ensayos mediante la aplicación de ultrasonidos pueden realizarse siguiendo diferentes métodos. La elección de un tipo de ensayo u otro dependerá de las características tanto estructurales como geométricas del material a observar, de los defectos más probables que se puedan dar en éste, de la accesibilidad que permita el elemento a ser ensayado, etc.

Se pueden distinguir técnicas en base a la forma en que se emite y reciben los haces ultrasónicos: por impulso-eco, por transmisión o por resonancia. Pero también es posible clasificar los ensayos por la técnica que se emplea: por contacto o por inmersión; y por la forma en que se realizan: manuales o automáticos (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Ultrasonidos 1996).

A continuación se realiza una breve descripción del fundamento de cada uno de ellos:

2.4.1 Método de ensayo por Impulso-eco

Consiste en la emisión y recepción de ondas por medio de un único palpador, aunque en ocasiones también se emplean dos. Mediante esta técnica se puede medir la amplitud y el tiempo que tarde en recorrer un impulso la muestra ensayada, lo que permite conocer la situación de heterogeneidades.

Es la técnica que más se utiliza en debido a su utilidad y sencillez de aplicación a la práctica y la interpretación de los datos obtenidos.

El fundamento del que parte esta técnica es el de la reflexión de las ondas emitidas en los defectos y contornos del material y luego alcanzan el receptor, pudiendo ser visualizadas con el equipo. Para ello, el palpador funciona primero como emisor, transmitiendo un impulso con una duración de 3 μ s. Después, deja de emitir durante un “intervalo de silencio” de unos 0,01 s, en el que recibe cualquier impulso acústico reflejado, denominado “eco”.

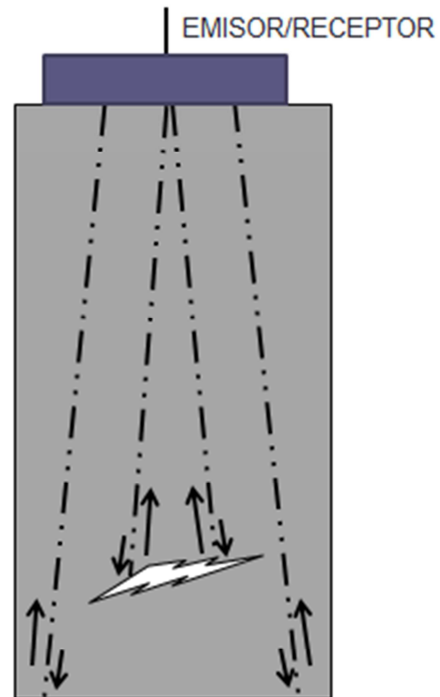


Figura 2.20 Esquema de ensayo por pulso-eco

Como principal desventaja respecto a otros métodos, se encuentra la gran dependencia de componentes pesados, para un mayor contraste con los contornos de la pieza y los defectos, y la gran cantidad de información a tener en cuenta: la posición del palpador o palpadores, la amplitud del eco recibido y a forma del impulso, y el recorrido de las ondas en el material.

2.4.2 Método por transmisión

Se trata de una técnica que emplea dos palpadores, uno emisor y otro receptor, situados a ambos lados de la muestra. Se basa en la medida de la cantidad o intensidad del sonido transmitido a través de la pieza examinada (Figura 2.21).

Permite observar la amplitud de los impulsos recibidos, lo que indica la presencia de defectos en la muestra (si se encuentran, la amplitud será menor).

Método muy poco empleado en ensayos manuales, pero sí se utiliza para automáticos.

Es muy útil en los ensayos de inmersión, pero presenta como inconvenientes:

- a) No se puede determinar la posición de los defectos localizados. Sólo es posible detectar dónde se encuentran, pero no a qué profundidad (para ello sería necesario explorar la muestra en dos direcciones).
- b) Es imprescindible mantener los palpadores emisor y receptor perfectamente enfrentados y alineados, lo que lo hace un método lento y tedioso.
- c) Puede aparecer un acoplamiento pieza-palpador muy a menudo, lo que puede llevar a confusión en cuanto a la presencia de defectos.
- d) Se hace necesaria la posibilidad de acceso por ambos lados de la pieza en la mayoría de los casos.
- e) Existe gran dificultad de interpretación del tipo de defecto detectado.

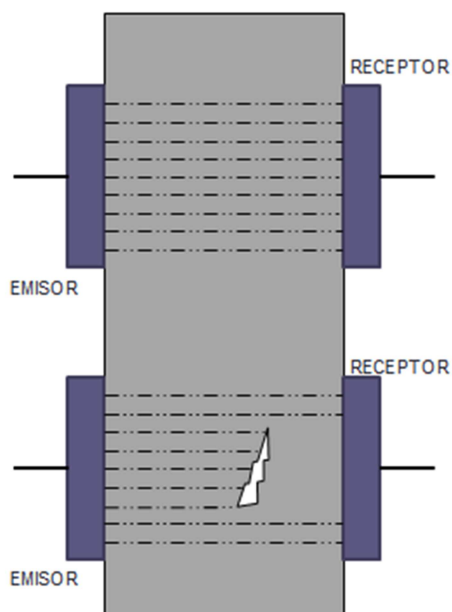


Figura 2.21 Esquema de ensayo por transmisión

2.4.3 Método por resonancia

Se emplea para medir espesores en cuerpos de superficies paralelas. Se basa en el fenómeno de resonancia producido en un tubo o lámina cuando el espesor es igual o múltiplo de una semilongitud de onda. En este caso la absorción y emisión de energía entre palpadores es superior a la normal, lo que da lugar a una indicación registrable en un equipo de medida de aguja o tubo

de rayos catódicos. Su uso es reducido y especializado, en beneficio de los ensayos de impulso-eco.

2.4.4 Ensayos por contacto y en inmersión

Además de la clasificación anteriormente mencionada, los ensayos a realizar mediante la emisión de ondas ultrasónicas pueden atender a dos grandes grupos según el procedimiento de acoplamiento entre el palpador y la pieza.

a) Ensayos por contacto

Son aquellos en los que el palpador se apoya sobre el objeto a examinar, mediante la aplicación de una delgada capa de agente acoplante (Figura 2.22), con el fin de evitar que el aire, que posee una impedancia acústica muy diferente de los líquidos y sólidos, que no es capaz de transmitir las ondas de alta frecuencia, altere la precisión de las ondas. En este caso, el impulso inicial y el eco de superficie se superponen.

Las características del medio de acoplamiento deben permanecer constantes durante la verificación, las operaciones de calibrado y el examen. El medio de acoplamiento debe ser adecuado al rango de temperatura en el que se utilizará. Pueden emplearse diferentes medios de acoplamiento pero el tipo utilizado ha de ser compatible con los materiales a examinar, por ejemplo: agua, pasta de cemento, aceite, grasa, pasta de celulosa a base de agua, etc.

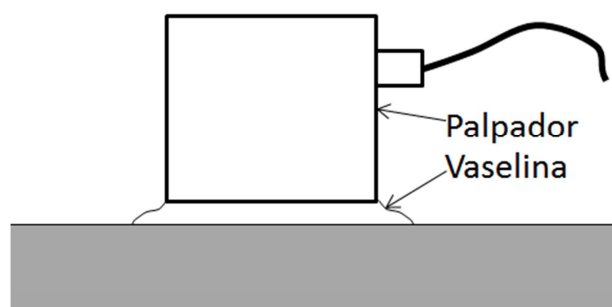


Figura 2.22 Esquema de colocación de palpador en pieza a examinar por contacto.

Después de efectuar el examen, se debe eliminar el medio de acoplamiento si su presencia puede afectar a operaciones subsiguientes, a la inspección o a la utilización de la pieza.

En muchas ocasiones la rugosidad de la propia pieza, del óxido, pintura, etc. que pueda presentar, dificulta mucho el movimiento del palpador y la existencia de una buena transmisión acústica (Dávila Ruiz. 2010) (UNE-EN583-1 1999) (UNE-EN583-3 1997).

b) Ensayos por inmersión

En este método de ensayos el acoplamiento acústico entre el palpador y el material tiene lugar a través de agua situada entre ambos, de manera que el eco de superficie se encuentra separado del impulso inicial una distancia que depende de éste camino intermedio.

La existencia del mencionado recorrido inicial permite que el ensayo de la pieza se realice empleando la zona lejana del haz (o de Fraunhofer).

Esta técnica ofrece ventajas como la presencia de un agente acoplante uniforme, da la posibilidad de focalizar el haz ultrasónico, y también automatizar fácilmente el ensayo permitiendo registrar los resultados (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Ultrasonidos 1996).

Dentro de los ensayos por inmersión, se distinguen dos clases de métodos distintas:

- **Ensayos de Inmersión Total:** introduciendo la pieza en una cuba llena de agua, siendo explorada por el palpador. En este caso, se da la posibilidad de que éste se desplace para inspeccionar, o que sea la propia pieza la que se mueva.
- **Ensayos de Inmersión Local:** en los que el acoplamiento viene dado por medio de una columna de agua (un recipiente).
- **Ensayos por chorro de agua:** el acoplamiento tiene lugar por medio de un chorro de agua proyectado sobre la muestra.

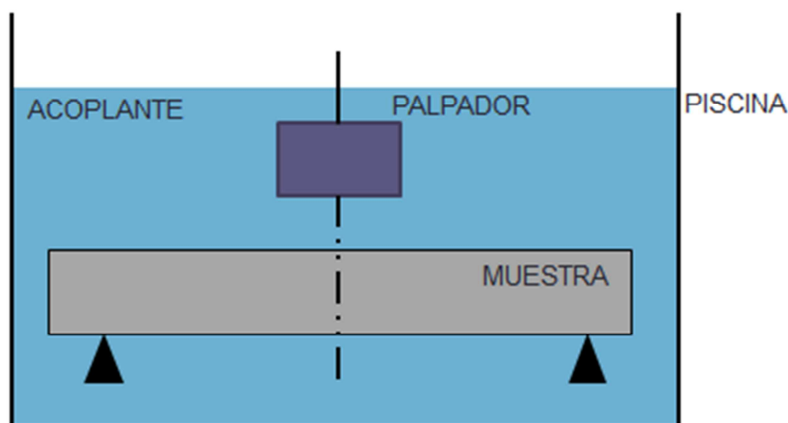


Figura 2.23 Disposición esquemática para ensayo por inmersión total.

2.4.5 Ensayos manuales y automáticos

En los ensayos por ultrasonidos se suelen realizar mediante un movimiento relativo palpador – pieza examinada para alcanzar un nivel de exploratorio máximo de la zona a controlar. Éste movimiento relativo puede ser de forma manual o automática.

a) Ensayos manuales

Son ensayos de contacto que suelen emplear la técnica de reflexión o eco. El operador va desplazando el palpador sobre la pieza por deslizamiento o contactos sucesivos.

Como principal ventaja, se encuentra la posibilidad de que se puede detener el ensayo para poder explorar minuciosamente la zona sospechosa. También es de valorar positivamente la rápida puesta en marcha y la sencillez del equipo. Además de ser los únicos que pueden darse en muchos ensayos de obra.

En cuanto a las desventajas, se pueden mencionar la lentitud de operación, posibles variaciones en el acoplamiento a causa de diferentes presiones

ejercidas por la mano o por falta de acoplante, y la necesidad de un operador responsable y experimentado.

b) Ensayos automáticos

Aquellos que requieren de un dispositivo mecánico o electromecánico que desplaza el palpador según una trayectoria y una velocidad controladas o, como en otras ocasiones, es la pieza la que se mueve.

Puede emplearse como ensayo por contacto o en inmersión, siendo en ésta en la que alcanza sus máximas posibilidades y son más utilizados.

Se emplean principalmente para controlar componentes de geometría sencilla y producidos en grandes series (tubos, chapas, etc.).

Como mayores ventajas, se presentan: la rapidez del ensayo, un acoplamiento uniforme entre el palpador y la pieza, un registro automático de los datos, una clasificación automática de componentes. Ofrece objetividad en los resultados, puesto que no se han podido ver manipulados por diferencias en el procedimiento del operador, y un posible empleo simultáneo de varios palpadores.

Estos ensayos requieren de la utilización de dispositivos electromecánicos, máquinas de barrido, que suelen ser muy costosos (UNE-CEN/TR15134-IN 2011).

2.5 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPULSOS. PROCEDIMIENTOS Y FACTORES QUE INFLUYEN EN ELLA

a) Colocación del palpador

Aunque la dirección en la que se propaga la energía máxima es en ángulo recto respecto a la cara del palpador transmisor, es posible la detección de impulsos que circulen a través del hormigón en cualquier otra dirección, otorgando la posibilidad de efectuar medidas de velocidad de impulso situando los dos palpadores en caras opuestas (transmisión directa), en caras adyacentes (transmisión semidirecta), o en la misma cara (transmisión indirecta o superficial) de la estructura de hormigón o de la probeta (Figura 2.24, Figura 2.25, Figura 2.26).

Puede ser necesario situar los palpadores sobre caras opuestas, pero no directamente opuestos el uno del otro. Esta disposición se debe considerar como transmisión semidirecta. Ésta se emplea cuando no puede aplicarse la disposición directa, como es el caso de las esquinas de las estructuras.

La colocación de transmisión indirecta es la menos sensible de las tres. Sólo debe emplearse cuando no se pueda acceder a la pieza a examinar más que por una cara, o bien cuando el propósito sea comprobar la calidad de la superficie del hormigón en relación con el resto (Naik, Malhotra y Popovics 2004) (F. Ramírez Gómez, M. Á. Fernández Soler, y otros, Ultrasonidos 1996) (UNE-EN12504-4 2006).

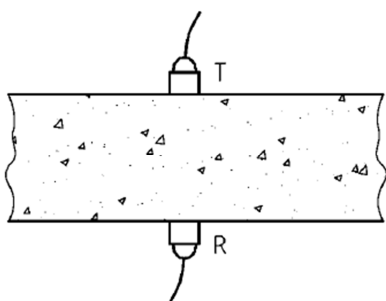


Figura 2.24 Transmisión Directa

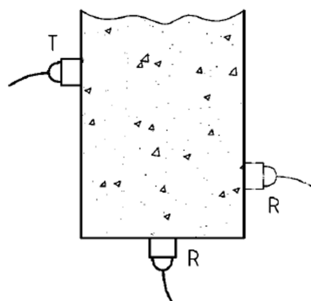


Figura 2.25 Transmisión
Semidirecta

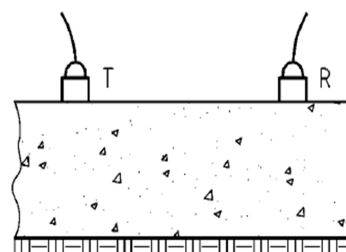


Figura 2.26 Transmisión Indirecta

b) Acoplamiento de los palpadores sobre el hormigón

Debe haber un adecuado acoplamiento acústico entre el hormigón y la cara del palpador. En muchas ocasiones el hormigón presenta un acabado lo suficientemente liso como para proporcionar un buen contacto si interfiere por medio de sustancias de acoplamiento como vaselina, grasa, jabón líquido y pasta de caolín y glicerina (UNE-EN583-3 1997).

De acuerdo con distintos estudios experimentales, es importante reflejar que el material acoplante posee unas características que permiten que la transmisión de las ondas sea mayor gracias al sellado que proporciona entre el palpador y la superficie del elemento de hormigón. La aplicación de estas sustancias ha de ser tal que esté comprendida en un rango que va desde un espesor de, aproximadamente, 0,5 mm. a 2 mm. ya que se ha visto que en este ámbito la velocidad ultrasónica se ve incrementada, pero para espesores mayores, la velocidad sufre una disminución (De Fino, De Tommasi y Fatiguso 2009).

Se estima necesaria la realización de lecturas repetidas del tiempo de recorrido hasta obtener un valor mínimo, lo que indica que el espesor del elemento de acoplamiento se ha reducido al mínimo.

En el caso de hormigones con una superficie muy rugosa y desigual, es preciso alisar y nivelar la zona mediante un pulido o aplicación de resina epoxi de endurecimiento rápido. A pesar de ello, es posible contar con palpadores especiales para superficies muy rugosas (Gosálbez, y otros 2009).

c) Medida de la longitud de trayectoria y la velocidad de propagación

Se trata de la distancia que separa a los palpadores, desde el punto de salida y recepción real de cada uno. En ocasiones coincide con la dimensión de la muestra examinada, pero no siempre es posible una medida directa, sino que hay que recurrir a otras herramientas (UNE-EN12504-4 2006).

En el caso de **transmisión directa**, la longitud de la trayectoria es la distancia más corta entre los palpadores. La precisión de medida de la longitud debe registrarse con una exactitud de $\pm 1\%$.

En **transmisión semidirecta**, generalmente basta con tomar como longitud de trayectoria la distancia medida entre los centros de las caras de los palpadores. La precisión de la longitud depende del tamaño del palpador comparado con la distancia entre centros. Se ha de tomar la distancia de cada palpador y emplear el teorema de Pitágoras (para caras perpendiculares) o el teorema del seno o del coseno.

Por medio del dispositivo electrónico con el que cuenta un equipo básico de emisión de ultrasonidos, se debe determinar el intervalo de tiempo indicado de acuerdo con las instrucciones del fabricante (UNE-EN12504-4 2006).

En **transmisiones directas y semidirectas**, la velocidad de impulso responde a la expresión: $V = \frac{L}{T}$

Donde, **V** es la velocidad del impulso (km/s), **L** la longitud de trayectoria (mm), y **T** el tiempo que tarda el impulso en recorrer la trayectoria (μs).

En cuanto a la **transmisión indirecta**, no se determina la longitud de trayectoria entre palpadores, sino que se realizan series de medidas colocando los transductores a distancias diferentes.

A pesar de que puedan tener algún tipo de indicación del punto de salida y recepción real, no se puede tomar una única medida de distancia (a causa del desgaste de la zapata, errores en las marcas indicativas, etc.). Para realizar las medidas, el palpador transmisor debe colocarse en contacto con la superficie de hormigón en un punto determinado fijo (x_0), mientras que el palpador se irá colocando a lo largo de una línea escogida sobre la superficie, tomando diferentes posiciones equidistantes entre sí (x_n).

Los tiempos de transmisión que vayan siendo registrados deberían ser representados en un gráfico que muestre su relación con la distancia de separación de los palpadores (Figura 2.27).

La pendiente de la recta que mejor se ajuste a los puntos obtenidos (tangente \emptyset) se registra como la media de la velocidad de los impulsos a lo largo de la línea elegida sobre la superficie del hormigón.

Si los puntos, medidos y registrados de esta forma, indican una discontinuidad, puede ser consecuencia de la presencia de una grieta superficial o una capa superficial de calidad inferior. En estos casos, la velocidad medida no es fiable.

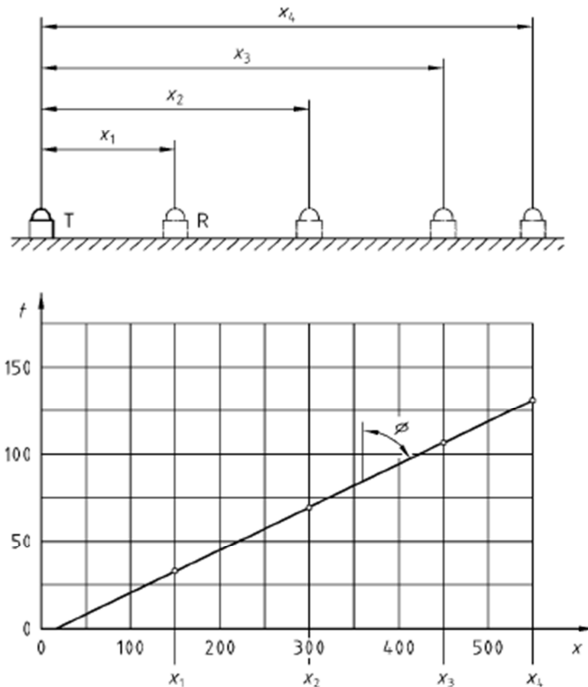


Figura 2.27 Determinación de la distancia entre palpadores para transmisiones indirectas.

La determinación resultante de la velocidad del impulso debe expresarse con una aproximación de 0,01 km/sec.

d) Determinación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad

La velocidad de propagación obtenida permite la clasificación de la calidad del hormigón. Leslie y Chessman, y Agraval establecen una serie de rangos de velocidad (Tabla 2.5; Tabla 2.6).

Tabla 2.5 Clasificación de la calidad del hormigón a partir de la velocidad de onda (Leslie y Chessman).

VELOCIDAD DE LA ONDA LONGITUDINAL (m/seg)	CALIDAD DEL HORMIGÓN
> 4570	Excelente
3650 – 4570	Buena
3050 – 3650	Regular a dudosa
2130 – 3050	Pobre
< 2130	Muy pobre

Tabla 2.6 Evaluación de la calidad del hormigón mediante la velocidad de propagación (Agraval).

VELOCIDAD DE IMPULSO (m/seg)	CALIDAD DEL HORMIGÓN
> 3000	Buena
2500 – 3000	Regular
< 2500	Pobre

A fin de obtener una medida de velocidad de impulso que sea reproducible y que dependa principalmente de las propiedades del hormigón ensayado, se entiende necesaria la consideración de distintos **factores** que pueden influir en dicha velocidad y su correlación con diversas propiedades físicas del hormigón en cuestión (UNE-EN12504-4 2006).

a) Estado Tensional del elemento

Según diferentes estudios, la emisividad de las ondas ultrasónicas muestra sensibilidad a la estructura interna del objeto evaluado. Se ha verificado experimentalmente el incremento de la velocidad media con el incremento del estado tensional, aspecto que también se ve reflejado en la potencia ultrasónica (Gosálbez, y otros 2009).

b) Contenido en humedad

El contenido de agua que pueda presentar una pieza de hormigón induce dos efectos sobre la velocidad de propagación del impulso, uno químico y otro físico. Ambos efectos son importantes en el establecimiento de correlaciones para la estimación de la resistencia del hormigón.

Puede darse una variación significativa en la velocidad de transmisión de un impulso si se realiza la misma prueba en una probeta cúbica, una cilíndrica normalizada curada adecuadamente y en un elemento estructural (Naik, Malhotra y Popovics 2004) (Vecca Vallejos y Lucero Suzuki 2007).

Gran parte de las diferencias observadas es debida al efecto de las diferentes condiciones de curado sobre la hidratación del cemento, mientras que otra parte se debe a la presencia de agua libre en los poros. Es importante que estos efectos sean previstos y considerados cuidadosamente en la estimación de la resistencia.

c) Temperatura del hormigón

La presencia de variaciones de la temperatura del hormigón entre 10 °C y 30 °C no produce cambios significativos al margen de los correspondientes a la resistencia o propiedades elásticas. Las correcciones a las medidas de la velocidad del impulso deberían efectuarse únicamente para temperaturas fuera del rango citado, que en el caso de encontrarse en un ambiente de laboratorio no debería presentar (UNE-EN12504-4 2006).

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que si se requieren mediciones de gran precisión, los bloques de calibración deben estar a la misma temperatura que el elemento sometido a ensayo.

Para realizar mediciones bajo cero, al igual que para altas temperaturas, el acoplante seleccionado ha de conservar sus características acústicas y tener un punto de congelación por debajo de la temperatura de ensayo. Es

importante, incluso, el palpador a emplear: la mayoría se pueden utilizar entre -20°C y +60°C.

Por debajo de 20°C bajo cero y por encima de 60°C es posible que se necesiten palpadores especiales, limitando el tiempo de contacto a las recomendaciones del fabricante (UNE-EN14127 2011).

d) Longitud de trayectoria

La longitud de trayectoria sobre la que determinar la velocidad de impulso debería ser lo suficientemente grande como para que no pueda encontrarse influida significativamente por la naturaleza del hormigón (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 Distancia máxima entre palpadores según el tamaño máximo del árido.

Tamaño máximo árido: ≤ 20 mm.	Long. Trayectoria máxima: 100 mm.
Tamaño máximo árido: 20-40 mm.	Long. Trayectoria máxima: 150 mm.

En general, la velocidad del impulso no está influenciada por cambios en la longitud del recorrido, aunque los aparatos de temporizadores electrónicos pueden mostrar una tendencia de reducción de la velocidad con incrementos de la longitud de la trayectoria.

Esto se debe a que los componentes de alta frecuencia del impulso están más atenuados que los de baja frecuencia, y la forma del inicio de la onda se vuelve más redondeada al incrementarse la distancia recorrida.

Por lo tanto, la aparente reducción de velocidad del impulso proviene de la dificultad de definición del inicio del impulso, que depende del método particular empleado para su definición. Esta reducción aparente de velocidad es normalmente pequeña y cumple una tolerancia de precisión de medida del tiempo de $\pm 0,1$ μ s, pero en el caso en que se transmite sobre longitudes de trayectoria grandes es necesario adoptar un cuidado especial (UNE-EN12504-4 2006).

e) Forma y tamaño de la muestra de ensayo

La velocidad de impulsos cortos de vibraciones es independiente del tamaño y forma de la pieza por la que se desplazan, a no ser que su dimensión lateral menor sea inferior a un valor mínimo (Tabla 2.8).

En el caso de ser inferior a este valor, la velocidad de impulso puede verse reducida apreciablemente. Esta reducción depende principalmente de la relación de la longitud de onda de las vibraciones del impulso y la dimensión lateral menor de la pieza.

Tabla 2.8 Tabla B.1. Efecto de las dimensiones de la pieza en la transmisión del impulso (UNE-EN12504-4 2006).

Frecuencia Palpador (KHz)	Velocidad del Impulso en el hormigón		
	V _c =3,50	V _c =4,00	V _c =4,50
	Dimensión mínima lateral recomendada (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Si la esta dimensión mínima lateral es inferior que la longitud de onda, o si la posición empleada corresponde a transmisión indirecta, la forma de propagación cambia y, por lo tanto, la velocidad medida será diferente. Esto es particularmente importante en los casos en los que se comparan elementos de hormigón de tamaños significativamente diferentes (UNE-EN12504-4 2006).

f) Efecto de las barras de armado

Dado que el acero posee un coeficiente de transmisión acústica mayor que el hormigón, se recomienda en la medida de lo posible la realización de medidas próximas a barras de acero de armado paralelas a la dirección de propagación, ya que ofrecerán unos resultados erróneos (UNE-EN12504-4 2006) (Vecca Vallejos y Lucero Suzuki 2007).

g) Grietas y coqueras

Si un impulso se encuentra dentro de la pieza de hormigón con una interfase hormigón-aire, éste sufre una transmisión despreciable de energía a través de esta interfase (UNE-EN583-4 2003).

De este modo, la presencia de algún tipo de fisura o coquera entre los dos palpadores, y por tanto en la trayectoria de la propagación de las ondas, obstruirá el haz ultrasónico directo cuando la longitud proyectada de la coquera sea mayor que la anchura de los palpadores y la longitud de onda del sonido empleado. En este caso, el primer impulso que llega al palpador receptor habrá sido difractado alrededor del perímetro del defecto, y el tiempo de trayectoria experimentará un aumento respecto de un hormigón de iguales características sin defectos.

En función de la distancia que exista entre los palpadores, es posible emplearlo como método de localización de fisuras, coqueras u otros defectos más grandes, de 100 mm. de diámetro o profundidad aproximadamente. Los defectos de menor tamaño presentan poca influencia sobre los tiempos de transmisión (Moreno Fernández. 2008).

La representación gráfica de contornos de igual velocidad proporciona información relevante respecto a la calidad de una pieza de hormigón. Una prueba de atenuación de la señal ofrece información útil al respecto.

En el caso de elementos fisurados, como se aprecia en la Figura 2.28 y la Figura 2.29, en los que los bordes rotos están en contacto unidos fuertemente por fuerzas de compresión entre sí, la energía del impulso puede pasar a través de la fisura sin ningún tipo de incidencia (Naik, Malhotra y Popovics 2004).

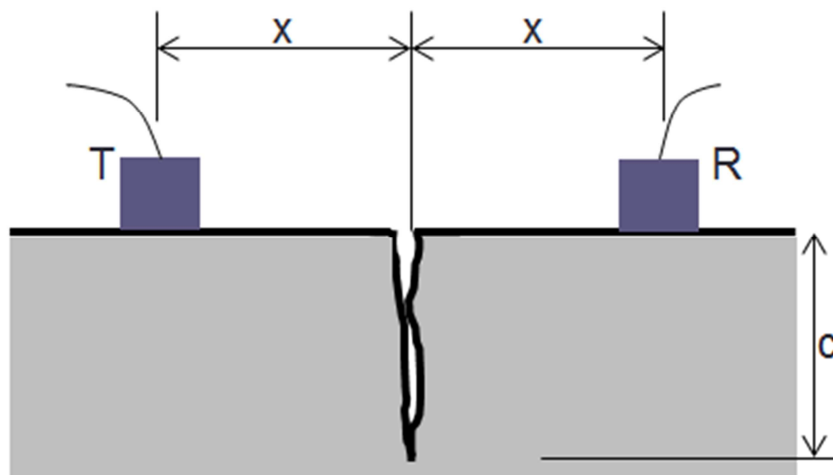


Figura 2.28 Estimación de la profundidad de una grieta superficial perpendicular.

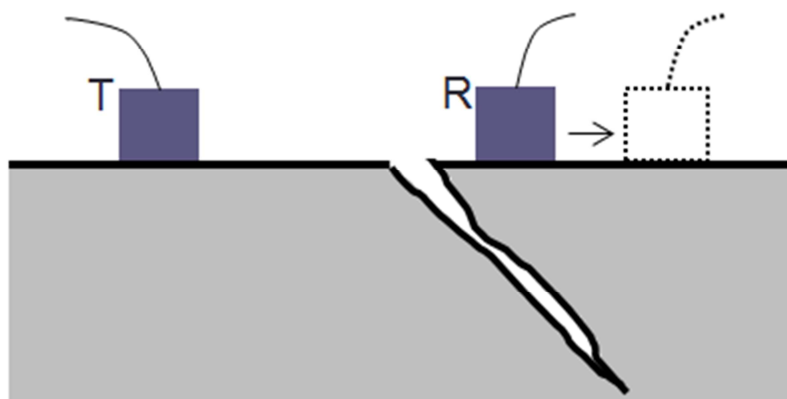


Figura 2.29 Estimación de la profundidad de una grieta superficial oblicua.

En el caso de la presencia de grietas superficiales, para determinar la profundidad y el espesor de las mismas en el interior del elemento ensayado, es necesario tomar una serie de medidas a ambos lados de la superficie del defecto, manteniendo uno fijo y el otro alejándolo (UNE-EN12504-4 2006).

2.6 CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL IMPULSO Y LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

Las propiedades físicas de los materiales que influyen más notablemente en la medida de velocidad de propagación de un impulso son el módulo elástico, la densidad del hormigón y el coeficiente de Poisson.

Una de las aplicaciones más extendida es la que intenta determinar la relación existente entre la velocidad de propagación y la resistencia a compresión.

Este principio se basa en la homogeneidad del material que se pretende estudiar. En el caso del hormigón, dado su carácter heterogéneo, hace que los valores obtenidos dependan del tipo de árido empleado, su dosificación y las propiedades físicas de la pasta de cemento, y sus componentes.

De esta forma, la correlación existente entre la velocidad del impulso y la resistencia del hormigón son indirectas físicamente y deben establecerse para cada mezcla específica de hormigón (Velasco García s.f.).

La precisión de la estimación varía según los datos que se dispongan: composición del hormigón y resultados de las probetas ensayadas (Jones y Facaoaru 1969).

A partir de las velocidades de las ondas ultrasónicas es posible calcular el módulo elástico dinámico como sigue en la Ecuación 2.16 (Urtubey, Schiava y Etse 2003):

$$E_D = V^2 \rho \frac{(1 + r) + (1 - 2r)}{1 - r}$$

Ecuación 2.16

Donde V es la velocidad (en km/s); ρ la densidad del hormigón (en kg/m³); r la relación de Poisson (para hormigón de alta resistencia $r = 0,15$; para

hormigón de baja resistencia $r = 0,30$); y ED corresponde al módulo elástico dinámico (en MN/m²).

En el caso de un hormigón de composición y cualidades desconocidas, la relación entre velocidad y resistencia no es posible de encontrar debido a la cantidad de variables que afectan a ambos parámetros. (UNE-EN12504-4 2006).

El método empleado para definir la variación de la **resistencia en probetas** influye en la correlación de velocidad del impulso.

La correlación de la velocidad de impulso con la resistencia es menos fiable según se incrementa la resistencia del hormigón. Una correlación obtenida variando la edad del hormigón es apropiada cuando se controla el desarrollo de la resistencia a medida que madura, pero a efectos de control de la calidad es preferible una correlación obtenida variando la relación agua-cemento, estableciendo unas bases desde el comienzo.

En las probetas ya moldeadas, la velocidad del impulso debería medirse entre las caras moldeadas en el caso de probetas cúbicas o axialmente para cilindros y testigos.

En el caso de vigas, es preferible medir la velocidad del impulso a lo largo de su longitud para obtener mayor precisión. Se deberían efectuar, por cada probeta, al menos tres medidas espaciadas entre su parte superior y su parte inferior. La variación entre los tiempos de propagación medidos sobre probetas de un solo ensayo debería estar dentro del $\pm 1\%$ del valor medio de esas tres medidas, de otra forma la probeta debería rechazarse como anómala. Las probetas de ensayo deberían, pues, ensayarse a compresión según la norma UNE-EN 12390-3.

La velocidad de impulso media y la resistencia media obtenidas de cada conjunto de tres probetas pertenecientes al mismo ensayo proporcionan los datos para el establecimiento de una curva de correlación. La curva obtenida

de esta manera hace referencia a las probetas fabricadas, curadas y ensayadas de forma similar, pudiendo obtener diferentes curvas de correlación para los mismos hormigones si el curado al aire es sustituido por el curado al agua (UNE-EN12504-4 2006).

La resistencia a compresión del hormigón puede determinarse usando la velocidad de pulso mediante:

a) **Correlaciones gráficas** entre Velocidad y Resistencia obtenidas ensayando probetas.

Se requiere un mínimo de 30 probetas ensayadas. El valor promedio de la velocidad de pulso se obtiene a partir de tres probetas sometidas a idénticas condiciones de ensayo. Las variaciones de resistencia y velocidad de pulso requeridas para la correlación se logran modificando la relación agua-cemento, el grado de compactación, etc. Con los resultados se construye la curva de correlación gráfica entre Velocidad y Resistencia, usando cualquier procedimiento de ajuste de curva a una nube de puntos.

b) En las siguientes expresiones (Ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.19) se pueden deducir **correlaciones analíticas** conocidas entre Velocidad y Resistencia del material (Urtubey, Schiava y Etse 2003).

$$R = a V^b$$

Ecuación 2.17

$$R = a e^{bV}$$

Ecuación 2.18

$$R = aV + bV + c$$

Ecuación 2.19

En las cuales V es la velocidad; e propagación de onda medida a , b , y c son constantes que se determinan mediante ensayos.

La precisión de la estimación varía según los datos que se dispongan: composición del hormigón y resultados de las probetas ensayadas (Jones y Facaoaru 1969).

2.7 INCONVENIENTES DEL MÉTODO

Una vez estudiadas las numerosas ventajas del empleo de métodos de ensayo en hormigón mediante ultrasonidos, es necesario determinar qué factores pueden perjudicar la medida de propagación.

a) Precisión en las mediciones

Dado que la velocidad de propagación de la onda se obtiene mediante:

$$V = \frac{L}{T}$$

Midiendo la longitud de camino (L) con una precisión de $\pm 1,0$ % y el tiempo (T) de tránsito con una precisión del $\pm 2,0$ % resultará que la velocidad de pulso (V) se puede obtener con una precisión del $\pm 3,0$ %. Como el módulo elástico E varía con el cuadrado de la velocidad de pulso, la precisión en su medición será alrededor de $\pm 6,0$ %.

Aunque no está claro que la velocidad de pulso resulte influida por la longitud del camino recorrido, se sugieren los siguientes valores mínimos en función del tamaño máximo del árido (Urtubey, Schiava y Etse 2003).

- 100 mm para hormigones con Tamaño máximo del árido < 30 mm
- 150 mm para hormigones con Tamaño máximo del árido < 45 mm

b) Influencia de las condiciones de ensayo

Tal y como se ha mencionado anteriormente, debe establecerse un adecuado contacto entre la superficie del hormigón y el transductor, usando si es necesario, una sustancia para mejorar el acoplamiento.

Variaciones de la temperatura en condiciones ambientales normales, de 5 °C a 30 °C, no ocasionan cambios significativos en la velocidad de pulso en el hormigón. Para temperaturas mayores y menores contemplan cambios en la velocidad de pulso en concretos secos y saturados por lo cual las mediciones efectuadas deberán corregirse (UNE-EN14127 2011).

Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad del pulso (y por tanto el tiempo que transcurre desde que el impulso mecánico pasa de un transductor a otro) está afectada por la composición del hormigón, la frecuencia de la emisión ultrasónica (los pulsos de alta frecuencia atenúan más), la edad y la heterogeneidad del hormigón, la cantidad y disposición de la armadura, y el estado tensional al que se encuentre sometido (Gosálbez, y otros 2009). Todo ello puede representar un inconveniente en el caso en que no se estudie previamente la situación en que se encuentra el elemento a examinar (Urtubey, Schiava y Etse 2003).

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO

3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para estudiar la evolución de la velocidad de ultrasonidos en hormigón y relacionar ésta con otras propiedades del material de manera analítica, se ha fabricado hormigón con diferentes dosificaciones y distintos tipos de árido grueso. Se conformaron distintos elementos de hormigón en masa con el propósito de utilizarlos en los ensayos.

En este apartado se detallan los materiales que se han empleado, el proceso de fabricación del hormigón y, por último, los métodos de ensayo que se han utilizado.

Se ha realizado un total de 32 probetas cúbicas, de 10x10x10 cm., de hormigón en masa. Sobre éstas se han llevado a cabo ensayos experimentales de medida del tiempo de propagación de ondas ultrasónicas y de rotura a compresión.

En la fabricación de los elementos de hormigón se han combinado distintos factores (relación Agua-Cemento y tipo de árido grueso) con el fin de obtener una serie de probetas representativa.

Mediante comparación analítica de los datos obtenidos en los ensayos con los resultados del ensayo de rotura a compresión, se ha estudiado la influencia de las distintas variables.

A lo largo del trabajo realizado se ha procurado mantener el principio de aleatoriedad en el orden de ejecución, con ayuda del programa informático Microsoft Excel y la función de generación de números aleatorios que ofrece, tanto en la fase de fabricación de las diferentes amasadas como en la fase de ensayos, con el fin de evitar el efecto aprendizaje durante la fabricación y en la medida del tiempo de propagación y reducir las influencias de falta de precisión que puedan producir los equipos de ensayo empleados durante su uso.

3.2 MATERIALES EMPLEADOS

Se ha fabricado hormigón H-25 en hormigonera planetaria (Figura 3.1). Se trata de un material que presenta una resistencia característica a compresión a los 28 días de 25 N/mm^2 , y es uno de los más utilizados en edificación.

Se han tomado dos variables a tener en cuenta, de dos niveles cada uno: por un lado, dos dosificaciones diferentes en cuanto a la relación agua/cemento, y por otro, se han empleado dos tipos distintos de árido grueso.

Por último, también se ha valorado la opción de añadir aditivos para evaluar su influencia, como retardadores de fraguado del hormigón: cloruro cálcico (CaCl_2) con el fin de observar si provoca algún tipo de alteración durante las fases de curado y endurecimiento respecto de la posible correlación lineal entre la velocidad de propagación de ultrasonidos y el grado de humedad.



Figura 3.1 Hormigonera planetaria, con la que se ha realizado el hormigón.

Las dimensiones de las probetas son de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm.}$, tamaño elegido debido a su facilidad de manejo y a que, al tratarse de árido grueso menor de 20 mm. , 100 mm. es la distancia de medida recomendada por la norma UNE-EN 12504.

Se han llevado a cabo las amasadas, de cuatro probetas cada una, en las que se han ido interaccionando los dos niveles de cada uno de los dos primeros factores (relación agua/cemento y tipo de árido grueso). En cuanto a la adición de cloruro cálcico, sólo se ha contemplado emplearlo para un solo tipo de dosificación y árido.

Los componentes utilizados en la fabricación del hormigón son los que se muestran en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Características de los materiales que componen el hormigón realizado.

Cemento	CEM II A-L 32,5 R	(UNE-EN197-1 2000)
Árido fino	Arena de río de naturaleza silíceica (Fracción 0-4 mm)	(UNE-EN12620 2003)
Árido grueso	Pórfido granítico de machaqueo. TM=15mm	
	Grava de canto rodado. TM=10mm	
Agua	Potable	Artículo 27 (EHE 2008)
Aditivos y adiciones	Cloruro sódico anhidro en polvo (CaCl ₂)	

a) Hormigón Tipo 1 (relación agua/cemento=0,5)

Una ha sido con una relación de agua/cemento igual a 0,5, lo que da una dosificación de **1 : 1,875 : 3,125 : 0,5**; es decir, que para un metro cúbico de hormigón, se necesitan las siguientes cantidades (Tabla 3.2):

Tabla 3.2 Composición para la fabricación de hormigón con relación agua/cemento = 0,5 por metro cúbico.

Componente	Cantidad (Peso)
Cemento	354 Kg
Árido fino	663,50 Kg
Árido grueso (según el tipo)	1106 Kg
Agua	177 Kg

Para este primer tipo de hormigón, se han fabricado de acuerdo a lo que indica la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Composición de las probetas de Hormigón Tipo 1.

Relación A/C = 0,5	Árido de pórfido granítico 4 amasadas (16 probetas)	8 probetas sin Cl ⁻		P1.1 – P1.8
		8 probetas con Cl ⁻	0,4% Cl ⁻	P3.1 – P3.4
			2% Cl ⁻	P4.1 – P4.4
	Árido de canto rodado 1 amasada (4 probetas)	4 probetas sin Cl ⁻		P2.1 - P2.4

Las sales se han añadido al cemento en seco en polvo, en cantidades de manera que el porcentaje determinado (0,4% ó 2%) sea de ión cloruro exclusivamente, no del total del compuesto salino.

b) Hormigón Tipo 2 (relación agua/cemento=0,6)

La otra proporción de materiales empleados para la fabricación del hormigón es de **1 : 1,875 : 3,125 : 0,6**; siendo igual que la anterior salvo por la cantidad de agua necesaria, es decir, que para un metro cúbico de hormigón, se necesitan las siguientes cantidades (Tabla 3.4):

Tabla 3.4 Composición para la fabricación de hormigón con relación agua/cemento = 0,6 por metro cúbico.

Componente	Cantidad (Peso)
Cemento	348,50 Kg
Árido fino	653,40 Kg
Árido grueso (según el tipo)	1089 Kg
Agua	209,10 Kg

Con este tipo de hormigón se han fabricado como se indica en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5 Composición de las probetas de Hormigón Tipo 2.

Relación A/C = 0,6	3 Amasadas (12 probetas) sin Cl ⁻	Árido de canto rodado 2 amasadas (8 probetas)	P5.1 – P5.8
		Árido de pórfido granítico 1 amasada (4 probetas)	P6.1 – P6.4

En las imágenes (Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4) se pueden apreciar los materiales que componen cada amasada: cemento, arena silíceo, árido grueso, agua y cloruro cálcico.



Figura 3.2 Dosificación de los componentes (I).



Figura 3.3 Dosificación de los componentes (II).

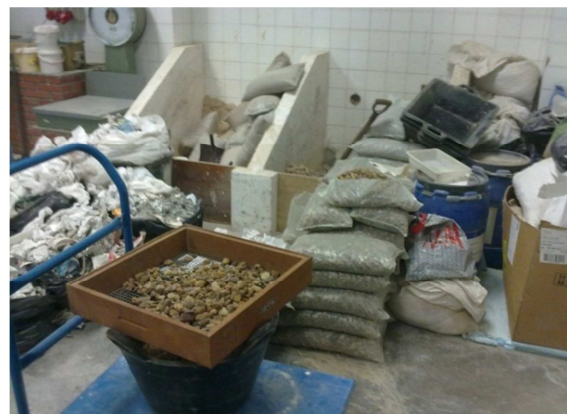


Figura 3.4 Dosificación de los componentes (III).

3.3 FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN. PROBETAS CÚBICAS

Se han realizado 32 probetas cúbicas de 1x10x10 cm. Esta geometría permite obtener elementos aislados y sencillos, en los que permite aplicar técnicas mediante ultrasonidos fácilmente. De acuerdo con la norma UNE-EN 12504-4, dado que el tamaño de árido grueso empleado es menor de 20 mm., se cumple con la distancia mínima que debe haber entre palpadores. De esta manera las propiedades de los haces ultrasónicos no se ven afectadas por la naturaleza heterogénea del hormigón.

El amasado se realizó en amasadora planetaria. Se introduce poco a poco la mitad del árido grueso, la mitad del cemento (en aquellas amasadas con CaCl_2 , éste se añade en seco al cemento y se mezcla antes de verterlo en la hormigonera), la mitad del árido fino y la mitad del agua. Se amasa durante unos 30 segundos. Tras este tiempo, se añade el resto de materiales en el mismo orden en que se incluyeron anteriormente.

Se vertió la masa en los moldes de acero en dos tongadas, compactando con una varilla con 25 golpes por capa. Transcurridas 24 horas en ambiente de laboratorio, se procede al desmoldado y la introducción de las probetas en cámara húmeda ($T^a=25^\circ\text{C}$; $\text{HR}=99\%$) para su curado.

Las probetas fabricadas se pueden distribuir en distintos grupo (Tabla 3.6) en base a la composición.

Tabla 3.6 Distribución de las probetas por su composición.

TIPO PROBETA		RELACIÓN A/C	TIPO DE GRAVA	¿CaCl ₂ ?	Nº PROBETAS
P1	P1.1 – P1.8	0,5	MACHAQUEO	NO	8
P2	P2.1 – P2.4	0,5	RODADO	NO	4
P3	P3.1 – P3.4	0,5	MACHAQUEO	SÍ	4
P4	P4.1 – P4.4	0,5	MACHAQUEO	SÍ	4
P5	P5.1 – P5.8	0,6	RODADO	NO	8
P6	P6.1 – P6.4	0,6	MACHAQUEO	NO	4

3.4 TÉCNICAS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICAS

Se pueden diferenciar dos fases bien definidas durante la realización experimental: una primera fase de ensayos no destructivos seguida de ensayos destructivos.

Una vez fabricada cada amasada, se esperó un día para desmoldar las probetas resultantes para almacenarlas después en cámara húmeda durante el tiempo de curado del hormigón. Transcurrido este tiempo, se han sacado y almacenado en ambiente de laboratorio hasta su rotura por compresión.

a) Ensayos de propagación de Ultrasonidos

Atendiendo a los objetivos principales del presente trabajo, la parte fundamental de la fase experimental se ha basado en el desarrollo de ensayos no destructivos sobre las probetas cúbicas de hormigón. Se han realizado medidas periódicas del grado de humedad que han ido tomando con el paso del tiempo, al igual que medidas de la velocidad de propagación de ultrasonidos a través del hormigón.

La dinámica de trabajo de laboratorio en esta fase se basa en la medida periódica del peso y la velocidad ultrasónica que van adoptando las probetas a lo largo del tiempo:

- Durante el periodo de curado en cámara húmeda ($T^a=25^{\circ}\text{C}$; $\text{HR}=99\%$).
- Durante el tiempo de endurecimiento en laboratorio, en condiciones ambientales normales ($T^a=21^{\circ}\text{C}$; $\text{HR}\approx 30\%$).

El tiempo dedicado a este ensayo ha sido de 120 horas.

Se ha sometido a las probetas de hormigón a ensayos de medida de la propagación de ultrasonidos con el fin de evaluar la velocidad de transmisión a lo largo del tiempo.

El procedimiento llevado a cabo para la correcta realización de este tipo de ensayos ha seguido lo descrito por la normativa vigente (UNE-EN12504-4 2006), de ensayos de hormigón en estructuras.

- **Equipo de medida de la velocidad de ultrasonidos.**

El aparato empleado para la medida de la velocidad de ultrasonidos desde un palpador a otro a través de la probeta de hormigón, es el modelo E-46, de la marca Ibertest (Figura 3.5).

Éste cuenta con un generador de impulsos eléctricos, dos palpadores de incidencia normal de un solo cristal, un temporizador digital que indica el tiempo que tarda el impulso mecánico desde un palpador a otro a través de la muestra y una barra de calibrado (que tara la medición a su través a $54,7 \mu\text{s}$). Además, incluye un agente acoplante a base de glicerina para la realización de los ensayos por contacto.

El equipo genera impulsos eléctricos breves (entre 500 y 5000 por segundo), que se convierten en el palpador emisor por efecto piezoeléctrico en un haz ultrasónico longitudinal continuo. Éste llega al palpador receptor atravesando el medio mecánico situado entre ambos, en este caso la probeta

de hormigón, y lo convierte en impulso eléctrico de nuevo, por efecto piezoeléctrico inverso. El tiempo (en μs) que tarda el haz ultrasónico en recorrer la distancia que separa ambos transductores es reflejado en el cronómetro que hay en la consola del equipo.

Los ensayos se realizan por transmisión directa. De acuerdo con la normativa, la longitud de la trayectoria onda mínima ha de ser de 100 mm., que coincide con las dimensiones de las probetas. Además indica que para a una distancia de estas características le corresponde una frecuencia de 54 KHz, que es la empleada en estos ensayos (Tabla 2.8).

Las probetas poseen una geometría cúbica. Las superficies en contacto con las paredes del molde son lisas, lo que permite un buen acoplamiento del palpador con ayuda de glicerina. Se presionan los transductores contra la superficie del hormigón realizando lecturas hasta obtener el valor mínimo indicado en el cronómetro, lo que determina que se ha alcanzado la distancia mínima.



Figura 3.5 Equipo de medición de ultrasonidos empleado.



Figura 3.6 Ejemplo de medida de la velocidad de ultrasonidos en las caras opuestas de una probeta.

Los palpadores se sitúan en caras opuestas, realizándose medidas en dos direcciones perpendiculares. La velocidad se obtiene a partir de la media aritmética de ambas medidas (Figura 3.6).

Se han realizado medidas de la velocidad de transmisión de ultrasonidos en las 32 probetas fabricadas, en dos direcciones, conforme avanzaba el tiempo a fin de estudiar su evolución.

b) Determinación de resistencia a compresión

Una vez realizados los ensayos no destructivos, se ha procedido a la rotura por compresión de las probetas, con el objetivo de observar posibles correlaciones con la composición que tiene cada tipo de hormigón y la velocidad de transmisión de ultrasonidos en cada probeta. Se ha llevado por etapas, en las que se han destruido por tercios. Se ha llevado a cabo un orden de rotura aleatorio.

El procedimiento llevado a cabo para la correcta realización de este tipo de ensayos ha seguido lo descrito por la normativa vigente de ensayos de hormigón en estructuras (UNE-EN12504-4 2006) y de ensayos de hormigón endurecido (UNE-EN12390-1 2005) (UNE-EN12390-3 2003).

- **Descripción del equipo.**

Los ensayos de rotura a compresión se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica (EUATM) de la Universidad Politécnica de Madrid, utilizando una máquina universal de ensayos de la marca Ibertest, modelo MIB-60/AM, controlada por el software informático Wintest 32, y que cumple con los requisitos definidos por la normativa vigente (UNE-EN12390-4 2001).



Figura 3.7 Máquina universal de ensayos Ibertest, modelo MIB-60/AM, empleada en la rotura a compresión.

Los ensayos se han realizado por Rotura a Compresión, con un control de ensayos por carrera en todos los casos. En los ensayos sobre probetas cúbicas, la velocidad de carga fue de 1 mm/min. En el caso de las probetas cilíndricas, la velocidad de carga fue de 0,8 mm/min.

Para llevar a cabo el ensayo, dado que es una máquina de dos columnas hidráulicas (Figura 3.7), la probeta ha de colocarse sobre una cara lisa cuya opuesta sea también lisa (que no sea la base y la cara superior del molde), con la cara superior del cubo orientado hacia una columna (Figura 3.8).



Figura 3.8 Probeta cúbica de hormigón colocada en plato de descarga.

Una vez colocada la probeta cúbica en el plato de descarga de la máquina, el software comienza a aplicar carga a compresión de manera progresiva y continua.

Alcanzado el punto de máxima deformación la máquina determina la carga máxima de rotura, obteniéndose la tensión máxima de rotura de la probeta. La máquina universal registra la carga máxima de rotura (KN) y la resistencia del hormigón (MPa).

Una vez desarrollada la fase experimental de la medida del tiempo que tarda en pasar una onda ultrasónica por el hormigón, y la rotura compresión de las probetas, es necesario evaluar analíticamente la posible relación de los datos obtenidos con las condiciones que se han determinado desde el comienzo.

c) Estudio de la dependencia lineal de los valores de velocidad de ultrasonidos y la pérdida de humedad de la probeta según la composición

Se han realizado medidas del peso que van tomando las probetas y del tiempo que tardan las ondas ultrasónicas en atravesar cada una de ellas, de las que se puede deducir la velocidad de propagación de los impulsos, durante los periodos de curado y endurecimiento del material.

Para la obtención de la velocidad, se emplea la siguiente expresión (Ecuación 3.1):

$$V = \frac{L \times 10^3}{T}$$

Ecuación 3.1

Siendo V la velocidad de propagación (m/s), L la longitud entre palpadores (mm) y T el tiempo que tarda el impulso de un palpador al otro (s).

A partir de estos datos obtenidos, se realiza para cada amasada de hormigón fabricada un estudio de la posible correlación entre la evolución de la velocidad ultrasónica y el grado de humedad para relacionarlo con el grado de humedad.

d) Estudio de los efectos de las condiciones previas de ensayo sobre la carga de rotura a compresión de las probetas

Mediante la realización de gráficas y la obtención de los datos analíticos más importantes de los ensayos de rotura a compresión se determinan los efectos que provocan las condiciones establecidas de partida para el hormigón, en cuanto a la dosificación y los materiales empleados, sobre el comportamiento del mismo cuando se lo somete a compresión simple.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han llevado a cabo ensayos mediante técnicas no destructivas y destructivas sobre 32 probetas cúbicas de 10x10x10 cm. de hormigón en masa y 3 probetas cilíndricas de Ø10x20 cm. En función de la composición de la que están hechas, se pueden diferenciar seis tipos de probetas cúbicas y dos cilíndricas. En la Tabla 4.1 se muestra de nuevo los tipos de muestra fabricados:

Tabla 4.1 Cuadro resumen de las características de las probetas cúbicas empleadas.

TIPO PROBETA		RELACIÓN A/C	TIPO DE GRAVA	¿CaCl ₂ ?	Nº PROBETAS
P1	P1.1 – P1.8	0,5	MACHAQUEO	NO	8
P2	P2.1 – P2.4	0,5	RODADO	NO	4
P3	P3.1 – P3.4	0,5	MACHAQUEO	SÍ	4
P4	P4.1 – P4.4	0,5	MACHAQUEO	SÍ	4
P5	P5.1 – P5.8	0,6	RODADO	NO	8
P6	P6.1 – P6.4	0,6	MACHAQUEO	NO	4

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de los procedimientos experimentales realizados sobre un tipo de probetas, tanto en la fase de ensayos no destructivos (toma de peso y medida de tiempo de propagación de ultrasonidos) como en la fase de pruebas destructivas (rotura a compresión simple), a modo de explicación. El resto de fichas, gráficas y tablas se encuentran en los Anexos I a IV.

FASE DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Se han realizado medidas periódicas de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas y el peso de las probetas de hormigón. Una vez recabados todos los datos, se desarrollan gráficas de dispersión en las que se incluye un análisis lineal de la distribución de las medidas.

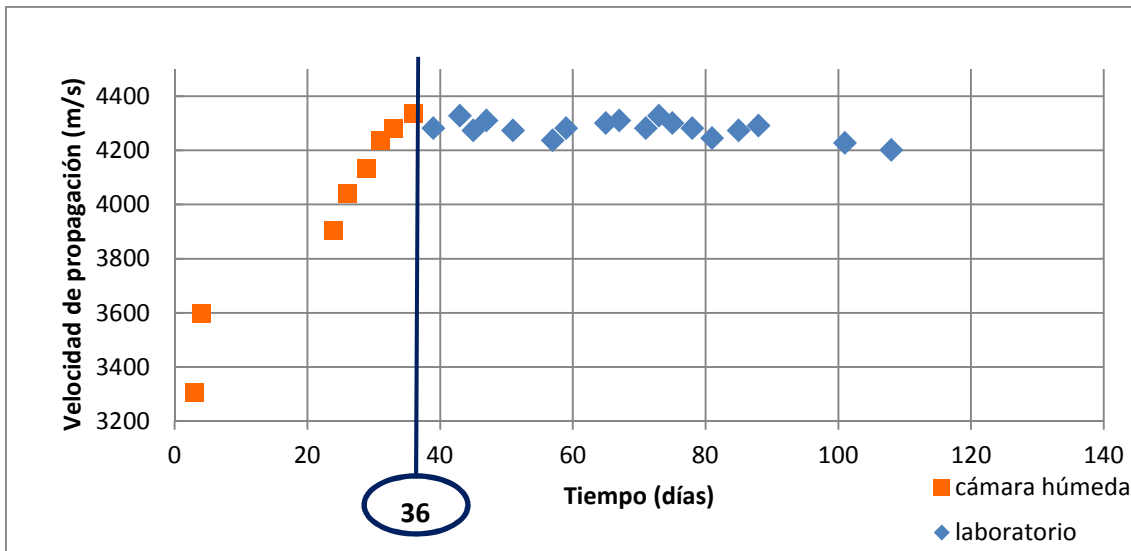
- **Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en probetas cúbicas a lo largo del tiempo.**

Tras la toma de datos del tiempo que tardan las ondas acústicas en pasar de un palpador a otro, pasando a través del hormigón, se puede determinar la velocidad de propagación de las ondas mecánicas en el material.

Por medio de gráficas de dispersión se puede obtener una visión clara de la evolución que sigue dicha velocidad a lo largo del tiempo, en función de la fase en que se encuentre el material (curado, endurecimiento), las condiciones ambientales, etc.

En la Gráfica 4.1 se aprecian las distintas fases y ambientes a los que está sometida la probeta.

- Durante el curado del hormigón, en cámara húmeda, se observa un alto crecimiento en la velocidad ultrasónica debido a la absorción de la humedad que hay en el ambiente.
- Una vez fuera, cuando el hormigón endurece en ambiente de laboratorio, se puede ver una tendencia más equilibrada, en la que la velocidad se reduce levemente.

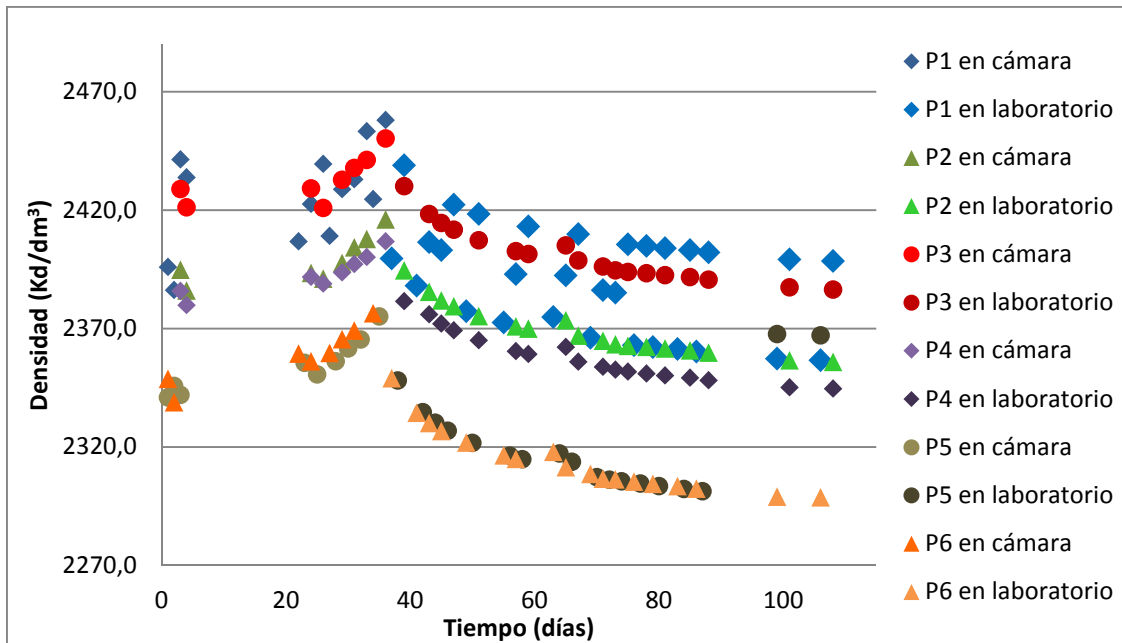
Gráfica 4.1 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el hormigón para la probeta P1.1.

El conjunto de probetas presenta un comportamiento similar, en la que se diferencian las dos fases mencionadas. Las gráficas correspondientes a las demás probetas se incluyen en el Anexo I.

- **Estudio de la evolución del contenido de humedad y la densidad en probetas.**

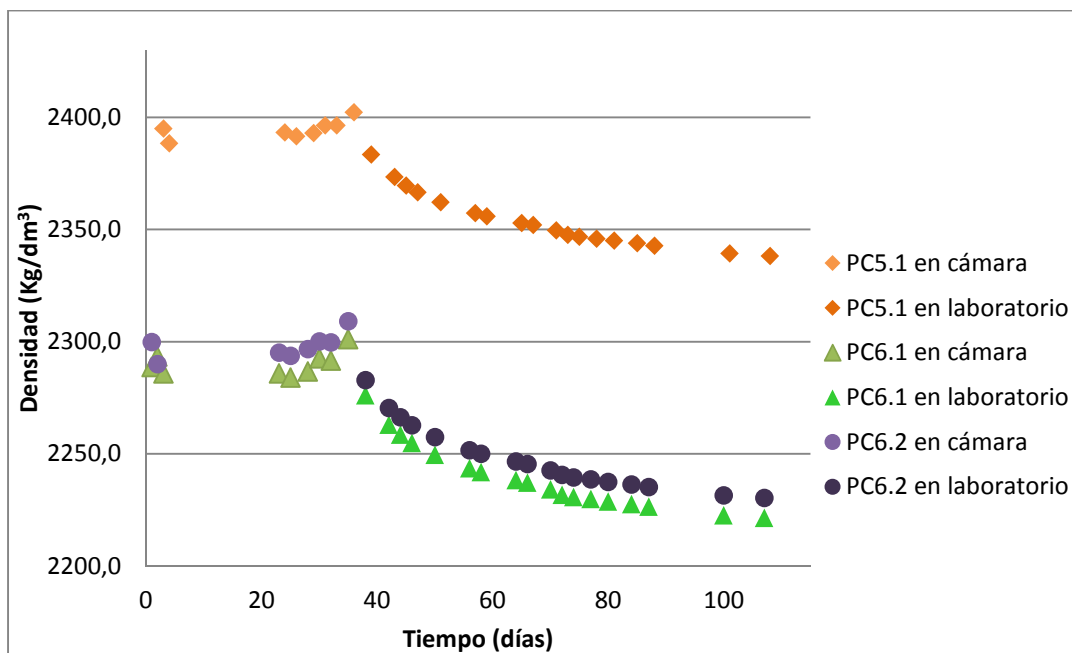
La toma de datos acerca del peso de las probetas a lo largo del tiempo permite deducir el modo en que han ido evolucionando las probetas respecto de la absorción o la pérdida de humedad interior, en función del ambiente en el que se encuentren y de la proporción de materiales de la que estén fabricadas. En la Gráfica 4.2 se representa los valores de densidad obtenidos a partir de las medidas del peso de las probetas.

Gráfica 4.2 Evolución de la densidad del hormigón en probetas cúbicas.



Se han llevado a cabo medidas sobre las probetas cilíndricas fabricadas de la densidad a lo largo del tiempo. En la Gráfica 4.3 se muestran dos fases bien diferenciadas: el periodo de curado del hormigón en cámara húmeda y el periodo de endurecimiento, en ambiente de laboratorio.

Gráfica 4.3 Evolución de la densidad en probetas cilíndricas en el tiempo



Se observan dos secciones bien definidas dentro de un mismo tipo de hormigón: el periodo de curado, dentro de la cámara húmeda, y el periodo de endurecimiento, en el laboratorio. El ambiente determina la tendencia de absorción y pérdida de humedad en las muestras de manera muy similar para todos los tipos de probeta.

El hormigón con una relación Agua-Cemento con menor contenido en humedad (probetas P1, P2, P3, P4 y PC5) presentan una densidad mayor respecto de las que poseen una relación mayor (P5, P6 y PC6).

Además, observando la progresión de absorción y pérdida de agua, el hormigón con mayor relación Agua-Cemento experimenta una pérdida ligeramente mayor de humedad, que las de menor relación. En la Gráfica 4.2 se aprecia una separación mayor en los últimos datos entre un tipo y otro de hormigón.

Aparentemente, el tipo de árido grueso empleado en la mezcla no influye sobre la densidad ni el grado de absorción de agua, ya que las probetas P2 se mantienen en la zona media de la Gráfica 4.2 y las de tipo P4 se encuentran en la zona baja.

Esto indica que la absorción de humedad se mantiene igual para diferentes tipos de dosificación y de árido grueso empleados en el hormigón, dependiendo sólo, aparentemente, del ambiente en el que se encuentran.

- **Estudio de la dependencia lineal de los valores de velocidad de ultrasonidos y el grado de humedad en la probeta según la composición.**

A partir de la toma de datos en laboratorio, se realiza una observación de la posible correlación lineal entre la velocidad de propagación de ondas en hormigón y el grado de humedad que presentan las probetas. Para este estudio se ha ensayado sobre 32 probetas cúbicas, de las que se detallan ocho, que componen el tipo de probetas P1, a modo de explicación. El resto de gráficas y tablas se incluyen en los Anexos I y II.

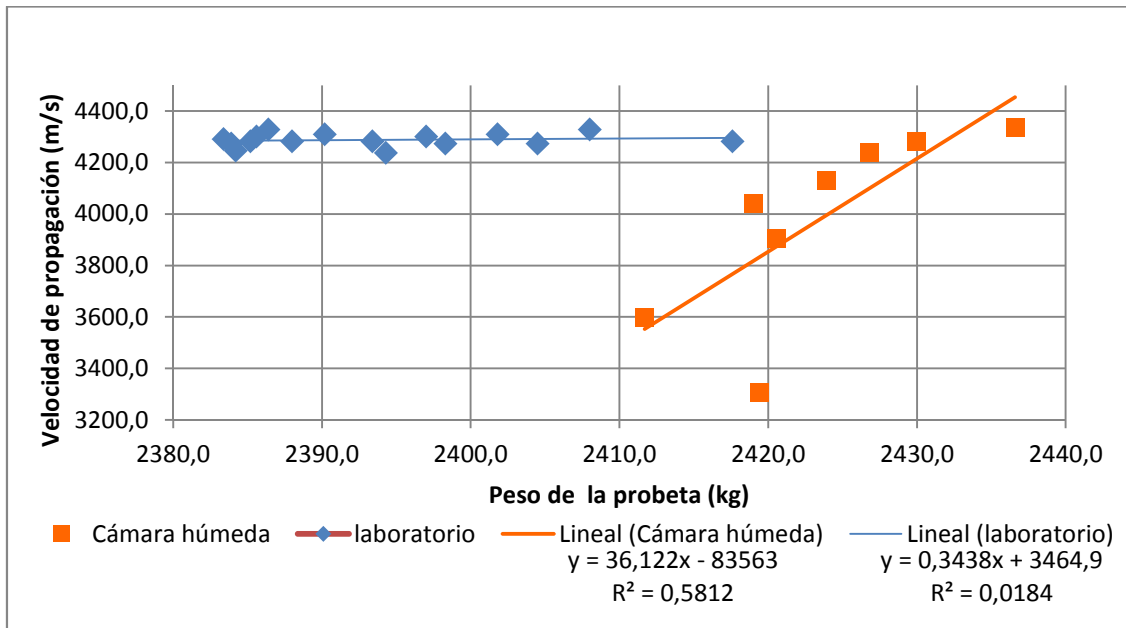
PROBETAS TIPO P1 (P1.1 – P1.8).

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

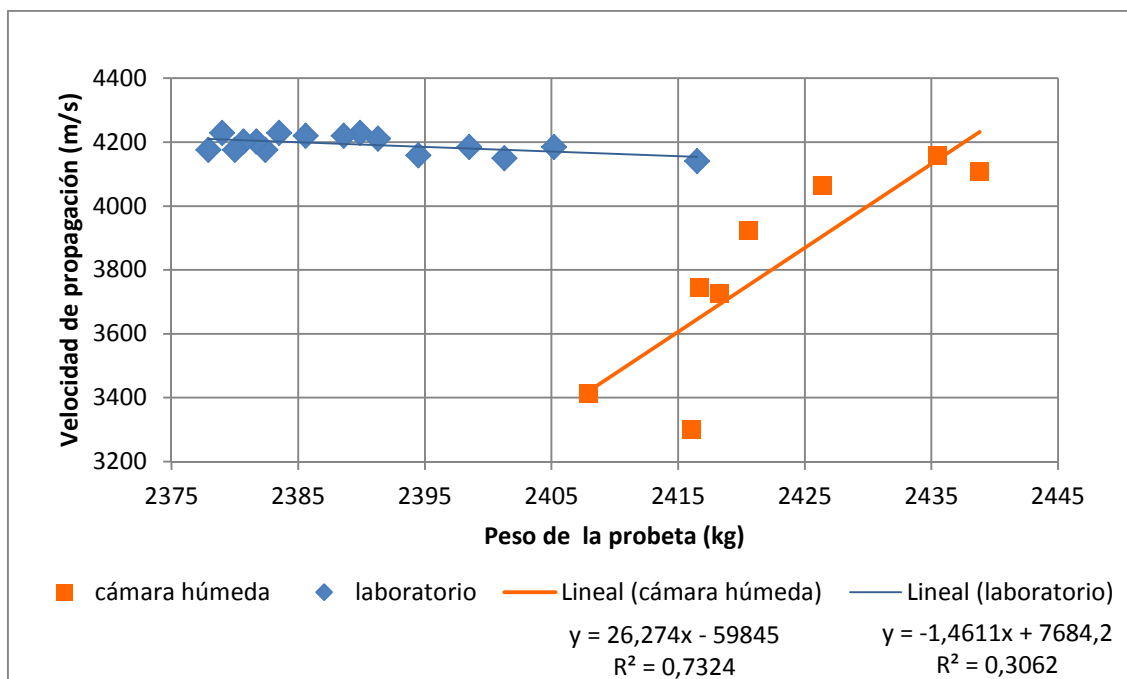
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

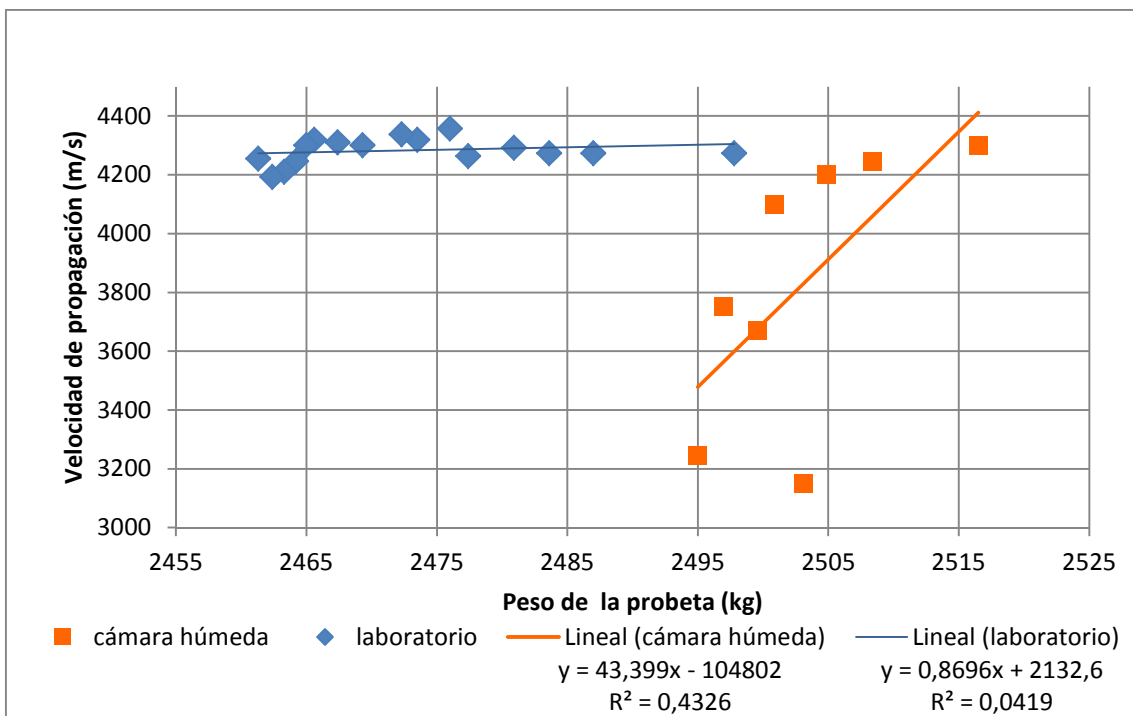
Gráfica 4.4 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.1.



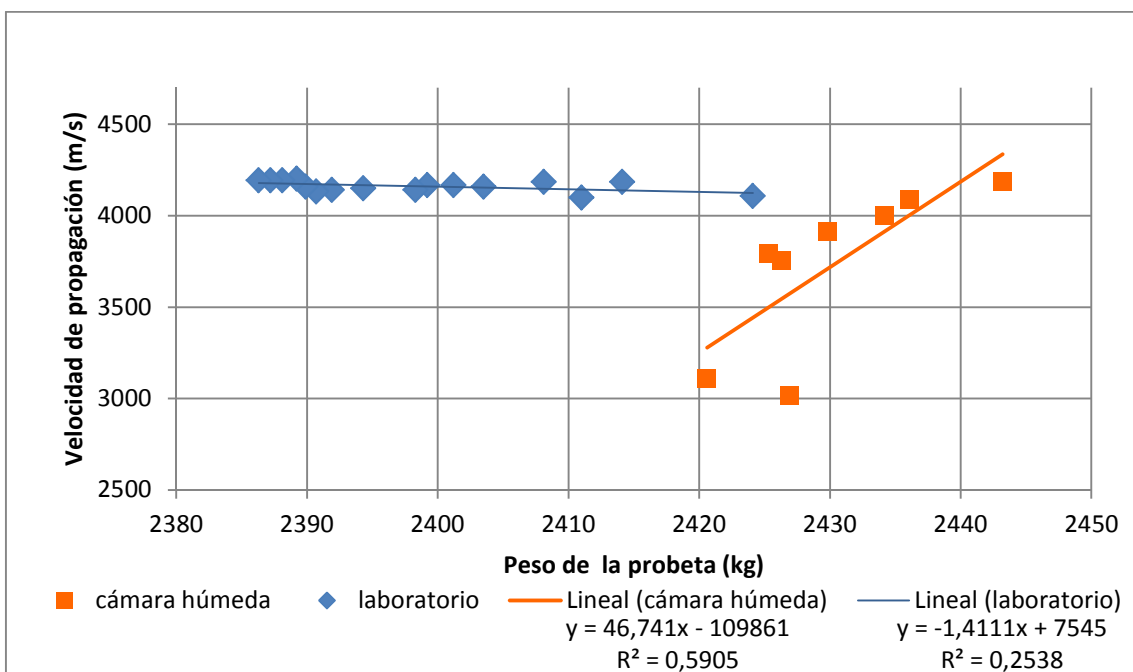
Gráfica 4.5 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.2.



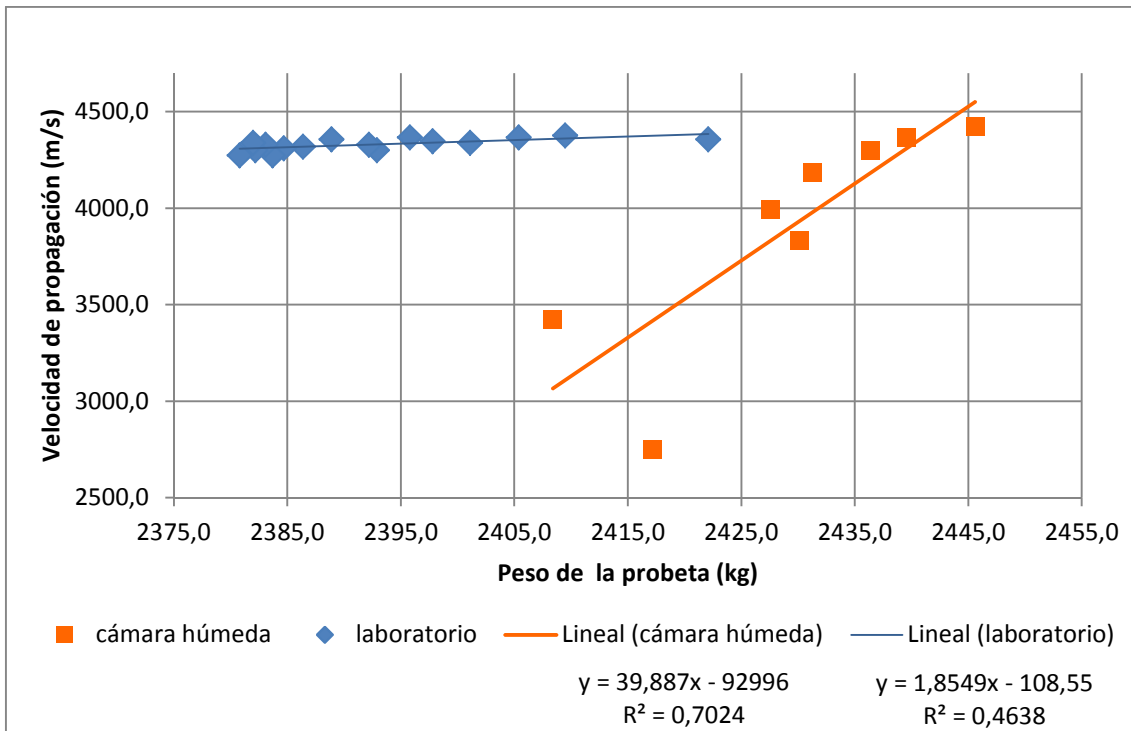
Gráfica 4.6 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.3.



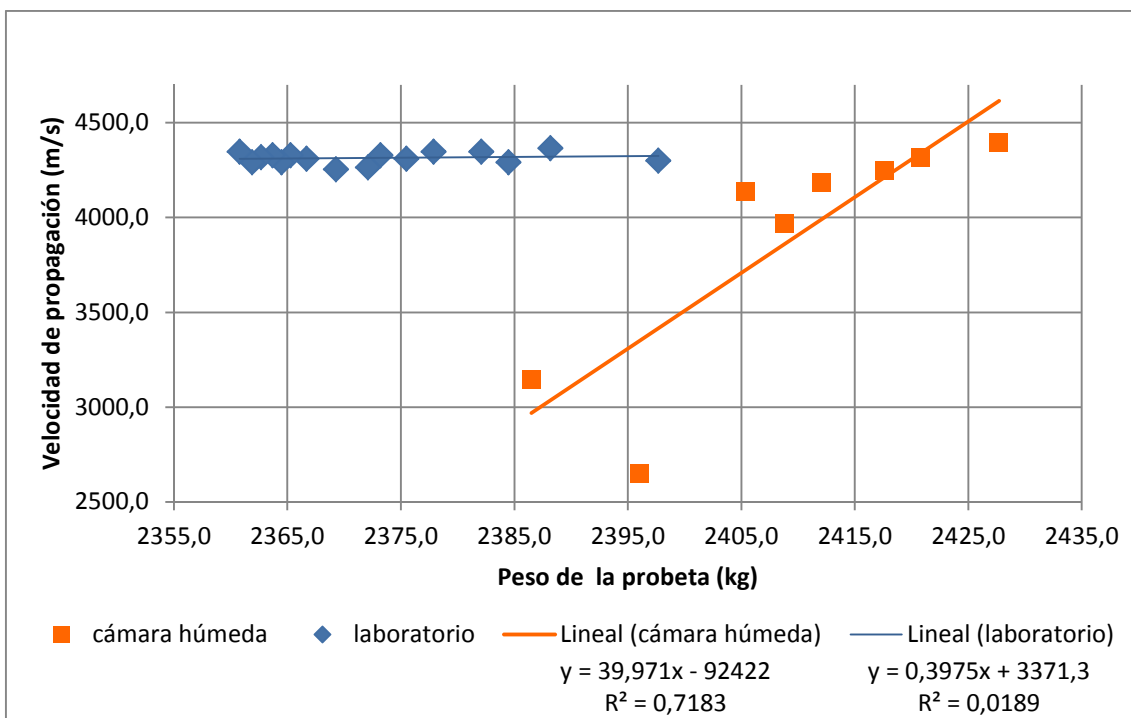
Gráfica 4.7 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.4.



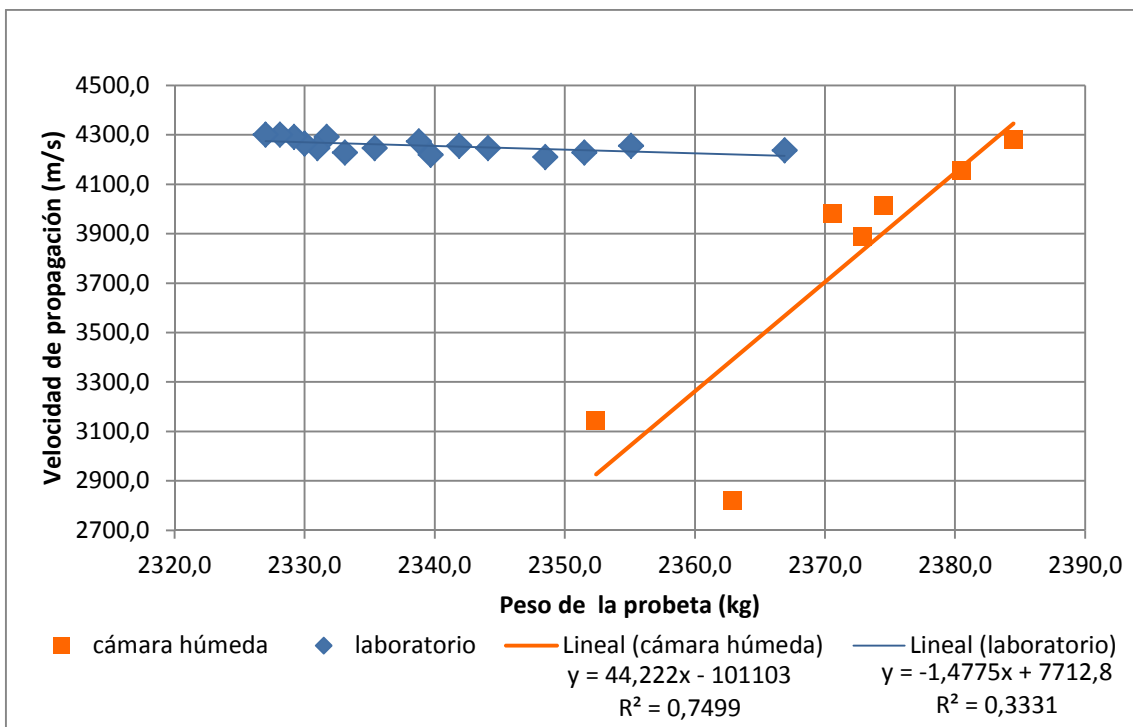
Gráfica 4.8 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.5



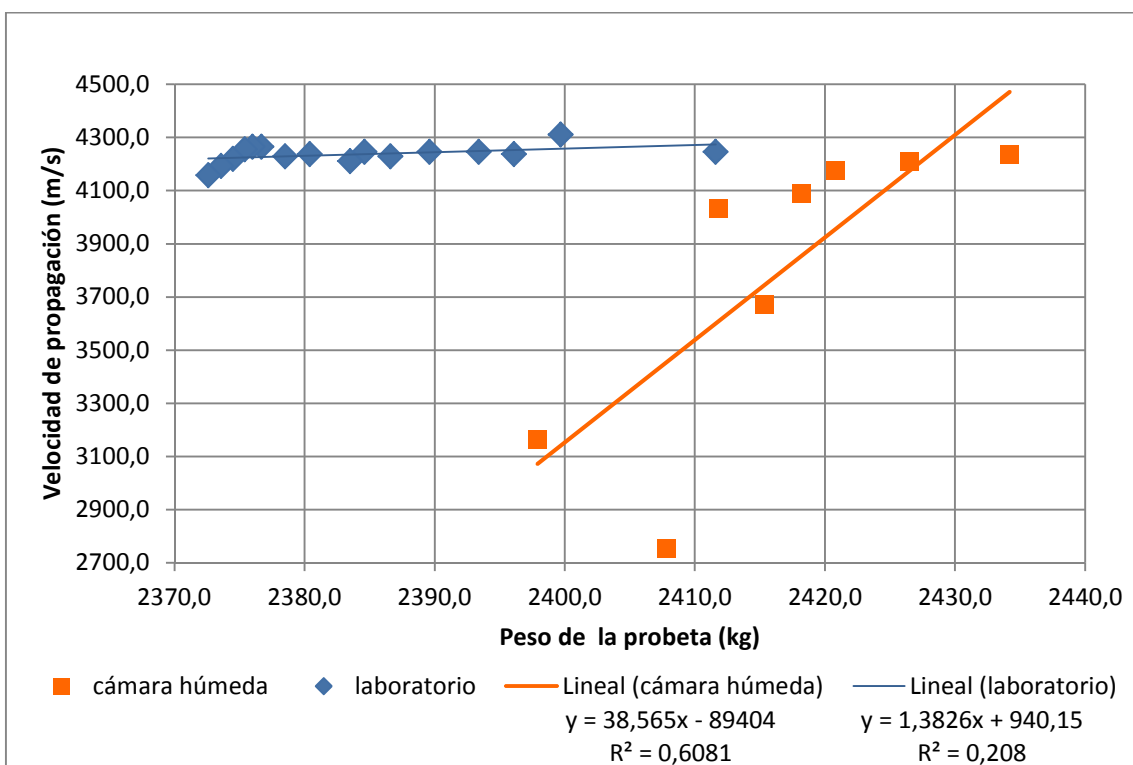
Gráfica 4.9 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.6.



Gráfica 4.10 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.7



Gráfica 4.11 Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.8



De acuerdo con los gráficos mostrados, en los que se incluye un estudio de la posible relación lineal entre el grado de humedad que presentan las probetas y la velocidad de propagación de ondas a través del hormigón. En éste se obtiene el p-valor y el coeficiente de correlación lineal de cada probeta con el fin de determinar el grado de dependencia entre ambas variables.

Desde un punto de vista gráfico, se distinguen dos según las condiciones ambientales a las que se encuentran sometidas las probetas. Las muestras, aparentemente, reflejan un comportamiento similar en cuanto a la evolución de los datos. El rango de valores en el que se sitúan los datos obtenidos varía sensiblemente de una probeta a otra.

Sin embargo, para poder determinar la existencia de diferencias de comportamiento entre las distintas probetas, es necesario recurrir a una regresión simple. En las siguientes tablas se incluyen el p-valor y el coeficiente de correlación de las probetas tipo P1 (Tabla 4.2; Tabla 4.3):

Tabla 4.2 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P1 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P1.1	58,12	0,762	0,0279	< 0,05
P1.2	73,24	0,856	0,0067	< 0,05
P1.3	43,26	0,667	0,0708	> 0,05
P1.4	59,05	0,770	0,0254	< 0,05
P1.5	70,24	0,828	0,0094	< 0,05
P1.6	71,83	0,472	0,2373	> 0,05
P1.7	74,99	0,866	0,0054	< 0,05
P1.8	60,21	0,780	0,0225	< 0,05

Tabla 4.3 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P1 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P1.1	1,84	0,385	0,1146	> 0,05
P1.2	3,06	-0,113	0,6562	> 0,05
P1.3	4,19	0,439	0,0685	> 0,05
P1.4	25,38	-0,046	0,8565	> 0,05
P1.5	46,38	0,736	0,0005	< 0,05
P1.6	1,89	0,373	0,1269	> 0,05
P1.7	33,31	-0,122	0,6296	> 0,05
P1.8	20,8	0,590	0,0099	< 0,05

El estudio de relación lineal se ha realizado con un nivel de confianza del 95%, por lo que para detectar la interacción entre las variables “velocidad de propagación” y “grado de humedad de la probeta” basta con comprobar el p-valor: si es mayor de 0,05, existe interacción, lo que determina que hay no correlación lineal entre las dos variables tomadas en cuenta. Si es menor de 0,05, no habría interacción, lo que indica que sí existe correlación lineal. Atendiendo al coeficiente R², éste indica el grado en que se explica el modelo lineal, lo que sirve de respaldo a la hora de determinar la posible correlación.

Como se puede observar en las tablas y en la distribución de los datos en las gráficas, en el periodo de curado del hormigón en cámara húmeda existe correlación lineal entre el peso que presentan las probetas y la velocidad de propagación de ultrasonidos salvo en dos individuos muestrales. Esto se debe a la gran variación que experimenta la velocidad de propagación en un rango de pesos de probeta no muy grande.

Por el contrario, en el periodo de endurecimiento del hormigón en ambiente de laboratorio sólo se aprecian dos casos en los que cumple el p-valor, por lo que se puede decir que no hay correlación lineal durante el endurecimiento,

según las condiciones ambientales, ya que la velocidad apenas varía y la pendiente de la recta de regresión es prácticamente horizontal.

Respecto del conjunto de amasadas, se aprecia una tendencia común: durante el periodo de curado en cámara húmeda se dan signos de correlación lineal, mientras que durante el periodo en ambiente de laboratorio no presentan correlación entre el grado de humedad de la probeta y la velocidad de propagación de ultrasonidos la práctica mayoría. El resto de gráficas y tablas de los distintos tipos de hormigón se incluye en el Anexo III.

Cabe destacar el comportamiento del tipo de probetas P3 (relación A/C = 0,5; árido grueso procedente de porfídico granítico de machaqueo y con aditivos en una proporción en Cl⁻ del 0,4%), que no que muestra correlación lineal en tres de los cuatro individuos que componen la muestra en cámara húmeda. La amasada más parecida, tipo P4 (con un 2% en Cl⁻) presenta un comportamiento similar al resto, aunque sí presenta relación lineal respecto de las variables. Esto hace pensar que el curado el hormigón ha presentado inestabilidad respecto de la pérdida y la absorción de humedad, bien por efecto del retardante de fraguado (CaCl₂), por las condiciones ambientales, por defectos en la fabricación o por errores en la medición de tiempo de propagación.

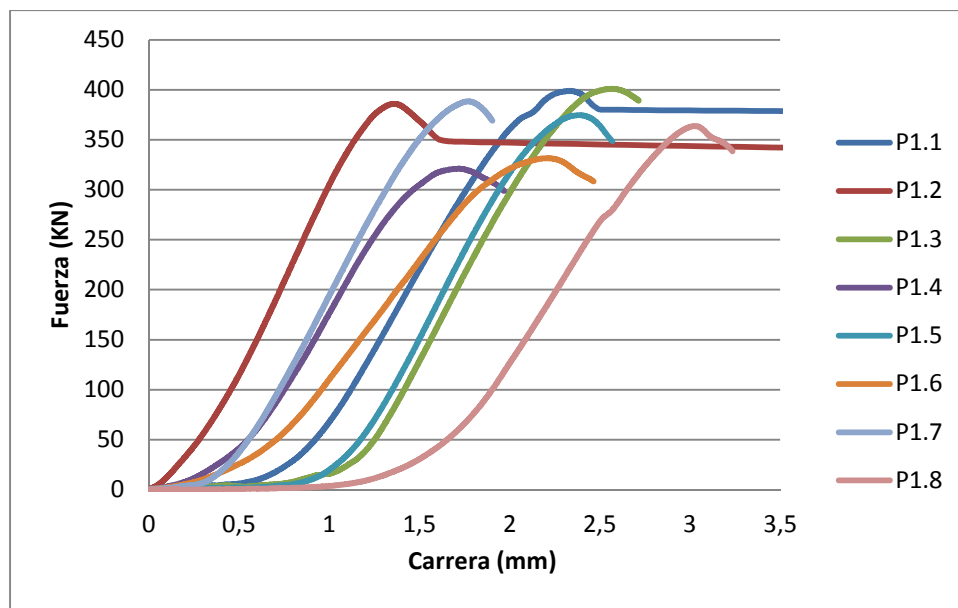
ENSAYOS DESTRUCTIVOS

- **Estudio de los efectos de las condiciones previas de ensayo sobre la carga de rotura a compresión de las probetas.**

A partir de los ensayos de rotura a compresión realizados sobre las probetas, se observan los datos de Carga y Tensión en el Límite Elástico, Carga y Tensión Máximas de Rotura y las respectivas Deformaciones.

A continuación se muestran los resultados derivados del ensayo de rotura a compresión de las probetas tipo P1, a modo de ejemplo. Las demás gráficas y tablas gráficas se encuentran en el ANEXO IV.

Gráfica 4.12 Diagrama Tensión-Deformación de Ensayo de rotura a compresión de las probetas tipo P1.



La gráfica muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan (Gráfica 4.12). En la Tabla 4.4 se incluyen los valores más representativos obtenidos durante los ensayos de rotura a compresión.

Tabla 4.4 Valores de carga, deformación y tensión durante el ensayo a compresión de las probetas tipo P1.

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P1.1	351,87	35,19	1,93	398,83	39,88	2,33
P1.2	335,81	33,58	1,07	385,96	38,60	1,36
P1.3	312,34	31,23	2,05	401,04	40,10	2,57
P1.4	274,40	27,44	1,29	321,08	32,11	1,72
P1.5	338,74	33,87	2,09	374,64	37,46	2,39
P1.6	291,88	29,19	1,78	331,59	33,16	2,21
P1.7	349,15	34,92	1,49	388,36	38,84	1,77
P1.8	319,86	31,99	2,73	363,81	36,38	3,03

Se observa uniformidad en las pendientes que toman las probetas hasta alcanzar el límite elástico, salvo por la probeta P1.6, que es levemente inferior.

Las mayores diferencias se aprecian a partir de la deformación que adquieren con la carga máxima de rotura, que proceden del asentamiento que experimentan a la hora de acoplarse la prensa de la máquina universal.

El límite elástico y la carga máxima de rotura alcanzada se mantienen regulares en una franja de menos de 50 KN (que representa una desviación del 10-12%, aproximadamente), lo que indica que son aparentemente similares. Sin embargo, se observan dos probetas, P1.4 y P1.6, con un punto máximo por debajo que el resto (alrededor del 20%).

Respecto del conjunto de probetas ensayadas, se puede apreciar una tendencia similar en la forma y la pendiente de las curvas obtenidas.

Se observa una mayor carga de rotura a compresión en las probetas con relación Agua-Cemento menor (0,5), en torno a los 350-400 KN, mientras que

el hormigón fabricado con mayor proporción de humedad se sitúa entre 300 y 350 KN.

Por otro lado, las gráficas de los ensayos de las muestras tipo P5 y P6, con relación A/C = 0,6, indican una mayor homogeneidad en los resultados: salvo por una probeta desviada en cada caso, el resto ofrece pendientes, límites elásticos y cargas de rotura a compresión más similares que lo que sucede en tipos de probeta como P2, P3 o P5, con relación A/C = 0,5.

Atendiendo al tipo de árido grueso empleado en la fabricación del hormigón, los resultados no permiten determinar diferencias de comportamiento de probetas con la misma dosificación pero con distinto árido. Las probetas tipo P2 muestran unos resultados dentro del rango indicado anteriormente para la dosificación de la que están hechos (entre 350 y 400 KN, aproximadamente). Lo mismo sucede con las probetas tipo P6, aparentemente tienen una resistencia entre 325 y 350 KN (inferior que la otra dosificación, pero muy próximo al resto de probetas).

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS A SEGUIR EN FUTURAS INVESTIGACIONES

Tras llevar a cabo toda la metodología experimental desarrollada en el presente trabajo fin de máster, y el consiguiente análisis e interpretación de los resultados obtenidos, es posible enunciar las siguientes conclusiones:

- Como cabía esperar, la velocidad de los ultrasonidos viene determinada en función del contenido de humedad en el material por el que se propagan. A mayor cantidad de humedad, mayor velocidad de propagación.

La velocidad de ultrasonidos se ve influenciada, en igualdad de condiciones, por el ambiente al que están sometidas las muestras, principalmente.

- Durante el proceso de curado en cámara húmeda, la evolución que desarrollan el peso y la velocidad presenta poca estabilidad, aunque existe una gran correlación lineal entre ambas variables.

En ambientes con condiciones normales, durante el periodo de endurecimiento del hormigón tal correlación no se da, debido a la escasa variación de la velocidad de propagación de ondas acústicas respecto de la densidad.

- El grado de humedad empleado en la fabricación del hormigón influye notablemente en el peso que tiene la muestra y en la velocidad de transmisión de ultrasonidos, otorgando una mayor densidad las dosificaciones que contienen una relación Agua-Cemento menor.

Sin embargo, el grado de absorción y pérdida de humedad es ligeramente superior para dosificaciones con mayor cantidad de agua.

- La resistencia a compresión se ve influenciada, como era de suponer, en mayor grado por la dosificación empleada y el contenido de agua en el hormigón que por el tipo de árido grueso empleado.

Relaciones de Agua-Cemento más bajas ofrecen resistencias de rotura mayores, mientras que el empleo de áridos procedentes de machaqueo mejora muy levemente éstos valores respecto de la utilización de áridos rodados.

Una vez alcanzadas las conclusiones mencionadas, se determina una serie de líneas a seguir en la realización de investigaciones futuras:

- Ampliar la población muestral de ensayo con el fin de dar mayor trascendencia a los resultados experimentales obtenidos.
- Complementar el campo experimental mediante la adición de técnicas de ensayo de dureza superficial en hormigón.
- Dado que se establece la influencia del ambiente durante el curado del hormigón, se plantea estudiar la evolución de la velocidad de propagación con distintos ambientes y situaciones de curado.
- Incorporar el factor de la corrosión del acero en hormigón al estudio del comportamiento del material mediante técnicas de ensayo por ultrasonidos.
- Valorar la posibilidad de realizar ensayos de rotura a compresión en distintas etapas del hormigón.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code. «Section V.» En *Nondestructive Examination*. New York, 1998.
- Berganza, Adolfo, y Olivia Hernández. *Estrucplan On Line*. 7 de junio de 2007. <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1589>.
- Bermúdez Olivares, Dolores, Félix Faura Mateu, Ginés Martínez Nicolás, y José Ojados Roca. *Prácticas de Ciencias Materiales. Fundamento y desarrollo*. Universidad de Murcia, 1992.
- Bounatian Benatov, B., Carlos Faraco Muñoz, y A. Nouet. «Aplicación de métodos no destructivos a los controles de cimientos profundos en España.» Editado por CEDEX. *Ingeniería Civil*, nº 79 (1991): 33-42.
- Calavera Ruiz, José. *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado*. INTEMAC, 2005.
- Cañas Guerrero, I., y J.M. Fuentes Pardo. «Métodos de Ensayo No Destructivo en Estructuras de Hormigón.» 2001.
- Carino, N.J. «3. Pullout Test.» En *Handbook of Nondestructive Testing of Concrete*, de V.M. Malhotra, & N.J. Carino. CRC Press, 2004.
- Cobo Escamilla, Alfonso. *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación*. Fundación Escuela de la Edificación, 2001.
- Dasel Sistemas e Instituto de Automática Industrial (IAI), CSIC. «Workshop Phased Array: Introducción y nuevas técnicas.» Arganda del Rey, 2009.
- Dávila Ruiz., María Elisa. «Capítulo 2: Métodos de inspección no destructiva aplicados a materiales compuestos.» En *Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array para la inspección por ultrasonidos de elementos fabricados con materiales compuestos. Proyecto Fin de Carrera UC3M*. Leganés, 2010.
- De Fino, M., G. De Tommasi, y F. Fatiguso. «Experimental studies to normalize the sonic test on masonry walls.» En *Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido (REHABEND 2009)*, 338. Bilbao, 2009.
- Delibes Liniers, Adolfo. *Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón*. Madrid: INTEMAC, 1993.

- Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo. s.f.
- Díaz M., Gonzalo E. *gonzalodiaz.net*. 2010.
<http://www.gonzalodiaz.net/ultrasonido/ultrasonidos/ultrasonido.shtml>.
- Duffó, G. S., S. B. Farina, y F. M. Schulz R. «Corrosión de materiales metálicos embebidos en hormigón.» Villa del Mar, 2010.
- Dulia Ortega, T, Solange Seguel, B. «Historia del Ultrasonido: El caso chileno.» *Revista Chilena de Radiología* 10, nº 2 (2004).
- EHE. «Artículo 27.» En *Instrucción de hormigón estructural*. Ministerio de Fomento, 2008.
- Escalona, Iván. *Pruebas no destructivas - Ultrasonidos*. monografias.com. Instituto Politécnico Nacional, Ingeniería Industrial. México, s.f.
- Fernández Cánovas, Manuel. *Hormigón*. Madrid: CICCOP, 2007.
- Gacitúa Lovera, Guisella Fabiola. *Estudio en estructuras de hormigón armado mediante el uso de un RADAR de Penetración Terrestre. Trabajo de Titulación, Universidad Austral de Chile*. Valdivia, 2006.
- García Cueto, Alfonso R. *Ensayos no destructivos por la técnica de ultrasonido industrial*. México, 1989.
- García, Alberto, Carlos Desimone, y Pablo Katchadijian. «Caracterización de equipos de END. Ejemplo de aplicación en equipos de Ultrasonido.» Buenos Aires, Octubre de 2007.
- Gómez de León, Eduardo. *END. Ultrasonidos. Nivel II*. Editado por Asociación Española de ensayos No Destructivos. Madrid: Fundación Confemetal, 2006.
- Gosálbez, J., J.V. Fuente, G. Safont, R. Fernández, A. Salazar, y V. Albert. «Experimentación en laboratorio de reproducciones a escala de muros históricos mediante monitorización END y QEND.» En *Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido (REHABEND 2009)*, 360. Bilbao, 2009.
- Gwirc, Sergio N. *Películas gruesas de PZT como transductores de ultrasonido para imágenes. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires*. Buenos aires, 2009.
- Henry, Jorge-Louis, y Antonio Aguado de Cea. *Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la Depuradora del Besos mediante ultrasonidos. Proyecto Fin de Carrera, UPC*. Barcelona, 2009.

- Hostalet Alba, Francisco. «Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo en hormigón.» (Informes de la Construcción) 46, nº 433 (1994).
- Jones, R., y I. Facaoaru. «Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method.» *RILEM Publications SARL* 2, nº 10 (1969).
- Kane, J.W., y M.M. Sternheim. *Física*. Reverté, 2000.
- López García, Óscar, Alberto Carnicero López, y Rosa Ruiz Pablos. «Materiales inteligentes I/II. Introducción a los materiales del siglo XXI.» *Anales de mecánica y electricidad*, Noviembre-diciembre 2003.
- Molero Armenta, Miguel Ángel. *Caracterización de materiales cementicios mediante dispersión ultrasónica. Tesis doctoral, UPM*. Madrid, 2009.
- Moreno Fernández., Esther. *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras de hormigón corroidas aplicando el criterio de acero equivalente. Tesis Doctoral UC3M*. Leganés, 2008.
- Moreno Hernández, Eduardo. *Propagación de ondas mecánicas y aplicaciones de los ultrasonidos*. Prod. ICIMAF. Centro de Ultrasonica. La Habana (Cuba), s.f.
- Naik, T.R., V.M. Malhotra, y J.S. Popovics. «8. The Ultrasonic Pulse Velocity Method.» En *Handbook of Nondestructive Testing of Concrete*, de V.M Malhotra, & N.J. Carino. CRC Press, 2004.
- NTC-4991. *Soldadura de líneas de tubería y de instalaciones relacionadas*. ACOSEND, ICONTEC, 2009.
- Perera-Gerónimo, Daniel. *Manual de introducción al ultrasonido industrial. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Tecnológica de Tabasco*. s.f.
- Pucinotti, Raffaele. «Durezza degli inerti e metodo Windsor.» *AIPnD Journal*, 2009.
- Ramírez Gómez, Francisco, Miguel Ángel Fernández Soler, Amador Alonso Roldán, Gabriel Delojo Morcillo, Carlos Valdecantos Martínez, y José Manuel de los Ríos Rubalcaba. *Introducción*. Vol. 1, de *Métodos de Ensayos no Destructivos*. Madrid: INTA, 1996.
- Ramírez Gómez, Francisco, Miguel Ángel Fernández Soler, Amador Alonso Roldán, Gabriel Delojo Morcillo, Carlos Valdecantos Martínez, y José Manuel de los Ríos Rubalcaba. *Métodos de inducción electromagnética. Corrientes inducidas*. Vol. 2, de *Métodos de Ensayos no Destructivos*, 714-970. Madrid: INTA, 1996.

- Ramírez Gómez, Francisco, Miguel Ángel Fernández Soler, Amador Alonso Roldán, Gabriel Delojo Morcillo, Carlos Valdecantos Martínez, y José Manuel de los Ríos Rubalcaba. *Métodos y técnicas especiales de END*. Vol. 2, de *Métodos de Ensayos no Destructivos*, 1072-1258. Madrid: INTA, 1996.
- Ramírez Gómez, Francisco, Miguel Ángel Fernández Soler, Amador Alonso Roldán, Gabriel Delojo Morcillo, Carlos Valdecantos Martínez, y José Manuel de los Ríos Rubalcaba. *Radiología Industrial*. Vol. 1, de *Métodos de Ensayos no Destructivos*, 58-332. Madrid: INTA, 1996.
- Ramírez Gómez, Francisco, Miguel Ángel Fernández Soler, Amador Alonso Roldán, Gabriel Delojo Morcillo, Carlos Valdecantos Martínez, y José Manuel de los Ríos Rubalcaba. *Ultrasonidos*. Vol. 1, de *Métodos de Ensayos no Destructivos*, 335-608. Madrid: INTA, 1996.
- Santulli, Carlo. «Utilizzo della Termografia per il rilevamento di oggetti sommersi: opportunita'e problemi.» Editado por Università degli Studi di Roma - La Sapienza. *AIPnD Journal*, 2009.
- Sirvent Casanova, I., y A. García Barreira. En *Estimación de la Resistencia del Hormigón "in situ" por Métodos Combinados*, de Instituto Técnico de la Construcción (ITC), 1-4. 1994.
- Soria Lemus., Enrique Humberto. «Capítulo 1: Marco Teórico.» En *Laboratorio de END de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, USAC. Trabajo de Graduación*. Guatemala, 2004.
- UNE83-308-86. *Ensayos de Hormigón. Determinación de la Velocidad de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos*. AENOR, 1986.
- UNE-CEN/TR15134-IN. *Ensayos no destructivos. Examen automatizado por ultrasonidos. Selección y aplicación de sistemas*. AENOR, 2011.
- UNE-EN12390-1. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes*. AENOR, 2005.
- UNE-EN12390-3. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. AENOR, 2003.
- UNE-EN12390-4. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo*. AENOR, 2001.
- UNE-EN12504-2. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote*. AENOR, 2002.
- UNE-EN12504-3. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 3: Determinación de la fuerza de arrancamiento*. AENOR, 2006.

- UNE-EN12504-4. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*. AENOR, 2006.
- UNE-EN12620. *Áridos para hormigón*. AENOR, 2003.
- UNE-EN12688-1. *Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen por ultrasonidos. Parte 1: Aparatos*. AENOR, 2010.
- UNE-EN12688-2. *Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen por ultrasonidos. Parte 2: Palpadores*. AENOR, 2010.
- UNE-EN1330-4. *Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 4: Términos utilizados en ensayos por ultrasonidos*. AENOR, 2010.
- UNE-EN14127. *Ensayos no destructivos. Medición del espesor mediante ultrasonidos*. AENOR, 2011.
- UNE-EN197-1. *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. AENOR, 2000.
- UNE-EN583-1. *Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 1: Principios generales*. AENOR, 1999.
- UNE-EN583-3. *Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 3: Técnica de transmisión*. AENOR, 1997.
- UNE-EN583-4. *Ensayos no destructivos. Ensayo por ultrasonidos. Parte 4: Examen de las discontinuidades perpendiculares a la superficie*. AENOR, 2003.
- UNE-EN583-5. *Ensayos no destructivos. Ensayo por ultrasonidos. Parte 5: Caracterización y dimensionamiento de discontinuidades*. AENOR, 2004.
- Urtubey, Edgardo, Ricardo Schiava, y Guillermo Etse. «Simulación numérica de la propagación de una onda ultrasónica a través de un sólido elastoplástico - Evaluación de daño.» *Mecánica Computacional XXII* (2003).
- Vecca Vallejos, Christian R., y Ricardo S. Lucero Suzuki. «Parámetros que influyen en los resultados de los ensayos no destructivos de esclerometría y ultrasonido.» Asunción (Paraguay), 2007.
- Velasco García, Juan Carlos. «Estimación de la resistencia a compresión en una estructura de hormigón, mediante la aplicación de la técnica de la velocidad del impulso ultrasónico (ensayo no destructivo).» s.f.
- Veloso Alarcón, Mario Enrique. *Simulación de propagación de ondas sonoras con aplicaciones en Acústica Subacuática. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Austral de Chile*. Valdivia (Chile), 2007.

- Venet, M., y A.H.P. Pereira. *Curso Materiais e Dispositivos Piezoelétricos: Fundamentos e Desenvolvimento*. Editado por ATCP do Brasil. Vol. 1 a 3. Sao Paulo, 2004.
- Vergara, L., y otros. «Métodos de END mediante ultrasonidos para caracterizar la durabilidad del mortero.» *XXXI Congreso Nacional de Acústica*, 2000.
- Villegas, L., Lombillo, I. «Patología de la construcción o una "obra en tres actos": problema, investigación y rehabilitación.» En *Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio construido (REHABEND 2009)*. Bilbao, 2009.
- Weil, Gary J. «15. Infrared Thermography Techniques.» En *Handbook of Nondestructive Testing of Concrete*, de V.M. Malhotra, & N.J. Carino. CRC Press, 2004.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO I

Evolución de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en hormigón, a lo largo del tiempo y en función del peso de la probeta. Gráficas.

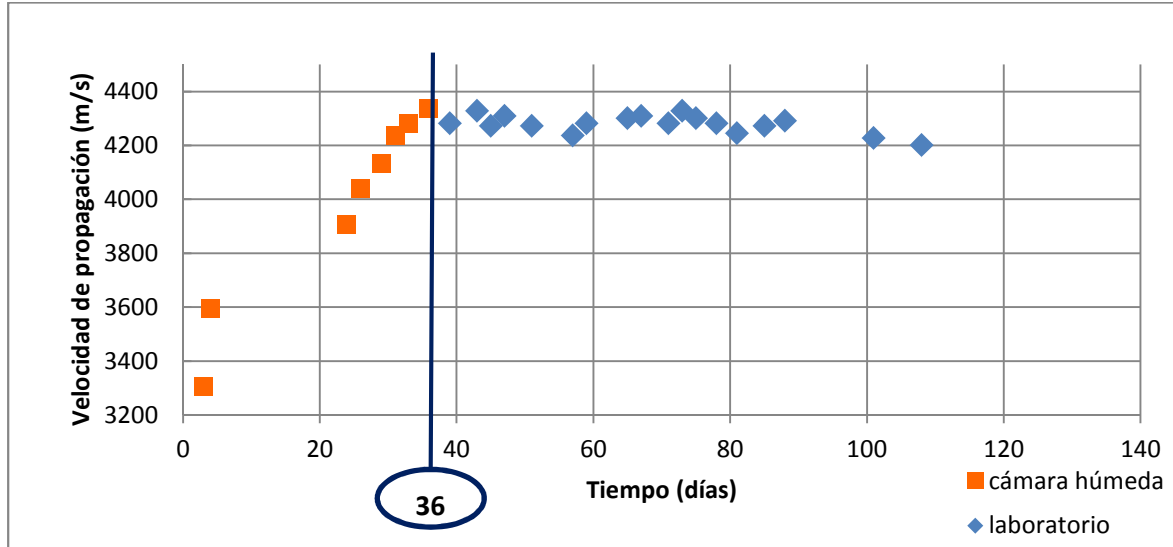
PROBETA P1-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

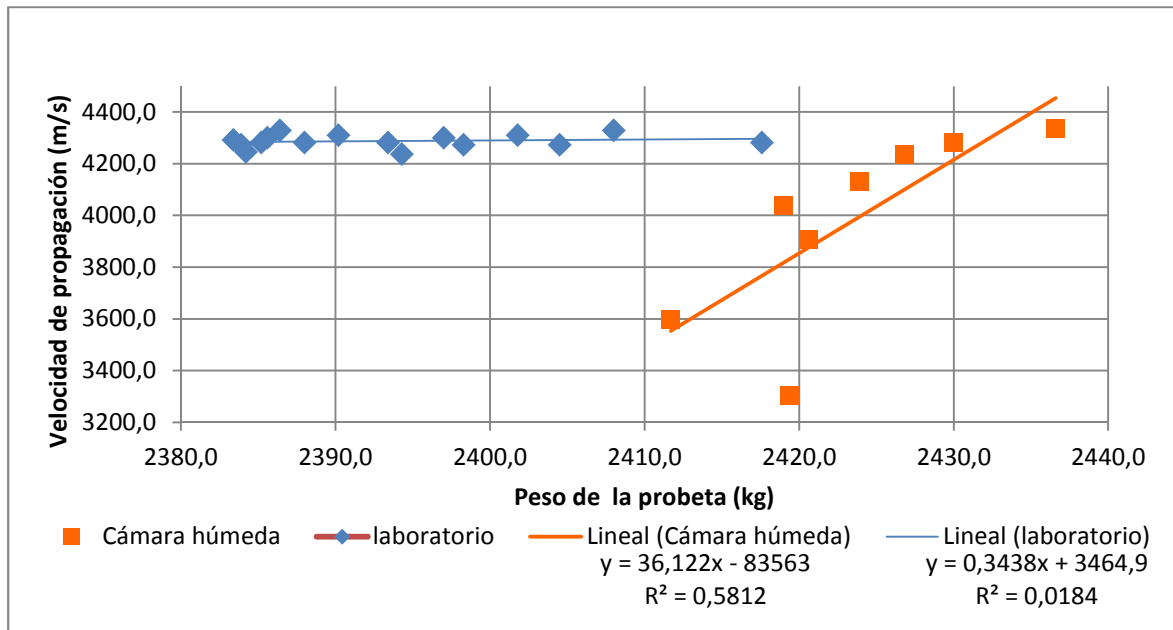
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.1 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.1



Gráfica 7.2 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.1



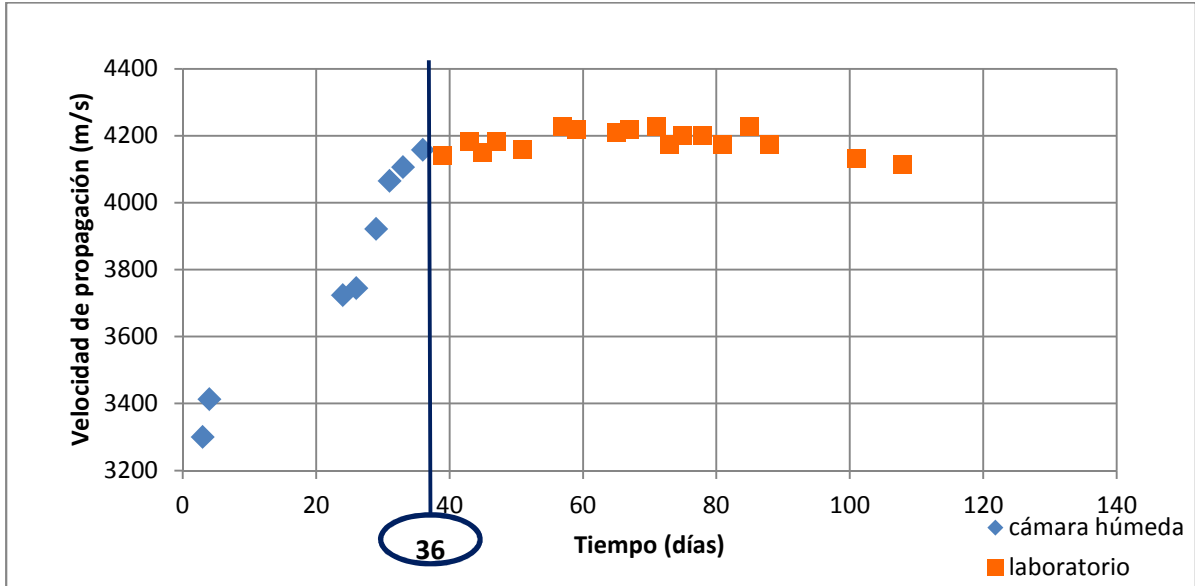
PROBETA P1-2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

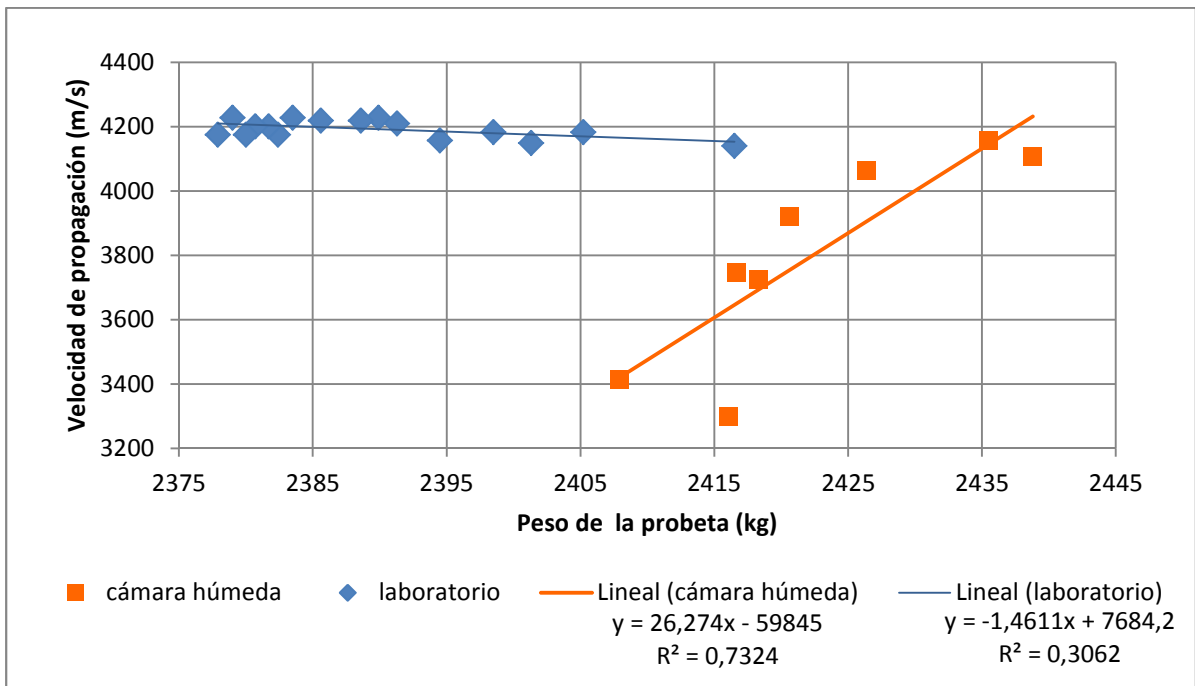
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.3 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.2



Gráfica 7.4 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.2



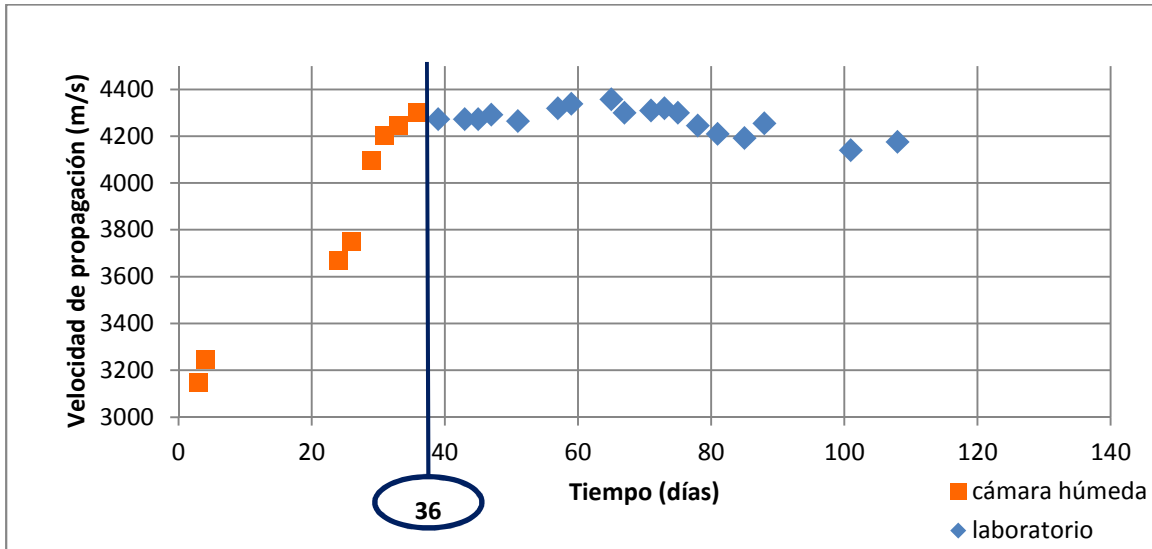
PROBETA P1-3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

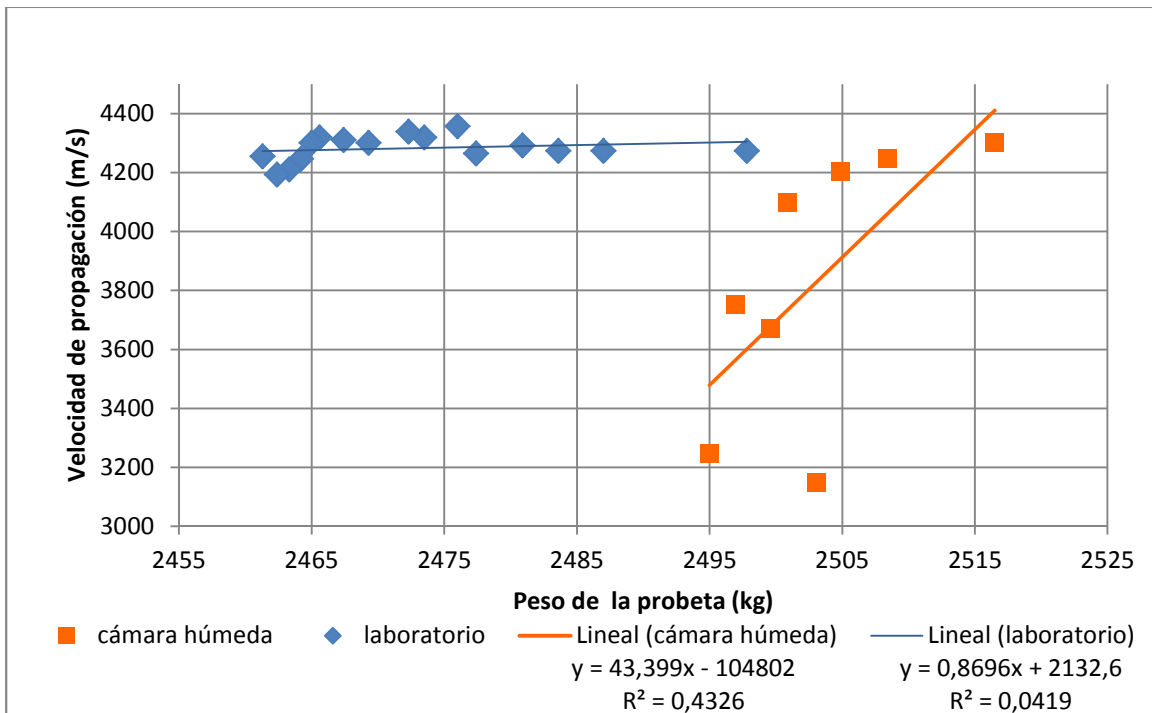
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.5 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.3



Gráfica 7.6 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.3



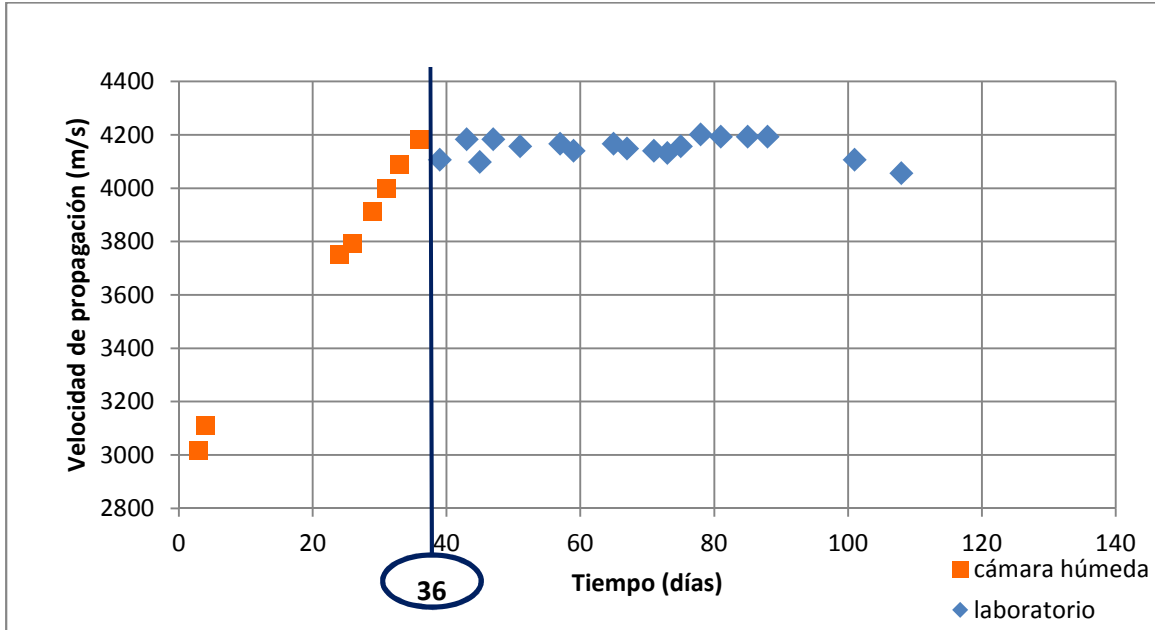
PROBETA P1-4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

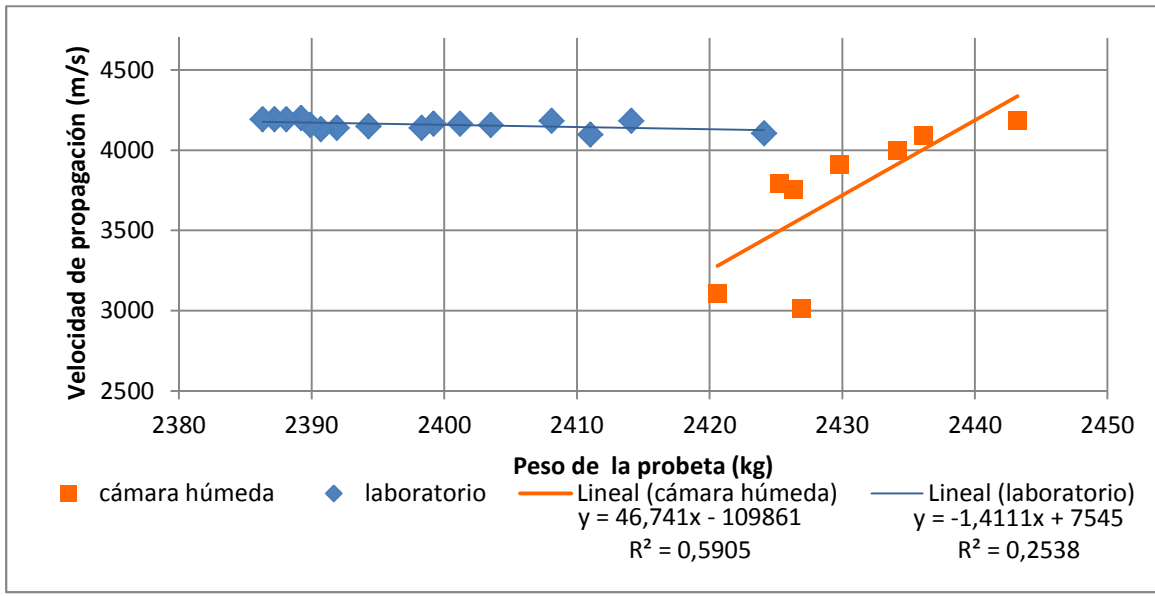
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.7 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.4



Gráfica 7.8 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.4



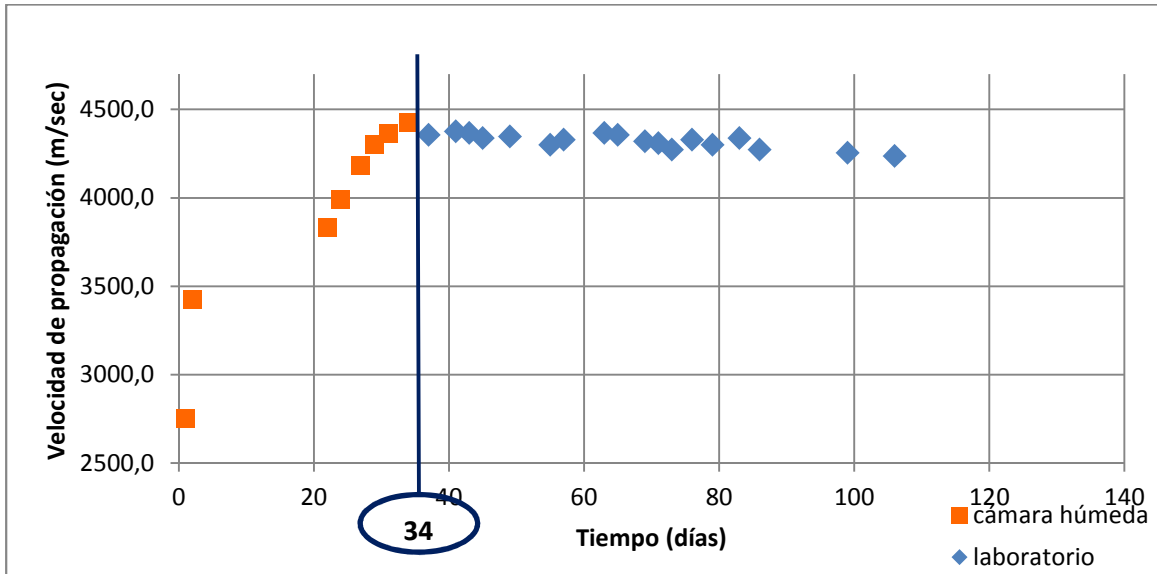
PROBETA P1-5.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

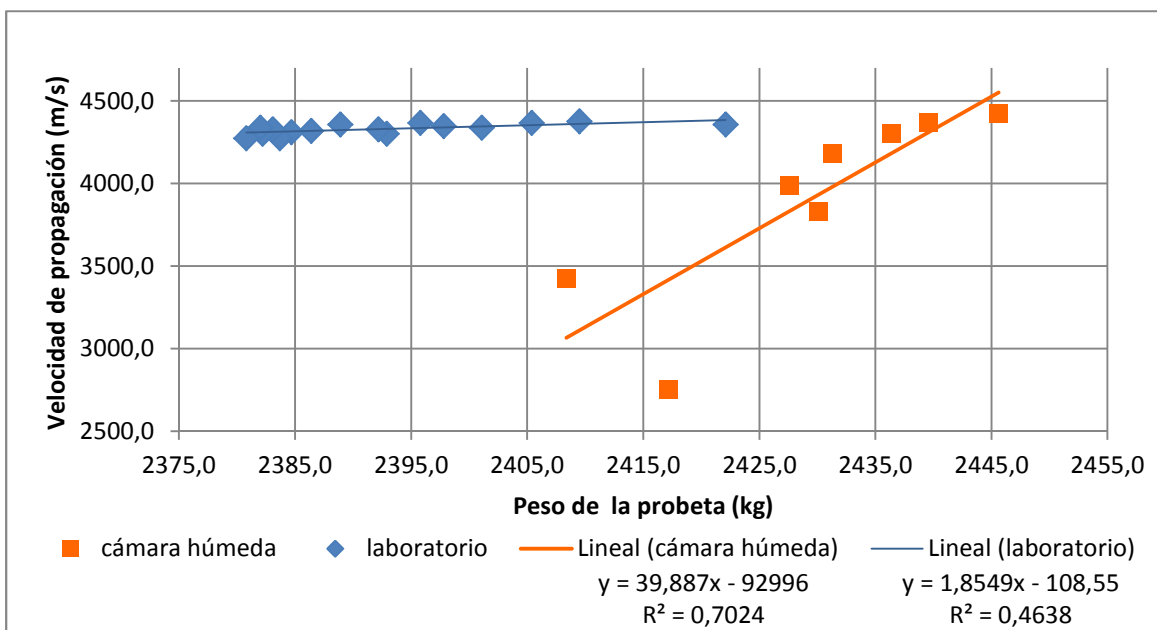
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.9 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.5



Gráfica 7.10 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.5



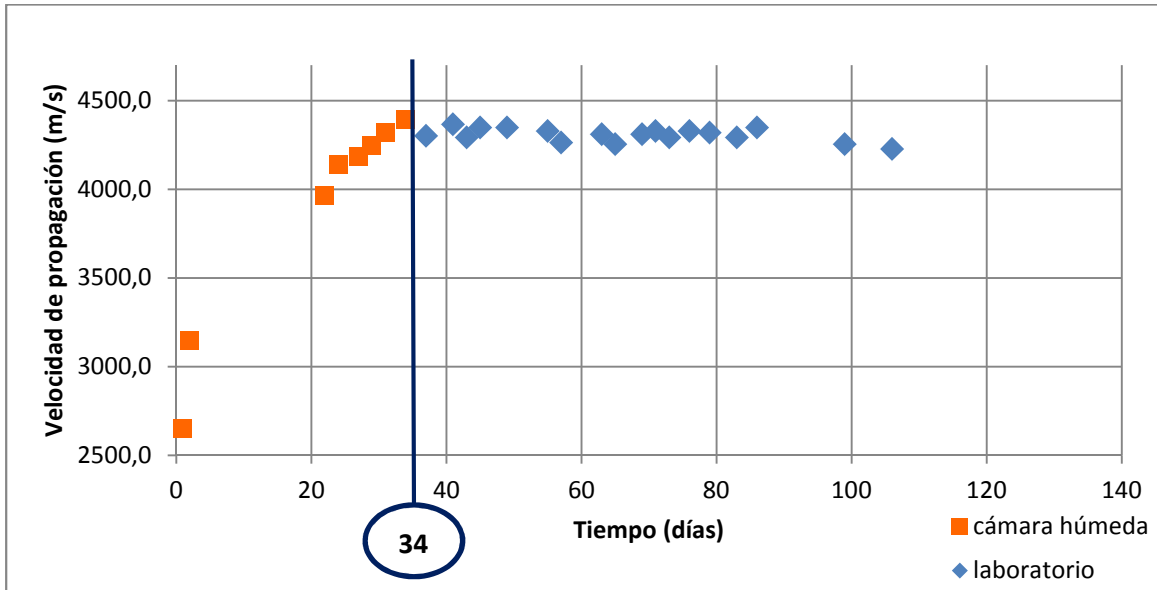
PROBETA P1-6.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

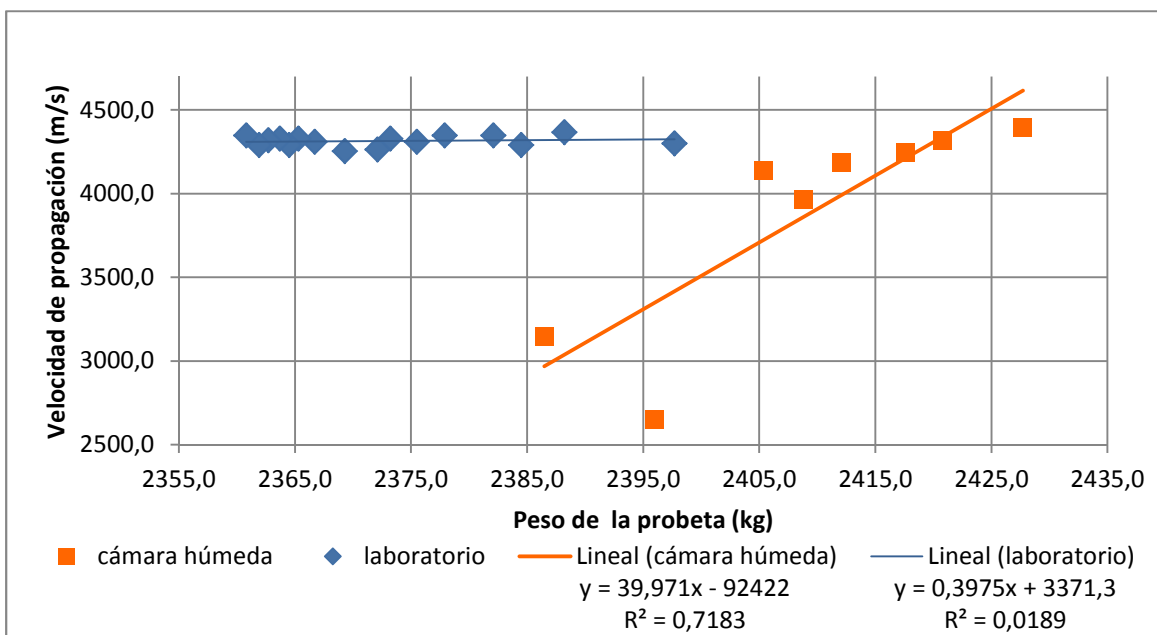
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.11 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.6



Gráfica 7.12 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.6



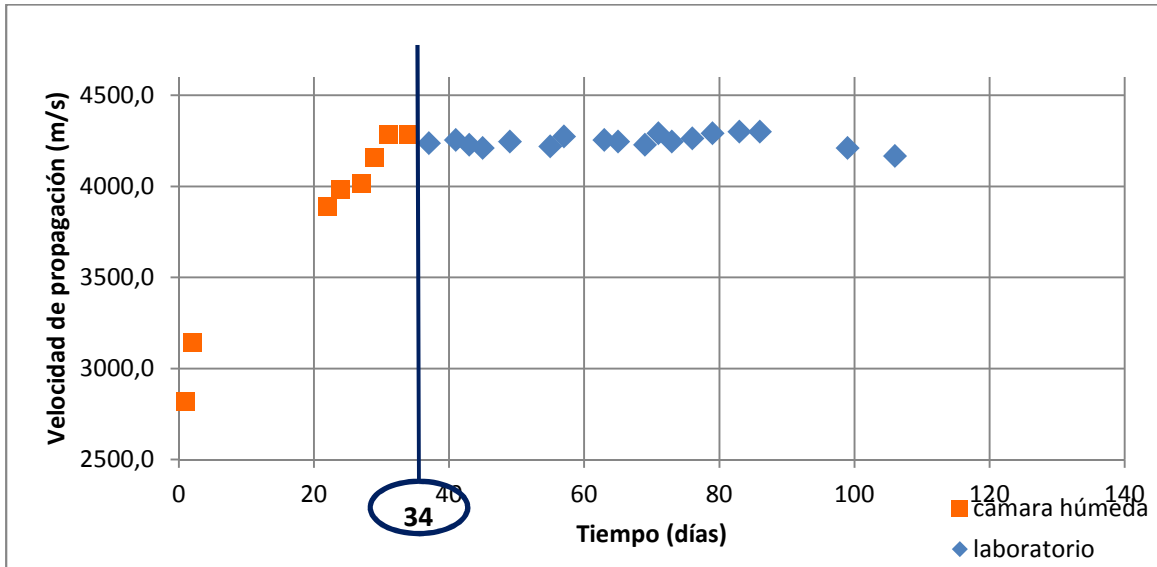
PROBETA P1-7.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

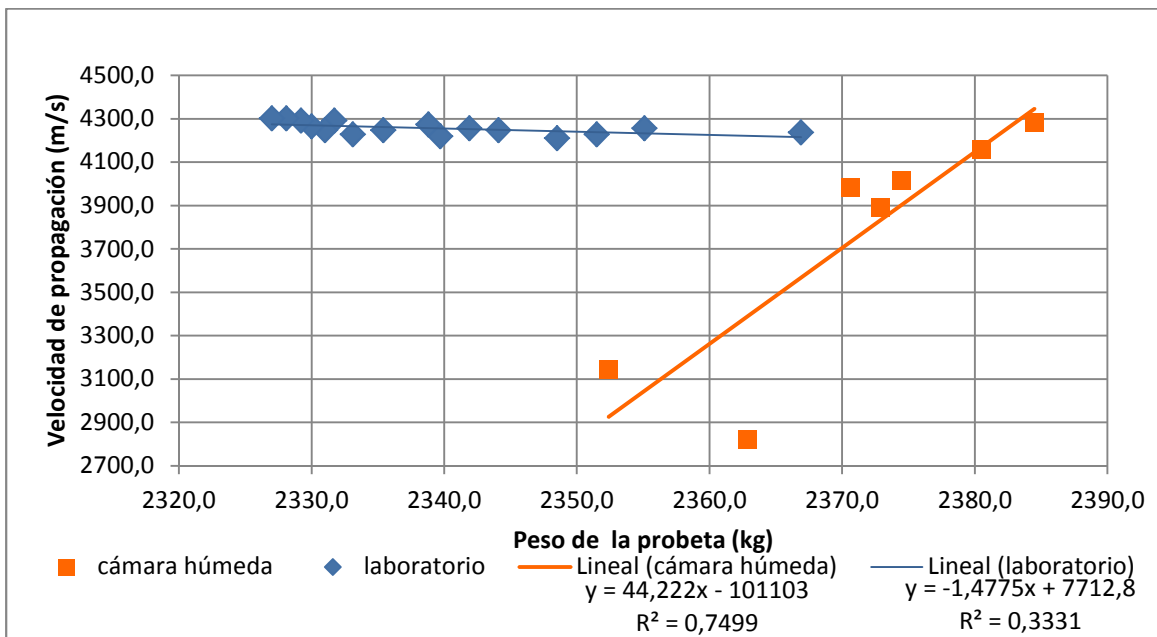
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.13 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.7



Gráfica 7.14 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.7



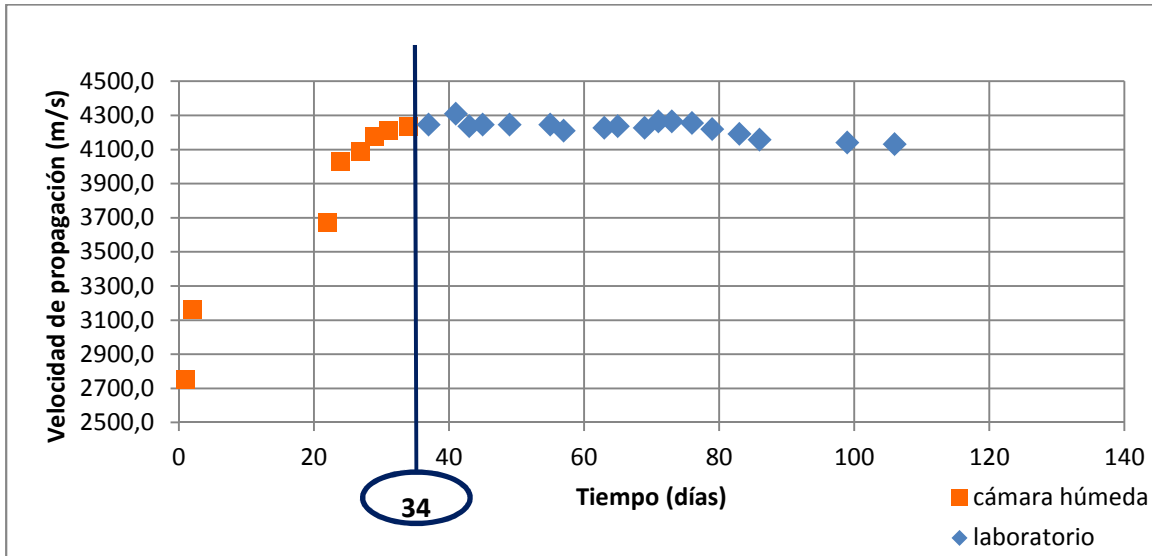
PROBETA P1-8.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

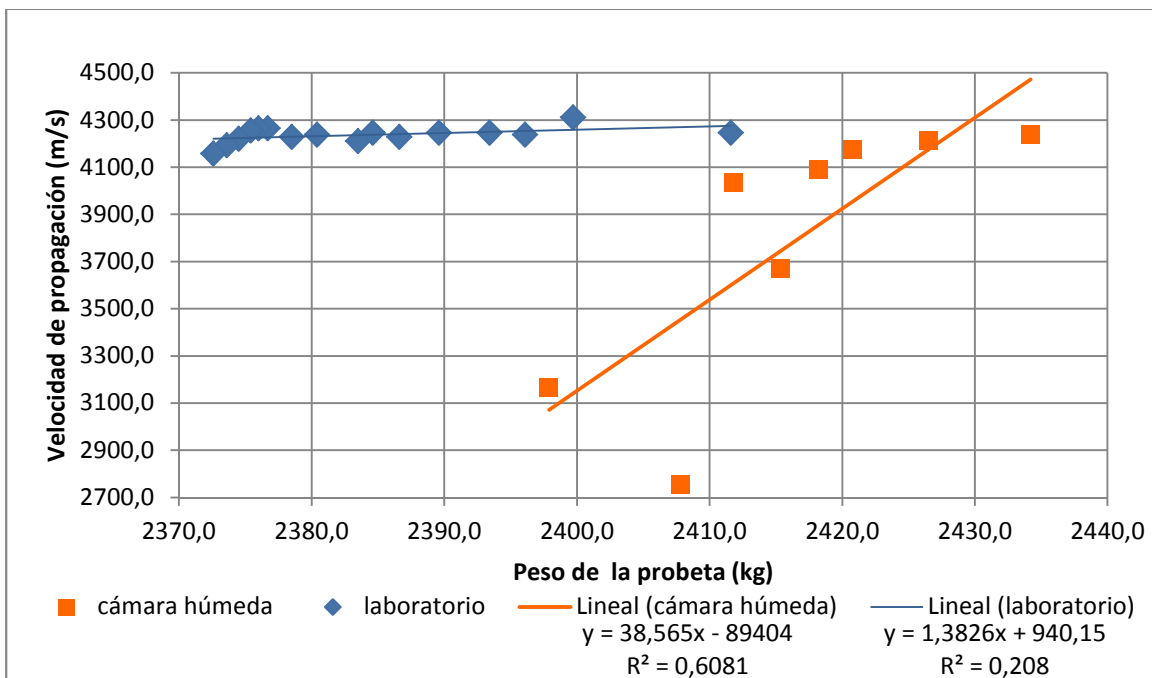
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.15 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P1.8



Gráfica 7.16 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P1.8



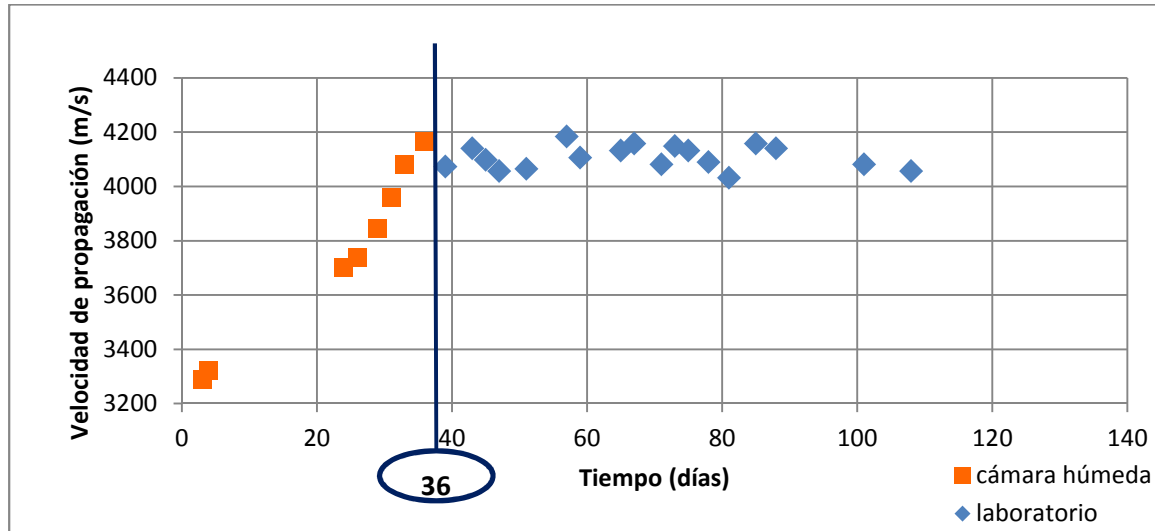
PROBETA P2-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

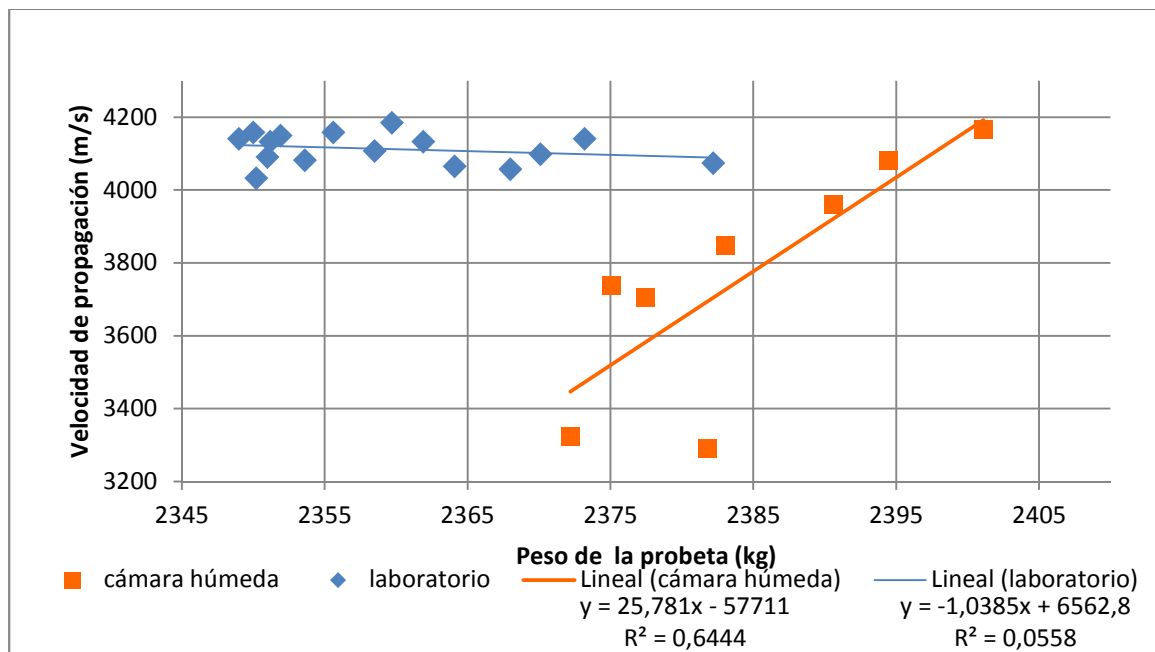
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.17 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P2.1



Gráfica 7.18 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P2.1



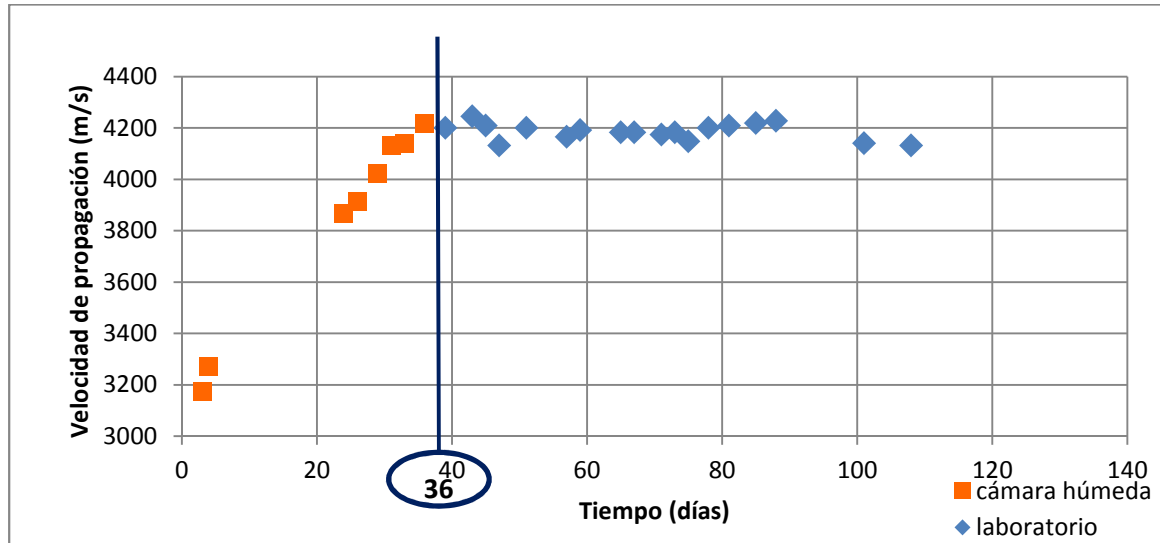
PROBETA P2-2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

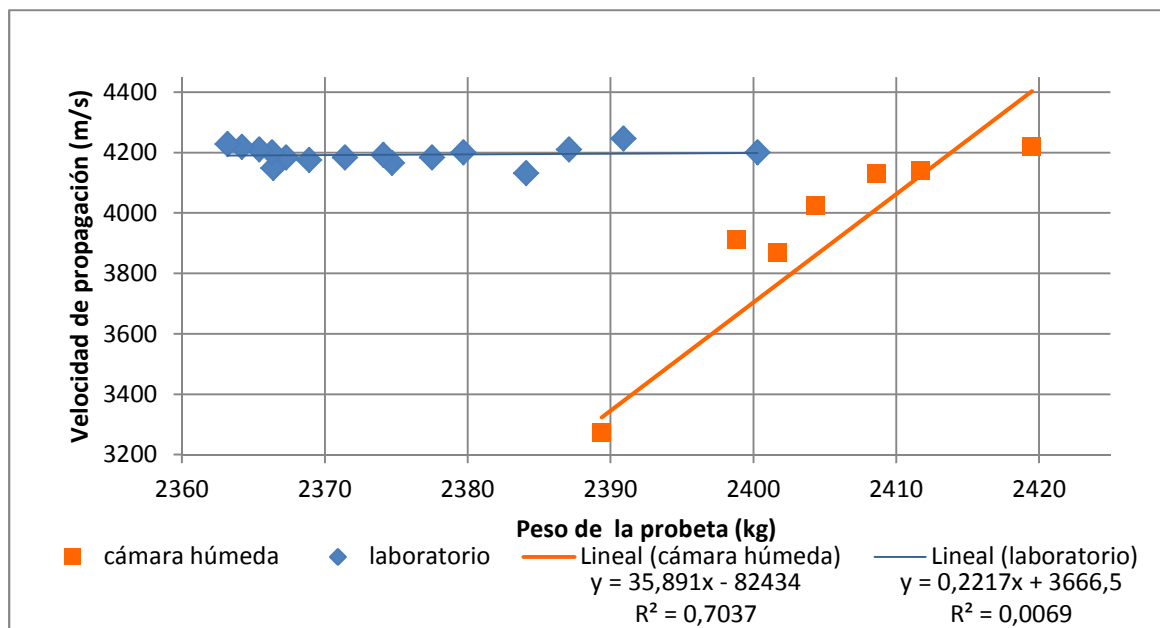
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.19 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P2.2



Gráfica 7.20 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P2.2



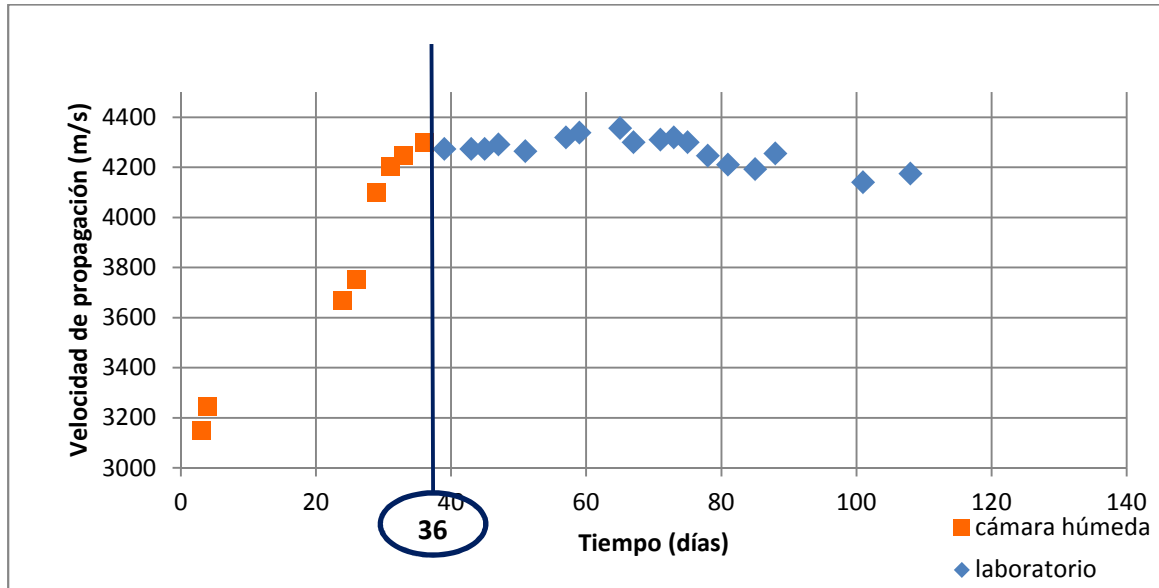
PROBETA P2-3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

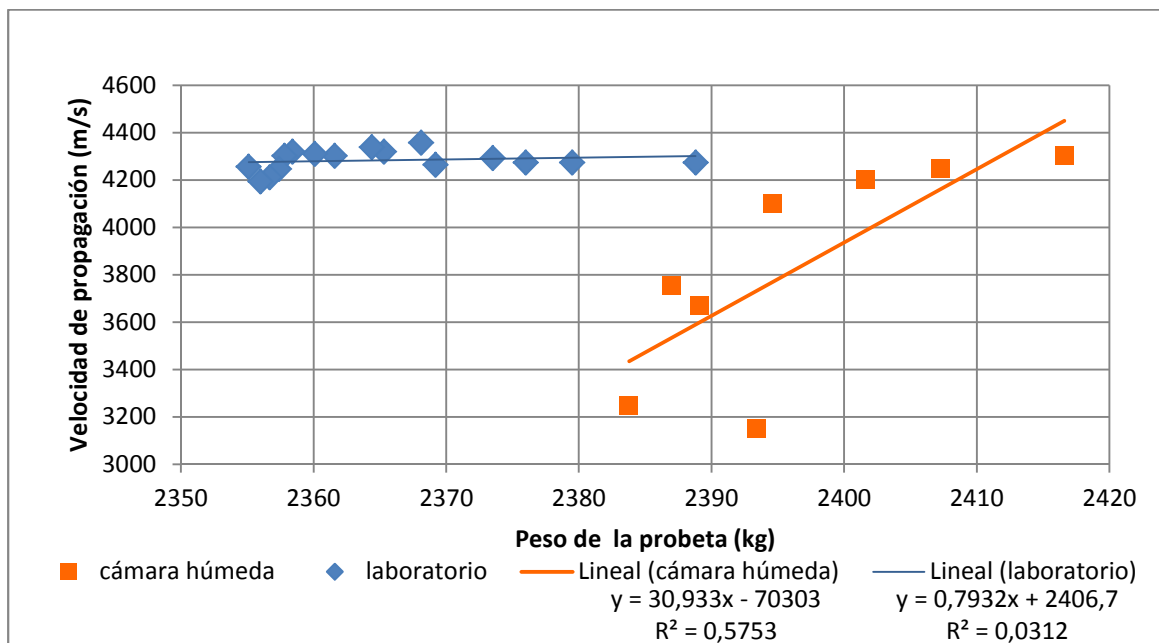
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.21 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P2.3



Gráfica 7.22 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P2.3



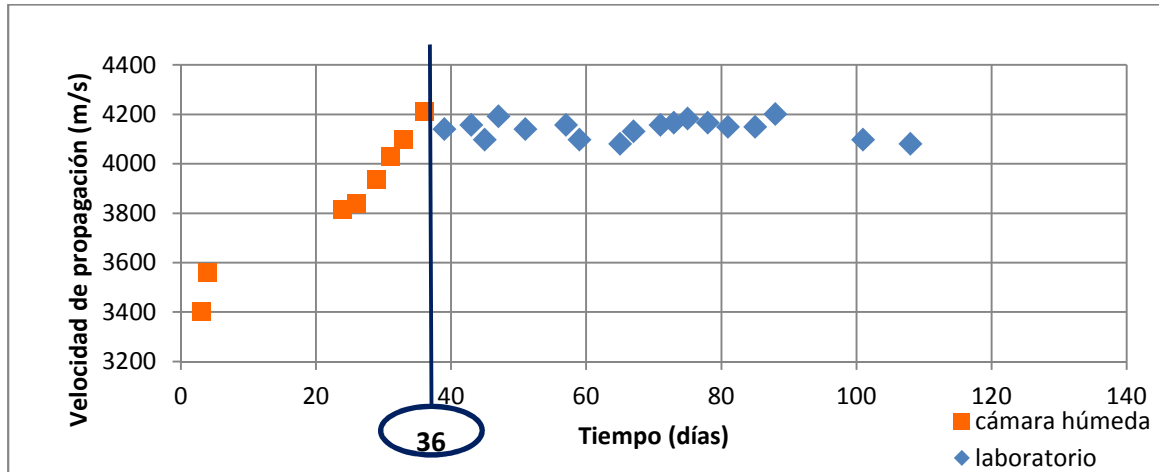
PROBETA P2-4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

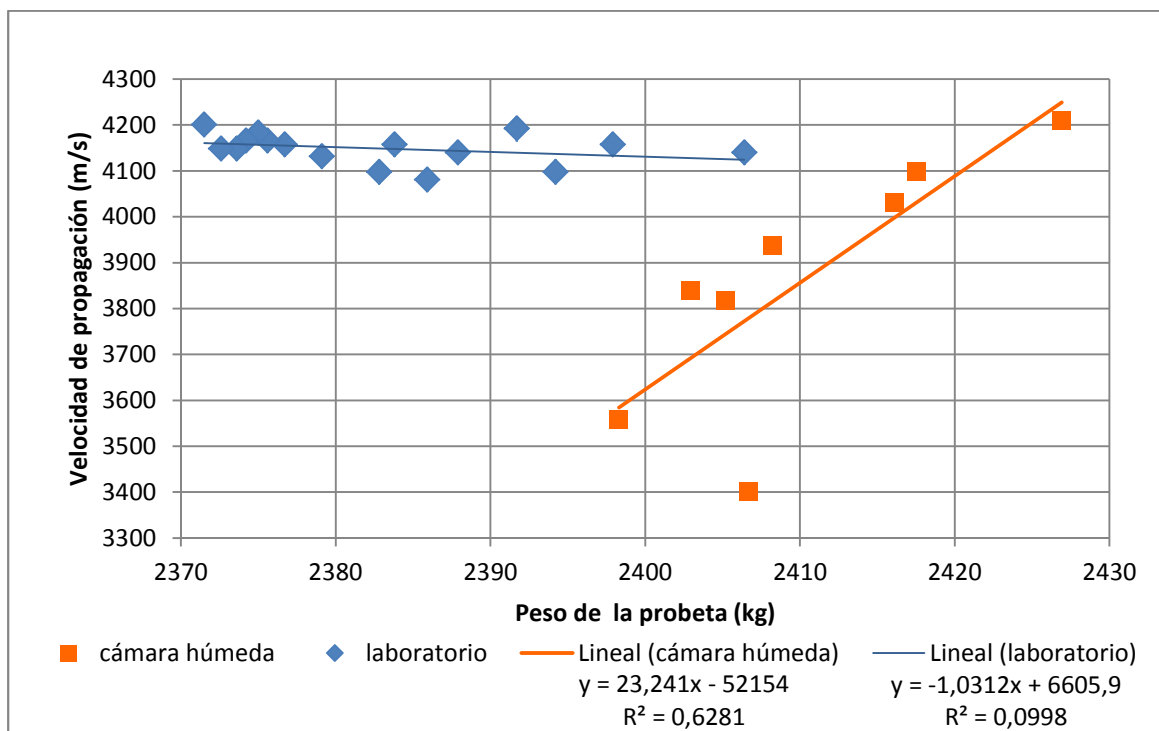
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.23 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P2.4



Gráfica 7.24 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P2.4



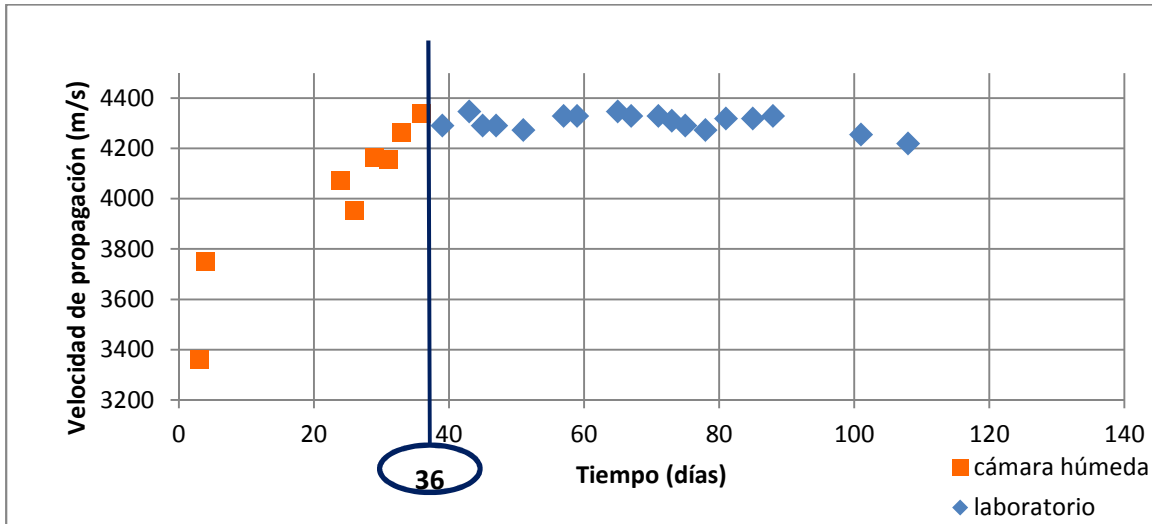
PROBETA P3-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 0,4% de Cl⁻.

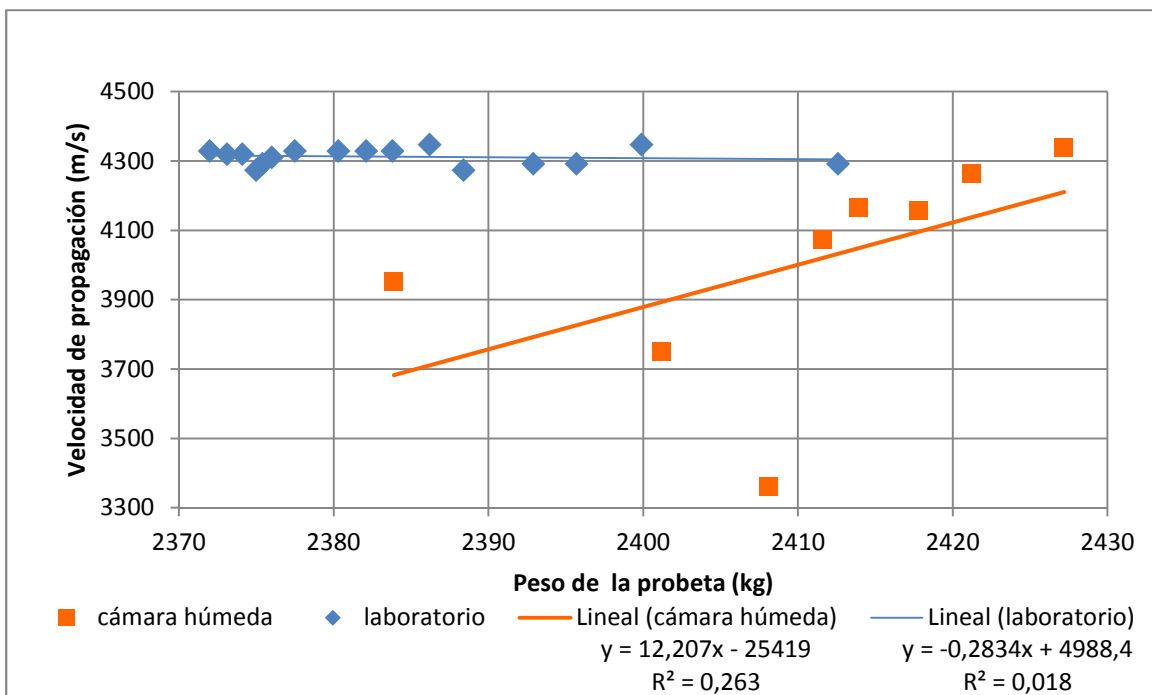
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.25 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P3.1



Gráfica 7.26 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P3.1



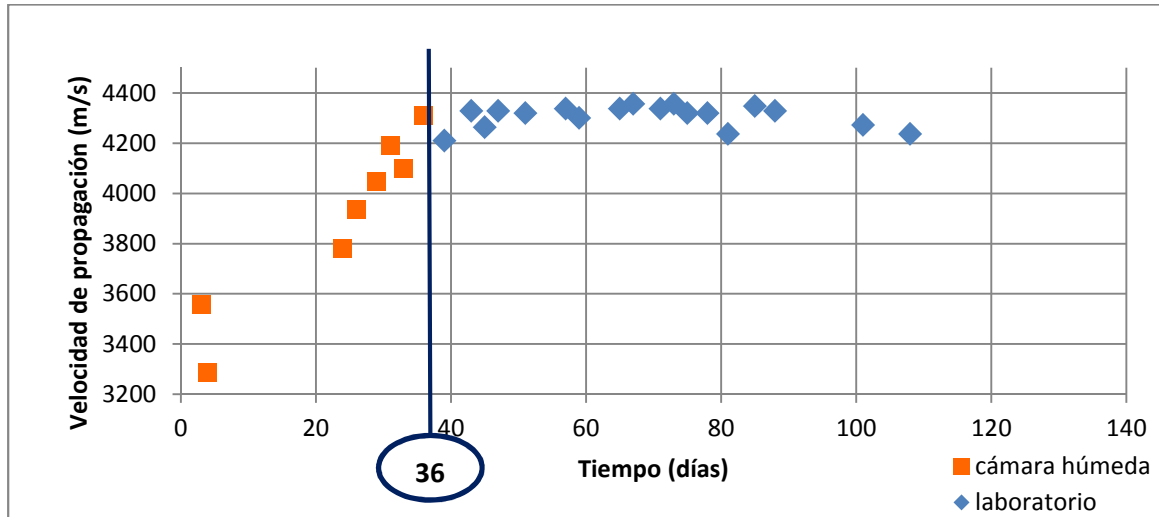
PROBETA P3-2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 0,4% de Cl.

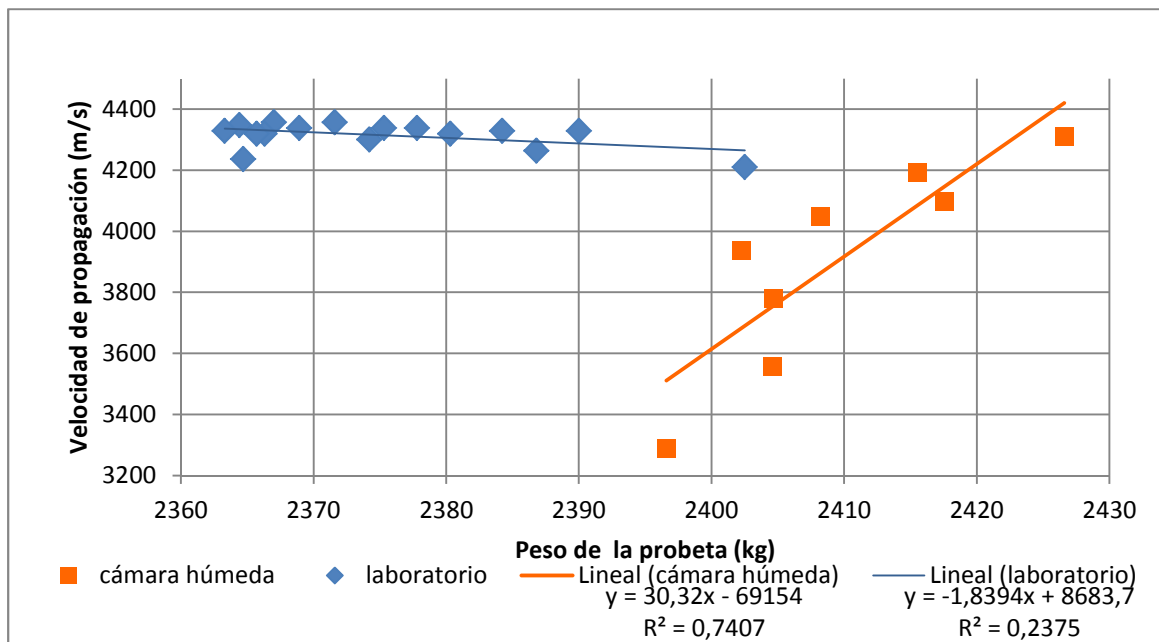
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.27 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P3.2



Gráfica 7.28 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P3.2



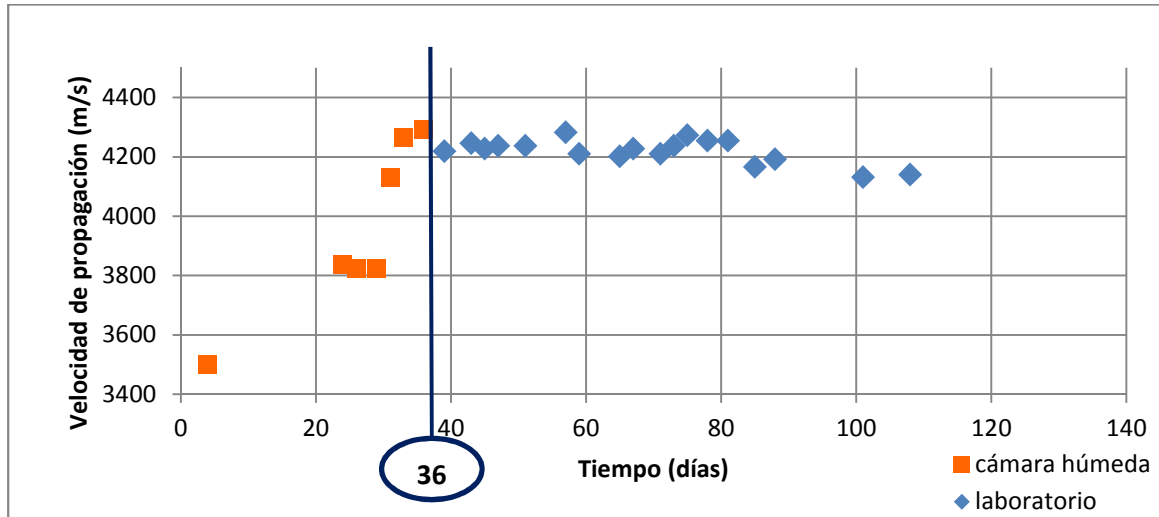
PROBETA P3-3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 0,4% de Cl⁻.

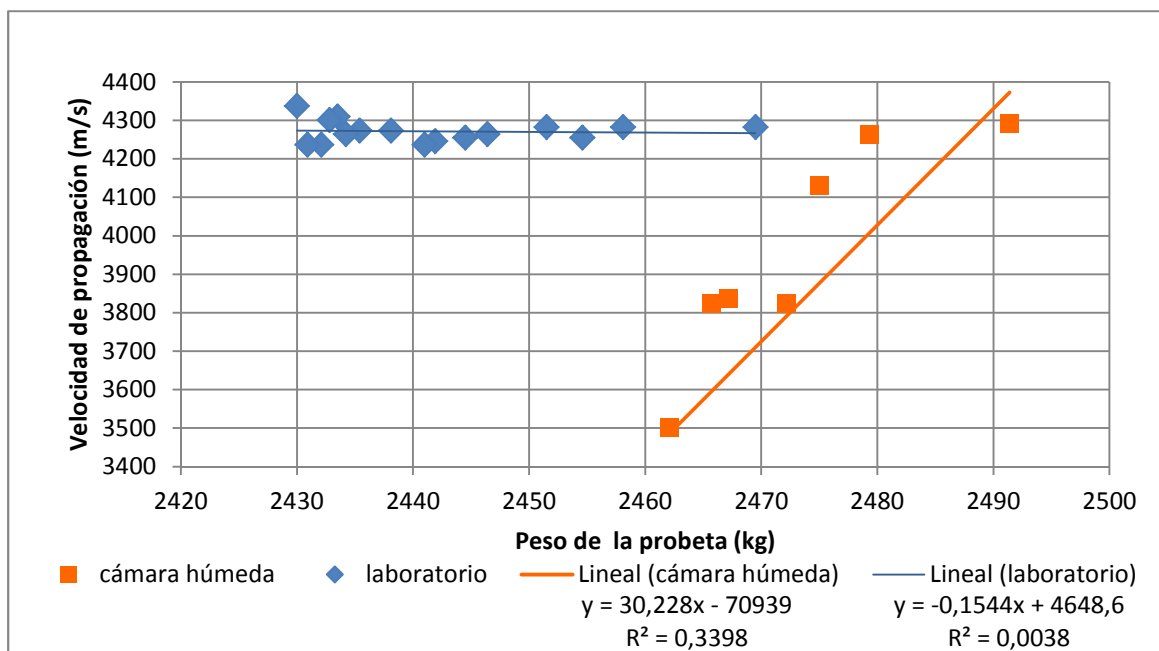
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.29 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P3.3



Gráfica 7.30 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P3.3



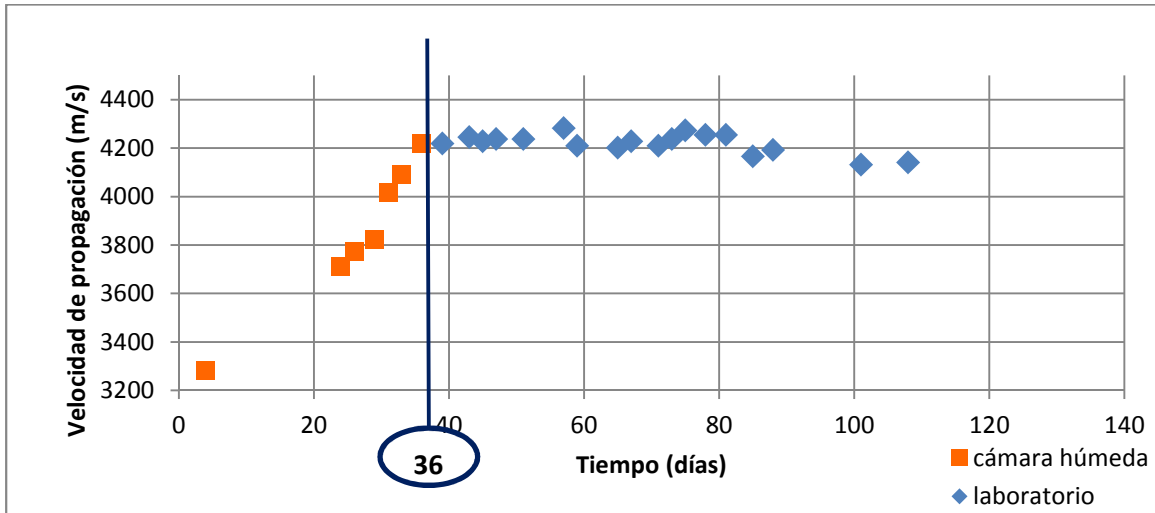
PROBETA P3-4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 0,4% de Cl⁻.

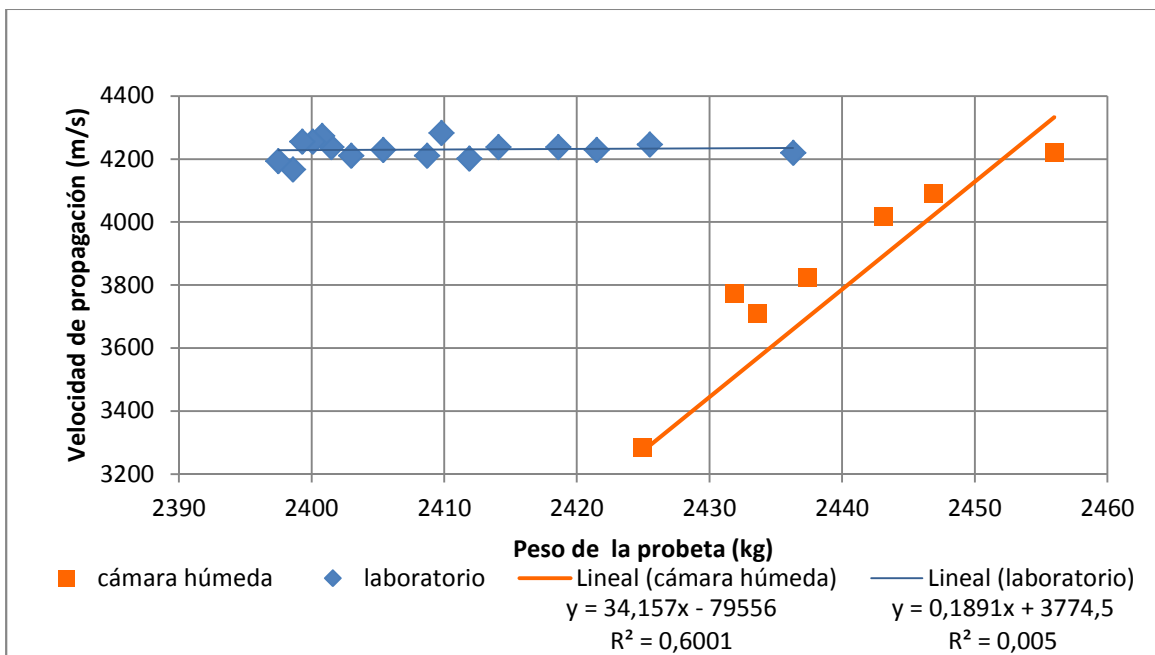
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.31 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P3.4



Gráfica 7.32 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P3.4



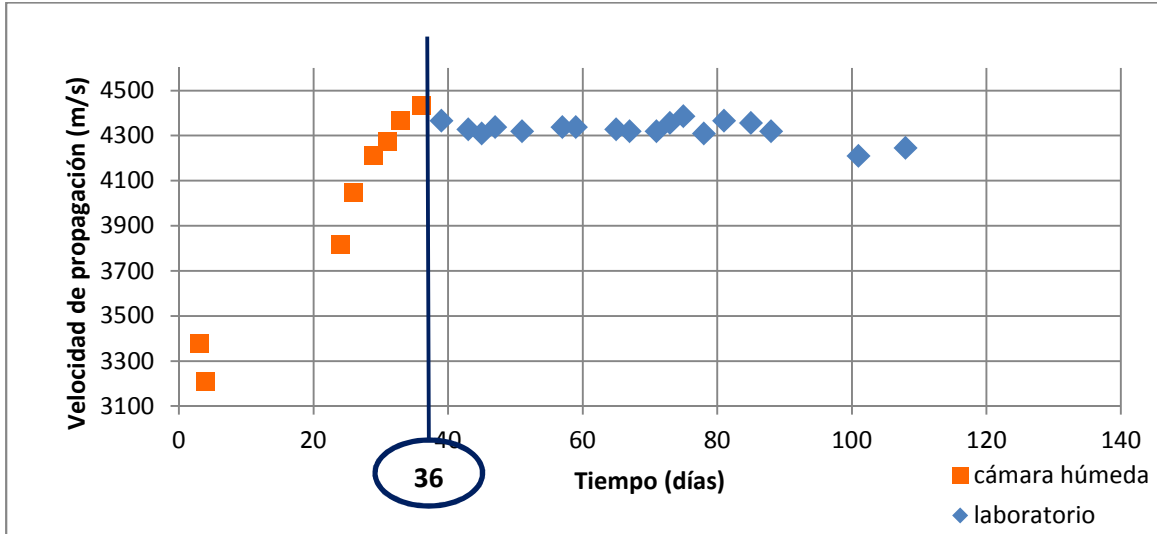
PROBETA P4-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 2% de Cl⁻.

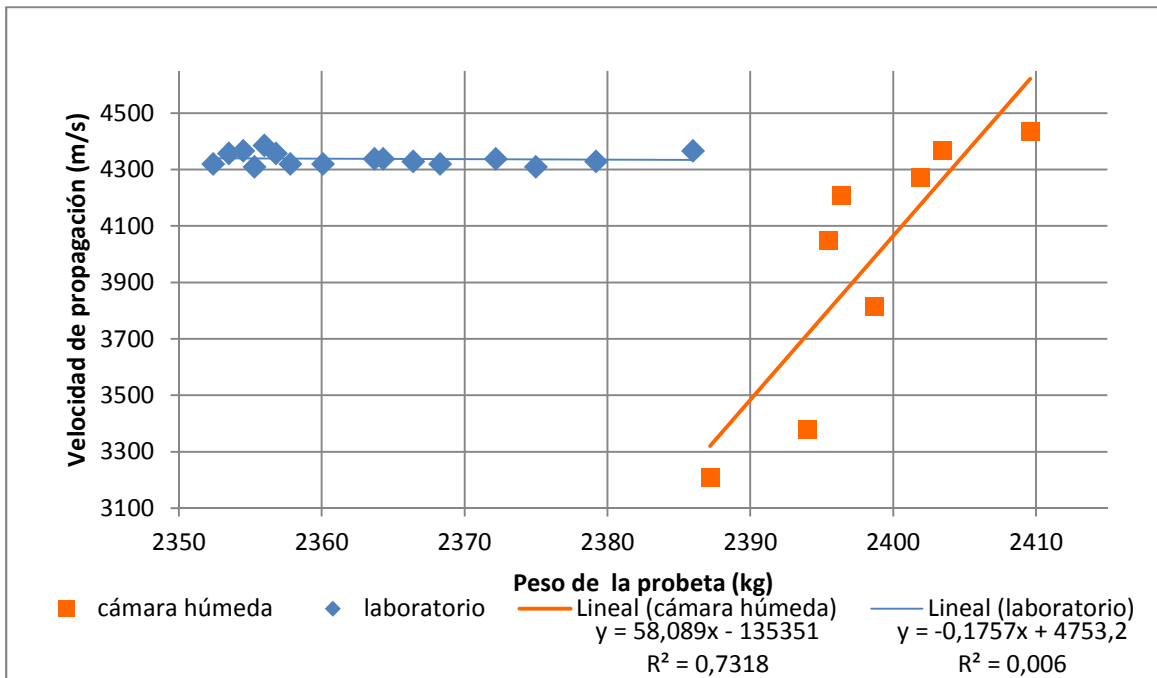
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.33 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta 4.1



Gráfica 7.34 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P4.1



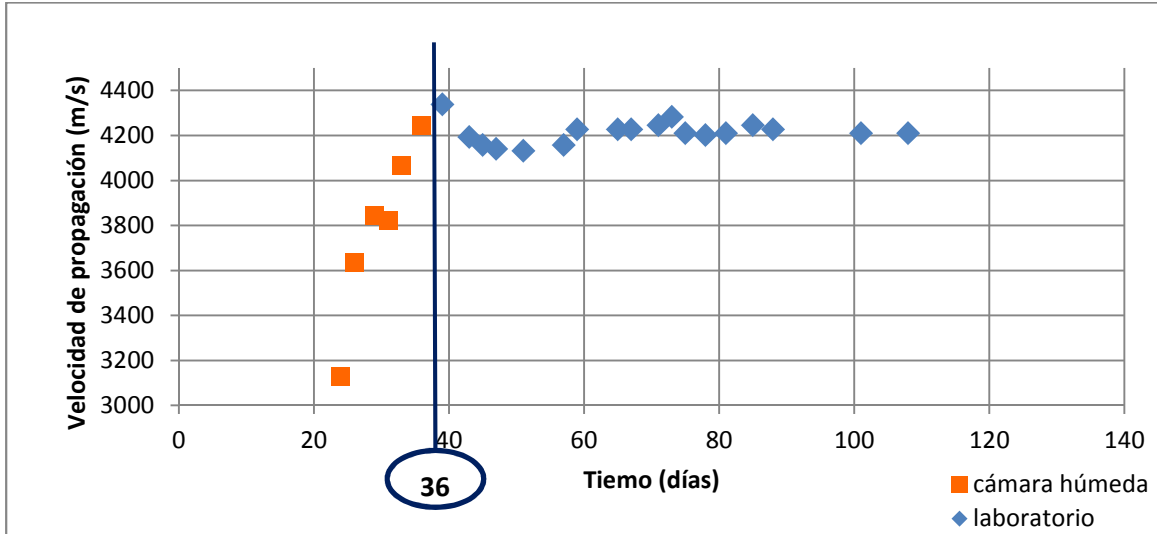
PROBETA P4-2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 2% de Cl.

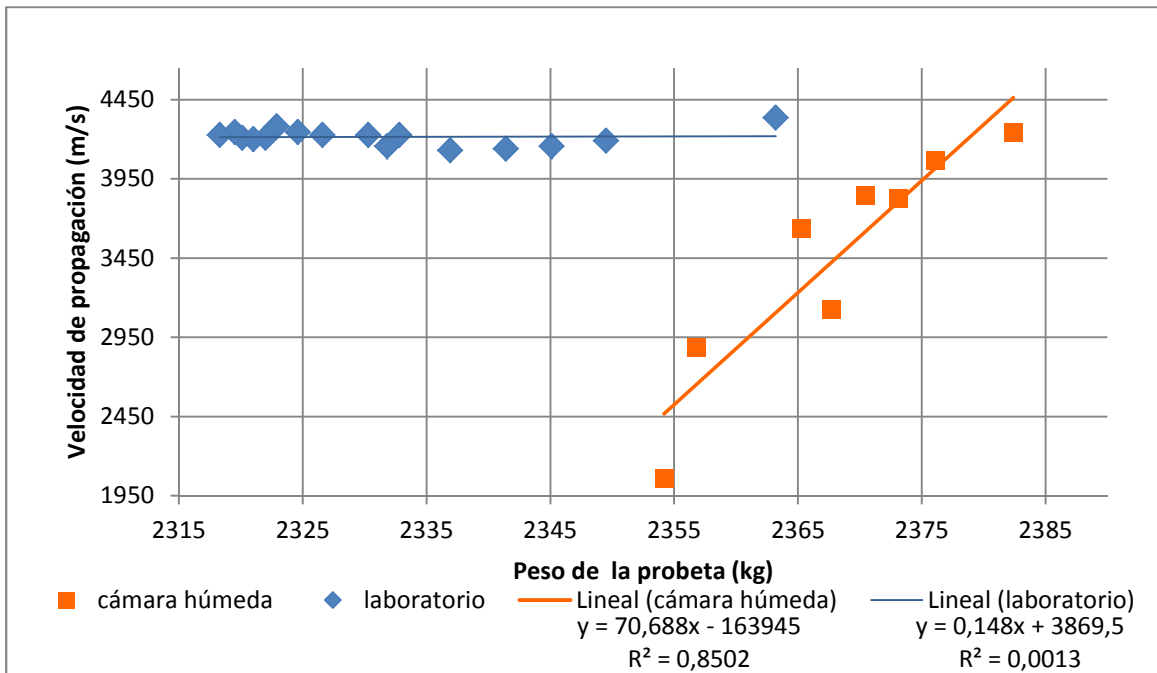
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.35 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P4.2



Gráfica 7.36 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P4.2



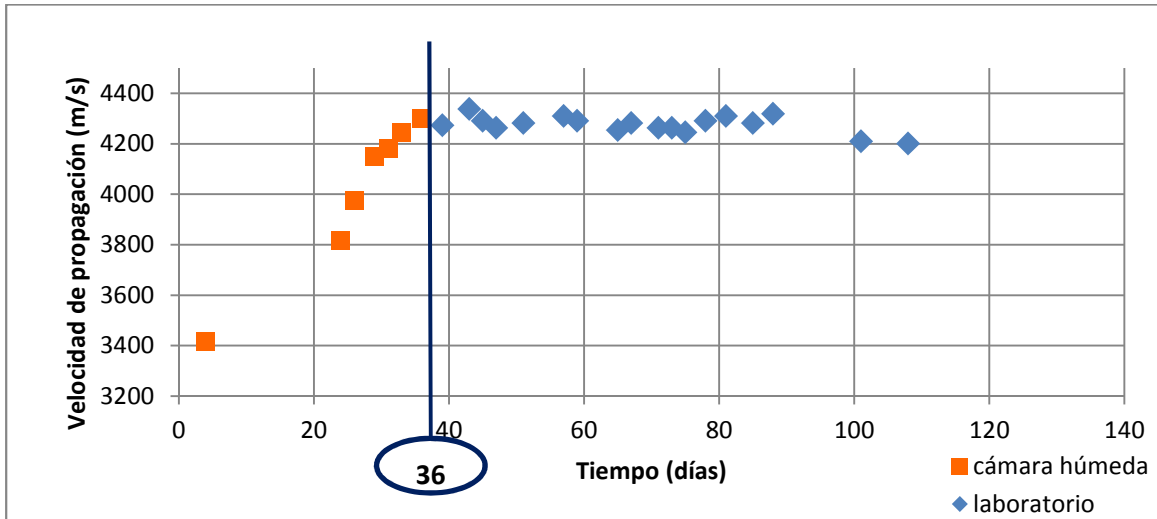
PROBETA P4-3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 2% de Cl⁻.

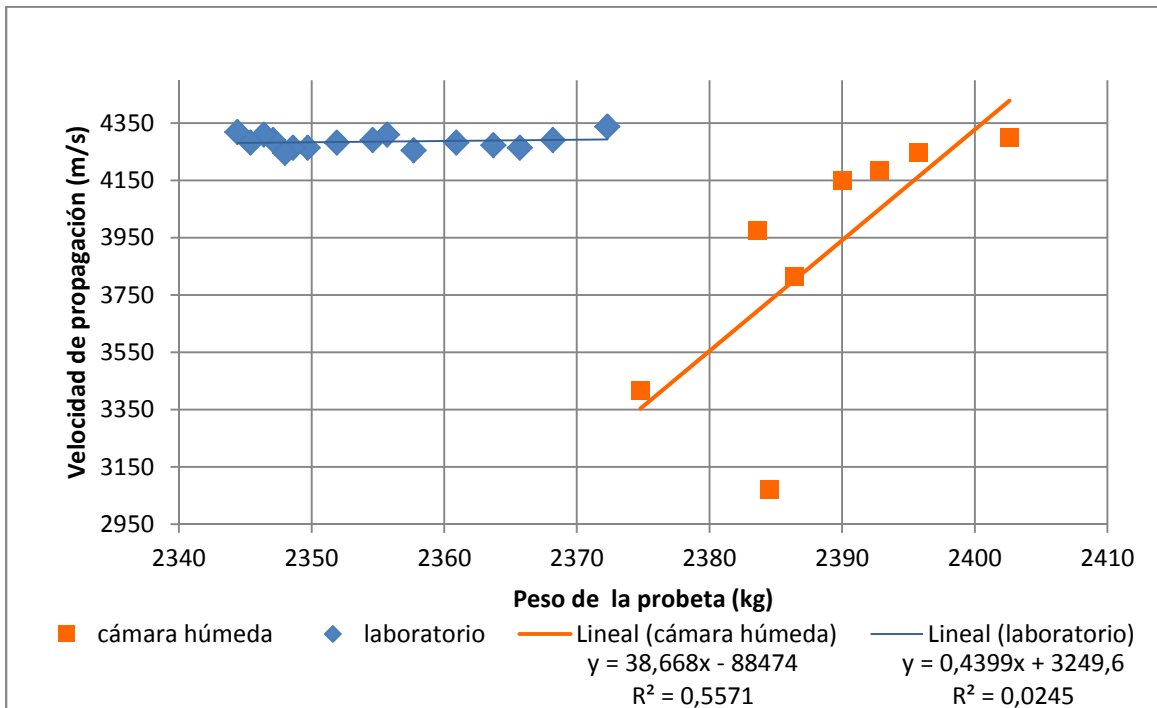
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.37 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P4.3



Gráfica 7.38 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P4.3



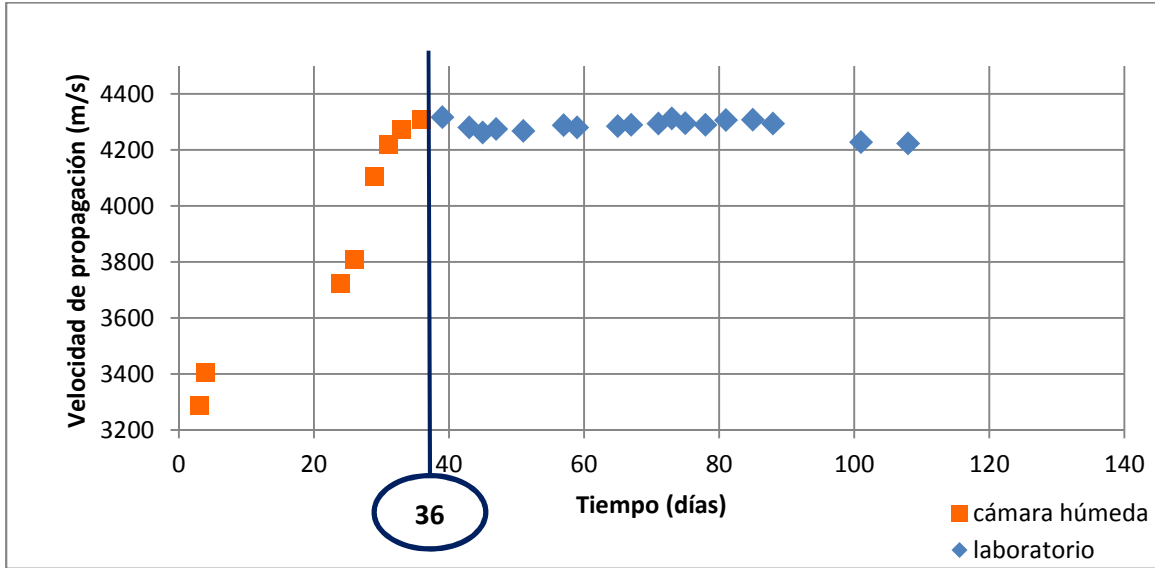
PROBETA P4-4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 2% de Cl⁻.

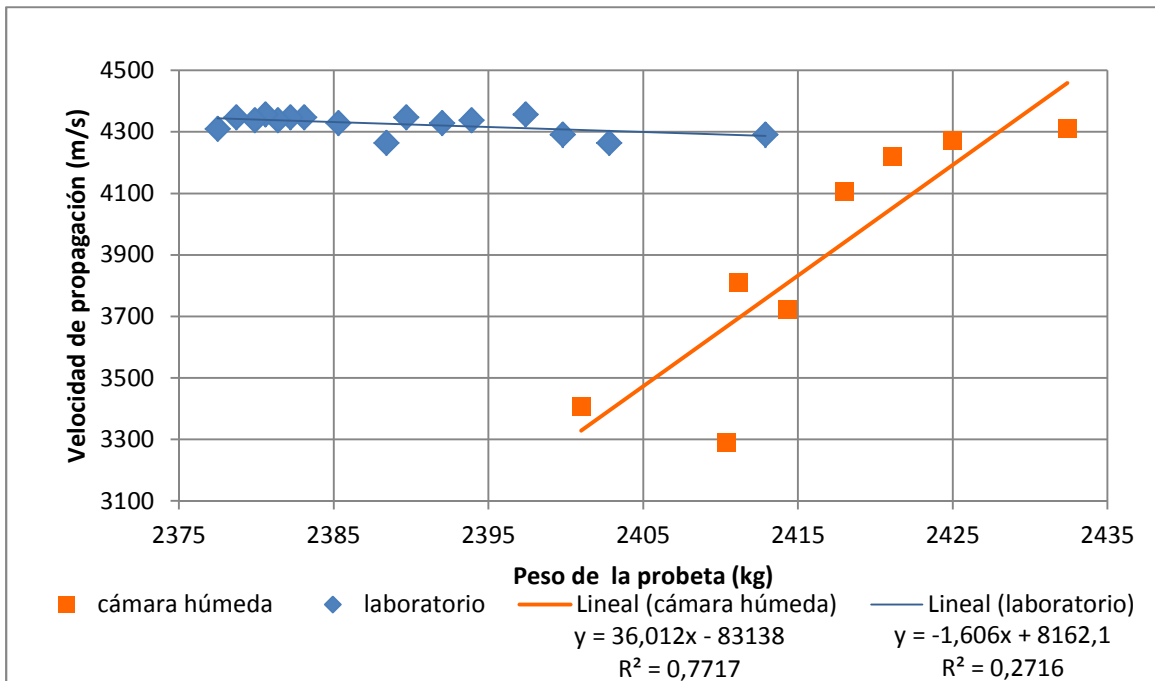
RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.39 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P4.4



Gráfica 7.40 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P4.4



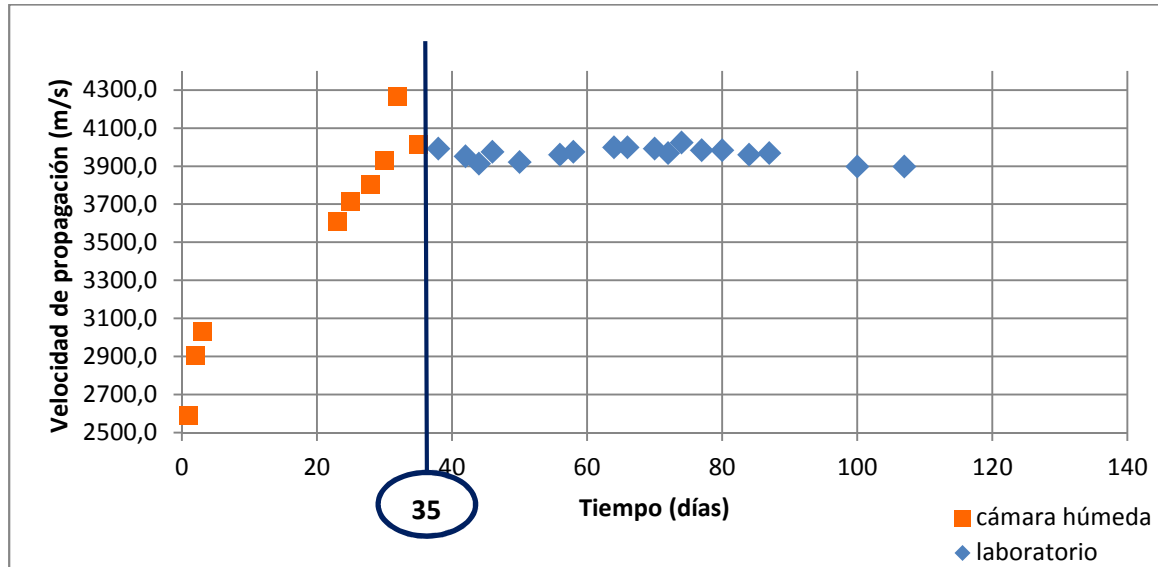
PROBETA P5-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

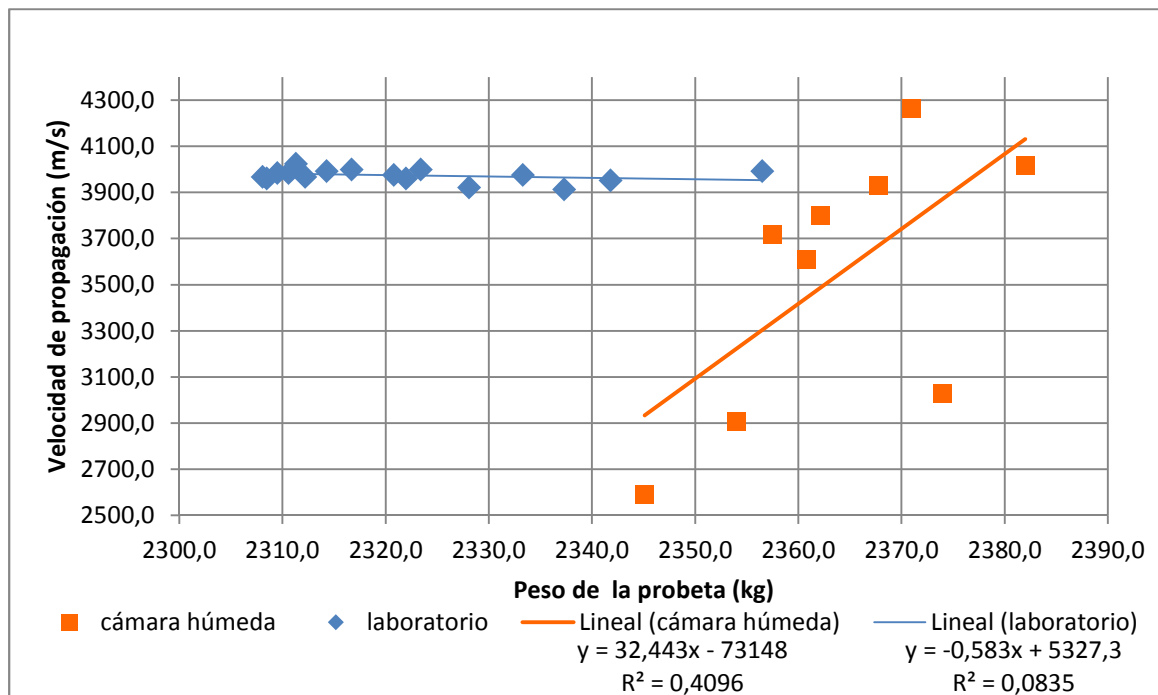
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.41 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.1



Gráfica 7.42 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.1



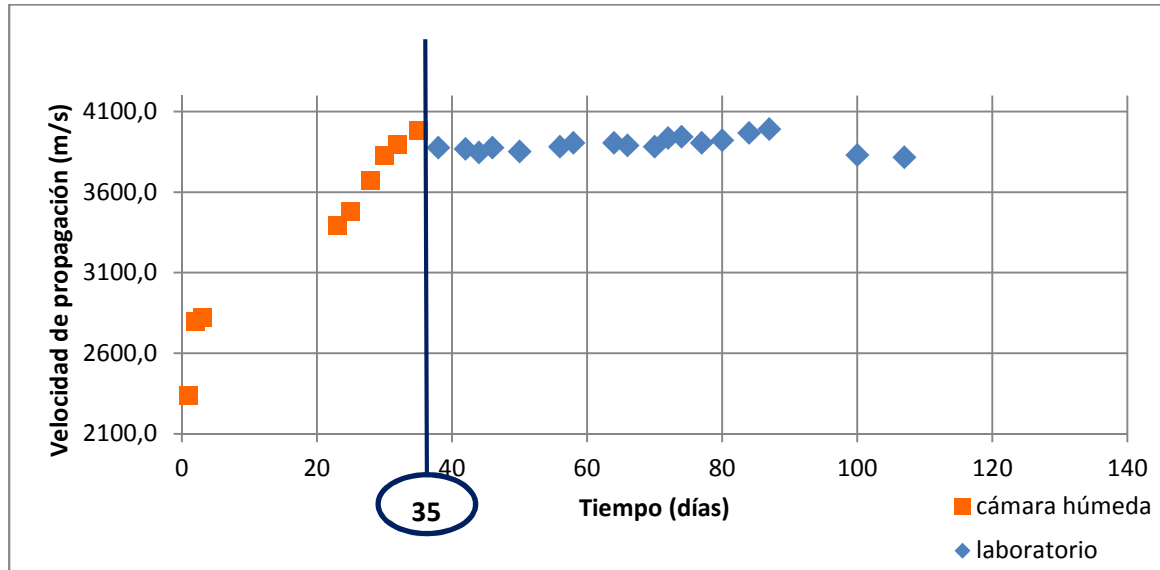
PROBETA P5-2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

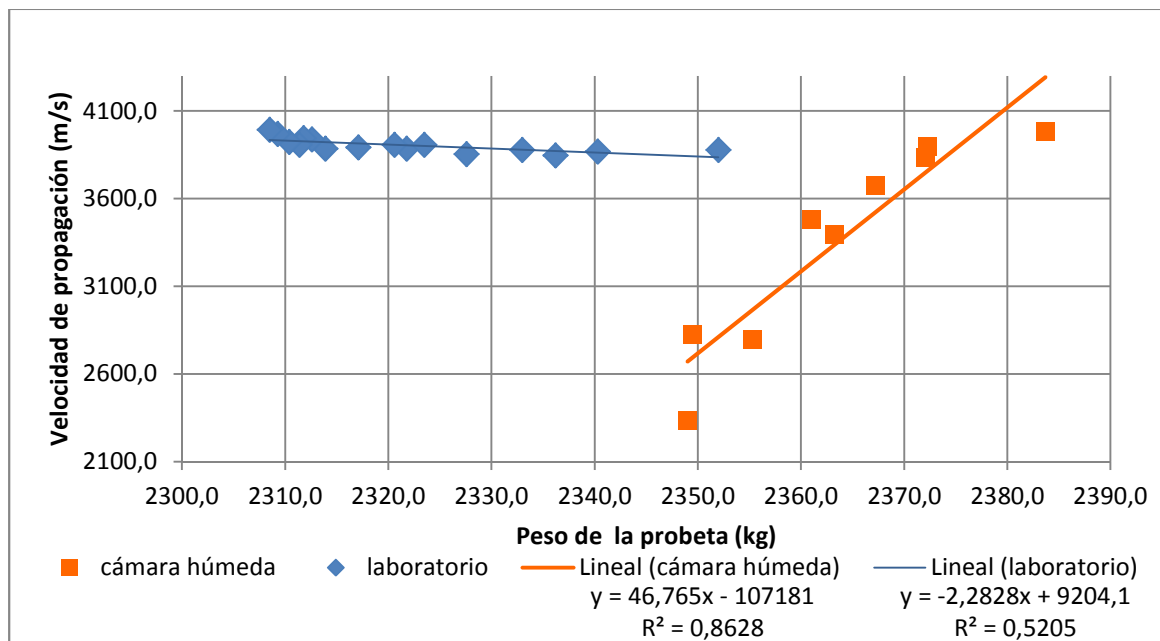
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.43 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.2



Gráfica 7.44 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.2



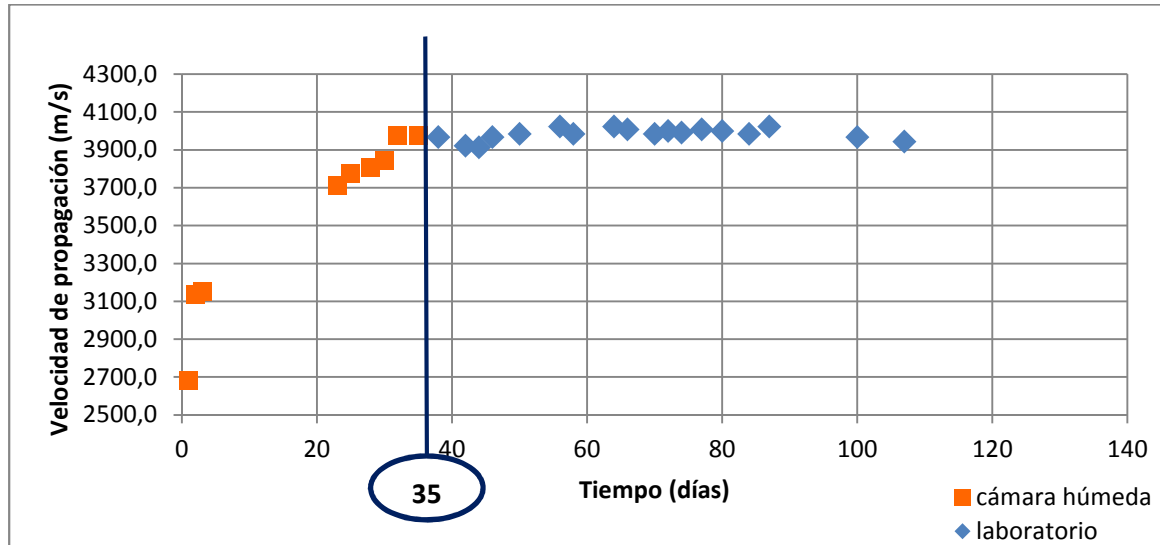
PROBETA P5-3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

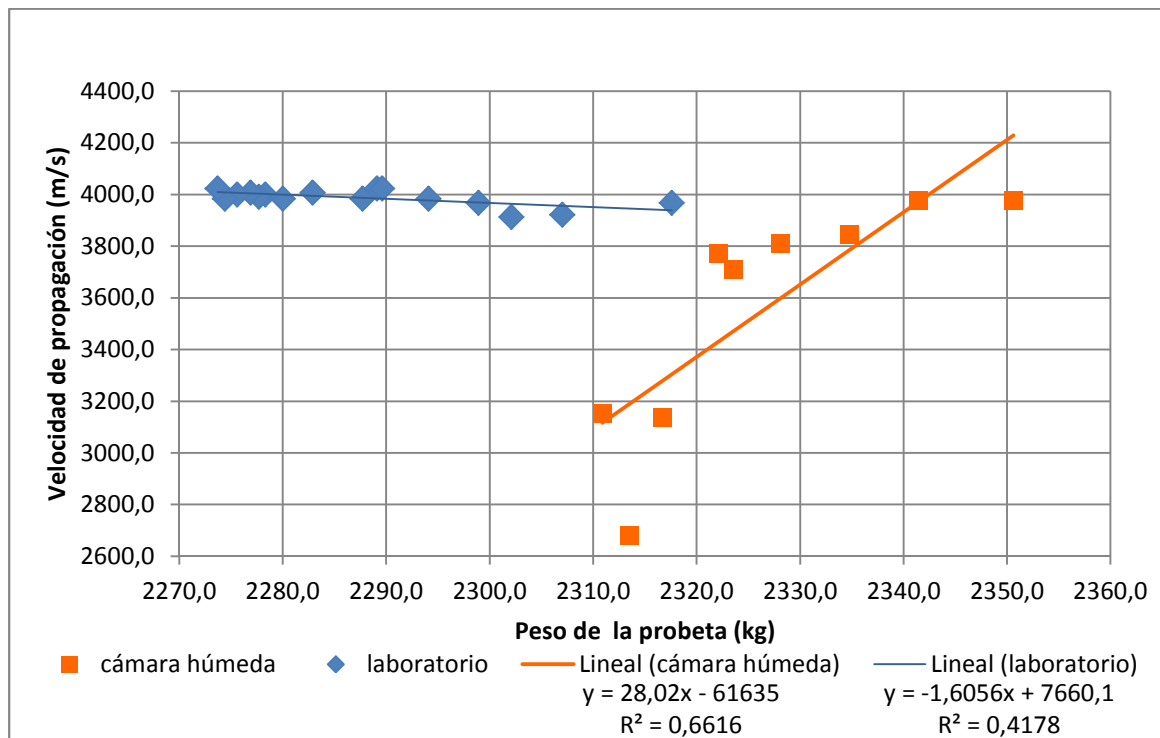
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.45 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.3



Gráfica 7.46 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.3



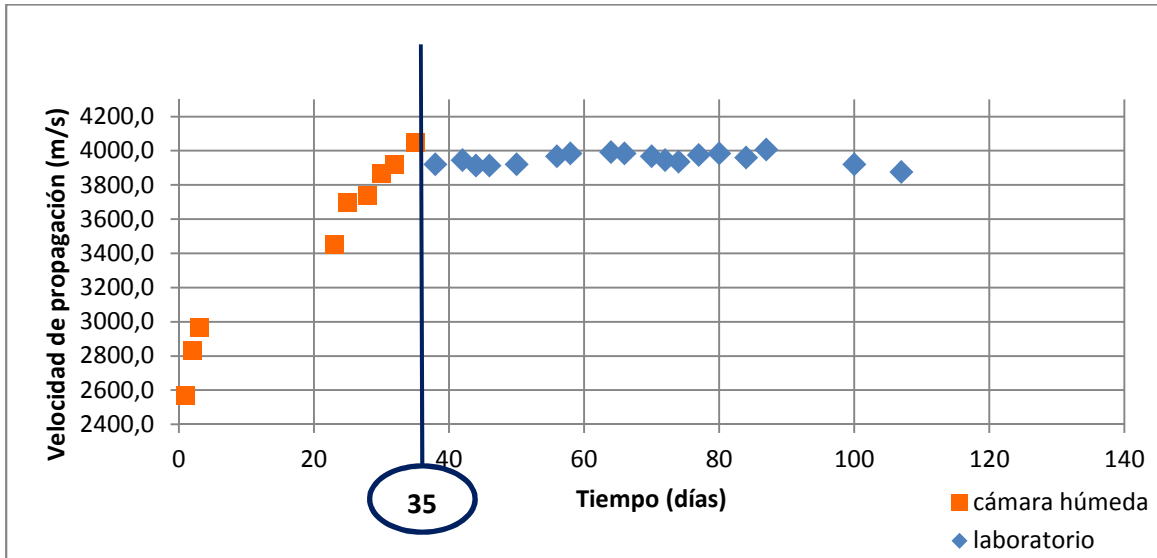
PROBETA P5-4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

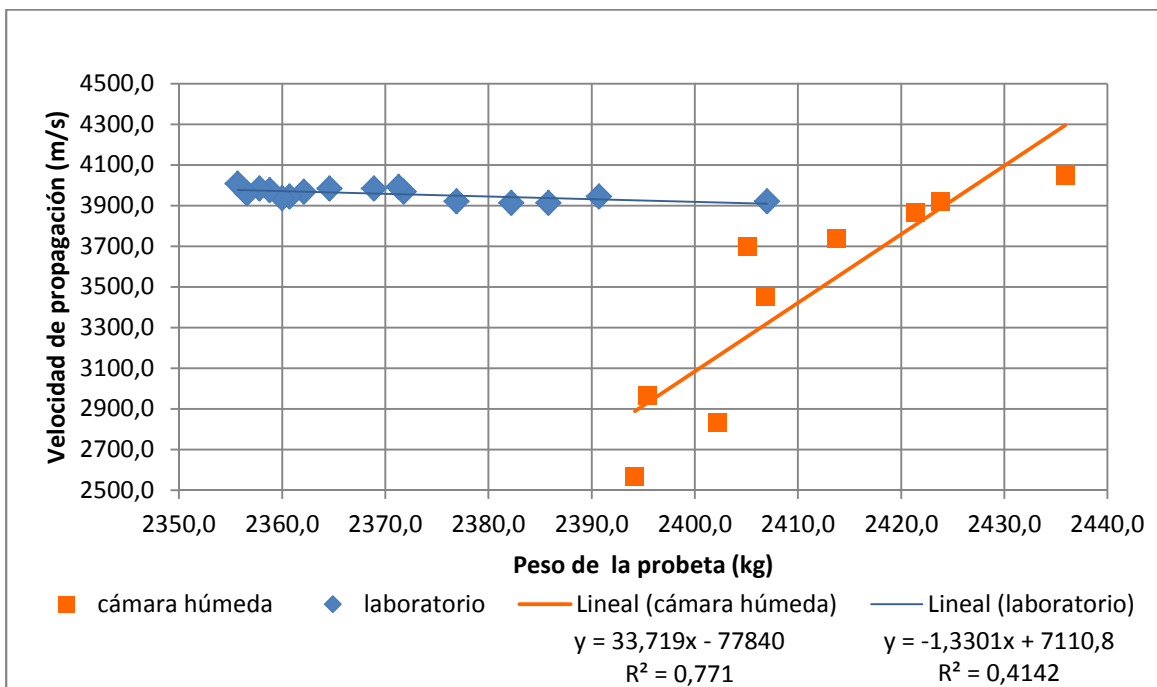
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.47 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.4



Gráfica 7.48 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.4



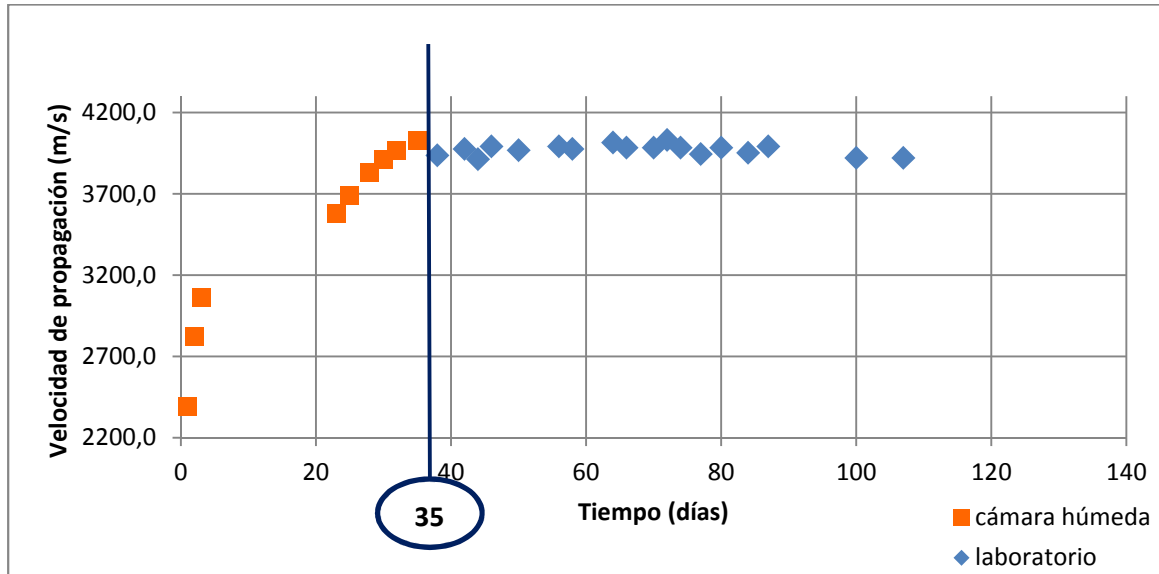
PROBETA P5-5.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

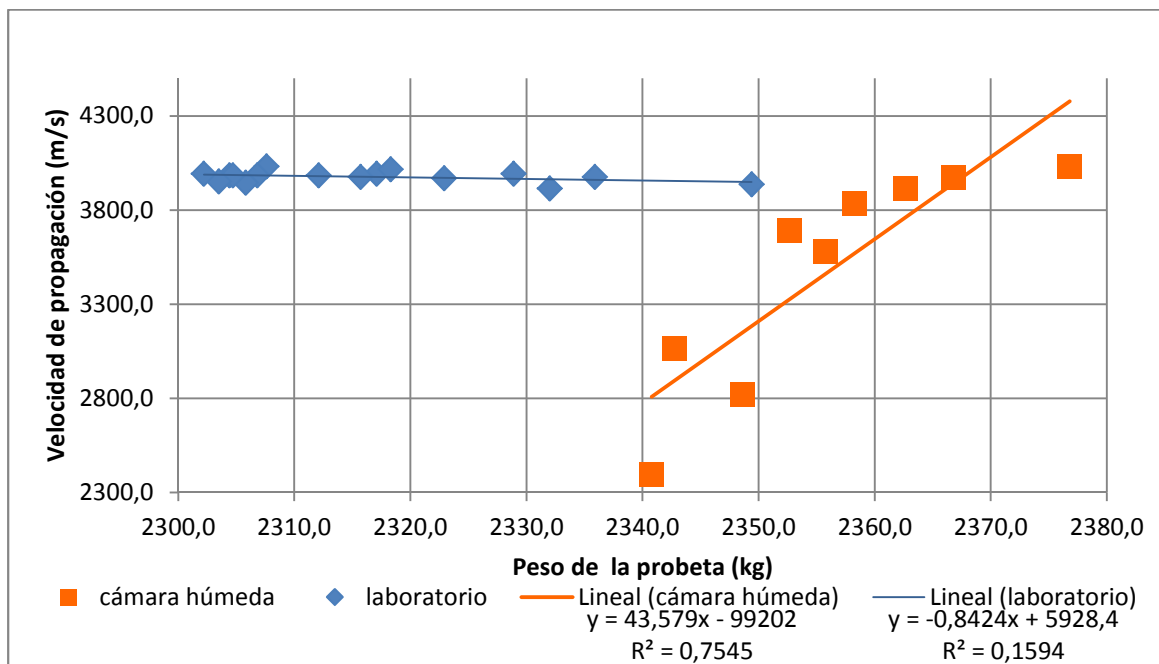
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.49 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.5



Gráfica 7.50 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.5



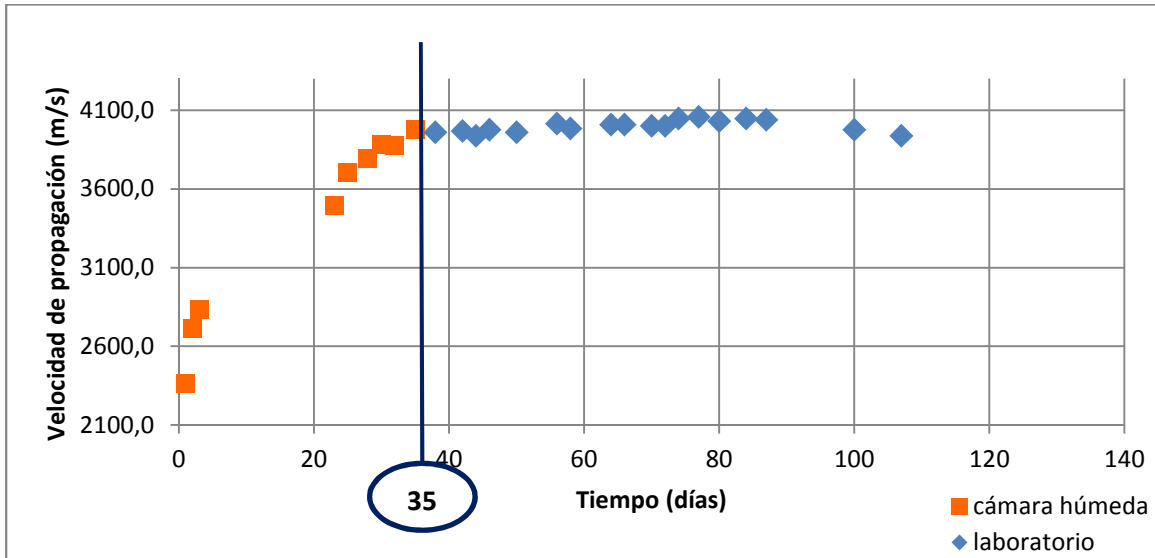
PROBETA P5-6.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

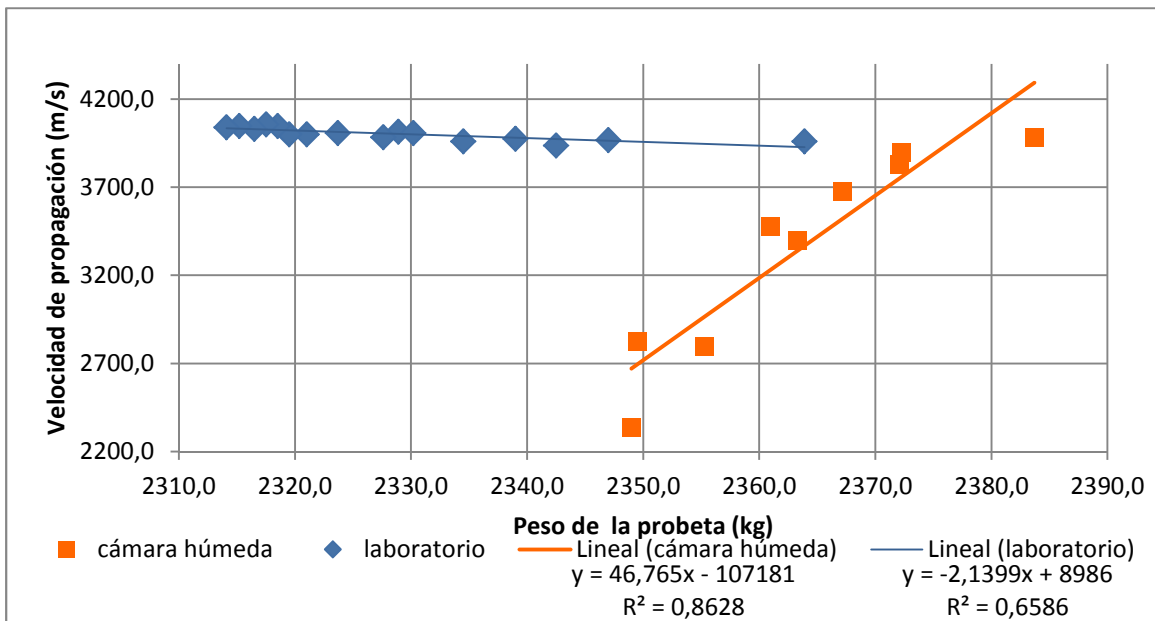
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.51 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.6



Gráfica 7.52 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.6



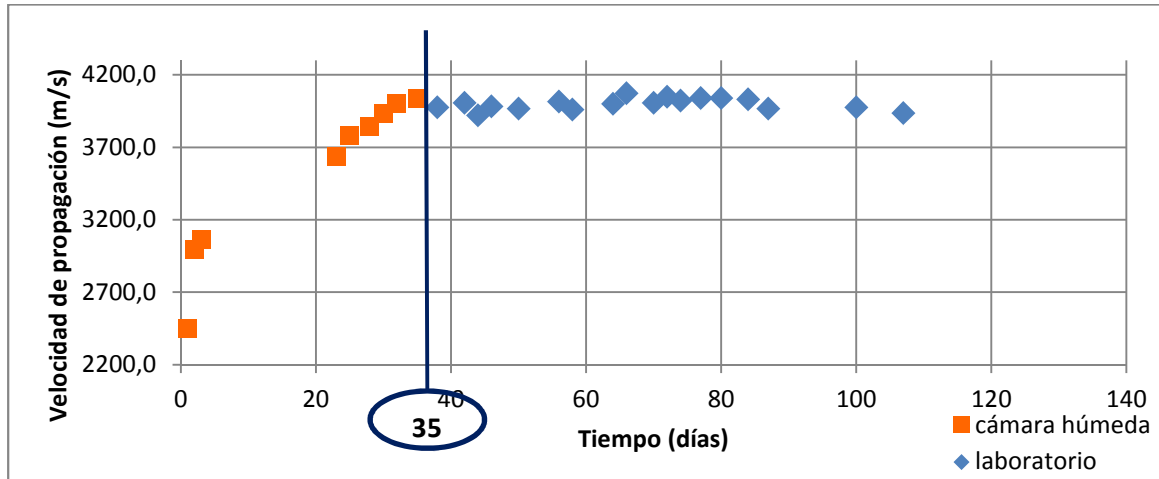
PROBETA P5-7.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

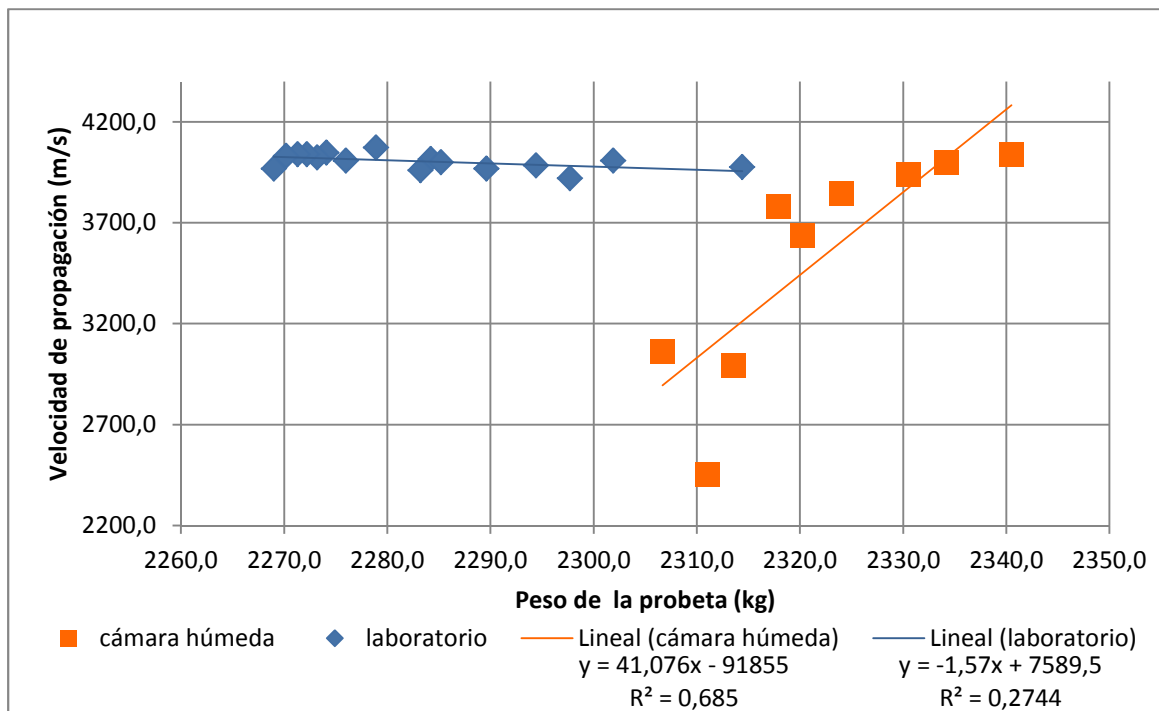
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.53 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.7



Gráfica 7.54 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.7



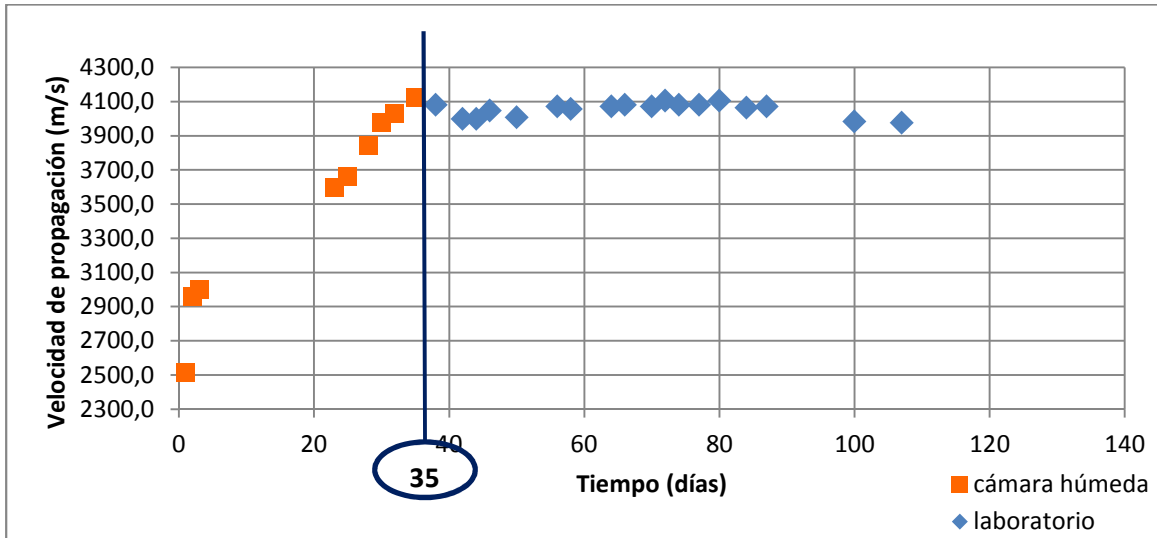
PROBETA P5-8.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

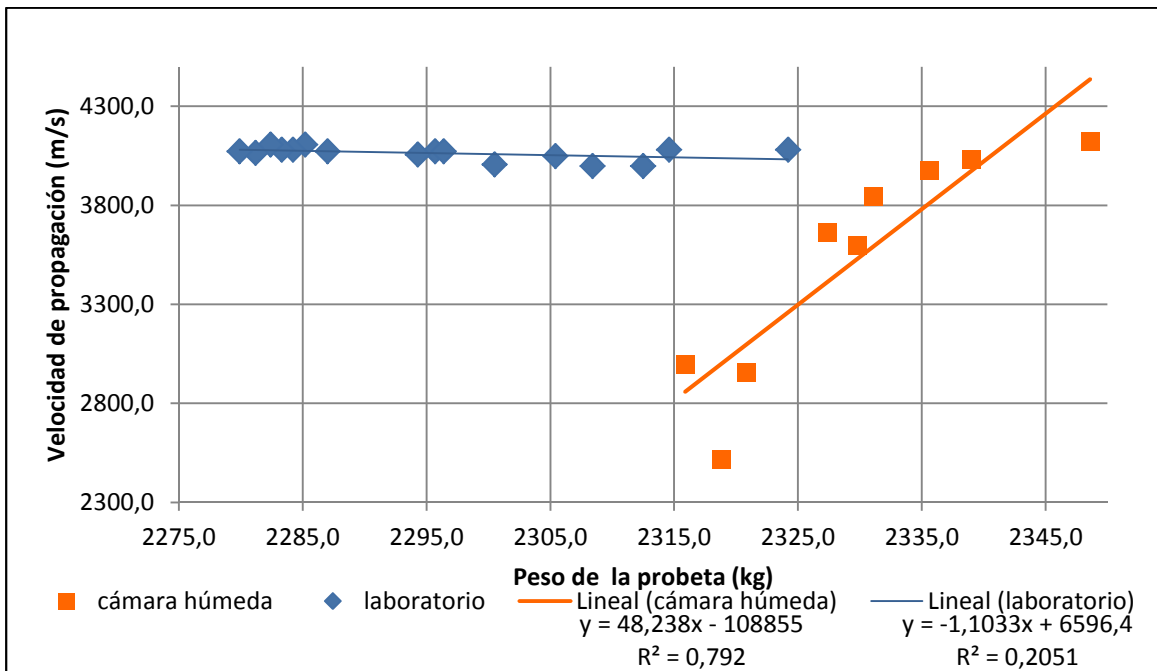
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.55 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P5.8



Gráfica 7.56 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P5.8



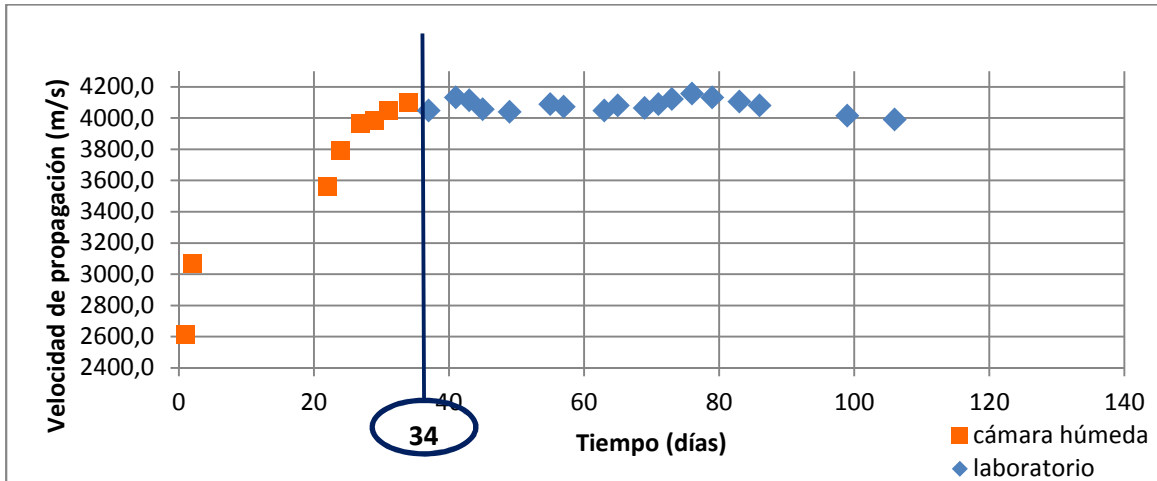
PROBETA P6-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

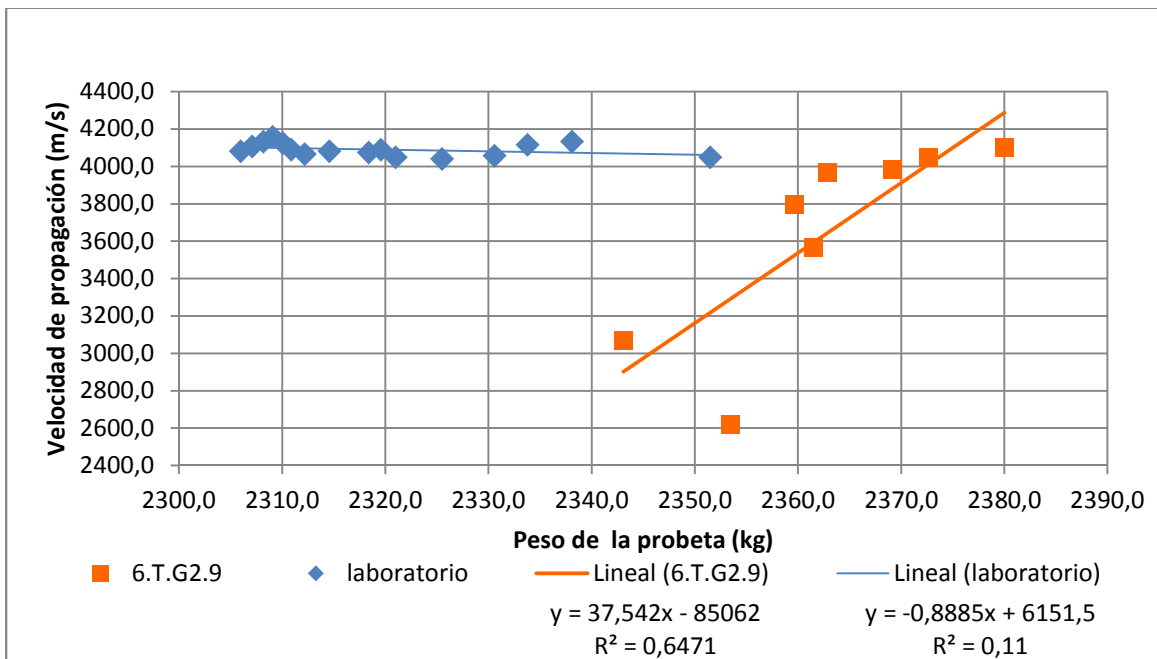
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.57 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P6.1



Gráfica 7.58 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P6.1



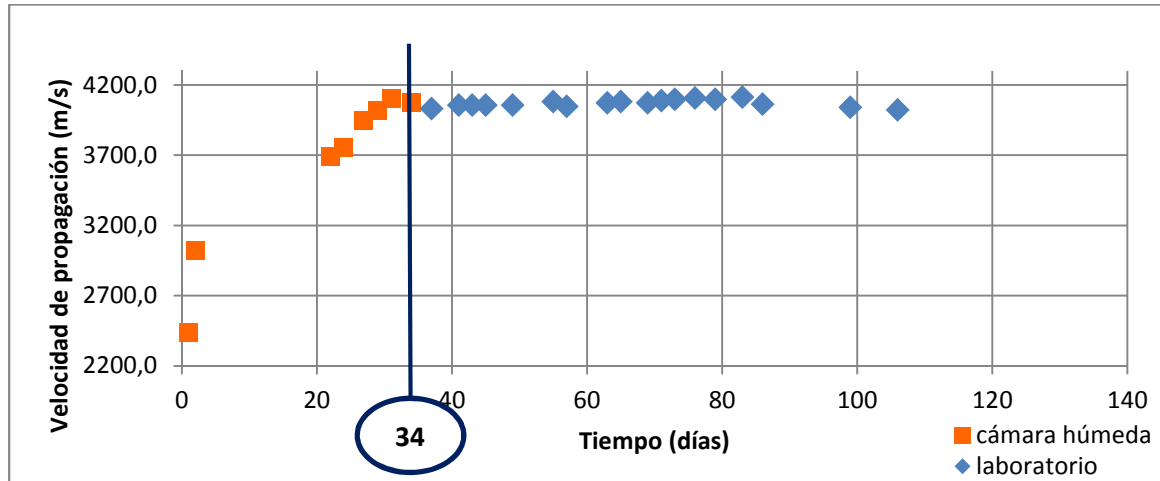
PROBETA P6-2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

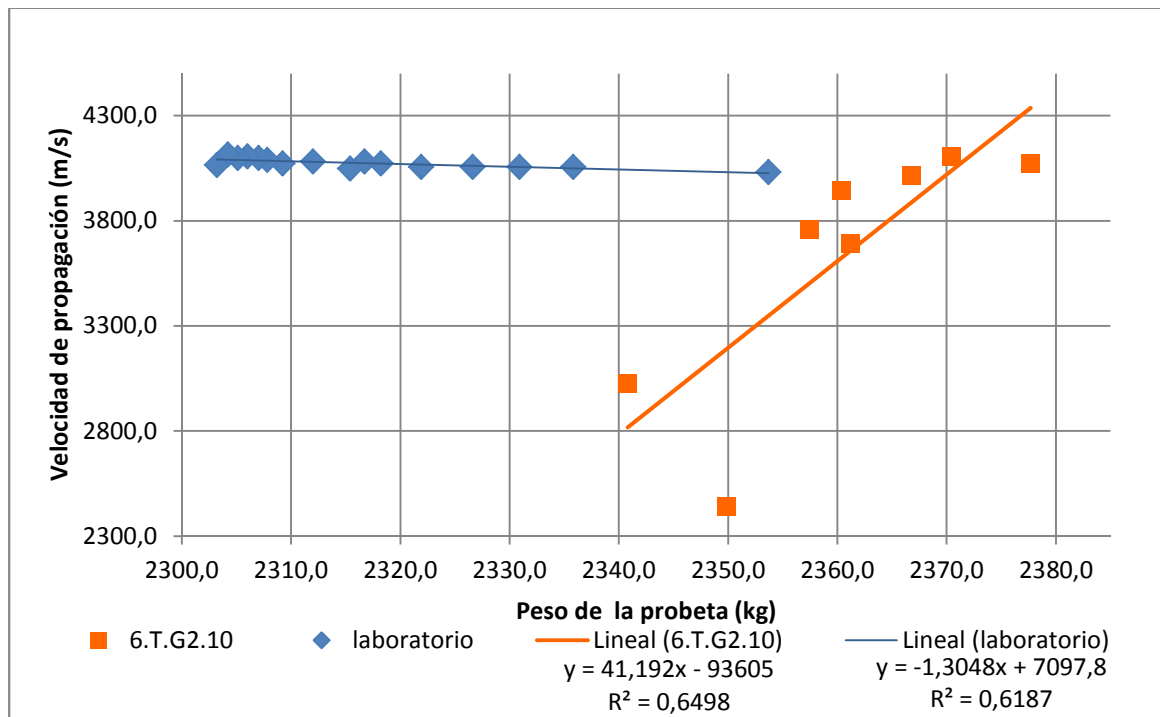
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.59 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P6.2



Gráfica 7.60 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P6.2



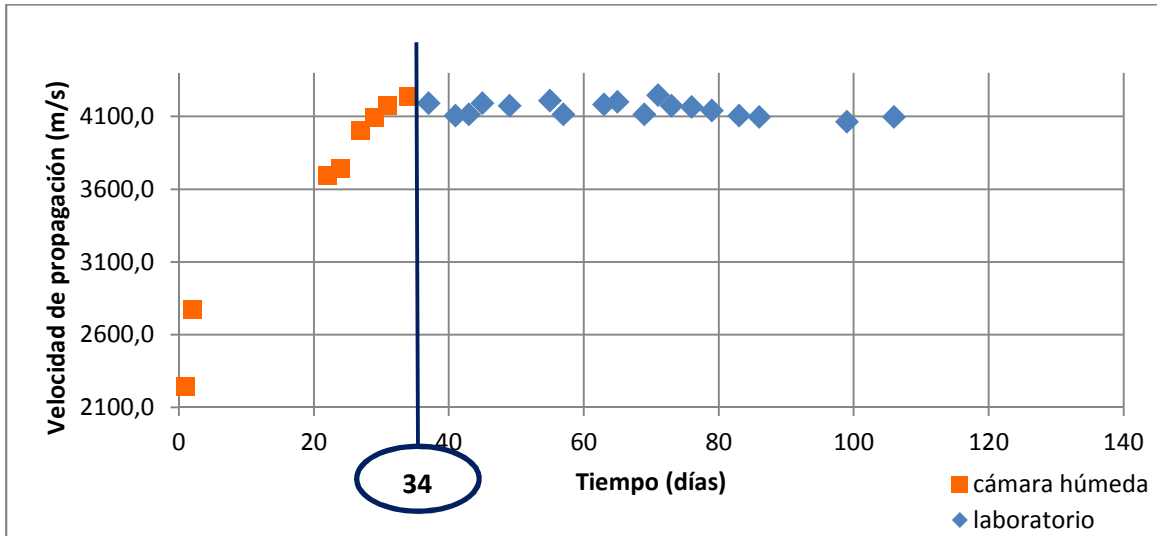
PROBETA P6-3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

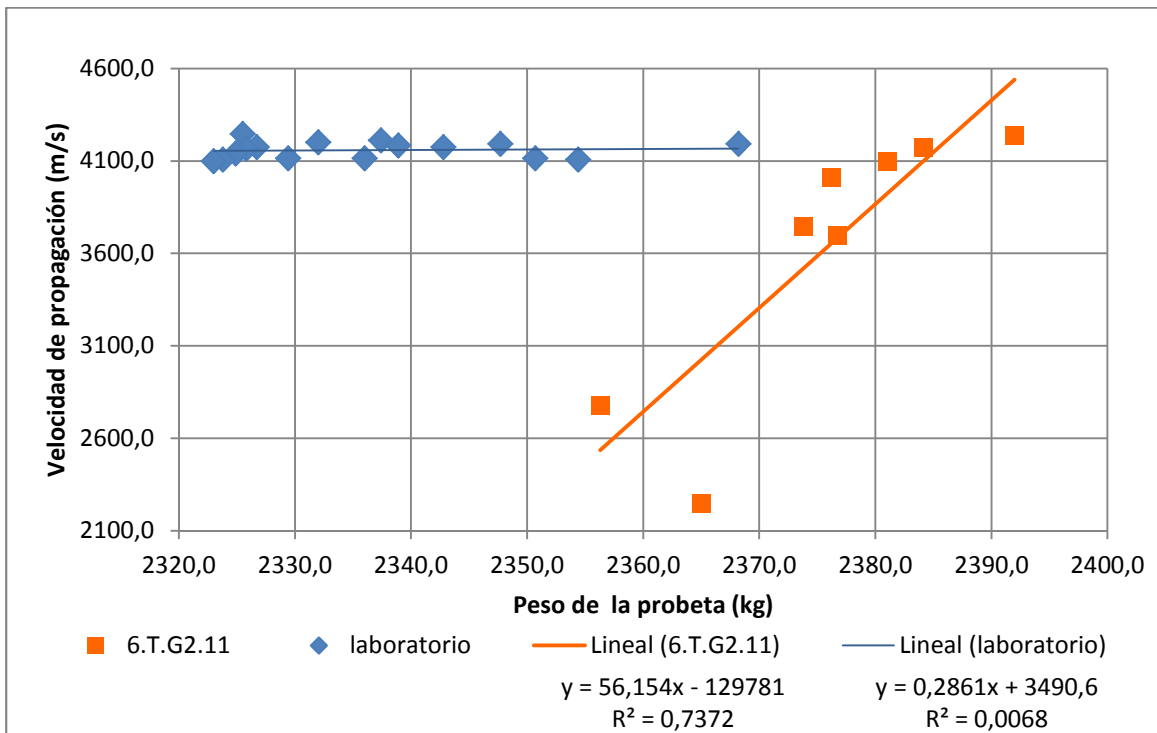
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.61 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P6.3



Gráfica 7.62 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P6.3



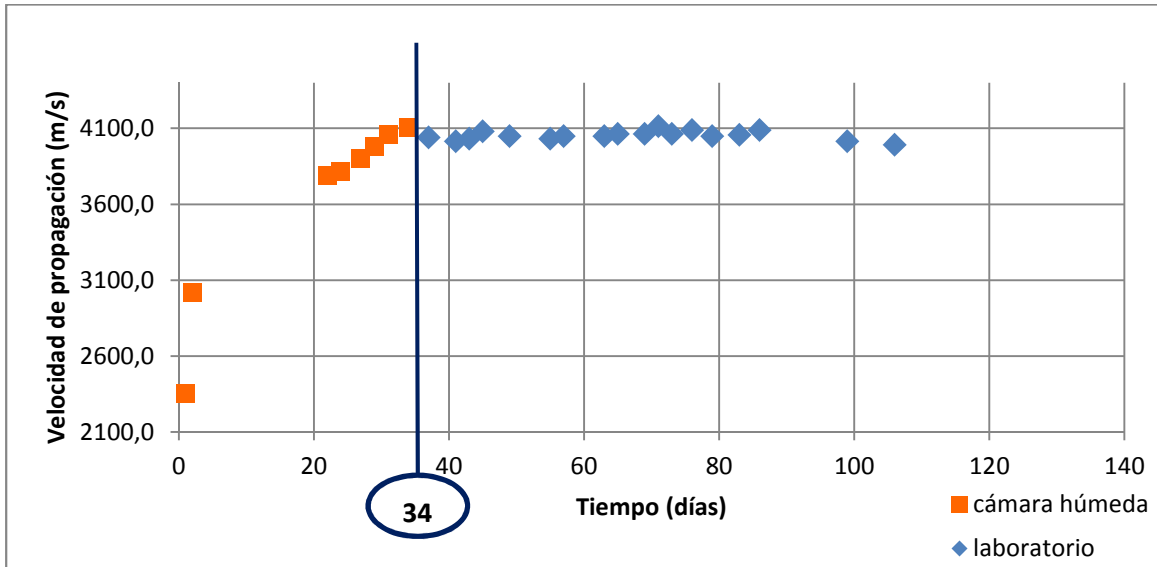
PROBETA P6-4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

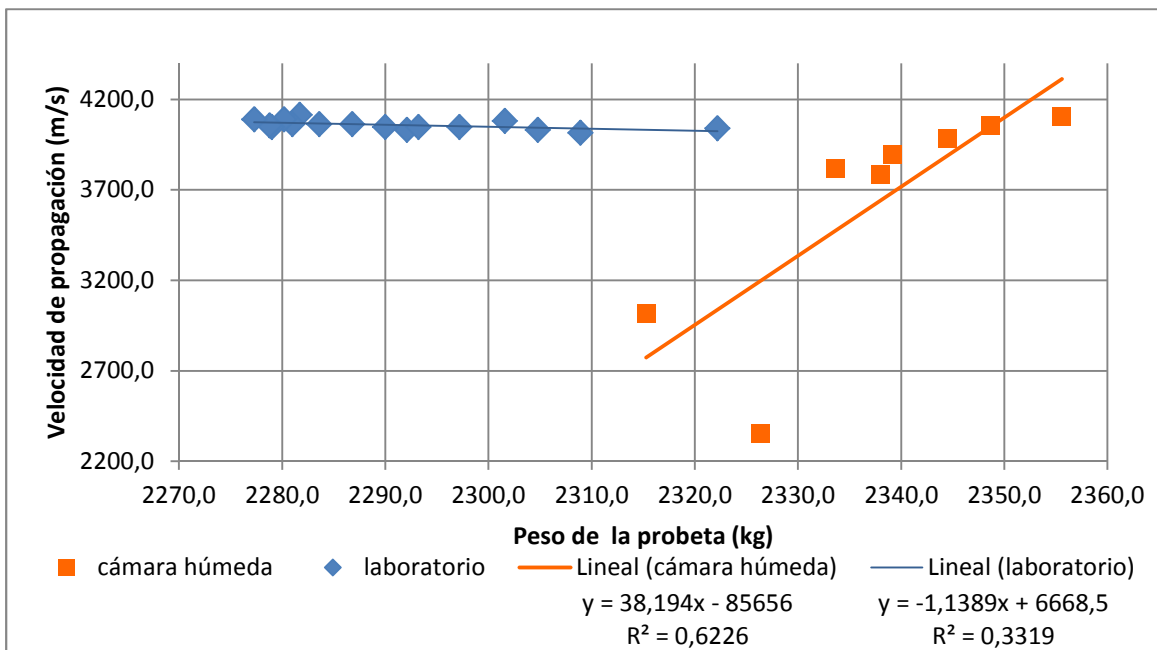
RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 106 días de ensayo hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.63 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos en el tiempo, en la probeta P6.4



Gráfica 7.64 Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos según el peso de la probeta P6.4



7.2 ANEXO II

Estudio de la dependencia lineal de los valores de la velocidad de ultrasonidos y el peso de la probeta según la composición.

Tablas.

PROBETAS P1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Tabla 7.1 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P1 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P1.1	58,12	0,762	0,0279	< 0,05
P1.2	73,24	0,856	0,0067	< 0,05
P1.3	43,26	0,667	0,0708	> 0,05
P1.4	59,05	0,770	0,0254	< 0,05
P1.5	70,24	0,828	0,0094	< 0,05
P1.6	71,83	0,472	0,2373	> 0,05
P1.7	74,99	0,866	0,0054	< 0,05
P1.8	60,21	0,780	0,0225	< 0,05

Tabla 7.2 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P1 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P1.1	1,84	0,385	0,1146	> 0,05
P1.2	3,06	-0,113	0,6562	> 0,05
P1.3	4,19	0,439	0,0685	> 0,05
P1.4	25,38	-0,046	0,8565	> 0,05
P1.5	46,38	0,736	0,0005	< 0,05
P1.6	1,89	0,373	0,1269	> 0,05
P1.7	33,31	-0,122	0,6296	> 0,05
P1.8	20,8	0,590	0,0099	< 0,05

PROBETAS P2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Tabla 7.3 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P2 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P2.1	64,44	0,803	0,0163	< 0,05
P2.2	70,37	0,839	0,0092	< 0,05
P2.3	57,53	0,759	0,0291	< 0,05
P2.4	62,81	0,792	0,0190	< 0,05

Tabla 7.4 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P2 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P2.1	55,58	-0,059	0,8137	> 0,05
P2.2	0,69	0,311	0,2088	> 0,05
P2.3	3,12	0,410	0,0908	> 0,05
P2.4	9,98	-0,004	0,9860	> 0,05

PROBETAS P3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 0,4% de Cl⁻

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Tabla 7.5 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P3 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P3.1	2,63	0,5125	0,1941	> 0,05
P3.2	74,07	-0,274	0,5117	> 0,05
P3.3	33,98	0,583	0,1294	> 0,05
P3.4	60,01	0,775	0,0240	< 0,05

Tabla 7.6 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P3 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P3.1	1,80	0,225	0,3699	> 0,05
P3.2	23,75	-0,202	0,4210	> 0,05
P3.3	0,38	0,283	0,2548	> 0,05
P3.4	0,50	0,359	0,1441	> 0,05

PROBETAS P4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 2% de Cl⁻

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Tabla 7.7 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P4 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P4.1	73,18	0,855	0,0068	< 0,05
P4.2	83,02	0,922	0,0011	< 0,05
P4.3	55,71	0,745	0,0334	> 0,05
P4.4	77,17	0,878	0,0041	< 0,05

Tabla 7.8 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P4 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P4.1	0,060	0,339	0,1683	> 0,05
P4.2	0,13	0,043	0,8653	> 0,05
P4.3	2,45	0,448	0,0620	> 0,05
P4.4	27,16	-0,101	0,6902	> 0,05

PROBETAS P5.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días hasta rotura a compresión.

Tabla 7.9 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P5 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P5.1	40,96	0,596	0,1191	> 0,05
P5.2	86,28	0,959	0,0002	< 0,05
P5.3	66,16	0,840	0,0091	< 0,05
P5.4	77,10	0,888	0,0032	< 0,05
P5.5	75,45	0,906	0,0019	< 0,05
P5.6	86,28	0,672	0,0677	> 0,05
P5.7	68,50	0,831	0,0106	< 0,05
P5.8	79,20	0,921	0,0012	< 0,05

Tabla 7.10 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P5 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P5.1	8,35	0,073	0,7750	> 0,05
P5.2	52,05	-0,307	0,2152	> 0,05
P5.3	41,78	-0,418	0,0846	> 0,05
P5.4	41,42	-0,250	0,3168	> 0,05
P5.5	15,94	-0,075	0,7668	> 0,05
P5.6	65,86	-0,509	0,0308	> 0,05
P5.7	27,44	-0,267	0,2835	> 0,05
P5.8	20,51	-0,017	0,9461	> 0,05

PROBETAS P6.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 106 días hasta rotura a compresión.

Tabla 7.11 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P6 en ambiente de cámara húmeda.

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P6.1	64,71	0,707	0,0500	= 0,05
P6.2	64,98	0,806	0,0157	< 0,05
P6.3	73,72	0,767	0,0265	< 0,05
P6.4	62,26	0,789	0,0199	< 0,05

Tabla 7.12 Coeficiente de correlación y p-valor, obtenidos para probetas tipo P6 en ambiente de laboratorio

PROBETA	R ² (%)	COEFICIENTE CORRELACIÓN	P-VALOR	
P6.1	11,00	0,040	0,8746	> 0,05
P6.2	61,87	-0,402	0,0982	> 0,05
P6.3	0,68	0,273	0,2733	> 0,05
P6.4	33,19	-0,165	0,5136	> 0,05

7.3 ANEXO III

Evolución del peso en probetas cilíndricas a lo largo del tiempo.

PROBETAS CILÍNDRICAS.

PROBETA PC5-1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

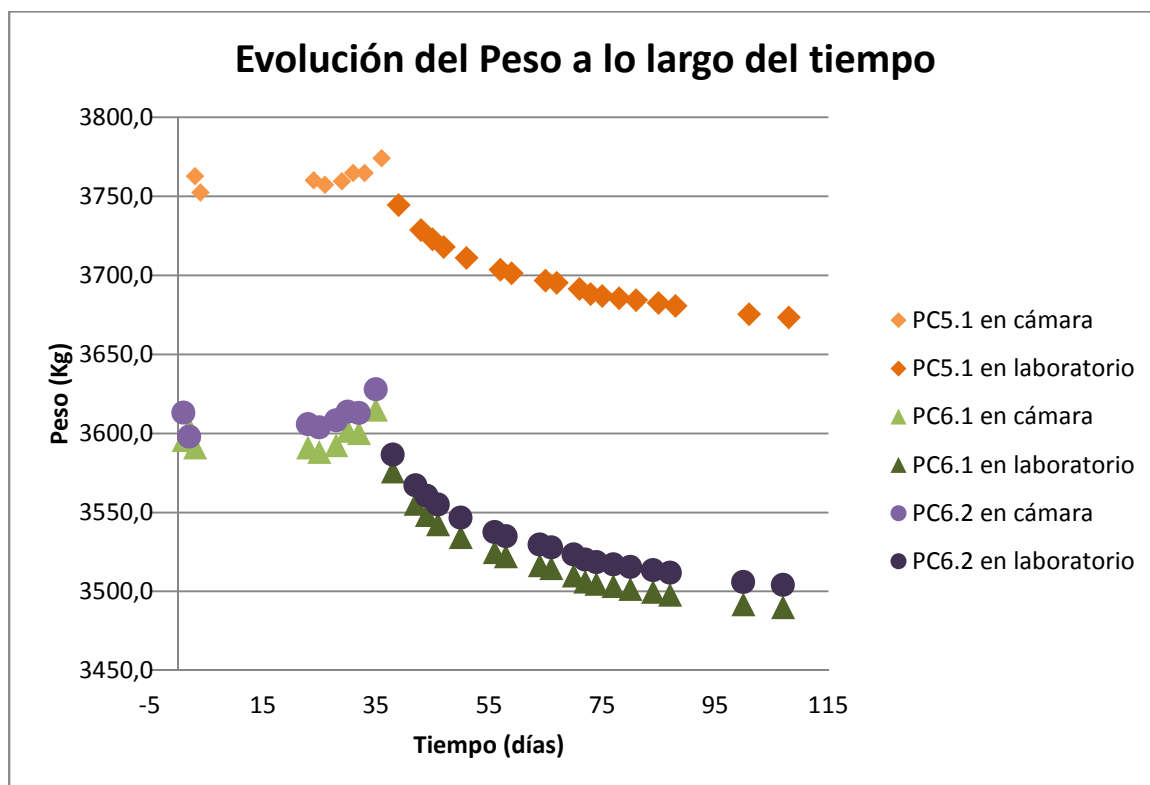
PROBETAS TIPO PC6.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.65 Evolución del peso de las probetas cilíndricas en el tiempo



7.4 ANEXO IV

Estudio de los efectos de las condiciones previas de ensayo sobre la carga de rotura a compresión de las probetas.

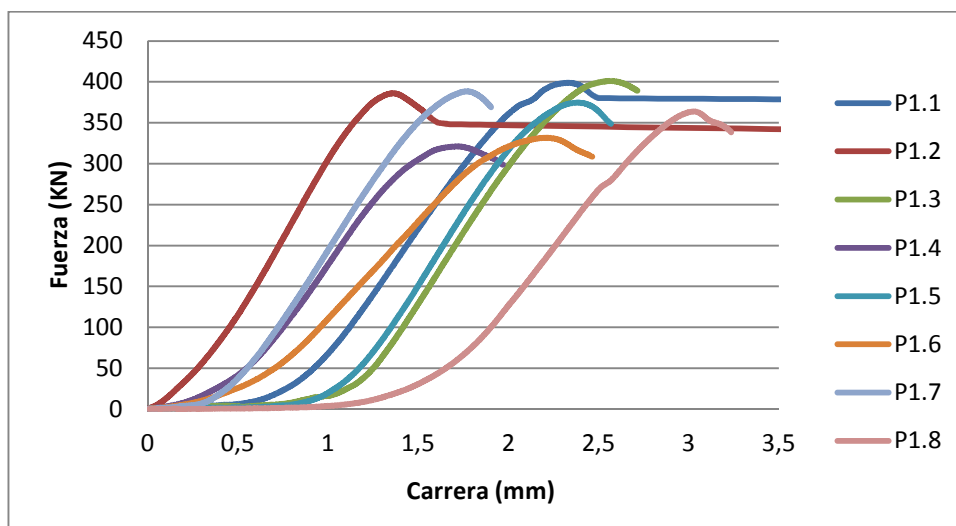
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO P1.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.66 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P1



La Gráfica 7.66 muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan.

Tabla 7.13 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P1

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P1.1	351,87	35,19	1,93	398,83	39,88	2,33
P1.2	335,81	33,58	1,07	385,96	38,60	1,36
P1.3	312,34	31,23	2,05	401,04	40,10	2,57
P1.4	274,40	27,44	1,29	321,08	32,11	1,72
P1.5	338,74	33,87	2,09	374,64	37,46	2,39
P1.6	291,88	29,19	1,78	331,59	33,16	2,21
P1.7	349,15	34,92	1,49	388,36	38,84	1,77
P1.8	319,86	31,99	2,73	363,81	36,38	3,03

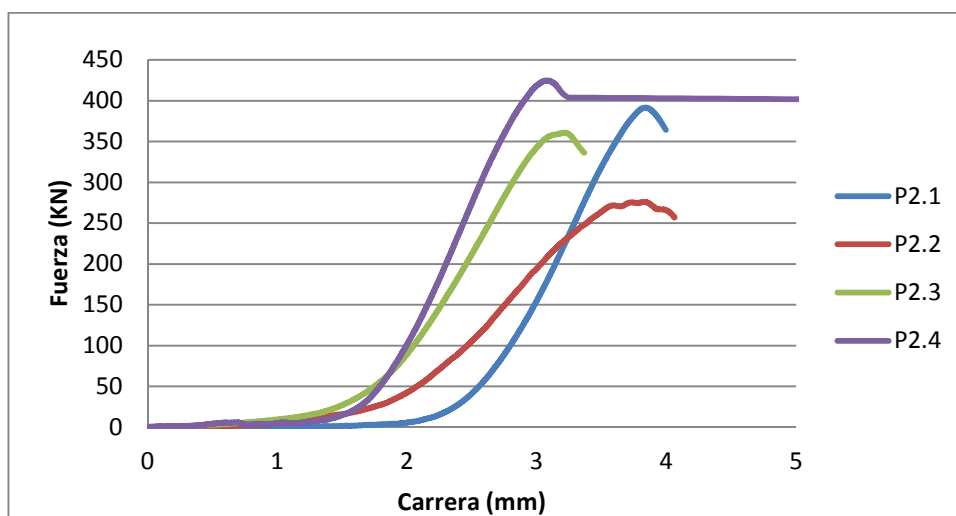
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO P2.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.67 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P2



La Gráfica 7.67 muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan.

Tabla 7.14 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P2

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P2.1	331,31	33,13	3,54	391,50	39,15	4,00
P2.2	219,04	21,90	3,15	276,16	27,62	4,06
P2.3	314,23	31,42	2,87	360,88	36,09	3,37
P2.4	373,85	37,39	2,80	424,72	42,27	8,81

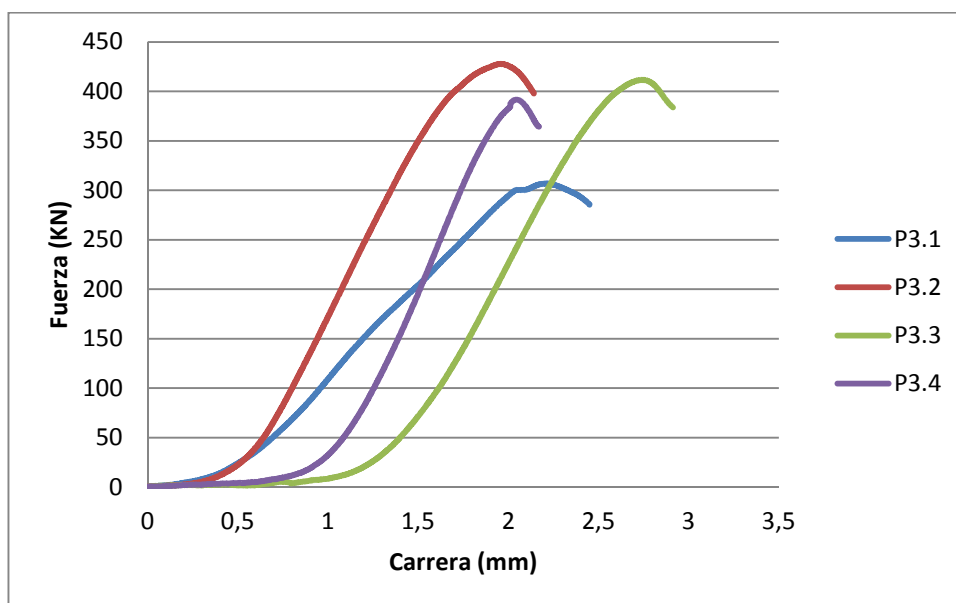
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO P3.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 0,4% de Cl^-

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.68 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P3



La Gráfica 7.68 muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan.

Tabla 7.15 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P3

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm^2)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm^2)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P3.1	283,78	28,38	1,93	306,79	30,68	2,45
P3.2	351,01	35,10	1,50	427,71	42,77	2,14
P3.3	346,09	34,61	2,36	411,62	41,16	2,91
P3.4	336,34	22,63	1,81	391,63	39,16	2,17

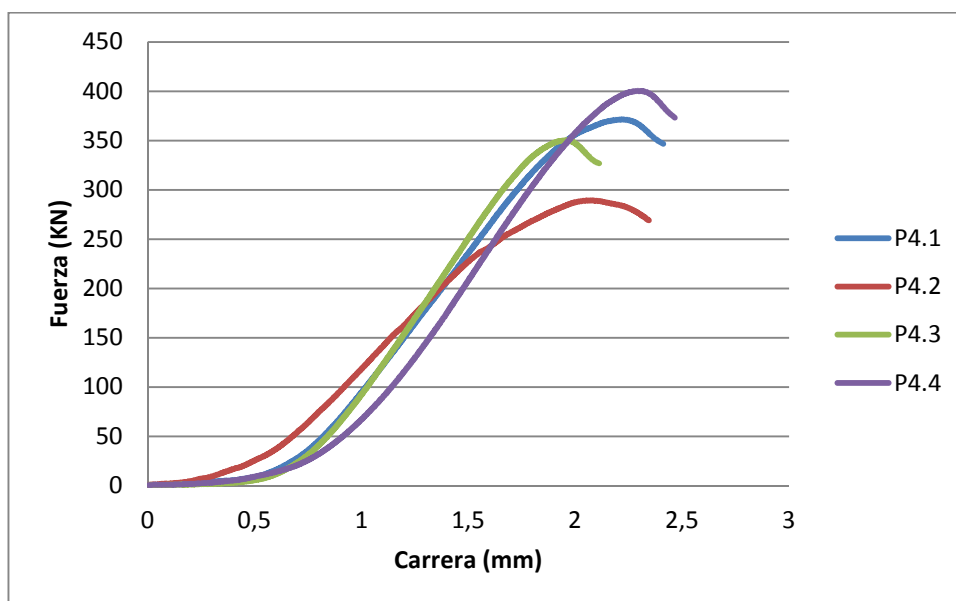
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO P4.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5. Con adición del 2% de Cl.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: Pórfido granítico de machaqueo.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.69 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P4



La Gráfica 7.69 muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan.

Tabla 7.16 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P4

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P4.1	317,29	31,73	1,80	371,20	37,12	2,41
P4.2	237,69	23,77	1,56	289,16	28,92	2,34
P4.3	311,28	31,13	1,70	350,08	35,01	2,11
P4.4	342,20	34,22	1,94	400,31	40,03	2,47

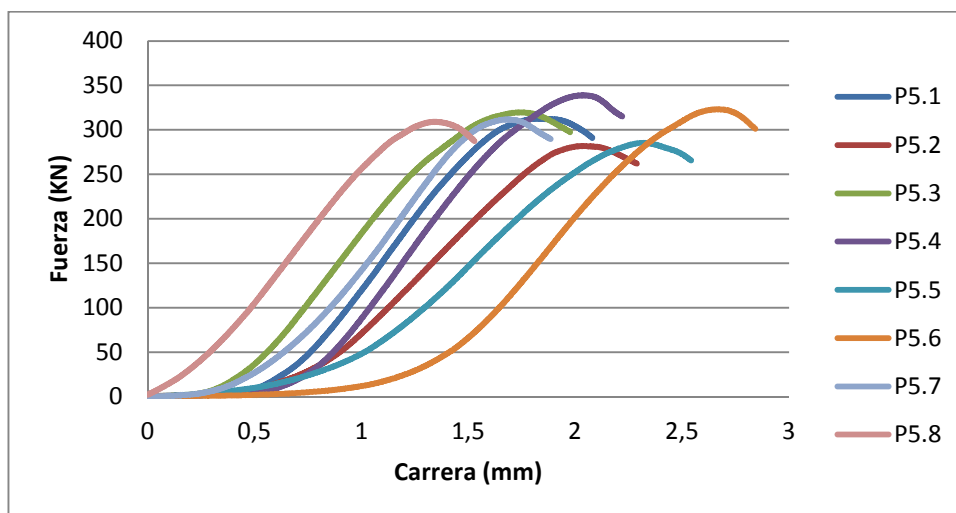
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO P5.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

35 días en cámara húmeda; 107 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.70 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P5



La Gráfica 7.70 muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan.

Tabla 7.17 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P5

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMO DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P5.1	265,73	26,57	1,48	312,66	31,17	2,08
P5.2	254,68	25,47	1,78	281,79	28,18	2,29
P5.3	253,28	25,33	1,34	319,70	31,97	1,98
P5.4	286,01	28,60	1,65	338,86	33,89	2,22
P5.5	252,53	25,25	2,00	285,42	28,64	2,54
P5.6	267,96	26,80	2,26	323,10	32,31	2,84
P5.7	168,70	16,87	1,40	311,69	31,17	1,89
P5.8	256,05	25,61	1,00	309,02	30,90	1,53

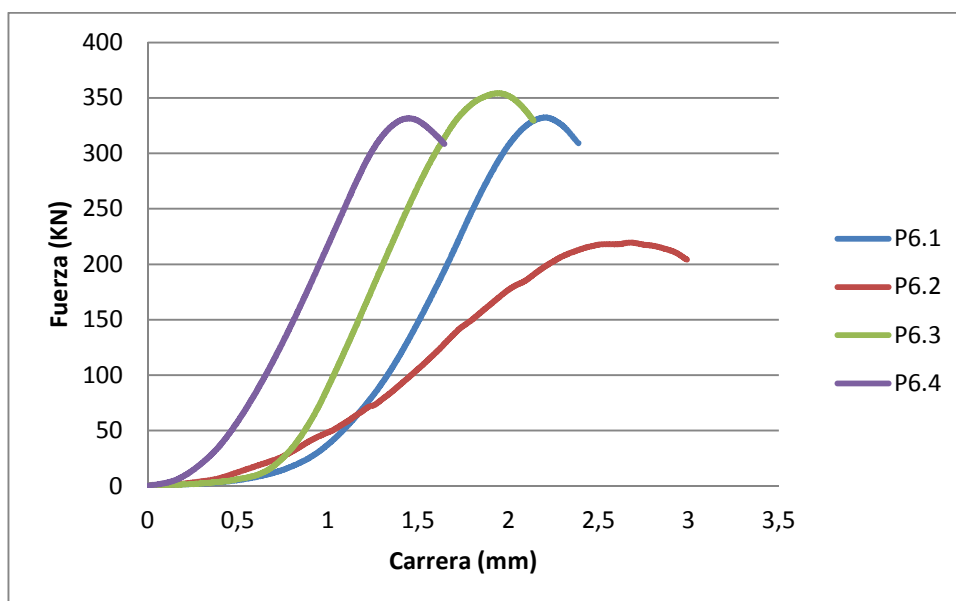
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO P6.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 106 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.71 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P6



La Gráfica 7.71 muestra la relación entre la fuerza aplicada sobre las probetas y la deformación que éstas experimentan.

Tabla 7.18 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas tipo P6

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P6.1	283,17	28,32	1,91	332,36	33,24	2,39
P6.2	184,32	18,43	2,08	219,50	21,95	2,99
P6.3	305,32	30,53	1,61	354,14	35,41	2,14
P6.4	310,15	31,12	1,28	334,56	33,46	1,64

ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN – PROBETAS CILÍNDRICAS.

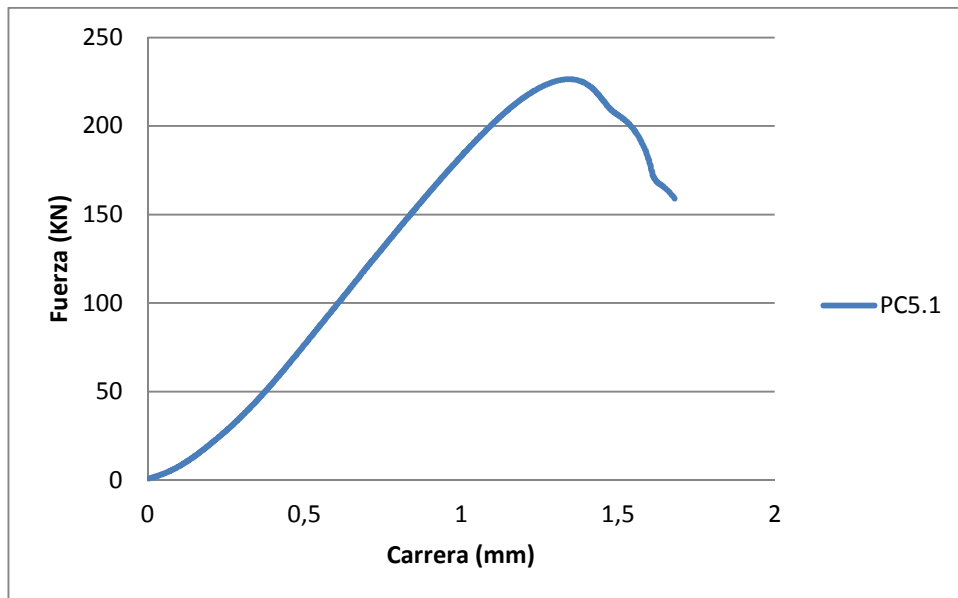
ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO PC5.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,5.

RELACIÓN A/C = 0,5. TIPO DE GRAVA: árido porfídico granítico.

36 días en cámara húmeda; 108 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.72 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probeta cilíndrica PC5



ENSAYO DE ROTURA A COMPRESIÓN - PROBETAS TIPO PC6.

DOSIFICACIÓN: 1: 1,875: 3,125: 0,6.

RELACIÓN A/C = 0,6. TIPO DE GRAVA: árido de canto rodado.

34 días en cámara húmeda; 107 días hasta rotura a compresión.

Gráfica 7.73 Diagrama σ/ϵ en ensayo de rotura a compresión en probetas cilíndricas tipo PC6

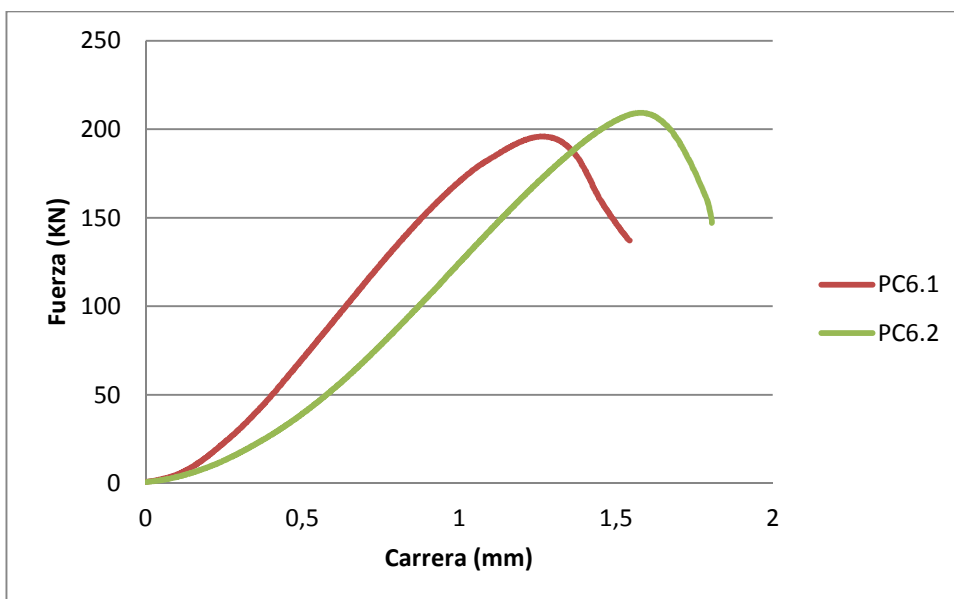


Tabla 7.19 Tabla de valores obtenidos a partir del ensayo de rotura a compresión en probetas cilíndricas

PROBETA	CARGA EN LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA EN LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA DE ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA DE ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
PC5.1	194,80	24,80	1,06	226,43	28,83	1,34
PC6.1	163,94	20,87	0,96	195,85	24,94	1,26
PC6.2	191,11	24,33	1,38	209,24	26,64	1,58

