

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID**  
**E. T. S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**



**ESTUDIO Y EXTENSIÓN DE UN MODELO MICROMECAÍNICO**  
**TRIFÁSICO PARA LA CARACTERIZACIÓN ULTRASÓNICA DE**  
**MATERIALES COMPUESTOS**

**TESIS DOCTORAL**

**M<sup>a</sup> MONTSERRAT ACEBES PASCUAL**  
**Licenciada en Ciencias Físicas**

**Madrid, 2007**





**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

**TESIS DOCTORAL**

**ESTUDIO Y EXTENSIÓN DE UN MODELO MICROMECAÍNICO  
TRIFÁSICO PARA LA CARACTERIZACIÓN ULTRASÓNICA DE  
MATERIALES COMPUESTOS**

Autora: Dña M<sup>o</sup> Montserrat Acebes Pascual  
Licenciada en Ciencias Físicas

Directora: Prof. Amparo Moragues Terrades  
Dra. en Ciencias Químicas

Directora: Dña. Margarita González Hernández  
Dra. Ingeniera Industrial

Madrid, 2007



**TESIS DOCTORAL**

**ESTUDIO Y EXTENSIÓN DE UN MODELO MICROMECAÍNICO TRIFÁSICO  
PARA LA CARACTERIZACIÓN ULTRASÓNICA DE MATERIALES  
COMPUESTOS**

Autora: Dña M<sup>a</sup> Montserrat Acebes Pascual

Directora: Prof. Amparo Moragues Terrades

Directora: Dra. Margarita González Hernández

Tribunal nombrado por el Mgfco. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de  
Madrid, el día \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2007.

PRESIDENTE: \_\_\_\_\_

VOCAL: \_\_\_\_\_

VOCAL: \_\_\_\_\_

VOCAL: \_\_\_\_\_

VOCAL SECRETARIO: \_\_\_\_\_

Acuerda otorgarle la calificación de:

\_\_\_\_\_

Madrid, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2007

## RESUMEN

La complejidad de los materiales compuestos como el hormigón, así como el auge de los materiales cementicios reforzados con fibras hace necesario profundizar en el estudio y el desarrollo de nuevos métodos de ensayos no destructivos. En este trabajo se plantea una metodología no destructiva por ultrasonidos para estimar las propiedades del compuesto a partir de las propiedades de sus materiales constituyentes. La metodología está basada en la aplicación de modelos micromecánicos, considerando la correlación que existe entre la velocidad ultrasónica y las componentes de rigidez y densidad del material compuesto.

En esta memoria, se plantea la extensión de la formulación teórica del modelo micromecánico trifásico para materiales con N-fases. En base a este modelo se realiza un estudio teórico mediante simulaciones que nos permite analizar la influencia de las inclusiones de acero en morteros, evaluando características microestructurales como geometría, fracción de volumen y propiedades elásticas. Además, la consideración de la porosidad como una fase más, nos permite estudiar el comportamiento de la estructura porosa parcial o totalmente llena de agua.

Para validar el modelo propuesto se han diseñado dos experimentos con probetas prismáticas normalizadas de mortero. En el primero de ellos se estudia la influencia de las inclusiones de acero con diferentes geometrías y en el segundo se estudia la influencia del agua en la estructura porosa. En ambos casos se realizaron ensayos destructivos de porosidad abierta y ensayos no destructivos de ultrasonidos. La porosidad se determinó según la metodología recomendada por la Rilem, mientras que en los ensayos no destructivos se midió la velocidad de las ondas ultrasónicas. En ambos casos se aplicó el modelo micromecánico tetrafásico acoplado con las medidas de la velocidad longitudinal. Los resultados experimentales son comparados con las predicciones teóricas del modelo propuesto mostrando una buena correlación en los dos experimentos, con errores inferiores al 2%.



## ABSTRACT

The complexity of composite materials like concrete, as well as the increasing use of fiber reinforced cementitious materials into building industry make necessary to study and to develop new non-destructive testing methods. In this thesis a non-destructive methodology by ultrasounds to characterize cementitious materials have been proposed which take into account the microstructural properties of its constituent phases. The methodology is based on the application of a micromechanical model, considering the correlation that exists between the ultrasonic velocity and the components of rigidity and density of the composite material.

In this work, the formulation of the three-phase micromechanic model has been generalized to materials with N-phases. From the formulations, a theoretical study has been made that allow us to analyze the influence of the steel inclusions in mortar, evaluating microstructural characteristics like the geometry, the volume fraction and the elastic properties of steel. In addition, the consideration of the porosity as another phase, allows us to study the behaviour of the porous structure which can be partial or totally full of water.

In order to validate the proposed model two experiments with standardized prismatic mortar samples have been designed. In the first experiment, the influence of the steel inclusions with different geometries in mortar has been studied. The second experiment analyzes the influence of water in the porous structure. In both cases destructive testing of open porosity and non-destructive testing by ultrasounds were made. Porosity has been determined according to the methodology recommended by the Rilem Committee. Non-destructive testing has been made by means of the measurement of the ultrasonic velocity. The tetraphasic model has been applied in both cases to predict the behaviour of ultrasonic velocity from the microstructural properties. The experimental results are compared with the theoretical predictions of the proposed model showing a good correlation in both experiments, with errors less than 2%.



# ÍNDICE

	<b>Páginas</b>
<b>Índice</b>	<b>i</b>
<b>Glosario</b>	<b>vii</b>
<b>Introducción</b>	<b>xi</b>
<b>Capítulo 1 Microestructura de los materiales cementicios</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Introducción. Escala de longitudes mecánicas</i>	1
1.2 <i>Los materiales cementicios como microestructura de niveles</i>	3
1.2.1 <i>Porosidad</i>	6
1.3 <i>Características físicas y químicas de la microestructura de los materiales cementicios en los diferentes niveles</i>	9
1.3.1 <i>Hidratación de cemento</i>	9
1.3.1.1 <i>Hidratación de los silicatos</i>	10
1.3.1.2 <i>Hidratación de los aluminatos</i>	12
1.3.2 <i>Nivel I: Matriz C-S-H</i>	14
1.3.3 <i>Nivel II. Pasta de cemento.</i>	21
1.3.4 <i>Nivel III: Mortero/hormigón</i>	27
1.4 <i>Hormigones reforzados con fibras</i>	30

<b>Capítulo 2 Modelos constitutivos aplicados a materiales multifásicos</b>	<b>35</b>
2.1 <i>Introducción</i>	35
2.2 <i>Ley de Hooke, constantes elásticas</i>	36
2.2.1 <i>Tensor de deformaciones</i>	37
2.2.2 <i>Tensor de tensiones</i>	39
2.2.3 <i>Ecuación de onda y velocidad</i>	40
2.3 <i>Los materiales cementicios como materiales multifásicos</i>	41
2.3.1 <i>Modelo de Kuster Toksöz</i>	45
2.3.2 <i>Evaluación de la influencia de la porosidad en las propiedades elásticas de la pasta de cemento mediante modelos multifásicos.</i>	48
2.3.3 <i>Evaluación de las propiedades elásticas de la matriz no porosa mediante la microestructura de niveles.</i>	51
2.4 <i>Aspectos básicos de la micromecánica continua.</i>	55
2.5 <i>Modelo micromecánico bifásico.</i>	57
2.5.1 <i>Densidad efectiva.</i>	59
2.5.2 <i>Relación entre la rigidez efectiva y la velocidad</i>	60
2.6 <i>Modelo micromecánico trifásico</i>	62
2.7 <i>Resumen</i>	75

<b>Capítulo 3</b>	<b>Extensión del modelo micromecánico trifásico a un modelo N-fásico</b>	<b>79</b>
3.1	<i>Introducción</i>	79
3.2	<i>Modelo bifásico vs. Modelo trifásico.</i>	81
3.3	<i>El hormigón como material trifásico.</i>	84
3.4	<i>Extensión teórica del modelo trifásico a materiales N-fásicos.</i>	88
3.5	<i>Aplicación del modelo tetrafásico al hormigón</i>	93
3.6	<i>Comportamiento de la velocidad de las ondas ultrasónicas a partir del modelo tetrafásico en compuestos de cemento tetrafásicos</i>	97
3.6.1	<i>Influencia del volumen de acero y la geometría del poro en la velocidad, a partir del modelo tetrafásico.</i>	98
3.6.2	<i>Influencia de la geometría de la fibra de acero en la velocidad ultrasónica.</i>	101
3.6.3	<i>Influencia de las propiedades del acero en la velocidad de las ondas ultrasónicas</i>	103
3.7	<i>Predicción del comportamiento de la velocidad con el poro parcial o totalmente lleno de agua</i>	107
3.8	<i>Resumen.</i>	114
<b>Capítulo 4</b>	<b>Metodologías para la medida de la velocidad ultrasónica</b>	<b>117</b>
4.1	<i>Ensayos no destructivos por ultrasonidos en materiales base cemento</i>	117

4.2	<i>Velocidad de una onda, velocidad de fase, de grupo y del frente de ondas.</i>	120
4.3	<i>Medida de la velocidad ultrasónica</i>	123
4.3.1	<i>Tipos de acoplamiento para la medida de la velocidad ultrasónica.</i>	126
4.3.1.1	<i>Medida de velocidad por contacto.</i>	128
4.3.1.2	<i>Medidas de la velocidad por inmersión.</i>	129
4.3.2	<i>Técnicas convencionales de medida de la velocidad ultrasónica.</i>	130
4.3.3	<i>Medida de la velocidad mediante procesamiento digital de señal</i>	134
4.3.3.1	<i>Detección de flanco, mínimo y máximo del pulso transmitido.</i>	136
4.3.3.2	<i>Detección del primer cruce por cero y doble cruce por 0.</i>	137
4.3.3.3	<i>Métodos basados en algoritmos de correlación o convolución</i>	138
4.3.3.4	<i>Normas L1 y L2</i>	140
4.3.3.5	<i>Medida de la velocidad basada en el espectro de la señal</i>	141
4.3.4	<i>Comparación entre diferentes métodos de medida de velocidad.</i>	143
4.4	<i>Resumen</i>	148

<b>Capítulo 5 Validación experimental</b>	<b>151</b>
5.1 <i>Objetivos de la validación experimental.</i>	151
5.2 <i>Metodología</i>	152
5.3 <i>Descripción de las probetas</i>	154
5.3.1 <i>Dosificaciones</i>	155
5.4 <i>Resultados de los ensayos destructivos.</i>	157
5.5 <i>Montaje experimental para la medida de la velocidad</i>	160
5.5.1 <i>Descripción de la metodología para el Experimento I</i>	160
5.5.2 <i>Descripción de la metodología para el Experimento II</i>	162
5.6 <i>Resultados de la medida de la velocidad ultrasónica</i>	165
5.7 <i>Estimación de la velocidad y las constantes elásticas a partir del modelo micromecánico</i>	169
5.7.1 <i>Constantes elásticas</i>	169
5.7.2 <i>Estimación del módulo de elasticidad</i>	170
5.8 <i>Aplicación del modelo tetrafásico al mortero al Experimento I.</i>	171
5.8.1 <i>Hipótesis para la aplicación del modelo tetrafásico al Experimento I</i>	171
5.8.2 <i>Resultados de la aplicación del modelo tetrafásico para los morteros con inclusiones de acero</i>	172
5.9 <i>Aplicación del modelo tetrafásico al mortero al Experimento II</i>	175
5.9.1 <i>Hipótesis para la aplicación del modelo tetrafásico al Experimento II</i>	175

5.9.2	<i>Resultados de la aplicación modelo tetrafásico para los morteros parcialmente llenos de agua</i>	177
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusiones y líneas de investigación futuras</b>	<b>181</b>
6.1	<i>Conclusiones.</i>	181
6.2	<i>Líneas de investigación futuras</i>	188
<b>Anexo 1</b>		<b>191</b>
<b>Anexo 2</b>		<b>193</b>
<b>Anexo 3</b>		<b>199</b>
<b>Anexo 4</b>		<b>205</b>
<b>Referencias</b>		<b>209</b>

## GLOSARIO

$(\phi, \theta, \psi)$	<i>Ángulos de Euler</i>
$\alpha$	<i>Relación de aspecto del elipsoide</i>
$\varepsilon$	<i>Deformación resultante</i>
$\varepsilon_{ij}$	<i>Deformación global del compuesto</i>
$\varepsilon_{ij}^*$	<i>Autodeformación</i>
$\varepsilon_r$	<i>Deformación “in situ” de la inclusión</i>
$\varepsilon_v$	<i>Deformación volumétrica</i>
$\gamma^0$	<i>Deformación aplicada</i>

$\gamma^m$	<i>Deformación elástica promedio de la matriz</i>
$\gamma^{\Omega_i}$	<i>Desviación elástica promedio de la inclusión <math>\Omega_i</math></i>
$\Gamma(\phi, \theta, \psi)$	<i>Función de distribución de orientación</i>
$\Delta\gamma$	<i>Desviación de la deformación</i>
$\Delta\gamma_i$	<i>Desviación de la deformación provocada por <math>\varepsilon_i^*</math> en <math>\Omega_i</math></i>
$\lambda$	<i>Longitud de onda</i>
$\mu$	<i>Coficiente o relación de Poisson</i>
$\nu$	<i>Fracción de volumen</i>
$\rho$	<i>Densidad</i>
$\rho_a$	<i>Densidad aparente</i>
$\rho_{abs}$	<i>Densidad absoluta</i>
$\rho_{real}$	<i>Densidad real</i>
$\sigma^0$	<i>Esfuerzo uniforme aplicado</i>
$\sigma^{\Omega_i}$	<i>Perturbaciones del esfuerzo <math>\sigma^0</math> en las inclusiones "i"</i>
$\sigma_{ij}$	<i>Esfuerzo global</i>
$\tau$	<i>Tensión</i>
$\Omega_i$	<i>Inclusiones</i>
$\Omega_r$	<i>Heterogeneidad</i>
$a_1, a_2, a_3$	<i>Radios del elipsoide</i>
$\mathbf{A}^i$	<i>Factor de concentración de la deformación en la inclusión</i>
$\mathbf{A}^m$	<i>Factor de concentración de la deformación en la matriz</i>
$\mathbf{C}$ o $\mathbf{C}_{ijkl}$	<i>Tensor de constantes elásticas</i>

$\mathbf{C}_i$	Tensor de constantes elásticas de la fase $i$
$\mathbf{C}_m$	Tensor de constantes elásticas de la matriz
$C_{11}^m, C_{44}^m$	Componentes del tensor de constantes elásticas de la matriz
$C_{11}^i, C_{44}^i$	Componentes del tensor de constantes elásticas de la inclusión
$d$	Sección transversal
$D$	Material homogéneo
$e_{ij}$	Deformación elástica
$E$	Módulo de elasticidad o módulo de Young
$G$	Módulo transversal
$H_r$	Factor de concentración de la deformación, que relaciona la deformación global, $E$ , con la deformación "in situ" de la inclusión, $\varepsilon_r$
$\mathbf{I}$	Tensor de identidad
$K$	Módulo volumétrico
$l$	longitud
$M_i$	Masa de la inclusión
$M_m$	Masa de la matriz
$n$	Constante empírica (Modelo de Hirsch)
$P$	Compresión hidrostática
$R_c$	Resistencia a compresión
$\mathbf{S}$	Tensor de Eshelby
$\mathbf{S}_i$	Tensor de Eshelby para la inclusión $i$
$\mathbf{T}$	Tensor de Wu, de cuarto orden
$T_{ijkl}$	Componentes del tensor de Wu

$u$  Transformación de fase o deformación necesaria para producir una autodeformación

$v_L$  Velocidad longitudinal

$v_t$  Velocidad transversal

$V$  Volumen

$V_i$  Volumen de la fase  $i$

$W$  Energía de deformación total

## INTRODUCCIÓN

A menudo es necesario examinar las estructuras de hormigón después que éste haya endurecido para determinar si dicha estructura es adecuada para la aplicación para la cual fue diseñada. Idealmente esta caracterización debería realizarse sin dañar el hormigón, aunque los ensayos disponibles abarcan desde los que son completamente no destructivos, donde no hay daño al hormigón, hasta aquellos donde la superficie es ligeramente dañada, pasando por los ensayos parcialmente destructivos, tales como los ensayos “core” y los ensayos “pullout” o “pull off”, donde la superficie debe ser reparada después del ensayo. El rango de propiedades que pueden ser evaluadas usando ensayos no destructivos, END, y ensayos destructivos parciales es muy

grande e incluye parámetros fundamentales como la densidad, el módulo elástico y la resistencia a compresión, así como la dureza superficial, la absorción superficial, la localización del refuerzo y su tamaño y distancia desde la superficie. En algunos casos también es posible chequear la calidad de la ejecución y la integridad estructural mediante la capacidad de detectar poros (voids), grietas y delaminaciones.

La calidad de un hormigón normalmente es determinada por su resistencia a compresión y su homogeneidad. Esta calidad depende de muchos factores tales como el tipo y cantidad de cemento incluido, la resistencia de sus agregados, la relación agua/cemento, la condición de fraguado, endurecimiento (espesamiento de la mezcla) y curado, la edad del hormigón, el grado de humedad, etc. Los ensayos destructivos para determinar la resistencia a compresión presentan el inconveniente de que, por ejemplo, si se extraen muestras, el coste de la extracción y del ensayo permitirían realizar solamente un pequeño número de réplicas en una gran estructura la cual puede tener una apariencia engañosa, y por tanto los resultados no reflejarán adecuadamente el estado de la misma.

Una de las ventajas de los END es que pueden ser aplicados tanto a estructuras antiguas como nuevas. Para las nuevas estructuras, las aplicaciones fundamentales son principalmente el control de calidad y la resolución de dudas acerca de la calidad de los materiales. En cambio su aplicación en obra construida está más relacionada con la valoración de la

integridad estructural. En ambos casos, los END pueden ser usados en aquellas situaciones como un ensayo preliminar a la subsiguiente extracción de testigos.

A pesar de que los ensayos no destructivos, y en particular los basados en la técnica de ultrasonidos, en hormigón se vienen aplicando desde hace unas décadas, las medidas se realizan generalmente con el objeto de buscar defectos significativos aislados, o determinar la dureza del material a partir de la relación que existe entre la velocidad ultrasónica y las propiedades elásticas del material, como por ejemplo el módulo de Young, o la relación de Poisson.

La relación que existe entre la velocidad de propagación en el medio y las propiedades elásticas del material ha sido establecida por la teoría de elasticidad para materiales homogéneos e isótropos, es decir para materiales monofásicos, en los cuales las propiedades no varían en función de la dirección. En el caso del hormigón, al tratarse de un material heterogéneo, no es posible definir una relación específica entre su resistencia y la velocidad ultrasónica, para los distintos tipos de mezclas en términos de la influencia de los factores mencionados anteriormente. Sin embargo un análisis estadístico de los resultados coleccionados hasta el presente, indica que esta relación existe. Esto se encuentra resumido en la tabla 1 la cual está referida a una muestra cilíndrica de 16 cm en diámetro y longitud.

Calidad del Hormigón	Velocidad de la onda longitudinal (m/s)	Resistencia a la compresión aproximada (kg/cm <sup>2</sup> )
Muy pobre	Por debajo de 2000	--
Pobre	2000-3000	Hasta 40
Ligeramente bueno	3000-3500	Hasta 100
Bueno	3500-4000	Hasta 250
Muy bueno	4000-4500	Hasta 400
Excelente	Por encima de 4500	Por encima de 400

*Tabla 1. Relación entre la velocidad longitudinal y la calidad del hormigón.*

Otro de los problemas que presenta la inspección ultrasónica en hormigón es que al tratarse de un material heterogéneo, la frecuencia de inspección se encuentra limitada a 100 kHz (o menos cuando se examinan distancias que exceden 1m) por sus heterogeneidades intrínsecas.

El hormigón también puede ser evaluado por la medición de la atenuación ultrasónica. Sin embargo, debido a los problemas de acoplamiento, las mediciones de la velocidad son las más comunes en los equipos comerciales.

El hormigón además de ser un material heterogéneo es poroso. Este hecho hace que la aplicación de la teoría de la elasticidad no muestre resultados alentadores, pues la relación que existe entre la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas y la porosidad no aparece explícitamente en las expresiones de la velocidad de propagación en el medio.

Considerando que los poros forman parte de la microestructura del los materiales cementicios, en trabajos previos, se aplicó la micromecánica

(extensión de la mecánica de los sólidos deformables a la microestructura de éstos) para la caracterización de este tipo de compuestos considerados como materiales trifásicos.

Partiendo de esta situación el objetivo principal de esta tesis es el estudio y extensión de un modelo micromecánico trifásico para la caracterización de materiales compuestos de N-fases, a partir de la velocidad ultrasónica. Entre las fases a considerar se encuentra la estructura porosa, en la cual los poros pueden estar parcial o totalmente llenos de agua. Ampliar el modelo a N-fases permite estudiar materiales multifásicos como es el caso del hormigón o los morteros reforzados con fibras, los cuales tienen agregados con propiedades elásticas que difieren mucho de las propiedades de los áridos.

En el capítulo primero se plantea una revisión general de la microestructura de los materiales cementicios. Para esto se utiliza una división en escalas de longitudes mecánicas a través de las cuales se estudiará el comportamiento de las propiedades químicas y físicas del material y sus fases constituyentes.

Teniendo en cuenta que a partir de la medida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas se pueden determinar las propiedades elásticas del material, en la primera parte del segundo capítulo se estudian las relaciones basadas en la teoría de elasticidad y propagación de ondas, que han sido establecidas para materiales homogéneos. Sin embargo los materiales cementicios, son heterogéneos, por lo que en una segunda parte se revisan las

bases de los modelos de homogenización clásicos, los cuales conducen a la predicción del comportamiento global de los materiales heterogéneos a partir de las propiedades microestructurales de sus fases constituyentes. Estos modelos permiten estudiar, con mayor o menor aproximación materiales bifásicos y trifásicos

Sin embargo los materiales cementicios no siempre pueden estudiarse como materiales trifásicos, por lo que se hace necesario la extensión de estos modelos a materiales de cuatro o más fases. En el capítulo tercero se plantea la formulación teórica para la extensión del modelo trifásico a un modelo multifásico para materiales N-fásicos. Además se realiza un estudio teórico, basado en simulaciones en Matlab, para caracterizar dos casos de materiales tetrafásicos:

- materiales cementicios formados por una matriz de cemento y tres tipos de inclusiones: arena, poros y acero, éste último con la peculiaridad de que sus constantes elásticas difieren mucho de las propiedades de la matriz no porosa.
- materiales cementicios, en este caso mortero, con estructura porosa parcial o totalmente llena de agua. Consideraremos como fases constituyentes la matriz no porosa, la arena, los poros con aire y los poros con agua.

El estudio teórico se basa en el comportamiento de la velocidad de las ondas ultrasónicas cuando se varía la fracción de volumen, las propiedades

elásticas y la geometría del acero, en el primer caso, y el volumen de arena, la porosidad y el módulo de elasticidad de la matriz no porosa para el segundo caso.

En el capítulo 4 se exponen las metodologías para la medida de la velocidad ultrasónica, tanto en inmersión como en seco, así como los métodos disponibles para la medida de la velocidad mediante el procesamiento digital de la señal ultrasónica. En la última parte de este capítulo se hace una comparación de los métodos citados y una valoración de los más adecuados para realizar las medidas en los materiales cementicios.

La validación del modelo N-fásico se expone en el capítulo 5. Para esta validación se diseñaron dos experimentos con probetas prismáticas de mortero de 40mm x 40mm x 160mm. En el primer experimento se estudian los morteros con inclusiones de acero. En este caso se considera el material formado por una matriz de cemento, poros, e inclusiones de arena y acero. Para esto se fabricaron probetas de mortero con inclusiones de acero de diferentes relaciones de aspecto. Mientras que, en el segundo experimento se evalúa el comportamiento del mortero con la estructura porosa parcialmente llena de agua. Para este caso se fabricaron probetas de mortero con distinta relación agua/cemento, en la que las cuales se varía la fracción de poros llenos de agua mediante la saturación de las muestras. En ambos experimentos se realizaron ensayos destructivos de porosidad y ensayos no destructivos (END) por ultrasonidos, utilizando la técnica de transmisión.

Los ensayos destructivos de porosidad se realizaron empleando la metodología Rilem. Mientras que los END por ultrasonidos se realizaron mediante la medida de la velocidad de las ondas ultrasónicas, utilizando transductores de alta frecuencia para medir el tiempo de propagación de las ondas a través del material.

Posteriormente se aplicó el modelo micromecánico, particularizado para materiales tetrafásicos, para predecir el comportamiento de la velocidad en cada uno de los casos estudiados, y comprobar las predicciones teóricas, realizadas en el capítulo 3. Los resultados del modelo han sido comparados con las medidas ultrasónicas, obteniéndose en ambos experimentos errores medios globales inferiores al 2% en la predicción de la velocidad. Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto la validez del modelo propuesto para caracterizar materiales cementicios.

# **CAPÍTULO 1**

## **MICROESTRUCTURA DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS**

*En este capítulo se plantea una revisión general de la microestructura de los materiales cementicios. Para esto se utiliza una división en escalas de longitudes mecánicas a través de las cuales se estudiará el comportamiento de las propiedades químicas y físicas del material.*

### **1.1. Introducción. Escala de longitudes mecánicas**

En la investigación de materiales pueden distinguirse diferentes escalas de longitudes mecánicas atendiendo a las características microestructurales y a

las técnicas de análisis que se utilicen. Con las técnicas de investigación actuales, las escalas de longitudes pueden ir desde las decenas de nanómetros hasta los centímetros.

La escala de longitudes en las que se realiza una investigación se eligen considerando el tipo de información que se busca, cómo se manifiesta ésta a altas escalas, y cómo se trata analíticamente.

Dependiendo del material estudiado, una escala de longitud corresponde a la escala de operación deseada, y determina cómo se agrupará la información de otras escalas inferiores. Atendiendo al tratamiento analítico, puede ser necesaria una separación de las escalas en la cual extraer la información. En este sentido una microestructura heterogénea puede ser dividida en niveles de heterogeneidades dominantes en el material.

### **Notación**

La notación específica para la química del cemento utilizada a lo largo de esta memoria se muestra en la tabla 1.1, así como las abreviaturas usadas para referirse a las sustancias que forman los materiales cementicios, y algunas otras de uso común en este campo.

Notación	
C	CaO
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
S	SiO <sub>2</sub>
H	H <sub>2</sub> O
N	Na <sub>2</sub> O
K	K <sub>2</sub>
C-S-H	Silicatos cálcicos hidratados
CH	Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandita

Tabla 1.1. Notación específica en química del cemento

## 1.2. Los materiales cementicios como microestructura de niveles

Vamos a considerar los materiales cementicios divididos en distintos niveles. Esta división se basa en consideraciones mecánicas y ha sido utilizada por algunos autores [Constantinides, 04], [Heukamp, 03], por ejemplo, como punto de partida para el posterior análisis de los efectos de lixiviado en materiales cementicios.

Para la caracterización de los materiales cementicios proponemos una modificación de la división de escala propuesta en [Constantinides, 04], que abarca un rango desde los nanómetros a los centímetros. La modificación viene dada por la consideración explícita de la porosidad como una fase más en la escala de longitudes considerada. Esta división esta estructurada en

cuatro niveles fundamentales como se explica a continuación y se muestra en la figura 1.1.

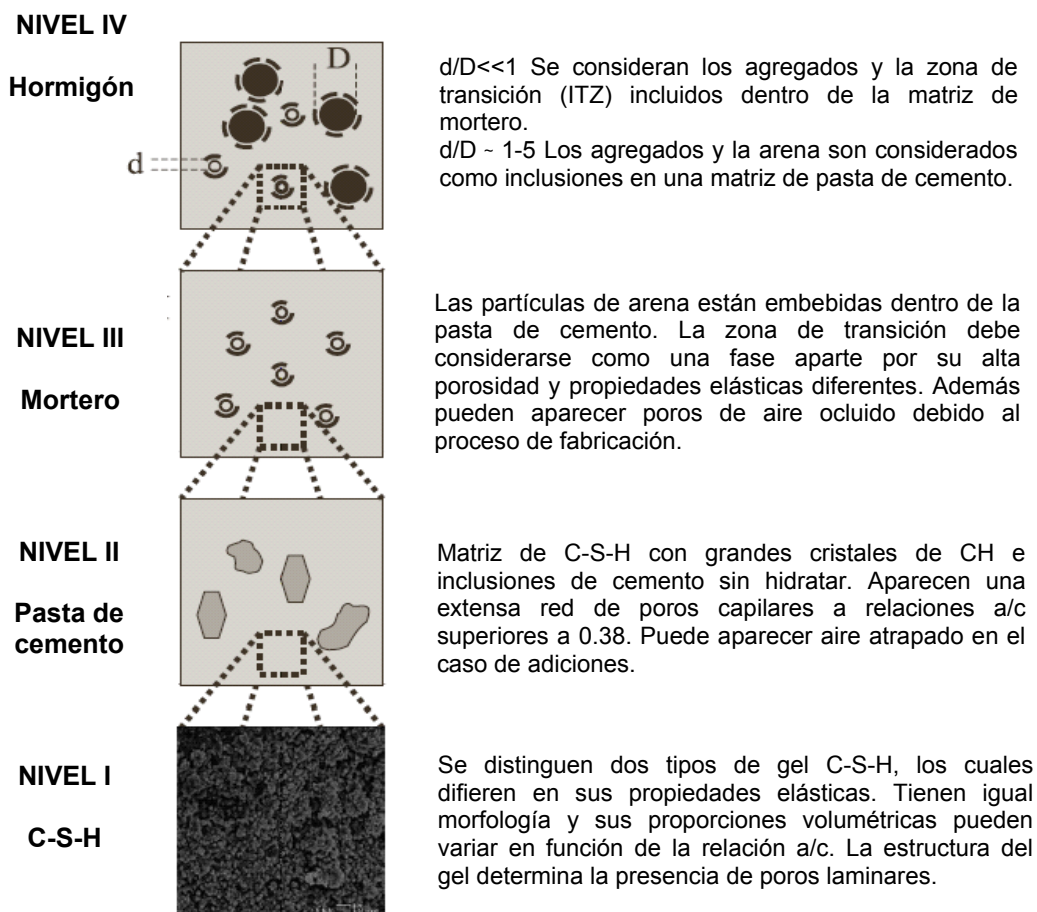


Figura 1.1. Microestructura de niveles en el hormigón.

NIVEL I: En este nivel se estudia la presencia del gel C-S-H en una escala de  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  m. Puede considerarse como el nivel más bajo accesible mediante ensayos mecánicos, habiéndose analizado las propiedades elásticas de los componentes individuales mediante nanoindentación ( $10^{-7}$ - $10^{-4}$  m) y microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM en inglés). Estos estudios han puesto de manifiesto la presencia de dos tipos de gel C-S-H los cuales difieren

en sus propiedades elásticas, además se ha comprobado que dichas propiedades son intrínsecas a la pasta de cemento, y probablemente aparezcan durante la hidratación. Los dos tipos de gel C-S-H son independientes de las proporciones de mezcla, las cuales afectan sólo a sus proporciones volumétricas. En este nivel aparecen los microporos o poros de gel con un tamaño inferior a 2 nm, los cuales están asociados con la estructura de capas del gel C-S-H.

NIVEL II: En este nivel encontramos la matriz de gel C-S-H junto con los cristales de portlandita de gran tamaño, los granos de cemento sin hidratar (clinker) y los poros capilares, con un tamaño del orden de las micras ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  m), el cual corresponde a la pasta de cemento. En este orden de magnitud las propiedades elásticas de la pasta se pueden estudiar tanto por ensayos destructivos como no destructivos, como por ejemplo los basados en la propagación de ondas ultrasónicas.

NIVEL III: Este nivel se refiere al mortero ( $10^{-3}$ - $10^{-1}$ m), como un material de tres fases, compuesto por matriz de pasta de cemento, inclusiones de arena y macroporos, cuyo tamaño es del orden de los milímetros. Además aparece una zona de transición (Interface Transition Zone, ITZ, en inglés) entre los agregados de arena y la pasta de cemento. En esta escala se han desarrollado y aplicado varios modelos micromecánicos analíticos y numéricos. La relevancia o no de estos modelos serán estudiados en profundidad en el capítulo siguiente.

**NIVEL IV:** En este nivel se considera al hormigón como un material homogéneo ( $10^{-1}$ - $10^1$ m). En esta escala se estudian las aplicaciones del hormigón a la ingeniería. Análogamente al mortero en el nivel III, se considera el hormigón como un material trifásico compuesto por agregados embebidos en una matriz de cemento con una zona de transición. La aplicación de un modelo de tres fases en este nivel que considere la zona de transición, requerirá información de las fracciones de volumen y de las propiedades elásticas de dicha zona.

### **1.2.1. Porosidad**

Dado que la estructura porosa de los materiales cementicios es la principal responsable del transporte de sustancias hacia el interior del material y de su degradación se le prestará una atención especial a lo largo de esta memoria. Los parámetros más importantes relacionados con dicha estructura son: la porosidad fundamental, (relacionada con los poros interconectados), y la distribución de tamaño de los poros.

El tamaño de los poros de la pasta de cemento abarca un rango de varios órdenes de magnitud, lo que permite clasificarlos según la tabla 1.2, en la cual se da una idea definitiva de la clasificación en cuanto a tamaño y del efecto de las categorías individuales en las propiedades del cemento.

<b>Tipos de poros.</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Características</b>	<b>Estado del agua en los poros</b>	<b>Propiedades influenciadas por el tamaño del poro</b>
Macroporos	1000-15 $\mu$ m	Huecos esféricos grandes	Tiene propiedades de fase sólida	Permeabilidad y resistencia
Poros Capilares	50-10 $\mu$ m	Capilares grandes	Tiene propiedades de fase sólida.	Permeabilidad y resistencia.
	15-0.05 $\mu$ m	Capilares de tamaño moderado. Huecos capilares. Poros entre partículas.	Moderada acción de tensión superficial.	Permeabilidad, resistencia y reducción a alta humedad.
Poros de Gel	10-2.5 nm.	Pequeños capilares de gel.	Intensa acción de la tensión superficial.	Reducción hasta el 50 % de humedad relativa.
	2.5-0.5 nm	Microporos, poros de gel, y poros entre los granos cristalinos.	Adsorción intensa, menisco no formado.	Reducción y deslizamiento.
	< 0.5 nm	Microporos "entre capas" (espacios entre capas). Poros en granos cristalinos.	Estructural	Reducción y deslizamiento.

*Tabla 1.2. Clasificación de la porosidad en el cemento endurecido [Modry, 73]*

El espacio del poro se define como el volumen no relleno con la fase sólida, el cual puede determinarse por alguno de los siguientes parámetros estructurales:

- Porosidad (en %) es la proporción del volumen total ocupada por los poros.
- Superficie específica interna, es el área o superficie accesible en una unidad de volumen o masa de una sustancia dada.

Las propiedades del espacio del poro dependen de las cantidades relativas de sus constituyentes, sus propiedades, homogeneización y compactación de la mezcla fresca depositada; como también de las condiciones y duración del curado.

La porosidad de los materiales cementicios está relacionada con los productos de hidratación. En la figura 1.2 se presenta una visión de los diferentes tamaños de poros y las técnicas de medidas utilizadas para su caracterización [Heukamp, 03].



Figura 1.2. Longitudes de escala de los diferentes tipos de porosidad en pastas y rango de trabajo de las técnicas de medida.

En la estructura de la pasta de cemento, debido a que en la hidratación se utiliza una cantidad de agua superior a la necesaria para hidratar totalmente el cemento, según [Taylor, 04] un 38%, encontramos una red de poros aislados e interconectados, los cuales son los responsables de los mecanismos de transporte de sustancias dentro de la estructura y del posterior deterioro de ésta.

### **1.3. Características físicas y químicas de la microestructura de los materiales cementicios en los diferentes niveles**

#### **1.3.1. Hidratación de cemento**

El proceso de hidratación constituye la base para la discusión de las características físicas y químicas de los materiales cementicios. Las partículas de cemento tienen un diámetro en el rango de los micrómetros, correspondiendo así a la escala de longitud del nivel II. La hidratación del cemento permite obtener productos microestructurales que se manifiestan en diferentes escalas de longitudes.

El componente básico del cemento es el clinker y está formado por una mezcla de cuatro componentes principales como se indica en la tabla 1.3. De todos los componentes principales, los silicatos suman entre el 60% al 80% y

son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento hidratado. En general, estos silicatos no se encuentran puros en el clínker sino conteniendo pequeñas cantidades de alúmina, magnesia y otros óxidos, por lo que a los silicatos y demás componentes se les suele llamar por su nombre mineralógico, alita, belita y celita.

Nombre	Composición	Peso molecular	Fórmula abreviada	Nombre del mineral
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	228	$\text{C}_3\text{S}$	Alita
Silicato bicálcico	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	172	$\text{C}_2\text{S}$	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	270	$\text{C}_3\text{A}$	--
Ferrito aluminato tetracálcico	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	486	$\text{C}_4\text{AF}$	Celita

Tabla 1.3. Componentes principales del clínker.

Estos cuatro componentes del clínker, reaccionan con el agua en un proceso llamado hidratación. A continuación se describirá brevemente la hidratación separada de los aluminatos y silicatos, pues ellos forman la parte más importante de la microestructura de la pasta de cemento.

### 1.3.1.1 Hidratación de los silicatos

Las propiedades de la pasta de cemento endurecida se obtienen como resultado de las reacciones químicas entre las distintas fases que forman el clínker de cemento y el agua [Richartz, 69]. Los silicatos cálcicos hidratados, también conocidos como gel C-S-H, se forman a partir de la hidratación de los silicatos cálcicos alita y belita ( $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ ), los cuales están en mayor

proporción en el cemento y generan los mismos productos de hidratación, aunque en distinta estequiometría. La diferencia en la hidratación de los dos silicatos esta motivada por la cinética de hidratación, marcadamente mayor en el caso del silicato tricálcico, generada por razones estructurales.

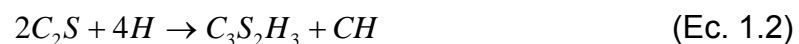
La hidratación de los las dos fases de silicatos es muy parecida y puede dividirse en tres estados:

- Disolución de los granos de clinker ( $C_3S$  y  $C_2S$ )
- Difusión de los iones formados en la solución intersticial
- Precipitación como punto de saturación para los diferentes hidratos.
- A medida que se produce la precipitación, la concentración de iones en la solución disminuye y se disuelve más clinker.

El silicato tricálcico reacciona rápidamente con el agua produciéndose tobermorita  $C_3S_2H_3$  y portlandita  $Ca(OH)_2$ , en forma simplificada  $CH$ , según la siguiente reacción:



El silicato bicálcico reacciona más lentamente según:



Para un mismo peso de silicatos reaccionantes se requiere casi la misma cantidad de agua, pero la cantidad de portlandita producida en la

muestra hidratada procedente del primer silicato viene a ser más del doble que la procedente del segundo.

Los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) ocupan entre el 50 y el 60 % del volumen de sólidos en una pasta de cemento completamente hidratada por lo que son los responsables de las propiedades resistentes y durables de los materiales cementicios. Este gel es una mezcla de partículas laminares pobremente cristalizadas, de variada morfología y composición química rodeado de un sistema más o menos continuo de poros que pueden estar parcial o totalmente llenos de agua. Los hidratos de silicato de calcio C-S-H, tienen un tamaño característico mucho menor y forman el nivel I de la microestructura.

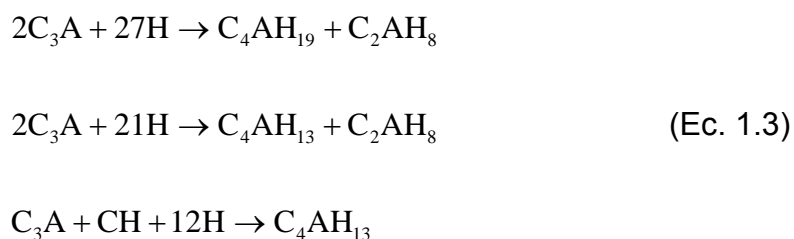
El hidróxido de calcio constituye entre el 20 y 25% del volumen de sólidos presentes en la pasta. A diferencia del gel C-S-H, el hidróxido cálcico es un compuesto con una estequiometría definida,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Además la presencia de una cantidad considerable de hidróxido cálcico tiene un efecto negativo en la durabilidad química a las soluciones ácidas debido a su alta solubilidad. El tamaño característico de la portlandita es de cientos de micrómetros y está situado en el nivel II de la estructura.

### **1.3.1.2 Hidratación de los aluminatos**

Aunque la cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  en un cemento es pequeña en comparación con los silicatos, su comportamiento y relación con las otras fases del cemento

es de gran interés. La reacción del  $C_3A$  con el agua es muy rápida debido al gran poder de disolución del mismo dando lugar a un endurecimiento rápido en la pasta, la cual tiene lugar en las primeras horas de la hidratación. El aluminato hidratado forma un material intersticial, posiblemente con otras sustancias en solución coloidal, que rodean a los silicatos hidratados.

La hidratación de aluminato tricálcico conduce a la formación de aluminatos cálcicos llamados fases AFm, en este rápido proceso de hidratación suceden las siguientes reacciones [Taylor, 04]:



En adición a estas fases se forma etringita, en cristales largos aciculares, (AFt en la notación de [Taylor, 04]), en presencia de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y agua.



Una vez que los iones sulfato se consumen, la etringita se convierte en una fase AFm según la siguiente reacción.



La hidratación de los ferroaluminatos,  $C_4AF$ , es muy similar a la hidratación de los aluminatos aunque se produce más lentamente. Las reacciones 1.3 pueden escribirse análogamente para los ferroaluminatos, originando simultáneamente ferritos y aluminatos cálcicos hidratados. El tamaño final de los productos de la hidratación del aluminio está en el rango de los  $10^{-6}m$ , localizado en el nivel II de la microestructura de niveles.

Los compuestos de sulfoaluminatos cálcicos ocupan entre el 15 y 20% del volumen de sólidos de la pasta hidratada y por lo tanto juegan un papel minoritario en las relaciones microestructura - propiedades.

### 1.3.2. Nivel I: Matriz C-S-H

El nivel I de un material cementicio, según la microestructura de niveles presentada anteriormente, se refiere a la matriz del gel C-S-H y a la porosidad intrínseca de éste. El gel C-S-H es la fase microestructural más pequeña ( $10^{-9}m$  a  $10^{-7}m$ ) y el producto de hidratación más importante. La composición del gel C-S-H es variable, esta es la razón de su notación (separada por guiones), y depende fundamentalmente de la composición del cemento.

Un método habitual de caracterizar las diferencias en composición en el C-S-H es determinar la relación en masa calcio/sílice, C/S. Esta relación puede variar generalmente entre 0.7 y 2.3. Para un cemento Pórtland de uso común (OPC en inglés) esta relación varía entre 1.2 y 2.3 con un valor habitual de

1.75. El gel está pobremente cristalizado, aunque existe una microestructura organizada en la escala de los nanómetros. La densidad de C-S-H varía entre 2300 y 2600 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de su composición exacta. La apariencia de C-S-H en el microscopio varía considerablemente dependiendo del momento de observación durante la reacción de hidratación y la composición del cemento. Pueden identificarse diferentes tipos de C-S-H (desde I hasta IV) con respecto a su morfología mediante microscopía electrónica de barrido [Taylor, 04]. En la bibliografía de esta temática encontramos que algunos autores han sugerido que minerales naturales tales como Tobermorita y Jenita [Mehta, 93] tienen una estructura análoga al C-S-H, sin embargo en trabajos más recientes [Richardson, 99], [Jennings, 00] se ha puesto de manifiesto que estas analogías son incompletas y quizá erróneas.

Entre el C-S-H, se ha propuesto diferentes modos para distinguir estos productos, de acuerdo a su localización en la hidratación o densidad: [Tennis, 00], [Constantinides, 04]:

- Productos externos o C-S-H de baja densidad, los cuales son los primeros productos de hidratación que se forman en el exterior del grano de clinker.
- Productos internos o C-S-H de alta densidad, los cuales se forman en el interior de las fases del clinker con el progreso de la hidratación.

Analizaremos ahora los dos tipos de C-S-H desde un punto de vista mecánico. Siguiendo el planteamiento de [Constantinides, 04], éstos pueden denominarse como C-S-H $_{\alpha}$  y C-S-H $_{\beta}$  y tienen diferentes propiedades físicas. La densidad del C-S-H $_{\alpha}$  es aproximadamente 1910 kg/m $^3$  mientras que para el C-S-H $_{\beta}$  es 2100 kg/m $^3$ . Además recientemente las propiedades elásticas del C-S-H han sido medidas mediante ensayos de nanoindentación por [Acker, 01] y [Constantinides, 04]. Este método de ensayo permite la medida de las propiedades elásticas en una escala de longitud de 10 $^{-7}$  m, y por lo tanto pueden utilizarse para medir las propiedades del nivel I.

### Nanoindentador

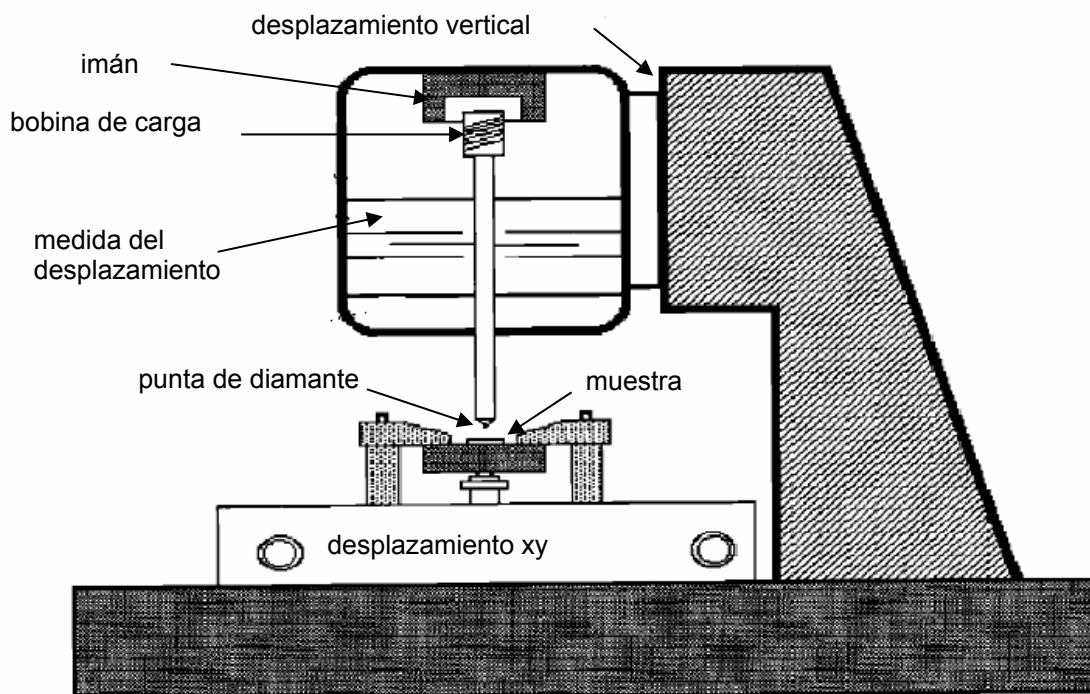


Figura 1.3. Representación esquemática de un equipo de nanoindentación.

La figura 1.3 muestra esquemáticamente el experimento de nanoindentación, el cual exponemos por la relevancia que brindan sus resultados para los materiales cementicios.

Para el ensayo se toman muestras de 10-15 mm de espesor y se pulen, por ejemplo, con partículas de diamante, para obtener una superficie lisa. Después del pulido las muestras se introducen en un baño ultrasónico para eliminar el polvo y las partículas de diamante que pudieran quedar en la superficie o en la estructura porosa. Por la acción de la bobina y el imán, el indentador con punta de diamante se introduce en la muestra que ha de estar firmemente sujeta, grabándose los resultados de fuerza (P) y penetración (h). El valor del desplazamiento del indentador (profundidad de penetración en la muestra) se controla mediante el cambio de la capacitancia de un condensador. Los valores de la carga abarcan el rango de 0 a 20N, y para el desplazamiento de 0 a 50mm con una resolución de 100nN y 0,04nm respectivamente. La distancia entre puntos de indentación ha de escogerse de tal forma que no se produzcan superposiciones.

En la figura 1.4 se muestra una curva típica P-h. A partir de la curva P-h puede extraerse el módulo de elasticidad (E) de las dos fases de C-S-H ( $C-S-H_{\alpha}$  y  $C-S-H_{\beta}$ ).

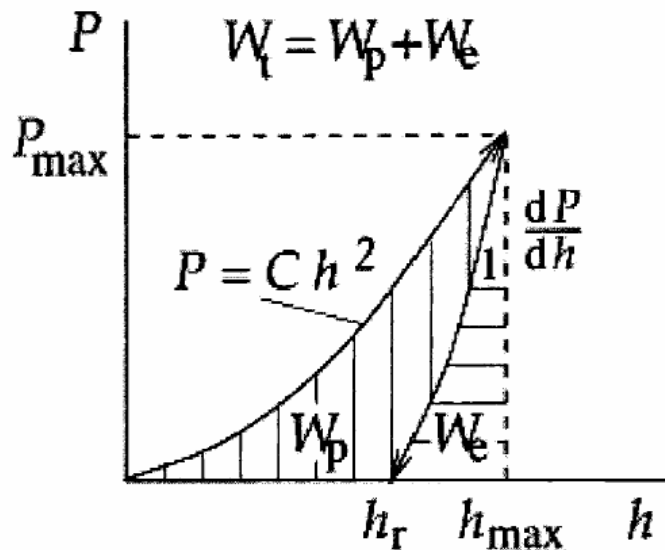


Figura 1.4. Curva P-h resultante del ensayo de nanoindentación.

Los resultados obtenidos por [Constantinides, 04] se exponen en la tabla 1.4, y muestra las diferencias en el módulo elástico de los dos tipos de gel. Se constata que el gel C-S-H de baja densidad es el material más blando.

Fases	Módulo elástico (GPa)
CH	$38 \pm 5$
C-S-H $_{\alpha}$	$21.7 \pm 2.2$
C-S-H $_{\beta}$	$29.4 \pm 2.4$

Tabla 1.4. Propiedades elásticas obtenidas mediante nanoindentación [Constantinides, 04]

Ensayos paralelos de Acker [Acker, 01] en diferentes materiales cementicios han dado resultados similares y sugieren que el módulo de Young es intrínseco para el C-S-H. Esta afirmación necesita ser corroborada, pero queda fuera del alcance de ésta investigación

La distribución de volumen entre los dos tipos de C-S-H depende de cómo se produzca la mezcla. La fase C-S-H<sub>α</sub> se forma en primer lugar, cuando el agua entra en contacto con el clinker, y cuando el agua se difunde en los granos de clinker es cuando comienza la formación de la fase C-S-H<sub>β</sub>. Es decir, el C-S-H de alta densidad se forma más tarde y si el agua disponible durante la hidratación se consume muy rápidamente (fundamentalmente en el caso de materiales basados en baja relación agua/cemento), es probable que se forme poco C-S-H<sub>β</sub>.

La composición puede predecirse mediante modelos de hidratación [Bernard, 03], utilizando como base mezclas de agua cemento.

Igualmente puede medirse la microdureza del C-S-H, pero aún no se ha establecido la correlación existente entre dureza y composición. Normalmente en el ensayo de nanoindentación sólo se evalúan las propiedades elásticas.

Una propiedad importante del C-S-H es la capacidad de producir sustituciones isomórficas, átomos de Si y Ca cambian por otros átomos tales como Al, Fe, y Sr, el nuevo C-S-H formado tiene diferentes grados de impurezas, pero su configuración puede ser químicamente más estable que la configuración original. Este hecho es de gran importancia en el lixiviado del calcio [Faucon, 98], el lixiviado del calcio en materiales cementicios conduce a un equilibrio químico en el cual algo de calcio permanece.

En el nivel de la matriz C-S-H aparece la mayor parte de la porosidad de los materiales cementicios, microporos o poros de gel, cuyo tamaño es inferior

a 2nm y se localizan entre las capas del gel. Estos poros no son accesibles por observación visual directa, por lo que se han propuesto diferentes modelos para explicar las observaciones experimentales indirectas realizadas a través de técnicas como la medida de absorción de nitrógeno.

El modelo de Powers y Brownyard [Brouwers, 04 a y b] predice un 28% de porosidad y un espacio entre capas de C-S-H de 1,8 nm. Este valor de porosidad es característico para cemento Pórtland e independiente de la relación agua/cemento de la mezcla y del grado de hidratación. Otros modelos como por ejemplo el de Feldman y Sereda [Feldman, 68] asumen espacios entre capas de 0.5 y 2.5nm.

Los modelos que distinguen entre dos tipos de C-S-H, predicen diferentes porosidades individuales pero la misma porosidad media [Tennis, 00]. Estos pequeños poros forman una zona de difícil adsorción y son importantes para los cambios dimensionales de la matriz C-S-H. El agua en los microporos está químicamente unida a la superficie, de forma que para las propiedades de transporte, estos poros no son particularmente perjudiciales, a pesar del gran volumen total.

Debido al tamaño de estos poros, cuya dimensión es del mismo orden que la molécula de agua, se considera que éstos no influyen negativamente en la resistencia mecánica de los materiales base cemento.

### **1.3.3. Nivel II. Pasta de cemento.**

Las fases que forman el nivel II son, junto con la matriz homogénea de C-S-H, la Portlandita (CH), los aluminatos, el clinker no hidratado y la porosidad capilar.

#### **Hidróxido de calcio (CH)**

Generalmente el hidróxido de calcio o portlandita forma un 20-25% de los productos de hidratación en volumen, como se ha mencionado anteriormente. La estequiometría de la portlandita está bien definida y generalmente forma cristales hexagonales. El tamaño de estos cristales es generalmente de varios cientos de micras cuando los cristales pueden crecer dentro del espacio vacío, lo cual es lo habitual. La excepción se presenta cuando la portlandita queda atrapada en el gel C-S-H (nivel I e inferior) cuyos cristales son más pequeños. La densidad de la portlandita es 2240 kg/m<sup>3</sup>.

El módulo de Young de la portlandita es relativamente fácil de medir pues los cristales pueden aumentar de tamaño. El valor que se presenta para este parámetro en la bibliografía existente puede variar entre 35 y 40 GPa [Heukamp, 03]. La influencia de la portlandita en la resistencia de los materiales cementicios es generalmente considerada más perjudicial que beneficiosa debido a la heterogeneidad creada en la matriz de C-S-H. Los cristales hexagonales tienden a tener fallos de hendidura, por lo que pueden inducir a la fractura mecánica debido a la concentración de esfuerzos. Por esta razón, en casos donde la optimización de la resistencia es importante, se han buscado

productos de hidratación libres de portlandita. Esto puede conseguirse con mezclas tales como el humo de sílice, en la cual se consume la portlandita durante la reacción.



Hormigones actuales de altas prestaciones utilizan esta técnica. Para las propiedades elásticas, la presencia de cristales de portlandita es beneficiosa debido al alto módulo de Young [Constantinides, 04], [Taylor, 04].

### **Aluminatos**

Los aluminatos se forman durante la hidratación del cemento muy rápidamente. Son los responsables del endurecimiento inicial de la pasta, lo que es importante para la trabajabilidad de la misma. La etringita forma cristales finos y alargados con una longitud del orden de micrómetros y una densidad de 1750 kg/m<sup>3</sup>. Los aluminatos de calcio forman cristales planos de forma hexagonal en el rango de los micrómetros con una densidad comprendida en el intervalo 1950-2020 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de la estequiometría del producto formado. Para las fases de aluminio hay muy poca información acerca de las propiedades elásticas y la resistencia, fundamentalmente porque estos valores son pequeños. Generalmente para la resistencia final de la pasta se consideran poco importantes.

### **Clinker no hidratado**

Dependiendo de la distribución de tamaños de partícula del cemento y del grado de hidratación, se pueden encontrar granos de clinker sin hidratar en la microestructura, aún mucho tiempo después de la hidratación. Esto es una consecuencia del rango de tamaños que presenta el clinker generalmente (entre 1 y 50  $\mu\text{m}$ ). Al comenzar la hidratación las partículas más pequeñas son las primeras en disolverse completamente y como los productos de hidratación tienden a cristalizar en la vecindad de las partículas hidratadas, las partículas de mayor tamaño disponen de poco espacio para su hidratación. Esto sucede cuando la relación agua/cemento está por debajo de 0.38. Algunos hormigones pueden llegar a tener una relación agua/cemento inferior a 0.2 o 0.25, por lo que puede encontrarse una considerable cantidad de clinker no hidratado en el nivel II de la microestructura.

Los granos de clinker tienen un diámetro en el rango de los micrómetros y un módulo de Young extremadamente alto. En [Heukamp, 03] se recogen valores, resultantes de medidas de indentación, que varían entre 125 GPa y 160 GPa dependiendo del tipo de clinker.

En el nivel II están presentes una segunda clase de poros. Estos poros se denominan normalmente como poros capilares y su tamaño característico está en el rango de las micras. Los poros capilares se crean de dos formas diferentes. La primera forma es la disminución de los productos de hidratación cuando el agua es incorporada en los productos de hidratación por medios

químicos. El agua que se encuentra químicamente unida tiene una densidad de hasta  $1250 \text{ kg/m}^3$ . El espacio que se libera en el transcurso de la hidratación se densifica gradualmente, en un proceso también llamado encogimiento químico, y se transforma en poros del tamaño de las micras.

La segunda forma de crear los poros capilares es el agua sobrante del proceso de hidratación. A una relación agua/cemento superior a 0.38, el gel de los productos de hidratación no rellena el volumen libre en la pasta endurecida y hay siempre un volumen definido de poros capilares aún en el caso de hidratación total del cemento

Los poros capilares inciden en mayor o menor medida en todos los fenómenos de transporte, debido a la existencia de fuerzas capilares y de tensión superficial que aceleran determinados procesos, y que es a su vez por donde penetran los agentes agresivos externos. Estos poros representan las  $\frac{3}{4}$  partes de la porosidad global del material. Esta clase de poros es perjudicial tanto para la rigidez como para la resistencia de las pastas de cemento. La dependencia de la resistencia de las pastas con la relación agua/cemento tiene su origen en la diferencia de porosidad capilar correspondiente.

La tabla 1.5 resume los valores medidos del módulo de elasticidad de los componentes del clinker mediante ensayos de nanoindentación (Tomado de [Heukamp, 03]).

<b>Elementos</b>	<b>E (GPa)</b>	<b>v</b>
C <sub>3</sub> S-Clinker	135±7	0.3
	147±5	0.3
C <sub>2</sub> S-Clinker	140±10	0.3
	130±20	0.3
C <sub>3</sub> A-Clinker	160±10	
	145±10	
C <sub>4</sub> AF-Clinker	125±25	
CH	35.4	
	48	
	39.77±44.22	0.305÷0.325
	36±3	
	38±5	

*Tabla 1.5. Medidas de las propiedades elásticas el clinker de cemento y portlandita.*

### **Propiedades mecánicas de la pasta de cemento como un material compuesto**

Los diferentes elementos de la microestructura, ya descritos, junto con los poros, forman la pasta de cemento. El comportamiento mecánico de un material compuesto de este tipo, es bien conocido porque puede probarse en muestras más grandes. Las propiedades de la pasta de cemento dependen fundamentalmente de la cantidad de cada constituyente. El parámetro más importante es la relación agua/cemento, considerándose normalmente materiales con una relación agua/cemento superior a 0,38 por lo que todas las fases de clinker se consumen en la reacción de hidratación. Para una pasta con una relación agua/cemento de 0,5 Constantinides [Constantinides, 04]

determinó las propiedades elásticas de los niveles II y III para material sano y degradado con diferentes métodos de ensayos (destructivos y no destructivos), ver tabla 1.6.

<b>Módulo (GPa)</b>	<b>Nivel II</b>	<b>Nivel II deg</b>	<b>Nivel III</b>	<b>Nivel III deg</b>
Módulo del pulso	22,8±0,5	3,6±0,2	26,5±1,8	5,3±0,1
Módulo dinámico	21,7±0,1	3,2±0,1	25,2±0,1	4,9±0,1
Módulo estático	18,6±0,6	0,7±0,2	21,6±0,4	0,5±0,1

*Tabla 1.6. Módulo de elasticidad para pasta de cemento (nivel II) y mortero (nivel III) con relación w/c=0,5 obtenido por diferentes métodos.*

En la tabla anterior, el módulo del pulso se refiere el módulo elástico determinado a partir de la velocidad del pulso ultrasónico, mientras que el módulo dinámico hace referencia al módulo que se obtiene a partir de la frecuencia de resonancia del material. Se puede apreciar como los métodos no destructivos (velocidad ultrasónica y frecuencia de resonancia) muestran resultados muy similares. Además se constata una fuerte reducción de propiedades en el material degradado

Un típico valor para el módulo de Young de la pasta de cemento es del orden de 20GPa. La resistencia de la pasta de cemento se mide normalmente mediante ensayos de compresión uniaxial. La resistencia a compresión para una pasta estándar (relación agua/cemento = 0.5) es de 50MPa [Neville, 00]. La resistencia a tracción de la pasta de cemento es normalmente más baja. Generalmente como regla empírica el 10%, la tensión alcanzada es el 10% de la carga de compresión.

#### **1.3.4. Nivel III: Mortero/hormigón**

Desde el punto de vista composicional, la diferencia entre la pasta de cemento (nivel II) y el mortero u hormigón, que aquí analizaremos como un solo nivel, (nivel III) es la presencia de agregados. Los agregados se dividen en función de su tamaño para mejorar la compactación. Dependiendo de la mezcla y uso, el rango de diámetros puede variar entre 0.1mm y 10 cm.

Al añadir agregados a la pasta de cemento aumenta la rigidez del material dado el alto módulo de Young de los agregados. En la tabla 1.6 pueden verse las medidas hechas por Constantinides [Constantinides, 04] del módulo de Young en un mortero con una relación agua /cemento de 0.5.

La resistencia, sin embargo no aumenta necesariamente. Esto es debido a que la interfase que se crea entre los agregados y la pasta influye en el comportamiento global de morteros y hormigones.

Con la adición de los agregados aparece una nueva característica en el material, la zona de interfase entre agregados y la pasta de cemento. La zona de interfase se conoce también como zona de transición (ITZ) y se caracteriza por un cambio gradual de la composición del conjunto. Normalmente la zona de transición tiene una porosidad más alta que la pasta de cemento, y una mayor concentración de Portlandita y Etringita.

Se han propuesto varias explicaciones para justificar este hecho:

- Un aumento de la relación agua/cemento cerca de los agregados produce un aumento de Portlandita y Etringita [Mehta, 93].
- El llamado efecto pared produce una zona de mayor porosidad y favorece la presencia de mayor cantidad de Portlandita y Etringita [Mehta, 93]
- La propiedad del gel de contraerse, provoca que se expulse el líquido interlaminar mientras que el volumen total del sistema permanece constante [Heukamp, 03].

Algunos autores, han identificado una delgada capa adyacente a los agregados como una doble capa de Portlandita y C-S-H [Barnes, 79]. Por el contrario su existencia es rebatida por otros autores que no verifican este hecho [Heukamp, 03]. Generalmente se acepta que la zona de transición reduce la resistencia de los materiales cementicios. Sin embargo no existen modelos concisos que puedan cuantificar esta reducción. Esto es debido a la falta de buenas metodologías de medidas de las propiedades mecánicas de la zona de transición.

Los hormigones de alta resistencia (High Performance Concrete, HPC, en inglés) no tienen Portlandita debido a la reacción puzolánica, por lo cual no sufren los efectos perjudiciales de la zona de transición. La ausencia de Portlandita lleva a que la pasta de cemento sea homogénea alrededor de los agregados y a que su resistencia sea mucho más alta que la de los hormigones

habituales. Normalmente el fallo de este tipo de hormigones ocurre por la rotura de los agregados.

La resistencia a compresión uniaxial de un mortero de baja calidad está en torno a los 35 MPa, que es considerablemente más baja que la de la pasta, lo que pone de manifiesto el papel de la zona de transición en la resistencia del material cementicio. Dada las razones planteadas, la caracterización de esta zona de interfase queda fuera del alcance de ésta investigación.

Los poros del nivel III son llamados macroporos. Su tamaño es del orden de los milímetros y suelen aparecer involuntariamente por una pobre compactación durante el proceso de fabricación.

No obstante, se pueden potenciar la formación de éstos poros de forma intencional por agentes anticongelantes, con el objetivo de aumentar la resistencia a los ciclos hielo-deshielo. Los macroporos son perjudiciales para las propiedades mecánicas de morteros y hormigones. Actúan como caminos preferentes para todos los fenómenos de transporte aunque no suelen aparecer interconectados

#### **1.4. Hormigones reforzados con fibras**

La utilización de los materiales compuestos en el diseño de estructuras se ha visto incrementada notablemente en los últimos años. Esta tendencia se debe al hecho de que estos materiales poseen características especiales y sus cualidades resultan totalmente distintas a las de los materiales simples e isótropos utilizados normalmente con fin estructural.

En aplicaciones estructurales es necesario combinar distintos materiales básicos para obtener materiales compuestos cuyas propiedades y cualidades mecánicas son superiores a las de sus constituyentes. Entre los componentes más utilizados están las partículas y las fibras. En el primero de los casos las partículas de un material o materiales específicos están adheridas entre sí mediante una matriz continua con bajo módulo de elasticidad. En los compuestos con fibras, éstas constituyen el refuerzo y pueden orientarse en la dirección que sea necesaria para proporcionar la mayor resistencia y rigidez global posibles.

Algunos de los fallos que presenta el hormigón tradicional pueden reducirse de forma notable incorporando, junto con los componentes del mismo fibras cortas que amasadas con el hormigón se dispersen dando lugar a una distribución discreta y uniforme de las mismas, que tiende a crear un material más homogéneo, mejorando sus características mecánicas. La matriz, por su parte mantiene el material unido dando resistencia a compresión y rigidez, distribuyendo los esfuerzos y protegiendo las fibras.

Las fibras actualmente empleadas en la fabricación de morteros y hormigones pueden ser minerales, orgánicas, y metálicas, proporcionando cada una de ellas diferentes características a estos materiales.

Las fibras metálicas normalmente utilizadas son de acero por ser éstas las más eficaces y económicas, y por poseer un módulo de elasticidad diez veces superior al del hormigón. Estas fibras presentan una buena adherencia a la pasta, tienen alto alargamiento de rotura, confieren al hormigón una resistencia postfisuración muy elevada y son fáciles de mezclar. Sin embargo al ser rígidas y con una geometría muy diferente a la de los áridos pueden reducir la docilidad de la mezcla pudiendo dar hormigones difíciles de trabajar cuando la dosificación de fibras sobrepasa el 2% en volumen del hormigón o el 4% del mortero. Un aumento en la proporción de fibras puede dar lugar a la formación de bolas de fibra o “erizos”. El diámetro de las fibras de acero oscila entre 0.25 mm y 0.75 mm, siendo muy utilizadas las de 0.50 mm de diámetro y 50 mm de longitud. Su relación de aspecto varía entre 30 y 150.

Fibras de polipropileno: El bajo módulo de elasticidad del polipropileno da lugar a que la resistencia a flexión del hormigón no aumente de forma sustancial y a que las deformaciones postfisuración del mismo sean elevadas. Pero estas fibras poseen las ventajas de no ser atacadas por los álcalis y de no corroerse; sin embargo, sus inconvenientes principales radican en su bajo módulo de elasticidad que las hace muy deformables y en la pobre adherencia que presentan con el hormigón, especialmente cuando se emplean en forma de

filamentos. Recientemente, se ha mejorado la adherencia mediante la utilización de fibras multifilamentos.

Fibras de vidrio: Las fibras de vidrio se han presentado siempre como un buen material de refuerzo en pastas y morteros debido a las ventajas que poseen, entre las que hay que destacar su alta resistencia a tracción y su aceptable módulo de elasticidad, pero frente a estas ventajas tiene el grave inconveniente de ser atacadas por los álcalis de los cementos portland. Aunque este inconveniente se ha solucionado debido a los avances en la protección del vidrio frente a los álcalis. Los diámetros de las fibras de vidrio oscilan entre 0.005 mm y 0.015 mm, pero se emplean formando trenzas de 0.015 mm a 1.5 m.

Hormigones preimpregnados con polímeros: El exceso de agua en el hormigón se pierde por evaporación dando lugar a la formación de poros capilares en su masa, en tanto mayor volumen cuanto mayor haya sido el exceso de agua empleada en el amasado. Con el empleo de polímeros se logra incrementar de una forma notable tanto las resistencias mecánicas como la durabilidad de los hormigones y morteros, al introducir en su red, mediante un proceso de impregnación, un monómero que posteriormente se hace polimerizar.

Productos procedentes del reciclado: Además de las ventajas medioambientales y económicas asociadas a la utilización de residuos, en algunos casos de costosa eliminación, los materiales resultantes presentan

características, como el menor peso específico, que, a pesar de la reducción en las prestaciones mecánicas, les confieren un cierto grado de interés en determinadas aplicaciones, y en el caso de materiales derivados del cemento, se justifica por los grandes volúmenes utilizados y por la diversidad de prestaciones exigidas a los mismos.

Hormigones con poliestireno expandido reciclado: Forman mezclas frágiles pero de gran resistencia mecánica.

Hormigones con reciclado de caucho: presenta gran ductilidad y un buen comportamiento frente al impacto aunque sufre deformaciones por retracción. Algunos estudios [Canovas, 02] han demostrado que al aumentar la temperatura aparece un cambio de color debido a que el caucho se convierte en grafito, aunque el efecto sobre su resistencia no varía respecto al del hormigón sin inclusiones de caucho

La principal dificultad que se encuentra en el momento de diseñar estructuras con materiales compuestos es la falta de modelos, pues las técnicas analíticas convencionales utilizadas para el estudio de materiales tradicionales no resultan adecuadas para el análisis de materiales compuestos. Hay también ciertas incertidumbres sobre la durabilidad y el envejecimiento de estos materiales que hace necesario más estudios que garanticen la integridad de los mismos al cabo de un largo período de utilización. Tampoco ha resultado del todo satisfactoria la representación de un compuesto mediante un único material ortótropo con propiedades del conjunto, sobre todo cuando el

comportamiento de al menos uno de sus componentes ha superado el límite de elasticidad.

En cuanto a las propiedades elásticas, una idea muy aproximada de la influencia de las fibras se desprende de la ecuación:

$$E_c = E_f v_f + E_m v_m \quad (\text{Ec 1.7})$$

En la que  $E_c$ ,  $E_f$ , y  $E_m$  son respectivamente los módulos de elasticidad del hormigón compuesto, de las fibras, y de la matriz, siendo  $v_f$  y  $v_m$  las fracciones volumétricas de la matriz y de las fibras. Esta ecuación es estrictamente válida para mezclas continuas y comportamiento elástico de los componentes y no existencia de deslizamiento entre fibras y hormigón. Dado que las fibras tienen longitud finita puede existir alguna microfisura antes de que se alcance el límite elástico como consecuencia de algún fallo de adherencia en las fibras; por tanto, la anterior ecuación es únicamente una solución límite para el módulo de elasticidad del hormigón reforzado con fibras.

En este trabajo se presentará como ejemplo el caso de un material compuesto formado por una matriz de mortero y fibras de acero de distintas relaciones de aspecto y se estudiará su influencia en la velocidad ultrasónica.

## **CAPÍTULO 2**

# **MODELOS CONSTITUTIVOS APLICADOS A MATERIALES MULTIFÁSICOS**

*En este capítulo se revisan las bases de los modelos de homogenización clásicos, los cuales conducen a la predicción del comportamiento global de materiales heterogéneos a partir de las propiedades microestructurales de sus fases constituyentes.*

### **2.1. Introducción**

Se llama modelo constitutivo a una formulación matemática capaz de describir el funcionamiento físico macroscópico de un “sólido ideal”, que resulta

después de aplicar hipótesis simplificadas sobre un “sólido real”. De aquí que la formulación de los modelos constitutivos sólo represente una “realidad condicionada” por ciertas hipótesis simplificadas y por lo tanto su utilización debe realizarse consecuentemente con ellas. Debido a esto existen innumerables modelos constitutivos y actualmente se sigue trabajando en la formulación de otros nuevos, cuyo objetivo es conseguir una formulación suficiente y acorde con el problema que se quiere resolver, ya que no es trivial obtener una formulación única que permita alcanzar la solución general para “todos los problemas”.

Los modelos constitutivos que se han formulado para el tratamiento lineal de los materiales cementicios están basados en la elasticidad lineal. Estos modelos permiten obtener muy buenos resultados sin que en ningún caso se esté representando la verdadera física microestructural que se desarrolla en el material. Los modelos basados en la elasticidad lineal son simples y se fundamentan en la Ley de Hooke.

## **2.2. Ley de Hooke, constantes elásticas**

En física, la **ley de elasticidad de Hooke** o **ley de Hooke**, originalmente formulada para casos de alargamiento longitudinal, establece que la deformación  $\varepsilon$  de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza

aplicada. Pero en la mecánica de sólidos deformables elásticos la distribución de tensiones es mucho más complicada que en un resorte o una barra estirada sólo según su eje. La deformación en el caso más general necesita ser descrita mediante un tensor de deformaciones ( $\epsilon_{kl}$ ) mientras que los esfuerzos internos en el material necesitan ser representados por un tensor de tensiones ( $\sigma_{ij}$ ). Estos dos tensores están relacionados por ecuaciones lineales conocidas como **ecuaciones de Hooke generalizadas** o **ecuaciones de Lamé-Hooke**, que son las ecuaciones constitutivas que caracterizan el comportamiento de un sólido elástico lineal. Estas ecuaciones tienen la forma general:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde  $C_{ijkl}$  es el tensor de constantes elásticas.  $C_{ijkl}$  es un tensor 4<sup>to</sup> orden y tiene 81 componentes independientes en su forma más general. Dada la simetría del tensor de tensión y de deformación se debe cumplir que  $C_{ijkl} = C_{jikl}$  lo cual reduce a 36 las componentes independientes del tensor.

Además existe otra simetría, debida a la igualdad entre derivadas parciales cruzadas, con lo cual se cumple:  $C_{ijkl} = C_{klij}$  y esto reduce a 21 las componentes independientes. Dicho tensor puede seguir experimentando reducciones si tenemos en cuenta las propiedades de simetría del material.

En el caso de un problema unidimensional,  $\sigma = \sigma_{11}$ ,  $\epsilon = \epsilon_{11}$ ,  $C_{11} = E$ , de forma que la ecuación anterior se simplifica quedando como:

$$\sigma = E \epsilon \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young.

### 2.2.1. Tensor de deformaciones

El **tensor deformación** o **tensor de deformaciones** es un tensor simétrico usado en mecánica de medios continuos y mecánica de sólidos deformables para caracterizar el cambio de forma y volumen de un cuerpo. En tres dimensiones un **tensor (de rango dos) de deformación** tiene la forma general:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$u_{i,j}$  representa los desplazamientos de los puntos del cuerpo.

Cada una de las componentes del anterior tensor es una función cuyo dominio es el conjunto de puntos del cuerpo sobre el que pretende caracterizarse la deformación. Las componentes  $\varepsilon_{ij}$  en general varían de punto a punto del cuerpo y por tanto la deformación en cuerpos tridimensionales se representa por un campo tensorial.

El tensor de deformaciones, como resultado de su propia definición, es un tensor simétrico lo que significa que cumple la condición de diagonalización,  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ . Expresado matemáticamente tiene 9 componentes y físicamente 6, pues hay una redundancia física al corresponder los valores “espejo” a la misma deformación. Las componentes diagonales producen deformaciones longitudinales mientras que las componentes no diagonales producen deformaciones de cizalladura.

Al tratarse, el tensor de deformaciones, de un tensor simétrico, resultará más conveniente trabajar con notación reducida, donde las tres primeras componentes corresponden a las deformaciones longitudinales, mientras que las tres restantes corresponden a las posibles deformaciones por cizalladura.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{11}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{22}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{33}, \quad \varepsilon_4 = \varepsilon_{23}, \quad \varepsilon_5 = \varepsilon_{13}, \quad \varepsilon_6 = \varepsilon_{12},$$

### **2.2.2. Tensor de tensiones**

En mecánica de medios continuos, el **tensor de tensiones** es el tensor que da cuenta de la distribución de tensiones y esfuerzos internos en un medio continuo.

Es posible definir el tensor de tensiones con 9 componentes, muy similar en forma al tensor de deformación, y expresado matricialmente como:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

El tensor de tensiones al igual que el tensor de deformaciones es simétrico, y su demostración se debe a que los componentes  $i \neq j$  involucrados producen un torque en el cubo, de forma que para que se de una condición de equilibrio y el cuerpo no rote indefinidamente por si solo, se hace necesaria la simetría. Nuevamente las componentes diagonales describen los esfuerzos longitudinales y las componentes no diagonales los esfuerzos transversales o de cizalladura. Como ya se comentó para el tensor deformación, conviene trabajar con la notación reducida.

### 2.2.3. Ecuación de onda y velocidad

Si definimos una onda mecánica como “la propagación de una deformación en un cuerpo elástico, es decir en un cuerpo deformable”, los ultrasonidos son un caso particular de ondas mecánicas. De esta forma se puede considerar que un cuerpo deformable esta compuesto por pequeñas partes que se mueven dentro de él. Utilizando la segunda ley de Newton sobre elementos diferenciales de volumen, donde las fuerzas estarán dadas a través de las tensiones de los elementos vecinos, y sustituyendo la ley de Hooke en la ecuación de movimiento de la partícula:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

obtenemos la ecuación de onda llamada ecuación vectorial de Lamé:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \vec{\nabla} (\vec{\nabla}_i \vec{u}) - \mu \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{u} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde  $\rho$  es la densidad del material, que se supone constante.

Esta ecuación contiene físicamente todas las posibles ondas que pueden producirse en un cuerpo sólido. Su resolución [Landau, 69] queda fuera del alcance de esta memoria.

Los casos particulares de ondas mecánicas que pueden existir se expondrán en el capítulo 4 dedicado a la medida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas.

### **2.3. Los materiales cementicios como materiales multifásicos**

Los materiales cementicios son un ejemplo clásico de material heterogéneo, poroso y dinámico. A partir de la microestructura de niveles, expuesta en el capítulo 1, se puede comprender que la modelización de estos materiales no es un problema trivial, pues el número de variables a considerar es elevado. El problema de la transición desde la microescala a la macroescala

para la predicción del comportamiento mecánico macroscópico del material ha sido materia de intensa investigación desde hace décadas, principalmente en materiales compuestos. La microescala considerada aquí se refiere a la composición heterogénea de los materiales estudiados, la heterogeneidad asociada y sus propiedades mecánicas. Los resultados preliminares en este campo fueron obtenidos ya en 1887 para la primera “ley o regla de mezclas” (conocido como modelo de Voigt) y en 1929 para la otra “ley o regla de mezclas” (conocido como modelo de Reuss), mientras que las bases actuales de las técnicas de homogenización son solamente de 40 años atrás.

El desarrollo de estos métodos vino originado por el moldeado de los materiales metálicos por una parte y por el desarrollo de nuevos materiales compuestos. De hecho, los avances en el estudio de los materiales compuestos motivaron progresivamente una nueva área de interés en este campo, principalmente de la elasticidad lineal.

A partir de las bases de la mecánica continua se definieron los conceptos básicos del elemento de volumen representativo, con condiciones de frontera adecuadas, y del medio homogéneo equivalente. Además se obtuvieron métodos variacionales potentes los cuales permitieron establecer fronteras más rigurosas: las fronteras de Hashin-Strikman, [Hashin, 63].

Al mismo tiempo, las estimaciones de Voigt y Reuss (conocidas en la mecánica continua como los modelos de fases serie y paralela) fueron recalificados como fronteras. Hirsch [Hirsch, 62] y Counto [Counto, 64]

refinaron los modelos serie y paralelo obteniendo esquemas promedios que se encuentran entre las dos predicciones anteriores. En la tabla 2.1 se resumen los modelos mencionados anteriormente.




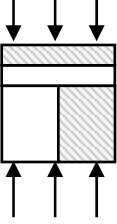
Voigt	Reuss	Counto	Hirsch
$E = E_1\nu_1 + E_2\nu_2$ 	$\frac{1}{E} = \frac{\nu_1}{E_1} + \frac{\nu_2}{E_2}$ 	$\frac{1}{E} = \frac{1 - \sqrt{\nu_2}}{E_1} + \frac{1}{\left(\frac{1 - \sqrt{\nu_2}}{\sqrt{\nu_2}}\right) E_1 + E_2}$ 	$E = \frac{1}{2}(E_{serie} + E_{paralelo})$ 
<p><b>Fronteras de Hashin-Strikman</b></p> $E_{inf} = \frac{9 \left( K_1 + \frac{\nu_2}{(1/K_{21}) + [3V_1/KG_1]} \right) \left( G_1 + \frac{\nu_2}{(1/G_{21}) + [6K_{11}V_1/5KG_1G_1]} \right)}{3 \left( K_1 + \frac{\nu_2}{(1/K_{21}) + [3V_1/KG_1]} \right) + \left( G_1 + \frac{\nu_2}{(1/G_{21}) + [6K_{11}V_1/5KG_1G_1]} \right)}$ <p>donde:</p> $K_{21} = K_2 - K_1 \quad KG_1 = 3K_1 + 4G_1 \quad G_{21} = G_2 - G_1 \quad K_{11} = K_1 + 2G_1$ $E_{sup} = \frac{9 \left( K_2 + \frac{\nu_1}{(1/K_{12}) + [3V_2/KG_2]} \right) \left( G_2 + \frac{\nu_1}{[1/G_{12}] + [6K_{22}V_2/5KG_2G_2]} \right)}{3 \left( K_2 + \frac{\nu_1}{(1/K_{12}) + [3V_2/KG_2]} \right) + \left( G_2 + \frac{\nu_1}{[1/G_{12}] + [6K_{22}V_2/5KG_2G_2]} \right)}$ <p>donde:</p> $K_{12} = K_1 - K_2 \quad KG_2 = 3K_2 + 4G_2 \quad G_{12} = G_1 - G_2 \quad K_{22} = K_2 + 2G_2$ <p>Se debe cumplir que: <math>K_2 &gt; K_1</math> y <math>G_2 &gt; G_1</math></p>			
<p><math>\nu</math>: fracción de volumen <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white;"></span> Matriz (1)</p> <p><math>E</math>: Módulo de elasticidad <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: gray;"></span> Inclusión (2)</p>			

Tabla 2.1. Modelos bifásicos

El objetivo común que se ha perseguido con la aplicación de estos modelos a los materiales cementicios ha sido estudiar el comportamiento de las propiedades elásticas globales al variar el tipo de agregado fino o grueso así como su proporción de volumen, en los niveles III y IV fundamentalmente. En apartados posteriores se realizará una evaluación de la bondad de estos modelos. Pero cuando se pretende caracterizar la porosidad de estos materiales, los citados modelos tienen éxito limitado o carecen de sentido.

Para intentar solucionar la desventaja de la consideración de la porosidad se establecieron relaciones semiempíricas, las cuales consideran explícitamente la porosidad como una fase más. Estas relaciones determinan solamente el módulo de elasticidad, por lo que su aplicación es limitada cuando se pretende evaluar el módulo transversal del material. Los modelos semiempíricos se han aplicado principalmente en materiales cerámicos y su formulación se presenta en la tabla 2.2, donde puede verse que son necesarios uno o más parámetros de ajuste así como estimar el módulo de elasticidad a cero porosidad.

<b>Modelos semiempíricos</b>		
$E = E_0(1 - a_1 p)$	$E = (E_0)^{(1 - a_1 p)}$	$E = E_0 \frac{1 - p}{1 + a_1 p}$
$E = E_0(1 - p)^{2n+1}$		$E = E_0^{-(a_1 p + a_2 p^2)}$
p: porosidad E: módulo de elasticidad	n, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> : parámetros de ajuste empíricos E <sub>0</sub> : módulo de elasticidad a 0 porosidad	

Tabla 2.2. Modelos semiempíricos para materiales porosos [Yaman, 02]

El hecho de estimar el módulo de elasticidad a cero porosidad puede no ser un problema en la caracterización de materiales multifásicos como las cerámicas o los composites, sin embargo cobra mucha importancia cuando se estudian los materiales cementicios. La estimación del módulo elástico de la matriz no porosa no es un problema trivial, ya que es inviable fabricar pasta de cemento, mortero u hormigón sin porosidad.

No obstante, el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido mediante la técnica de nanoindentación medir las propiedades elásticas de las distintas fases que componen la matriz sólida correspondiente a los niveles I y II, de la microestructura de niveles mostrada en el capítulo 1.

Además de los modelos reseñados anteriormente, a continuación se expone la formulación de Kuster-Toksöz [Kuster, 74] el cual considera la porosidad como una fase más. Dicho modelo está basado en el tratamiento teórico de la propagación de las ondas sísmicas en medios bifásicos, tema relativamente escaso en la literatura.

### **2.3.1. Modelo de Kuster Toksöz**

Kuster y Toksöz [Kuster, 74] estudiaron teóricamente la propagación de ondas elásticas en medios bifásicos para determinar los módulos elásticos del compuesto a partir de las propiedades, concentraciones y geometría de la inclusión y la matriz. El problema es formulado en términos del fenómeno de

scattering<sup>1</sup> para longitudes de ondas mucho más grande que el tamaño de las inclusiones.

Las expresiones del modelo son derivadas para una matriz sólida con inclusiones sólidas o líquidas así como para suspensiones sólidas en una matriz fluida. Además se consideran dos geometrías diferentes para las inclusiones: esférica y lenticular.

El método está basado en la incidencia de una onda de compresión sobre una esfera representativa en la cual hay  $N$  inclusiones distribuidas aleatoriamente en la matriz. La onda dispersada por cada inclusión es una función de la onda incidente en una inclusión particular, y a su vez la onda incidente dependerá de la localización de las otras inclusiones debido al efecto del scattering. Para el cálculo del conjunto de todas las ondas dispersadas es necesario conocer la localización relativa de todas las inclusiones. Dado que esta información estadística no está disponible para medios bifásicos reales es necesario plantear dos hipótesis. La primera hipótesis, asume que el punto de observación está suficientemente alejado de la esfera representativa tal que la localización de la inclusión coincide con la localización de la esfera. Por otra parte, consideraron que los efectos múltiples del scattering son despreciables, lo cual permite tomar el campo de la onda incidente no perturbada como la onda incidente en cada inclusión dentro de la esfera representativa.

---

<sup>1</sup> En nuestro contexto, cuando nos referimos a scattering estamos hablando de la dispersión de la onda debido a las inclusiones y su interacción. Pero dado que en ultrasonidos cuando hablamos de dispersión nos referimos a la dependencia de la velocidad ultrasónica con la frecuencia del material, se ha mantenido el término scattering en inglés para evitar confusiones.

Esta última hipótesis restringe la validez de los resultados obtenidos con este método a pequeñas concentraciones de volumen de inclusiones o, en otras palabras, al caso en el cual las inclusiones no interactúan entre sí.

A partir de estas aproximaciones, el problema de obtener las propiedades efectivas de un medio bifásico se reduce a la estimación del campo de desplazamientos dispersados debido a la incidencia de una onda monocromática de gran longitud de onda sobre una inclusión aislada en una matriz infinita. A partir de estas consideraciones, Kuster y Toksóz obtuvieron las expresiones para los módulos elásticos efectivos:

$$\frac{K - K_1}{3K - 4G_1} = \nu \frac{K_2 - K_1}{3K_1 - 4G_1} \frac{1}{3} S_{ijj} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$\frac{G - G_1}{6G(K_1 + 2G_1) + G_1(9K_1 + 8G_1)} = \frac{\nu(G_2 - G_1)}{25G_1(3K_1 - 4G_1)} [S_{ijj} - S_{ijj}] \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Este modelo considera explícitamente la forma de la inclusión a través del tensor de Eshelby (S) [Eshelby, 57], cuyas componentes son función de la relación de aspecto así como de la relación de Poisson de la matriz.

La conclusión principal obtenida por este modelo es que los módulos elásticos efectivos no dependen solamente de la concentración sino también influye la geometría de la inclusión, es decir la relación de aspecto. En las formulaciones anteriores se considera que todos los esferoides tienen la misma relación de aspecto.

Las relaciones entre los módulos elásticos se exponen a continuación:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad \mu = \left( \frac{E}{2G - 1} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{3K - 2G}{3K + G} \right) = \left( \frac{3K - E}{6K} \right) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde K denota el módulo volumétrico, G el módulo transversal y  $\mu$  la relación de Poisson.

A continuación evaluaremos la aplicación de los modelos expuestos a la caracterización de materiales cementicios considerando la porosidad como una fase.

### **2.3.2. Evaluación de la influencia de la porosidad en las propiedades elásticas de la pasta de cemento mediante modelos multifásicos.**

En general, los modelos citados anteriormente han sido aplicados a los materiales cementicios para estudiar el comportamiento global del material al variar la información de los agregados: propiedades elásticas y fracción de volumen. En [Baalbaki, 92], se recoge un estudio extenso acerca de la predicción del módulo de elasticidad en hormigones de alta resistencia con diferentes tipos de agregados gruesos y proporciones. Por lo cual en este apartado se estudiará la influencia de la estructura porosa y, posteriormente, de las propiedades elásticas de la matriz sólida en las propiedades globales del compuesto.

A continuación se realiza un análisis comparativo del comportamiento de los modelos multifásicos al considerar la porosidad como una fase. En este ejemplo se pretende caracterizar la respuesta elástica global de la pasta de cemento (Nivel II), considerándola como un material bifásico compuesto de una fase sólida y poros, en función de fracción de volumen de poros. Sus características elásticas y porosidad se muestran en la tabla (2.3).

Los datos han sido tomados de [Hernández, 02]. Las pruebas se hicieron sobre probetas prismáticas de pasta de cemento fabricadas con dos tipos de cemento: 32.5 MPa (I) y 42.5 MPa (II), con la particularidad de que los cementos han sido fabricados a partir de un mismo clinker y las resistencias distintas se han obtenido variando el grado de finura. Además se han utilizado dos relaciones agua/cemento (0.4 y 0.5), para obtener diferentes porosidades. Las constantes elásticas de la matriz no porosa han sido determinadas mediante ensayos destructivos y no destructivos según metodología descrita en [Hernández, 02].

Grupos de Probetas	Valores de la matriz a cero porosidad			Porosidad medida (%)
	$C_{11}$ (GPa)	$C_{44} = G$ (GPa)	$E$ (GPa)	
CI-04	46.00	12.90	36.35	30.74
CI-05	39.62	11.54	29.87	37.63
CII-04	45.70	12.75	33.31	27.37
CII-05	40.43	11.37	29.66	33.66

Tabla 2.3. Propiedades elásticas de la matriz de pasta de cemento

En la figura 2.1 se muestran los resultados de aplicar los modelos multifásicos considerando una de las fases como la porosidad. En la gráfica se comparan los resultados obtenidos mediante la aplicación de los modelos y los ensayos no destructivos por ultrasonidos (E\_Us). Se puede comprobar como los modelos que describen las fronteras de Reuss y Voigt y las de Hashin-Shtrikman dejan de tener valor práctico, anulándose en ambos casos la frontera superior. Por su parte, el modelo Hirsch expresa que el modulo del compuesto se anula lo cual no se ajusta a la realidad. Además, los modelos, en general, predicen un módulo de elasticidad superior al obtenido a partir de la medida de la velocidad ultrasónica.

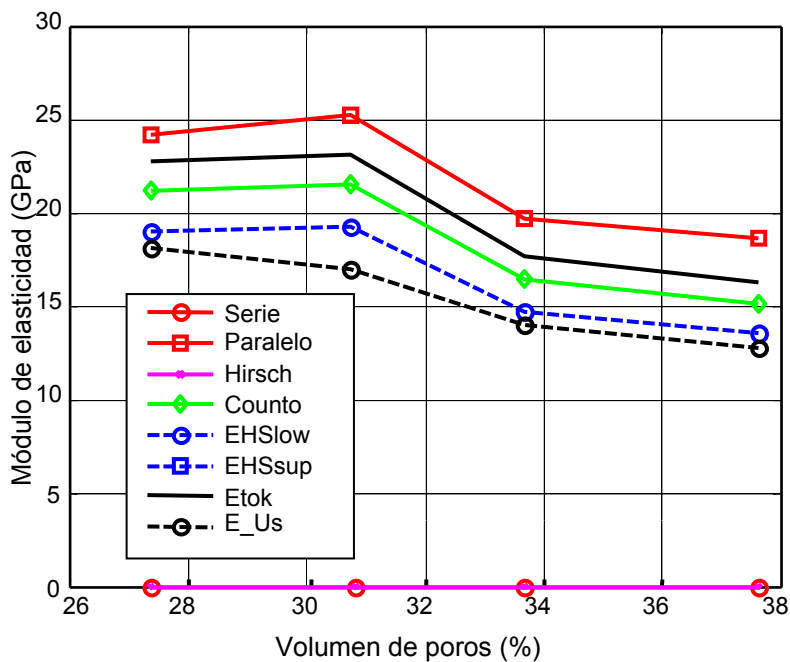


Figura 2.1. Módulo de elasticidad de la pasta de cemento en función del volumen de poros

### **2.3.3. Evaluación de las propiedades elásticas de la matriz no porosa mediante la microestructura de niveles.**

Como hemos visto anteriormente, la predicción teórica del módulo elástico de los materiales cementicios es una tarea difícil debido a la heterogeneidad que se presenta en las diferentes escalas. Por lo que la predicción de los módulos elásticos, basado en el conocimiento de sus fases individuales, es un problema de múltiples escalas. En este apartado se estimarán los módulos elásticos de la matriz no porosa de la pasta de cemento en la escala micrométrica (Nivel II).

Para poder estimar las propiedades elásticas del nivel II es necesario tener en cuenta la información microestructural del nivel I, así como conocer su influencia en el nivel II. Como se ha expresado anteriormente, en el nivel I se encuentra el gel C-S-H y la porosidad de gel. Este gel se produce por la reacción de las partículas de cemento con el agua.

Repetiremos la simulación anterior cambiando las propiedades elásticas de la matriz, en este caso utilizaremos las que han sido medidas mediante nanoindentación [Constantinides, 04]. Consideraremos que la matriz sólida esta formada por gel C-S-H y portlandita. Sus propiedades se recogen en la tabla 2.4.

	Módulo de elasticidad (GPa)	Relación de Poisson	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>C-H-S</b>	23.8	0.24	2040
<b>Portlandita</b>	38	0.31	2230
<b>Matriz sólida</b>	26.49	0.27	2087

Tabla 2.4. Propiedades elásticas de la matriz no porosa obtenidas por nanoindentación, datos tomados de [Constantinides, 04].

La figura 2.2 muestra los resultados obtenidos con la aplicación de los modelos multifásicos al considerar las propiedades elásticas medidas mediante nanoindentación. Se puede observar el comportamiento lineal del módulo de elasticidad en todos los modelos el cual diverge del obtenido por ensayos ultrasónicos. Esto puede ser debido a que las constantes elásticas de las fases constituyentes corresponden al cemento tipo I mientras que las probetas fueron

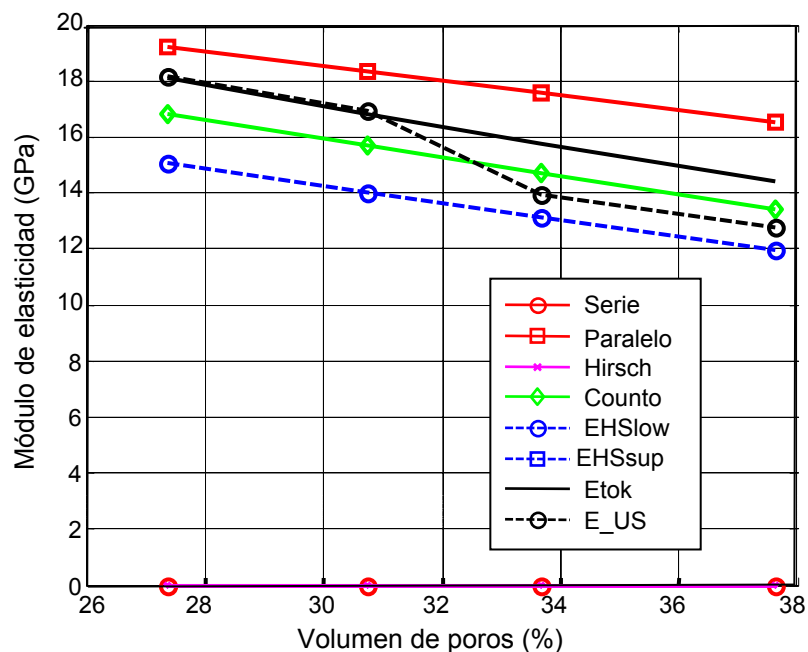


Figura 2.2. Módulo de elasticidad de la pasta de cemento en función del volumen de poros. Considerando los datos a partir de nanoindentación

fabricadas con cemento tipo II A-L. Este comportamiento nos indica que las propiedades elásticas del gel están influenciadas por el tipo de cemento. Por otra parte, los valores de E obtenidos son más bajos que los obtenidos mediante la metodología descrita en [Hernández, 02] y mostrados en la figura 2.1.

Comparando las figuras anteriores (2.1 y 2.2) podemos observar que la consideración de las propiedades elásticas medidas por nanoindentación ha permitido que se ajuste mejor la predicción realizada por el modelo de Kuster-Toksöz para las porosidades más bajas las cuales corresponde a una relación agua/cemento de 0.4 independientemente del tipo de cemento utilizado. Estos resultados nos resultan contradictorios ya que las propiedades medidas por nanoindentación han sido realizadas sobre probetas de pasta de cemento con relación agua/cemento de 0.5. Este comportamiento nos conduce al interrogante de hasta qué grado las propiedades de las fases hidratadas dependen del tipo de cemento y de la relación agua/cemento, entre otros factores. Esta cuestión se encuentra en debate actualmente en la comunidad científica, pues algunos investigadores apuntan que las propiedades elásticas del gel C-S-H son independientes del tipo de cemento [Jennings, 06], aunque otras indican que se hace necesario ampliar los ensayos de nanoindentación a un conjunto más amplio de tipos de cementos y relaciones agua/cemento [Constantinides, 06].

Haecker et al [Haecker, 05] ha mostrado recientemente, un estudio de cómo contribuyen las diferentes fases constituyentes a las propiedades

elásticas globales de los materiales cementicios. En el citado trabajo, se evalúa la contribución promedio del tensor de esfuerzo y de deformación de cada fase sobre la microestructura completa. Las fases analizadas son: el gel C-S-H, la portlandita, los granos de cemento sin hidratar, los poros saturados y otras, la cual engloba fases restantes como el yeso. Se analiza la contribución de los citados constituyentes a la fracción de volumen y a los módulos volumétricos y transversales. Los resultados obtenidos para la fracción de volumen muestran que los poros y el clinker son las fases que más varían con la relación  $a/c$ , aumentan y disminuyen respectivamente, mientras que la portlandita y el gel son bastante paralelos con respecto a la relación  $a/c$ . La contribución a los módulos elásticos muestra que a bajas relaciones  $a/c$  el clinker puede contribuir hasta un 40%, mientras que a altas relaciones  $a/c$  la principal contribución es del gel C-S-H (45%). Se hace necesario resaltar la contribución de los poros saturados (alrededor de un 6%) al módulo volumétrico debido al módulo del agua (2.0 GPa). La portlandita por su parte contribuye entre un 20 y 30% para todo el rango de  $a/c$  estudiado (0.2 – 0.6).

A la vista de los resultados anteriores para las diferentes relaciones  $a/c$  se hace necesario realizar nuevos experimentos que nos ayuden a clarificar las relaciones entre la microestructura y las propiedades elásticas de la pasta de cemento. Éste es sin duda uno de los objetivos principales de la ciencia de materiales, pero queda fuera del alcance de esta memoria.

## **2.4. Aspectos básicos de la micromecánica continua.**

La consideración de los materiales compuestos formados por una matriz sólida más inclusiones, motivó que se le diera solución al problema básico de la inclusión abriendo la forma de mejorar las estimaciones. A principios de la década del 60, las bases principales de la llamada “micromecánica continua” fueron establecidas por Hill (1965). Los análisis micromecánicos nos permiten predecir las propiedades efectivas y las características microestructurales de los materiales compuestos.

La micromecánica representa la aproximación sistemática para obtener propiedades mecánicas a grandes longitudes de escala tomando como base las propiedades del material en longitudes de escala inferiores.

Las técnicas de homogenización conducen a reemplazar un cuerpo heterogéneo complejo por un cuerpo homogéneo ficticio el cual se comporta globalmente de la misma forma. La micromecánica continua está relacionada con los materiales homogéneos estadísticamente para los cuales es posible definir un Elemento de Volumen Representativo (EVR) y un Medio Homogéneo Equivalente (MHE), que son equivalentes unos con otros desde un punto de vista mecánico. Esto significa que sus respuestas globales ante cualquier carga mecánica tienen que ser la misma. En otras palabras, el MHE debe ser tal que los campos de deformaciones y esfuerzos derivados en la macroescala son los valores promedios de los campos de deformaciones y esfuerzos locales

derivados en la microescala, sobre cualquier EVR, si la heterogeneidad microestructural considerada ha sido tomada en cuenta en los cálculos.

Esto requiere al menos que, para el comportamiento mecánico bajo investigación, la longitud característica ( $d$ ) de la heterogeneidad considerada y el mecanismo de deformación tiene que ser mucho más pequeño que el tamaño ( $l$ ) del elemento de volumen considerado, a fin de que este elemento pueda ser considerado como representativo del material estudiado, cualquiera que sea su localización en el cuerpo homogéneo macroscópicamente (o estadísticamente). Además,  $l$  debe ser mucho menor que la dimensión característica  $L$  del cuerpo completo y que la variación de longitud de su carga mecánica, de manera que sea posible el uso de las herramientas clásicas integrales y diferenciales de análisis estructural. En adición, la longitud característica más pequeña  $d$  tiene que ser compatible con el uso de los conceptos básicos (tensores de deformación, esfuerzo, etc.) de la mecánica continua.

Estas dos condiciones se llaman también condiciones de separabilidad de escalas, como se vio en el capítulo anterior.

La micromecánica del compuesto nos permite calcular el módulo de constantes elásticas a partir de las propiedades de los materiales constituyentes: tamaño, geometría y orientación; así como de sus propiedades elásticas individuales. Por lo cual cuando pretendemos usar la velocidad ultrasónica para la caracterización cuantitativa de la microestructura, nos

podemos apoyar en las bases de la micromecánica del compuesto. Gruber et al [Gruber, 88] fueron de los primeros investigadores en combinar las mediciones de la velocidad ultrasónica y la micromecánica empírica para estimar la variación de las propiedades locales en componentes cerámicos porosos.

En este trabajo se plantea la aplicación de la micromecánica a los compuestos de cemento, con el objetivo de caracterizar la porosidad presente en los mismos como una fase más. De entre los modelos existentes estudiaremos en profundidad los modelos basados en la teoría de campo promedio de Mori-Tanaka [Mori, 73] y en el principio de la inclusión equivalente de Eshelby [Eshelby, 57]. En particular en los modelos bifásico y trifásico aplicados por Hernández [Hernández, 00] y [Hernández, 06] para la caracterización de compuestos cementicios.

## **2.5. Modelo micromecánico bifásico.**

El modelo micromecánico bifásico [Jeong, 96] permite explicar la densidad efectiva y la rigidez de los sólidos porosos, tratando los poros como una fase más. La presencia de éstas inclusiones afecta a las propiedades globales mecánicas y físicas del material. El grado de cambio de dichas propiedades depende de las características de la matriz e inclusiones tales como fracción de volumen, forma y orientación. Para calcular la densidad efectiva y las propiedades elásticas de un material poroso, consideramos a

éste formado por una matriz homogénea y un gran número de inclusiones elipsoidales.

La figura 2.3 muestra un elemento de volumen representativo de un medio compuesto formado por inclusiones heterogéneas elipsoidales de

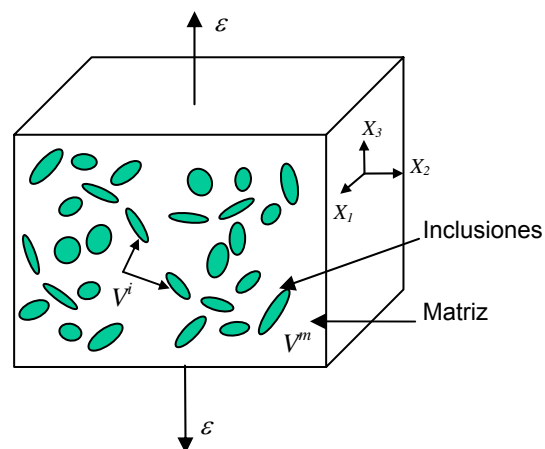


Figura 2.3. Elemento de volumen representativo.

volumen  $V_i$  y matriz isotrópica de volumen  $V_m$ ; sujeto a desplazamientos uniformes que dan origen a deformaciones constantes  $\varepsilon$  en su frontera. Se asume que las inclusiones son del mismo tamaño, isotrópicas y orientadas aleatoriamente, por lo tanto, las propiedades globales del compuesto serán isotrópicas.

Al referirnos a la rigidez efectiva del material, estamos hablando de las constantes elásticas del mismo; por lo que a lo largo del trabajo se usarán ambos términos indistintamente.

### 2.5.1. Densidad efectiva.

Si consideramos el elemento de volumen representativo  $V$  y masa  $M$ , como mostramos en la figura 2.3, formado por las inclusiones y la matriz, el volumen del compuesto puede ser calculado como:

$$V = V_i + V_m \quad (\text{Ec 2.11})$$

donde ' $i$ ' y ' $m$ ' están referidas a la inclusión y la matriz, respectivamente. Si definimos  $v$  como la fracción de volumen tenemos que:

$$v_i + v_m = 1 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde  $v_m = V_m / V$  es la fracción de volumen de la matriz y  $v_i = V_i / V$  la fracción de volumen de la inclusión.

La masa  $M$  del compuesto es:

$$M = M_i + M_m \quad (\text{Ec. 2.13})$$

A partir de las dos fórmulas anteriores la densidad del compuesto se determina como:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_i + M_m}{V_i + V_m} = \frac{(\rho_i V_i + \rho_m V_m)}{V} = \rho_i v_i + \rho_m v_m \quad (\text{Ec. 2.14})$$

### 2.5.2. Relación entre la rigidez efectiva y la velocidad.

La rigidez efectiva  $\mathbf{C}^2$  relaciona el esfuerzo promedio  $\sigma$  y la deformación promedio  $\varepsilon$  del compuesto, en el elemento de volumen representativo  $V$ :

$$\sigma = C\varepsilon \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Cuando la deformación  $\varepsilon$  se limita a la frontera, la rigidez efectiva puede derivarse en términos de  $\varepsilon$  si se encuentra la deformación promedio de la inclusión (en general dependientes de la orientación,  $\langle \varepsilon^i \rangle$ ). Para este propósito, se introdujo el tensor del factor de concentración de deformaciones  $\mathbf{A}$ . Este factor puede ser evaluado por la teoría de campos promedios de Mori-Tanaka [Mori, 73], quien aproxima la deformación promedio en las inclusiones que actúan recíprocamente, con el de una inclusión simple en una matriz infinita sometida a una deformación promedio, la cual es diferente a partir de  $\varepsilon$ , como:

$$\varepsilon^m = A^m \varepsilon \quad \langle \varepsilon^i \rangle = \langle A^i \rangle \varepsilon \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Usando esta aproximación Jeong [Jeong, 96] estudió las propiedades elásticas de cerámicas de alúmina con inclusiones elipsoidales orientadas arbitrariamente dentro de la matriz. Este estudio derivó en el tensor para la rigidez efectiva en términos de la rigidez de las fases y las características

---

<sup>2</sup> Cuando se haga referencia a un tensor de cuarto rango se representará en cursiva negrita, por ejemplo el tensor de rigidez isotrópica o tensor de constantes elásticas y el tensor de complacencia se representan por  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{C}^{-1}$ , respectivamente.

microestructurales de las inclusiones que dependen de la geometría, expresado como:

$$C = C^m + v^i (C^i - C^m) \langle T \rangle [v^m I + v^i \langle T \rangle]^{-1} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde  $C^m$  y  $C^i$  son los tensores de constantes elásticas de la matriz y la inclusión, respectivamente.  $T$  es el tensor de Wu, [Wu, 66], en coordenadas globales e  $I$  es el tensor de identidad, simétrico. Los paréntesis angulares,  $\langle \rangle$  denotan el promedio de las orientaciones de las inclusiones sobre todas las orientaciones posibles. El tensor de Wu,  $\langle T \rangle$  de cuarto rango, evalúa la forma, tamaño, distribución y orientación de las inclusiones. La manipulación de los tensores isotrópicos contenidos en la expresión 2.17 se ha realizado según la notación simbólica introducida por Hill [Hill, 57].

Si suponemos que tanto la matriz como las inclusiones son isotrópicas, entonces el tensor de constantes elásticas se reduce a sólo dos constantes elásticas independientes expresadas en notación reducida como:

$$C_{11} = C_{11}^m + \frac{v^i [C_{11}^i - C_{11}^m - \frac{4}{3} (C_{44}^i - C_{44}^m)] (\langle T_{1111} \rangle + 2 \langle T_{1122} \rangle)}{v^m + v^i (\langle T_{1111} \rangle + 2 \langle T_{1122} \rangle)} + \frac{\frac{8}{3} v^i (C_{44}^i - C_{44}^m) \langle T_{1212} \rangle}{v^m + 2 v^i \langle T_{1212} \rangle} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$C_{44} = C_{44}^m + \frac{2 \cdot v^i (C_{44}^i - C_{44}^m) \langle T_{1212} \rangle}{v^m + 2 \cdot v^i \langle T_{1212} \rangle} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

donde  $C_{ij}$  son las componentes del tensor de rigidez en notación abreviada [Mura, 87].

Las componentes de rigidez del compuesto se relacionan con las velocidades ultrasónicas longitudinal ( $v_L$ ) y transversal ( $v_T$ ) por:

$$v_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

$$v_T = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

## 2.6. Modelo micromecánico trifásico

En [Hernández, 02] se formuló un modelo micromecánico de tres fases, el cual tenía por objeto caracterizar compuestos de cemento a partir de sus propiedades microestructurales. Este modelo es una extensión del modelo bifásico anteriormente citado. En base a los objetivos que perseguimos en este trabajo de investigación, es necesario reproducir nuevamente la formulación del modelo trifásico para profundizar en su estudio y extender la formulación a materiales con N-fases.

El modelo micromecánico planteado por [Hernández, 02] parte de considerar un material extendido infinitamente con módulo elástico  $C$ , que

contiene dos dominios elipsoidales  $\Omega_a$  y  $\Omega_p$  con módulos elásticos  $C_a$  y  $C_p$ , respectivamente.  $\Omega_a$  y  $\Omega_p$  son llamadas heterogeneidades elipsoidales.

El tensor de constantes elásticas relaciona el esfuerzo promedio con la deformación promedio en un elemento de volumen representativo del compuesto, el cual incluye la información microestructural así como la orientación de las fases constituyentes.

El material compuesto está formado por tres fases, y representado por elemento de volumen  $V$ , una masa  $M$ , sujeto a deformaciones uniformes constantes globales  $\varepsilon_0$ , figura 2.4.

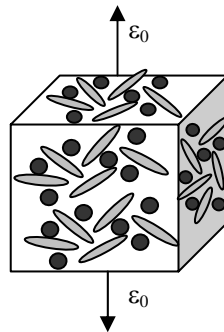


Figura. 2.4. Elemento de volumen representativo: matriz y dos tipos de inclusiones.

La densidad global del compuesto queda expresada como:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{\rho^m V^m + \rho^a V^a + \rho^p V^p}{V} = \rho^m v^m + \rho^a v^a + \rho^p v^p \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Consideremos las tres fases elásticas, homogéneas e isotrópicas. Además, asumimos que ambos tipos de inclusiones pueden ser representados por un elipsoide, donde el tamaño y la función de distribución de orientación

dependerán del tipo de heterogeneidad que se esté considerando. La orientación y distribución de las inclusiones elipsoidales se puede describir mediante los ángulos de Euler.

En el desarrollo de este modelo los superíndices  $m$ ,  $a$  y  $p$ , se usarán para referirse a las magnitudes relacionadas con la matriz, inclusiones tipo 'a' e inclusiones tipo 'p'. Al igual que en el modelo bifásico el tensor de constantes elásticas y la fracción de volumen de poro serán denotados por  $\mathbf{C}$  y  $v^p$ , respectivamente.

Para facilitar la determinación del tensor de constantes elásticas es conveniente trabajar con promedios de campos globales y locales. Supongamos que el campo de deformaciones en el volumen  $V$  es  $\varepsilon$ , bajo la condición de frontera descrita ( $V$  está sujeto a deformaciones globales uniformes y constantes,  $\bar{\varepsilon}$ ). La deformación global promedio en  $V$  está definida por la integral:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int \varepsilon dV \quad (\text{Ec. 2.23})$$

donde la barra superior ( $\bar{\quad}$ ) denota el promedio en el volumen.

Si tenemos en cuenta que el compuesto está formado por la matriz y dos tipos distintos de inclusiones, la integral anterior puede ser descompuesta en las siguientes integrales:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_{V^m} \varepsilon^m dV + \frac{1}{V} \int_{V^a} \varepsilon^a dV + \frac{1}{V} \int_{V^p} \varepsilon^p dV \quad (\text{Ec. 2.24})$$

La primera integral, al introducir la deformación promedio en la matriz  $\varepsilon^m$ , se convierte en:

$$\frac{1}{V} \int_{V^m} \varepsilon^m dV = v^m \varepsilon^m \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Sin embargo en el caso de la segunda y tercera integral, estas integraciones se deben hacer sobre todas las orientaciones posibles, ya que la deformación en cada inclusión depende de la orientación. Por lo que la integral de volumen sobre las inclusiones viene dada por:

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \int_{V^a} \varepsilon^a dV &= v^a \langle \varepsilon^a \rangle \\ \frac{1}{V} \int_{V^p} \varepsilon^p dV &= v^p \langle \varepsilon^p \rangle \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

donde  $\langle \varepsilon^p \rangle$  y  $\langle \varepsilon^a \rangle$  son las deformaciones promedio dependientes de la orientación en las inclusiones p y a, respectivamente.  $v_a$  y  $v_p$  representan las fracciones de volumen del poro y la arena, respectivamente, y los paréntesis angulares  $\langle \rangle$  se refieren al promedio de orientaciones dado por:

$$\langle \varepsilon^p \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \varepsilon^p \Gamma(\phi, \theta, \psi) \sin \theta \, d\phi \, d\theta \, d\psi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \Gamma(\phi, \theta, \psi) \sin \theta \, d\phi \, d\theta \, d\psi} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$\langle \varepsilon^a \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \varepsilon^p \Gamma(\phi, \theta, \psi) \sin \theta \, d\phi \, d\theta \, d\psi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \Gamma(\phi, \theta, \psi) \sin \theta \, d\phi \, d\theta \, d\psi}$$

donde  $\Gamma(\phi, \theta, \psi)$  representa la función distribución de orientación de la inclusión en el espacio de Euler. Las deformaciones promedio  $\varepsilon_p$  y  $\varepsilon_a$  pueden ser obtenidos a partir de  $\varepsilon^{p''}$  y  $\varepsilon^{a'}$ , respectivamente; a través de la transformación:

$$\varepsilon_{ij}^p = q_{ki} q_{lj} \varepsilon_{kl}^{p''} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

$$\varepsilon_{ij}^a = q_{ki} q_{lj} \varepsilon_{kl}^{a'} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

donde  $q$  representa la matriz de rotación y las componentes  $q_{ij}$  denota la dirección coseno entre el eje  $i'$  y el eje  $j$  no prima.

La matriz de rotación es única excepto si hay algún tipo de simetría en el cristal e independiente de la forma en la cual es obtenida. La matriz de rotación [Odergard, 03], expresada en términos de los ángulos de Euler se expresa como:

$$q = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \varphi - \text{sen} \phi \text{sen} \varphi \cos \theta & \text{sen} \phi \cos \varphi + \cos \phi \text{sen} \varphi \cos \theta & \text{sen} \varphi \text{sen} \theta \\ -\cos \phi \text{sen} \varphi - \text{sen} \phi \text{sen} \varphi \cos \theta & -\text{sen} \phi \text{sen} \varphi + \cos \phi \text{sen} \varphi \cos \theta & \cos \varphi \text{sen} \theta \\ \text{sen} \phi \text{sen} \theta & -\cos \phi \text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.30)

Los ángulos de Euler nos permiten mediante rotaciones sucesivas pasar de un sistema de referencia a otro, es decir, pasar del sistema de referencia de las inclusiones al sistema de referencia del compuesto. Por tanto la deformación promedio puede escribirse en términos de cada una de las fases:

$$\bar{\varepsilon} = \nu^m \bar{\varepsilon}^m + \nu^p \langle \varepsilon^p \rangle + \nu^a \langle \varepsilon^a \rangle \quad (\text{Ec. 2.31})$$

y análogamente el esfuerzo promedio:

$$\bar{\sigma} = \nu^m \bar{\sigma}^m + \nu^p \langle \sigma^p \rangle + \nu^a \langle \sigma^a \rangle \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Si suponemos que la matriz y las inclusiones son elásticas, el esfuerzo promedio en cada fase está relacionado con la deformación promedio por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^m &= C^m \bar{\varepsilon}^m \\ \langle \sigma^p \rangle &= C^p \langle \varepsilon^p \rangle \\ \langle \sigma^a \rangle &= C^a \langle \varepsilon^a \rangle \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Para relacionar la deformación uniforme global aplicada al compuesto  $\varepsilon_0$  con las deformaciones promedio de la matriz y las inclusiones p y a,

introducimos el factor de concentración de deformaciones promedio en cada fase  $\bar{A}^m, \bar{A}^p, \bar{A}^a$

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}^m &= \bar{A}^m \varepsilon_0 \\ \langle \varepsilon^p \rangle &= \langle \bar{A}^p \rangle \varepsilon_0 \\ \langle \varepsilon^a \rangle &= \langle \bar{A}^a \rangle \varepsilon_0\end{aligned}\quad (\text{Ec. 2.34})$$

Si el tensor de rigidez efectiva del compuesto se define mediante la relación:

$$\bar{\sigma} = C \varepsilon_0 \quad (\text{Ec. 2.35})$$

A partir de la ecuación 2.32 y teniendo en cuenta las ecuaciones 2.33 y 2.34, obtenemos C:

$$C = \nu^m C^m \bar{A}^m + \nu^p C^p \bar{A}^p + \nu^a C^a \bar{A}^a \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Cuando  $\varepsilon_0$  está aplicado en la frontera  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0$  por lo que las ecuaciones 2.31 y 2.34 dan:

$$\nu^m \bar{A}^m + \nu^p \bar{A}^p + \nu^a \bar{A}^a = I \quad (\text{Ec. 2.37})$$

donde  $I$  es el tensor unitario de cuarto rango definido por:

$$I_{ijkl} = \frac{(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})}{2} \quad (\text{Ec. 2.38})$$

siendo  $\delta_{ik}$  la delta de Kronecker [Heinbockel, 96].

Sustituyendo 2.37 en 2.38 obtenemos el tensor de rigidez efectiva:

$$C = C^m + v^p (C^p + C^m) \langle \bar{A}^p \rangle + v^a (C^a - C^m) \langle \bar{A}^a \rangle \quad (\text{Ec. 2.39})$$

Esta expresión permite la evaluación de las propiedades elásticas globales  $C$  teniendo en cuenta el factor de concentración de deformaciones promedio dependiente de la orientación. Este factor puede evaluarse usando la teoría de Mori-Tanaka. La deformación promedio en las inclusiones puede obtenerse a partir del promedio de la deformación en todas las orientaciones posibles.

Para la evaluación del factor de concentración de deformaciones por el método de Mori-Tanaka, supongamos que el compuesto está sometido a una deformación promedio  $\varepsilon_0$  en su frontera. Dado que las inclusiones están embebidas en la matriz, estas experimentarán una perturbación adicional  $\varepsilon^*$ . El objetivo aquí es encontrar la deformación promedio en la inclusión  $\langle \varepsilon^p \rangle$  y  $\langle \varepsilon^a \rangle$  en términos de la deformación aplicada.

En el método de Mori-Tanaka cada inclusión es considerada como una heterogeneidad simple embebida en una matriz infinita sometida a las deformaciones promedio de la matriz  $\bar{\varepsilon}^m$ .

Si la perturbación de la deformación causada por la presencia de las heterogeneidades es denotada por  $\varepsilon^{pt}$  y  $\varepsilon^{at}$ , la deformación total en las inclusiones tipo  $p$  y  $a$ , respectivamente, dependiendo de la orientación específica será:

$$\varepsilon^{p''} = \bar{\varepsilon}^{m'} + \varepsilon^{pt''} \quad (\text{Ec. 2.40})$$

$$\varepsilon^{a'} = \bar{\varepsilon}^{m'} + \varepsilon^{at'} \quad (\text{Ec. 2.41})$$

donde la prima indica que las variables están referidas a coordenadas locales.

Entonces a partir de la ley de Hooke y el principio de la inclusión equivalente de Eshelby, los esfuerzos en las inclusiones pueden ser descritos como:

$$\begin{aligned} \sigma^{p''} &= C^p \varepsilon^{p''} \\ \sigma^{p''} &= C^m (\varepsilon^{p''} - \varepsilon^{*p''}) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.42})$$

$$\begin{aligned} \sigma^{a'} &= C^a \varepsilon^{a'} \\ \sigma^{a'} &= C^m (\varepsilon^{a'} - \varepsilon^{*a'}) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.43})$$

donde  $\varepsilon^{*p''}$  y  $\varepsilon^{*a'}$  son autodeformaciones correspondiente a las inclusiones  $p$  y  $a$ , respectivamente, expresada en coordenadas locales. Ambas pueden ser relacionadas con las deformaciones perturbadas a través de:

$$\varepsilon^{pt''} = S^p \varepsilon^{*p''} \quad (\text{Ec. 2.44})$$

$$\varepsilon^{at'} = S^a \varepsilon^{*a'} \quad (\text{Ec. 2.45})$$

donde **S** es el tensor de Eshelby.

Igualando las ecuaciones 2.42 obtenemos:

$$\varepsilon^{*p''} = (C^m)^{-1} \varepsilon^{p''} (C^m - C^p) \quad (\text{Ec. 2.46})$$

Consecuentemente la ecuación 2.43 nos da:

$$\varepsilon^{*a'} = (C^m)^{-1} \varepsilon^{a'} (C^m - C^a) \quad (\text{Ec. 2.47})$$

donde  $(.)^{-1}$  representa la inversa de dicha magnitud.

Sustituyendo la ecuación 2.46 en 2.40 con la ayuda de 2.44 obtenemos la deformación para la inclusión  $p$  en coordenadas locales:

$$\varepsilon^{p''} = T_p'' \bar{\varepsilon}^{m'} \quad (\text{Ec. 2.48})$$

Mientras que para la inclusión  $a$ , sustituyendo 2.47 en 2.41 con la ayuda de 2.44, se obtiene:

$$\varepsilon^{a'} = T_a' \bar{\varepsilon}^{m'} \quad (\text{Ec. 2.49})$$

siendo:

$$T_p'' = \left[ I - S_p (C^m)^{-1} (C^m - C^p) \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 2.50})$$

y

$$T_a' = \left[ I - S_a (C^m)^{-1} (C^m - C^a) \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 2.51})$$

donde  $T_p''$  y  $T_a'$  representan el tensor de Wu [Wu, 66] de cuarto orden en coordenadas locales y  $S_p$  y  $S_a$  el Tensor de Eshelby [Eshelby, 57] para las inclusiones  $p$  y  $a$ , respectivamente en ambos casos.  $T'$  mantiene las propiedades de simetría tal que:

$$T_{ijkl}' = T_{jikl}' = T_{ijlk}' \quad (\text{Ec. 2.52})$$

En el anexo 3 se puede consultar una breve descripción de la función de distribución.

La deformación promedio en las inclusiones  $p$  y  $a$ , puede ser encontrada tomando el promedio de todas las orientaciones posibles en ambos lados de las ecuaciones 2.48 y 2.49, respectivamente, y puede ser escrito como:

$$\langle \varepsilon^p \rangle = \langle T_p \rangle \bar{\varepsilon}^m \quad (\text{Ec. 2.53})$$

$$\langle \varepsilon^a \rangle = \langle T_a \rangle \bar{\varepsilon}^m \quad (\text{Ec. 2.54})$$

donde  $T_p$  y  $T_a$  representan el tensor de Wu en coordenadas globales para las respectivas inclusiones

El tensor  $\mathbf{T}$  en coordenadas globales mantiene las mismas propiedades de simetría que el tensor  $\mathbf{T}'$  en coordenadas locales. Las componentes de  $\mathbf{T}$  en coordenadas globales pueden ser encontradas a través de la transformación de tensores:

$$T_{ijkl} = q_{mi} q_{nj} q_{ok} q_{pl} T'_{mnop} \quad (\text{Ec. 2.55})$$

como  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0$

$$\varepsilon_0 = \nu^m \bar{\varepsilon}^m + \nu^p \langle \varepsilon^p \rangle + \nu^a \langle \varepsilon^a \rangle \quad (\text{Ec. 2.56})$$

podemos encontrar:

$$\bar{\varepsilon}^m = \left[ \nu^m I + \nu^p \langle T_p \rangle + \nu^a \langle T_a \rangle \right]^{-1} \varepsilon_0 \quad (\text{Ec. 2.57})$$

Sustituyendo 2.56 en 2.53 y 2.54, tenemos:

$$\langle \varepsilon^a \rangle = \langle A^a \rangle \varepsilon_0 \quad (\text{Ec. 2.58})$$

$$\langle \varepsilon^p \rangle = \langle A^p \rangle \varepsilon_0 \quad (\text{Ec. 2.59})$$

siendo el tensor de concentración de las deformaciones promedio de cada inclusión:

$$\langle A^p \rangle = \langle T_p \rangle \left[ \nu^m I + \nu^p \langle T_p \rangle + \nu^a \langle T_a \rangle \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 2.60})$$

$$\langle A^a \rangle = \langle T_a \rangle \left[ \nu^m I + \nu^p \langle T_p \rangle + \nu^a \langle T_a \rangle \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 2.61})$$

A partir de lo cual puede obtenerse el tensor de constantes elásticas para un compuesto trifásico:

$$C = C^m + \nu^p (C^{pm}) \langle T_p \rangle \left[ \nu^m I + \nu^p \langle T_p \rangle + \nu^a \langle T^a \rangle \right]^{-1} + \nu^a (C^{am}) \langle T_a \rangle \left[ \nu^m I + \nu^p \langle T_p \rangle + \nu^a \langle T^a \rangle \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 2.62})$$

donde:

$$C^{pm} = C^p - C^m \quad \text{y} \quad C^{am} = C^a - C^m \quad (\text{Ec. 2.63})$$

Suponiendo que la matriz y ambos tipos de heterogeneidades son isotrópicas, el tensor de constantes elásticas del compuesto trifásico se reduce a sólo dos constantes elásticas independientes dadas por:

$$C_{11} = C_{11}^m + \frac{\nu^p (C_{11}^{pm} - \frac{4}{3} C_{44}^{pm}) \langle T^p \rangle + \nu^a (C_{11}^{am} - \frac{4}{3} C_{44}^{am}) \langle T^a \rangle}{\nu^m + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^a \langle T^a \rangle} + \frac{\frac{8}{3} \nu^p C_{44}^{pm} \langle T_{1212}^p \rangle + \frac{8}{3} \nu^a C_{44}^{am} \langle T_{1212}^a \rangle}{\nu^m + 2\nu^p \langle T_{1212}^p \rangle + 2\nu^a \langle T_{1212}^a \rangle} \quad (\text{Ec. 2.64})$$

$$C_{44} = C_{44}^m + \frac{\nu^p C_{44}^{pm} 2 \langle T_{1212}^p \rangle + \nu^a C_{44}^{am} 2 \langle T_{1212}^a \rangle}{\nu^m + 2\nu^p \langle T_{1212}^p \rangle + 2\nu^a \langle T_{1212}^a \rangle} \quad (\text{Ec. 2.65})$$

donde:

$$C_{11}^{pm} = C_{11}^p - C_{11}^m \quad C_{44}^{pm} = C_{44}^p - C_{44}^m \quad (\text{Ec. 2.66})$$

$$C_{11}^{am} = C_{11}^a - C_{11}^m \quad C_{44}^{am} = C_{44}^a - C_{44}^m \quad (\text{Ec. 2.67})$$

$$\langle T^p \rangle = \langle T_{1111}^p \rangle + 2\langle T_{1122}^p \rangle \quad \langle T^a \rangle = \langle T_{1111}^a \rangle + 2\langle T_{1122}^a \rangle \quad (\text{Ec. 2.68})$$

Una vez calculadas las componentes  $C_{ij}$  del tensor de constantes elásticas y teniendo la densidad del compuesto, las velocidades longitudinal y transversal pueden ser obtenidas, ecuaciones 2.20 y 2.21.

La formulación del modelo trifásico permitió estudiar el comportamiento de la velocidad ultrasónica al variar las características microestructurales de compuestos de cemento como el mortero. Su aplicación para la caracterización de la porosidad en morteros obtuvo buenos resultados logrando una estimación del volumen de poros con un error medio global del 10%. Este error es del mismo orden y magnitud que el que se obtienen hoy en día en los ensayos destructivos [Hernández, 06].

## **2.7. Resumen**

La gran heterogeneidad de los materiales cementicios y en particular de su estructura porosa, donde las dimensiones de los poros varían desde los ángstrom hasta los milímetros, hace necesaria la aplicación de modelos multifásicos capaces de describir las propiedades globales del compuesto a partir de su microestructura. Los modelos constitutivos aplicados a estos materiales van desde los más sencillos, que se fundamentan en la regla de

mezclas, hasta aquellos basados en la micromecánica, en los que se precisa la manipulación de tensores de cuarto orden.

En este capítulo hemos expuesto una revisión de los principales modelos constitutivos aplicados a los materiales base cemento. Esta revisión nos ha mostrado que la caracterización de la estructura porosa a partir de dichos modelos, es un tema poco abordado en la literatura. Por otra parte, constatamos que es necesario un conocimiento de los materiales base cemento, que abarque desde la química del cemento hasta el desarrollo de la microestructura, para definir o utilizar modelos que sean capaces de establecer las relaciones entre las propiedades mecánicas y la microestructura.

Con el fin de aplicar los modelos constitutivos a la caracterización de la estructura porosa, hemos realizado un estudio teórico a partir de datos experimentales tomados de [Hernández, 02]. Las simulaciones llevadas a cabo con dichos modelos en los que se ha considerado la porosidad como una fase más, han mostrado tener éxito limitado o incluso han inducido errores bastante grandes.

Además, se han aplicado los modelos utilizando la división en escalas de longitudes mecánicas, descritas en el capítulo 1, así como las propiedades elásticas determinadas mediante nanoindentación [Constantinides, 04]. Las simulaciones, realizadas en Matlab, muestran un mejor ajuste de los modelos, pero se han observado resultados contradictorios que hacen necesario profundizar en este tema.

Los modelos micromecánicos, aunque son más complejos, nos permiten, mediante aproximaciones, obtener propiedades mecánicas a grandes longitudes de escala tomando como base las propiedades del material en longitudes de escala inferiores. En este sentido, los modelos micromecánicos bifásico y trifásico han mostrado tener éxito en la estimación de la porosidad, a partir de la velocidad ultrasónica, con errores del mismo orden que los obtenidos mediante ensayos destructivos de porosimetría.



# **CAPÍTULO 3**

## **EXTENSIÓN DEL MODELO MICROMECAÍNICO**

### **TRIFÁSICO A UN MODELO N-FÁSICO**

*A partir del modelo trifásico, en este capítulo se extiende teóricamente dicho modelo al caso de materiales N-fásicos, y se aplica a dos casos particulares: hormigón con inclusiones de acero y mortero cuyos poros se encuentran parcialmente llenos de agua.*

#### **3.1. Introducción**

En el capítulo 2 se han expuesto los diferentes modelos multifásicos y micromecánicos que han sido aplicados a los materiales cementicios y se ha

podido comprobar tanto la bondad de dichos modelos así como algunas de sus limitaciones. De entre estos modelos, el que mejor resultado ha mostrado para la caracterización de la porosidad en morteros ha sido el propuesto por [Hernández, 02]. Por lo cual en una primera aproximación para la caracterización del hormigón, aplicaremos el citado modelo. No obstante, hay que tener en cuenta que este material está formado además por agregados gruesos, cuyas propiedades, tales como módulo de elasticidad, fracción de volumen y geometría, pueden diferir de las propiedades consideradas para el mortero. Por tanto nos surge el siguiente interrogante ¿debemos considerar estos agregados gruesos como una nueva fase en el hormigón? Para dar respuesta a esta pregunta dedicaremos la primera parte de éste capítulo a evaluar la influencia de la adición del árido grueso en las propiedades globales del material, desde el punto de vista de las propiedades mencionadas anteriormente. Así como la valoración de las posibles agrupaciones de las distintas fases presentes en el mortero y el hormigón.

Para evaluar si el hormigón es un material trifásico o tetrafásico, analizaremos primero si aplicar dos veces el modelo bifásico da los mismos resultados que aplicar una vez el modelo trifásico, considerando solamente el mortero. Después se estudiará la aplicación del trifásico al hormigón agrupando diferentes fases como una sola. A partir de las conclusiones que se obtengan se planteará la extensión del modelo micromecánico de tres fases a cuatro o más fases.

### 3.2. Modelo bifásico vs. Modelo trifásico.

En este apartado compararemos los resultados que se obtienen con la aplicación de los modelos bifásico y trifásico a los materiales cementicios. Ambos modelos se aplicarán sobre mortero considerando diferentes agrupaciones de las fases. Las propiedades de las fases constituyentes del mortero: pasta sin poros, arena y poros se muestran en la tabla 3.1.

	<b>Fase 1 Pasta (m)</b>	<b>Fase 2 Poros (p)</b>	<b>Fase 3 Arena (a)</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	46	0	80.7
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	12.9	0	32.64
<b>E (GPa)</b>	33.67	0	75.75
<b>μ</b>	0.31	--	0.16
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.23	0	2.67

Tabla 3.1. Parámetros de las fases consideradas en el mortero

Para aplicar el modelo trifásico consideraremos el mortero formado por pasta de cemento, arena y poros, mientras que para el modelo bifásico estudiaremos dos casos en función de cómo se agrupen las fases. En cada caso el resultado del primer bifásico será una fase del segundo bifásico. Los casos a considerar son los siguientes:

- i. Primer bifásico: Pasta sin poros + poros.

Segundo bifásico: Pasta con poros + arena.

- ii. El primer bifásico se realiza con las dos fases sólidas, pasta y arena, mientras que el siguiente bifásico considera fase sólida más poros.

En ambos casos, se ha modelado la arena como una esfera y los poros como cilindros alargados (capilares), siendo las relaciones de aspecto  $r_a=1$ ,  $r_p=1000$  respectivamente. Además se evaluaron distintas fracciones de volumen de arena, que se corresponden con las relaciones arena/cemento 1/1, 2/1 y 3/1. Las fracciones de volumen utilizadas se muestran a continuación:

- Para la relación arena/cemento 1/1:  
 $v_a= 0.340$ ,  $v_p= 0.126$  y  $v_m= 0.534$ .
- Para la relación arena/cemento 2/1:  
 $v_a= 0.497$ ,  $v_p= 0.136$  y  $v_m= 0.367$ .
- Para la relación arena/cemento 3/1:  
 $v_a= 0.584$ ,  $v_p= 0.180$  y  $v_m= 0.236$ .

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.2.

RELACIONES Arena/cemento	Ctes elásticas y velocidad	TRIFASICO	DOS BIFÁSICOS	
			(Pasta y Poros) + Arena	(Pasta y Arena) + Poros
1/1	$C_{11}$ (GPa)	38.35	37.72	40.45
	$C_{44}$ (GPa)	12.86	12.48	13.45
	E (GPa)	32.09	31.27	33.65
	$\mu$	0.25	0.25	0.25
	$V_l$	4274.6	4239.4	4390.1
2/1	$C_{11}$ (GPa)	40.42	38.82	44.12
	$C_{44}$ (GPa)	14.28	13.36	15.44
	E (GPa)	35.04	33.07	38.01
	$\mu$	0.23	0.24	0.23
	$V_l$	4340.2	4253.4	4534.9

<b>3/1</b>	$C_{11}$ (GPa)	37.74	33.43	43.46
	$C_{44}$ (GPa)	13.90	11.76	15.87
	E (GPa)	33.60	28.90	38.48
	$\mu$	0.21	0.23	0.21
	$V_l$	4255	3893	4565.8

Tabla 3.2. Resultados obtenidos tras la aplicación de un trifásico y dos bifásicos sucesivos

Si comparamos los resultados que se obtienen de aplicar dos veces el modelo bifásico, con los resultados que brinda el modelo trifásico podemos apreciar que la predicción del modelo trifásico se encuentra entre los dos casos de aplicación de modelos bifásicos consecutivos, tanto para la estimación de las constantes elásticas como de la velocidad. Aunque la diferencia entre la aplicación de los bifásicos es mayor a medida que aumenta la proporción de arena. Además se observa que la consideración de la pasta de cemento y la arena como una sola fase, conduce a propiedades elásticas más altas, en todos los casos evaluados.

Las conclusiones obtenidas de la comparación bifásico vs. trifásico nos permiten afirmar que modelar el mortero como un material trifásico nos proporciona resultados más acertados que considerar éste como bifásico.

### 3.3. El hormigón como material trifásico.

Atendiendo a los resultados obtenidos en el apartado anterior, estudiaremos ahora la posibilidad de modelar el hormigón como un material de tres fases, cuyas propiedades se muestran en la tabla siguiente (tabla 3.3). Al igual que en el caso del mortero, los agregados se consideran esféricos, mientras que los poros se consideran cilindros alargados. La consideración de la geometría de los agregados gruesos como esférica puede no estar de acuerdo con la real, pero en estudios realizados por Hernández [Hernández, 02], se vio que la geometría de los agregados tenía muy poca influencia en la velocidad ultrasónica.

	Pasta	Agregados finos	Agregados gruesos	Poros
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	32.6	84.33	68.78	0
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	9.7	31.63	25.79	0
<b>E (GPa)</b>	24.99	75.9	61.9	0
<b>μ</b>	0.29	0.2	0.2	--
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.5	2.67	2.7	0
<b>ν</b>	0.22	0.4	0.3	0.08

Tabla 3.3. Parámetros de las fases consideradas en el hormigón

Para el estudio de los modelos consideraremos cuatro casos posibles en función de cómo se agrupen las diferentes fases:

**Caso 1.** Bifásico (pasta de cemento y poros) + Bifásico (agregados finos y gruesos)

- i. Aplicaremos en primer lugar un modelo bifásico con la pasta de cemento y los poros, donde la fracción de volumen de poros es  $v=0.08$  del total. El resultado formará la fase 1
- ii. Seguidamente realizaremos un promedio (en serie y paralelo) de los agregados. El resultado formará la fase 2
- iii. Aplicaremos un bifásico a las fases 1 y 2 (tabla 3.4)

	<b>Pasta con poros Fase (1)</b>	<b>Agregados (promedio arena y grava) Fase 2</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	16.60	77.28
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	5.51	28.98
<b>E (GPa)</b>	13.77	69.55
<b><math>\mu</math></b>	0.25	0.2
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.83	2.68
<b><math>\nu</math></b>	0.3	0.7

*Tabla 3.4. Parámetros de entrada al segundo bifásico*

**Caso 2.** Bifásico (pasta de cemento y poros) + Trifásico (agregados finos + agregados gruesos).

Como en el caso anterior aplicaremos en primer lugar un modelo bifásico con la pasta de cemento y los poros. Los parámetros de entrada al modelo trifásico se muestran en la tabla 3.5.

	Pasta y poros (bifásico)	Agregados finos	Agregados gruesos
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	16.60	84.33	68.78
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	5.51	31.63	25.79
<b>E (GPa)</b>	13.79	75.90	61.90
<b>μ</b>	0.25	0.2	0.2
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.83	2.67	2.7
<b>v</b>	--	0.4	0.3

Tabla 3.5. Parámetros de entrada al trifásico

**Caso 3.** Trifásico: pasta de cemento + poros + agregados finos y gruesos

En este caso volvemos a considerar los agregados como fase promedio (serie paralelo), ver tabla 3.6.

	Pasta	Poros	Agregados (promedio de finos y gruesos)
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	32.6	0	77.28
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	9.7	0	28.98
<b>E (GPa)</b>	29.99	0	69.55
<b>μ</b>	0.29	--	0.2
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.5	0	2.68
<b>v</b>	0.22	0.08	0.7

Tabla 3.6. Parámetros de las fases del trifásico

**Caso 4.** Bifásico + Trifásico: pasta de cemento y agregados finos + poros + agregados gruesos.

La fase matriz del trifásico es el resultado de aplicar el modelo bifásico a la pasta de cemento y los agregados finos, ver tabla 3.7.

	<b>Pasta de cemento y agregados finos</b>	<b>Poros</b>	<b>agregados gruesos</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	56.93	0	68.78
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	19.04	0	25.79
<b>E (GPa)</b>	47.55	0	61.9
<b>μ</b>	0.25	--	0.2
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.6097	0	2.7
<b>v</b>	0.62	0.08	0.3

*Tabla 3.7. Parámetros de las fases del trifásico*

Los resultados que se obtienen con las distintas agrupaciones de fases consideradas se muestran en la tabla 3.8.

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	42.61	42.54	44.96	49.21
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	14.70	14.67	15.84	17.20
<b>E (GPa)</b>	36.35	36.30	38.90	42.35
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.43	2.43	2.43	2.43
<b>V<sub>l</sub> (m/s)</b>	4191.0	4185.8	4304.9	4501.9
<b>V<sub>t</sub> (m/s)</b>	2461.3	2458.4	2555.1	2661.4

*Tabla 3.8. Resultados obtenidos en función de la forma de agrupar las fases*

Analizando los resultados podemos obtener las siguientes conclusiones:

- i. La aplicación del modelo bifásico dos veces proporciona los valores más bajos para las propiedades del hormigón.
- ii. La inclusión de los agregados finos dentro de la matriz conduce a propiedades más altas que en el resto de los casos.

- iii. Los casos 1 y 2 muestran los mismos resultados, lo cual indica que el comportamiento del hormigón es independiente de considerar los agregados como fase promedio o como fases independientes.
- iv. Comparando el caso 2 con el caso 4, en los cuales se ha aplicado en primer lugar un bifásico y con los resultados de éste y las dos fases restantes un trifásico, vemos que el orden de escoger las fases produce diferencias significativas, fundamentalmente en las constantes elásticas, Para todos los parámetros calculados se obtienen valores más altos cuando el bifásico se aplica sobre la pasta y los áridos, que cuando las dos fases consideradas son pasta y poros.

### **3.4. Extensión teórica del modelo trifásico a materiales N-fásicos.**

En los modelos micromecánicos analizados y propuestos en [Hernández, 02] y reflejados en el capítulo 2, se ha considerado un medio efectivo, equivalente elásticamente al material heterogéneo dado. Este material compuesto está formado por una matriz equivalente y 1 o 2 tipos de inclusiones, el cual puede representarse por un elemento de volumen representativo con volumen  $V$  y masa  $M$ , de forma similar a la figura 2.4 del capítulo 2.

A partir de las formulaciones de los modelos bifásico y trifásico, ecuaciones 2.10 y 2.55, respectivamente, podemos observar que las propiedades elásticas del material heterogéneo son función de las propiedades elásticas, fracciones de volumen y distribución de orientaciones de las fases constituyentes:

$$C = f(C^m, C^a, C^p, \nu^m, \nu^a, \nu^p, \langle T_a \rangle, \langle T_p \rangle)$$

Además se observa que no hay interacción entre las familias o tipos de inclusiones, por lo cual la interacción sólo se produce entre la matriz y las inclusiones.

Partiendo de las consideraciones anteriores podemos generalizar el planteamiento teórico de los modelos micromecánicos planteados a materiales con N-fases.

Consideremos un material heterogéneo formado por una matriz y n tipos de inclusiones, al cual se le aplica una fuerza o deformación. El volumen del compuesto es la suma de los volúmenes de cada una de las fases, y análogamente la masa total será la adición de las masas de cada componente considerado.

$$V = \sum_{i=1}^N V_i \qquad M = \sum_{i=1}^N M_i$$

Dicho material, está sujeto a deformaciones uniformes constantes globales  $\varepsilon_0$ , de forma que la deformación global promedio puede describirse por medio de la integral.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int \varepsilon_0 dV \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Si tenemos en cuenta que el compuesto esta formado por una matriz y n-tipos de inclusiones, la integral anterior puede ser descompuesta en tantas integrales como fases se consideren:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_{V^m} \varepsilon^m dV + \sum_{i=1}^n \frac{1}{V^i} \int_{V^i} \varepsilon^i dV \quad (\text{Ec. 3.2})$$

En dicho material la deformación promedio del compuesto es la suma de deformaciones que se producen en cada una de las fases, teniendo en cuenta de que las deformaciones producidas en las inclusiones deberán ser realizadas sobre todas las orientaciones posibles ya que la deformación es función de la orientación.

El tensor de rigidez efectiva  $C$  de dicho compuesto puede definirse como el tensor que relaciona la deformación aplicada con el esfuerzo promedio:

$$\bar{\sigma} = C \varepsilon_0 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Considerando que tanto la matriz como las inclusiones embebidas en ella se consideran elásticas, homogéneas e isotrópicas, el esfuerzo promedio en cada fase está relacionado con la deformación promedio a través del tensor

de constantes elásticas de cada una de las fases, tal y como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}^m &= C^m \bar{\varepsilon}^m \\ \langle \sigma^i \rangle &= C^i \langle \varepsilon^i \rangle\end{aligned}\tag{Ec. 3.4}$$

Supondremos que cada tipo  $i$  de inclusiones tiene la misma geometría elipsoidal y es de un mismo material. Su distribución de orientaciones viene dada por la función densidad de probabilidad cuyos argumentos son los ángulos de Euler que describen la orientación y distribución de las inclusiones (ecuación 2.20 capítulo 2).

Para relacionar la deformación uniforme global aplicada al compuesto con las deformaciones promedio de cada una de las fases, es necesario introducir el factor de concentración de deformaciones promedio  $A$ . Si  $\varepsilon_0$  está aplicado en la frontera  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0$  el tensor de rigidez efectiva será:

$$C = C^m + \sum_{i=1}^n v^i (C^i - C^m) \langle A^i \rangle\tag{Ec. 3.5}$$

donde  $v^i$  es la fracción de volumen ocupada por la familia  $i$  de inclusiones.

El factor de orientaciones promedio puede evaluarse mediante la teoría de campos promedios de Mori-Tanaka y el principio de la inclusión equivalente de Eshelby [Eshelby, 57] aproximando la deformación promedio en las inclusiones que actúan recíprocamente, con el de una inclusión simple en una matriz infinita sometida a una deformación promedio.

$$\langle A^i \rangle = \langle T^i \rangle \left[ \nu^i I + \sum_{i=1}^n \nu^i \langle T^i \rangle \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde I es el tensor unitario de cuarto rango y T el tensor de Wu, que puede escribirse considerando los ángulos de Euler:

$$\langle T \rangle = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \overline{T}(\phi, \theta, \psi) \Gamma(\phi, \theta, \psi) \sin(\theta) d\phi d\theta d\psi}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \Gamma(\phi, \theta, \psi) \sin(\theta) d\phi d\theta d\psi} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

siendo  $\Gamma(\phi, \theta, \psi)$  la función de distribución de orientaciones

Sustituyendo el factor de concentración de tensiones (ecuación 3.6) en 3.5, obtenemos el **Tensor de Constantes Elásticas para Materiales con N-fases**, expresado como:

$$C = C^m + \sum_{i=1}^n \nu^i (C^i - C^m) \langle T^i \rangle \left[ \nu^m I + \sum_{i=1}^n \nu^i \langle T^i \rangle \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

El tensor de constantes elásticas de cuarto orden se puede reducir si tenemos en cuenta las características de isotropía del material a estudiar.

Tras el análisis realizado para los modelos bifásico y trifásico, podemos ver que puesto que no existen interacciones entre las inclusiones, las expresiones que aparecen anteriormente en términos de i son igualmente válidas para i=1 o i=2 (modelo bifásico y trifásico respectivamente), con los que se ha conseguido escribir el modelo de forma general, independientemente del número de fases, lo que hace pensar que estos modelos son extrapolables a N

fases, sin más que considerar N-1 (n) familias de inclusiones, siempre que las inclusiones no interactúen entre si.

### 3.5. Aplicación del modelo tetrafásico al hormigón

Al comienzo del presente capítulo nos planteábamos si debería tratarse al hormigón como un material trifásico o tetrafásico. Para ello se evaluó la equivalencia entre aplicar dos veces el modelo bifásico o una vez el modelo trifásico, y posteriormente se estudió la aplicación del modelo trifásico al hormigón variando la forma de agrupar las fases y estudiando las variaciones obtenidas en función de cómo sean tomadas éstas.

En el apartado anterior se ha desarrollado la formulación del modelo micromecánico para materiales con N-fases. Si consideramos el hormigón como un material tetrafásico, el tensor de constantes elásticas queda expuesto como:

$$C = C^m + \sum_{i=1}^3 v^p (C^i - C^m) \langle T^i \rangle \left[ v^m I + \sum_{i=1}^3 v^i \langle T^i \rangle \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Si suponemos que todas las fases son isotrópicas, el tensor de constantes elásticas se reduce a dos constantes elásticas independientes  $C_{11}$  y  $C_{44}$  (módulo transversal), en notación reducida:

$$\begin{aligned}
C_{11} = & C_{11}^m + \frac{\nu^a [C_{11}^a - C_{11}^m - \frac{4}{3}(C_{11}^a - C_{11}^m)] (\langle T_{1111}^a \rangle + 2\langle T_{1122}^a \rangle)}{\nu^m + \nu^a \langle T^a \rangle + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^w \langle T^w \rangle} \\
& + \frac{\nu^p [C_{11}^p - C_{11}^m - \frac{4}{3}(C_{11}^p - C_{11}^m)] (\langle T_{1111}^p \rangle + 2\langle T_{1122}^p \rangle)}{\nu^m + \nu^a \langle T^a \rangle + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^w \langle T^w \rangle} \\
& + \frac{\nu^w [C_{11}^w - C_{11}^m - \frac{4}{3}(C_{11}^w - C_{11}^m)] (\langle T_{1111}^w \rangle + 2\langle T_{1122}^w \rangle)}{\nu^m + \nu^a \langle T^a \rangle + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^w \langle T^w \rangle} \\
& + \frac{\frac{8}{3}\nu^a (C_{44}^a - C_{44}^m) \langle T_{1212}^a \rangle + \frac{8}{3}\nu^p (C_{44}^p - C_{44}^m) \langle T_{1212}^p \rangle + \frac{8}{3}\nu^w (C_{44}^w - C_{44}^m) \langle T_{1212}^w \rangle}{\nu^m + 2\nu^a \langle T_{1212}^a \rangle + 2\nu^p \langle T_{1212}^p \rangle + 2\nu^w \langle T_{1212}^w \rangle}
\end{aligned}$$

(Ec. 3.10)

$$C_{44} = C_{44}^m + \frac{\nu^a (C_{44}^a - C_{44}^m) 2 \cdot \langle T_{1212}^a \rangle + \nu^p (C_{44}^p - C_{44}^m) 2 \cdot \langle T_{1212}^p \rangle + \nu^w (C_{44}^w - C_{44}^m) 2 \cdot \langle T_{1212}^w \rangle}{\nu^m + 2\nu^a \langle T_{1212}^a \rangle + 2\nu^p \langle T_{1212}^p \rangle + 2\nu^w \langle T_{1212}^w \rangle}$$

(Ec. 3.11)

donde el subíndice m se refiere a la matriz y los subíndices a, p, w a las inclusiones.  $T_{ijkl}$  son las componentes del tensor de Wu, las cuales se pueden calcular según [Wu, 66].

Las componentes del tensor de constantes elásticas están relacionadas con la velocidad longitudinal y transversal por las expresiones:

$$\begin{aligned}
V_l &= \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \\
V_t &= \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}
\end{aligned}
\tag{Ec. 3.12}$$

donde  $\rho$  es la densidad del compuesto la cual es función de las densidades y fracciones de volumen de las fases constituyentes (ecuación 2.7 capítulo 2).

Aplicaremos el modelo tetrafásico al hormigón, para analizar las diferencias con los resultados obtenidos con los modelos bifásico y trifásico.

Los parámetros elásticos de cada una de las fases que forman el hormigón aparecen en la tabla 3.9.

	<b>Pasta</b>	<b>Poros</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	32.6	0	84.33	68.78
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	9.7	0	31.63	25.79
<b>E (GPa)</b>	24.99	0	75.90	61.90
<b>μ</b>	0.29	--	0.2	0.2
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.50	0	2.67	2.7
<b>ν</b>	0.22	0.08	0.4	0.3

*Tabla 3.9. Parámetros de las fases constituyentes del hormigón.*

En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos, aplicando tanto los modelos bifásico y trifásico (casos 1, 2, 3 y 4) así como el modelo tetrafásico.

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>	<b>Tetrafásico</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	42.61	42.54	44.96	49.21	44.90
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	14.70	14.67	15.84	17.20	15.82
<b>E (GPa)</b>	36.35	36.30	38.90	42.35	38.85
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43
<b>V<sub>l</sub> (m/s)</b>	4191.0	4185.8	4304.9	4501.9	4300.2
<b>V<sub>t</sub> (m/s)</b>	2461.3	2458.4	2555.1	2661.4	2552.4

*Tabla 3.10. Resultados obtenidos para los modelos bifásico, trifásico y tetrafásico*

Si comparamos los resultados que ofrece el modelo tetrafásico, frente a los analizados anteriormente, vemos que los valores obtenidos a partir del modelo son equivalentes al caso 3 en el que se aplicaba un trifásico considerando los agregados como una fase promedio. Este resultado pone de manifiesto la analogía entre tomar los agregados como promedio o como fases independientes, a la vez que permite comprobar la validez del modelo tetrafásico.

A la vista de los resultados obtenidos, puede llegarse a la conclusión de que el modelo trifásico es capaz de predecir el comportamiento de un material como el hormigón en el cual puede haber cuatro fases. Dicha afirmación es cierta sólo cuando las propiedades elásticas de los agregados son similares, en otro caso será necesario la aplicación del modelo anteriormente expuesto. Dada la versatilidad del modelo N-fásico aquí desarrollado, se pretende aplicarlo a un conjunto más amplio de materiales para los cuales sus propiedades elásticas pueden diferir hasta en un orden de magnitud. Tal es el caso, por ejemplo, de hormigones especiales o reforzados, en los que las características elásticas de alguno de sus agregados, como puede ser la fibra de vidrio o acero, difieren mucho de las de los áridos.

Otro aspecto que pone de manifiesto la importancia de un modelo N-fásico es el hecho de profundizar en el estudio de la estructura porosa de los materiales cementicios. Hasta el momento, en los modelos micromecánicos anteriores, se había supuesto la porosidad como una sola fase rellena de un

único fluido, pero en la realidad es común encontrar la estructura porosa parcialmente llena de agua. Esta afirmación, sin ser falsa, no nos permite abordar determinados casos como pueden ser la presencia de microgrietas, con una geometría diferente a la de los poros, o una estructura porosa parcialmente llena de algún fluido. Éste último caso cobra mucha importancia en climas con condiciones climáticas muy diferenciadas, como el de España, donde el agua contenida en el espacio del poro al llegar las bajas temperaturas se congela provocando una dilatación del poro y posteriormente una microfisuración. Por otra parte es importante conocer la cantidad de agua contenida en la estructura porosa, pues este dato es relevante para la velocidad de degradación de la estructura de hormigón.

### **3.6. Comportamiento de la velocidad de las ondas ultrasónicas a partir del modelo tetrafásico en compuestos de cemento tetrafásicos**

El modelo micromecánico de N-fases presentado anteriormente nos permite calcular las propiedades elásticas de materiales multifásicos teniendo en cuenta las características microestructurales de las fases constituyentes. En este apartado aplicaremos el modelo micromecánico para estudiar el comportamiento de los materiales base cemento con fibras de acero.

Consideraremos un material cementicio formado por la matriz, (pasta de cemento), y tres tipos de inclusiones, poros, arena y acero. En los apartados siguientes estudiaremos en qué medida la adición del acero provoca cambios en la microestructura de estos materiales.

### 3.6.1. Influencia del volumen de acero y la geometría del poro en la velocidad, a partir del modelo tetrafásico.

En este apartado evaluaremos cómo influye el volumen de acero en el comportamiento de la velocidad ultrasónica con respecto a la estructura porosa. Consideraremos que las inclusiones están distribuidas de forma aleatoria en la matriz cementicia y modelaremos el árido fino y el acero como esferas, mientras que la relación de aspecto del poro variará de esferoides lenticulares a oblongos. Consideramos que las propiedades elásticas se mantienen constantes, tabla 3.11, variando solamente la fracción de volumen de acero presente entre 0% y 5%. La fracción de volumen de agregados (arena y acero) se mantiene constante e igual a 0.51.

	<b>Pasta de cemento</b>	<b>Poros</b>	<b>Arena</b>	<b>Acero</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	44	0	79.8	257.25
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	12	0	32.3	78.16
<b>E (GPa)</b>	31.5	0	74.9	200.37
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2	1	2.6	7.9

Tabla 3.11. Propiedades de la matriz y las inclusiones correspondientes al compuesto tetrafásico

En la figura 3.1 se muestra la influencia de la variación de la relación de aspecto del poro (entre 0.0001 y 18) y del volumen de fibras de acero en la velocidad longitudinal. Se puede observar que para relaciones de aspecto del poro superiores a 6 apenas hay variaciones en la velocidad, (del orden del 25m/s), por lo que supondremos ese valor como límite en la relación de aspecto del poro.

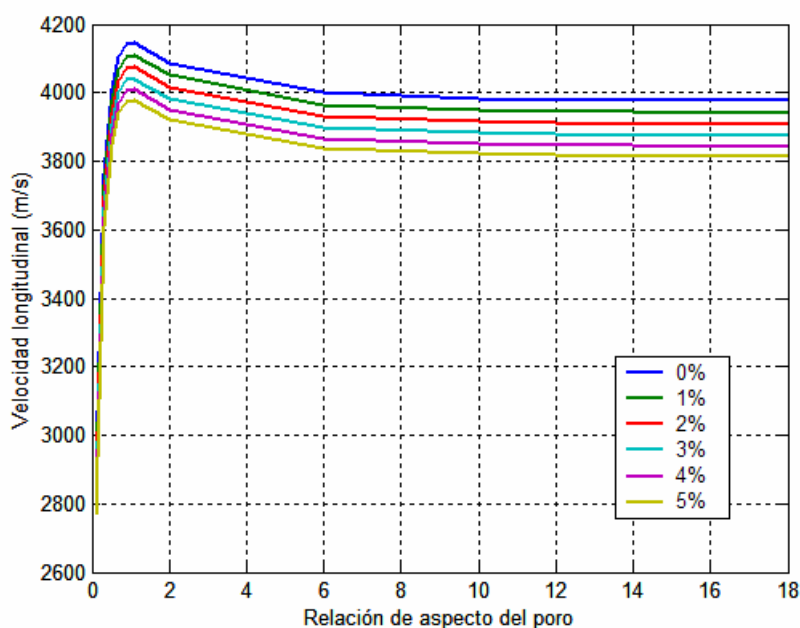


Figura 3.1. Influencia de la geometría del poro y la fracción de volumen del acero en la velocidad longitudinal.

En la gráfica anterior se puede observar que a medida que aumenta la proporción de acero, la velocidad disminuye, de tal forma que suponiendo poros esféricos, y por tanto una relación de aspecto igual a la unidad, se produce una variación de la velocidad longitudinal de 170 m/s cuando la proporción de acero pasa del 0% al 5%. Para una misma fracción de volumen

de acero la velocidad aumenta significativamente cuando la relación de aspecto del poro pasa de 0 a 1, para comenzar a disminuir a partir de este valor (140m/s cuando la relación de aspecto pasa de 1 a 6).

A la vista de los resultados puede afirmarse que la geometría lenticular afecta más significativamente a la velocidad que la geometría oblonga, por lo cual en materiales con microgrietas el descenso de la velocidad debe ser significativo, este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en [Hernández, 06].

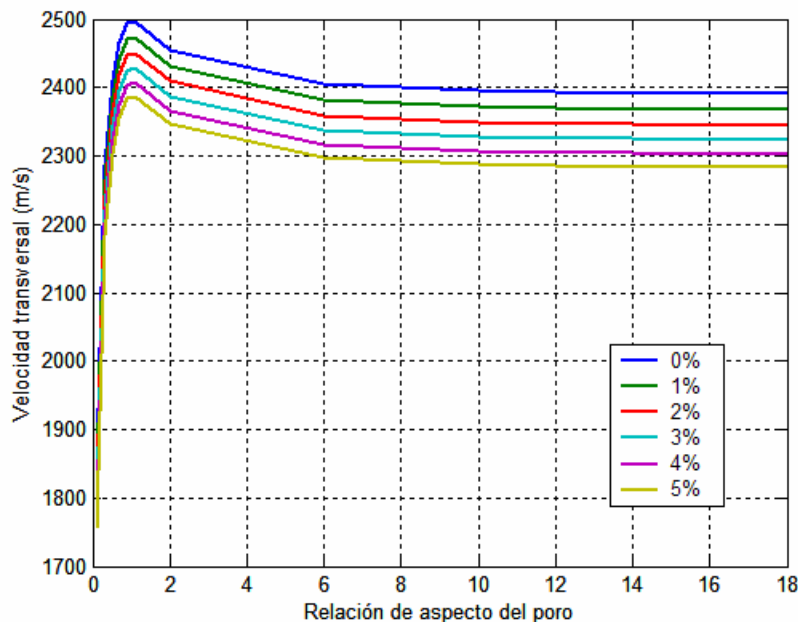


Figura 3.2. Influencia de la geometría del poro y la fracción de volumen del acero en la velocidad transversal.

El comportamiento observado en la velocidad transversal, figura 3.2, es análogo al referido anteriormente para la velocidad longitudinal.

### 3.6.2. Influencia de la geometría de la fibra de acero en la velocidad ultrasónica.

En este apartado evaluaremos cómo influye la geometría de la fibra en el comportamiento de la velocidad ultrasónica. Nuevamente modelaremos las inclusiones de arena como esferas y distribuidas de forma aleatoria en la matriz cementicia, mientras que los poros se consideraran como esferoides oblongos.

Las propiedades elásticas de cada una de las fases del compuesto tetrafásico son las que se indicaron anteriormente en la tabla 3.11, variando la fracción de volumen de acero entre 0% y 5% y su geometría entre lenticular y oblonga.

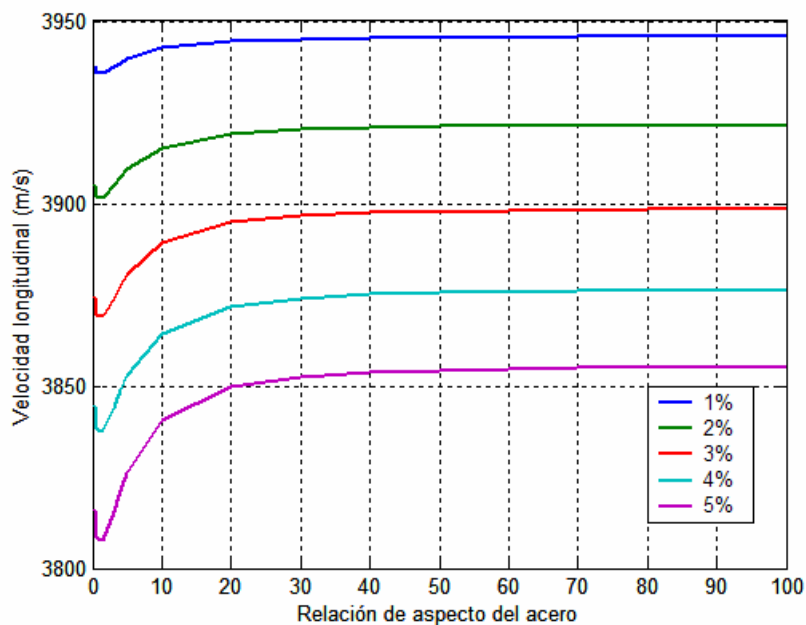


Figura 3.3. Influencia de la relación de aspecto y fracción de volumen del acero en la velocidad longitudinal de las ondas ultrasónicas.

En la figura 3.3 se representa el comportamiento de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales con respecto a la relación de aspecto del acero para las distintas fracciones de volumen consideradas.

En la figura anterior se puede apreciar que la geometría de las fibras de acero tiene gran influencia en la velocidad ultrasónica, tanto para los esferoides lenticulares como oblongo. A medida que la relación de aspecto aumenta hacia 1 la velocidad disminuye, mientras que las fibras más esbeltas provocan el efecto contrario, estabilizándose la velocidad para relaciones de aspecto superiores a 40, aproximadamente. Este comportamiento concuerda con el hecho de que las fibras comerciales que se utilizan en los materiales cementicios sean de relaciones de aspecto superiores a 35.

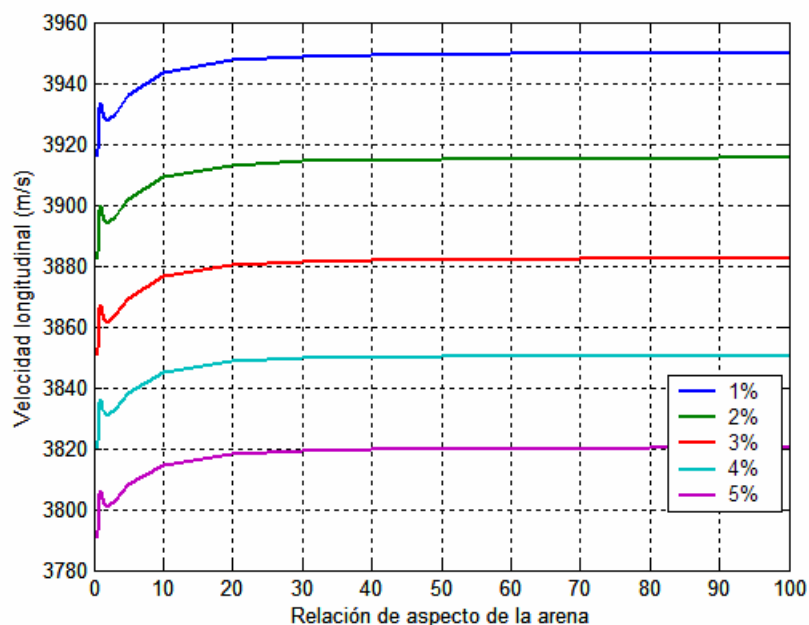


Figura 3.4. Influencia de la relación de aspecto y fracción de volumen de la arena en la velocidad longitudinal de las ondas ultrasónicas.

El comportamiento de las fibras de acero difiere completamente con el de arena, la cual no afecta prácticamente a la velocidad, 30 m/s, independiente del volumen de acero considerado, figura 3.4.

### 3.6.3. Influencia de las propiedades del acero en la velocidad de las ondas ultrasónicas

En este apartado se estudia cómo afectan las propiedades elásticas, del acero a la velocidad ultrasónica en los morteros reforzados con este material, al aplicar el modelo tetrafásico. En la tabla 3.12 se recogen las propiedades de las fases constituyentes así como el rango de variación estudiado. En este caso suponemos que tenemos una porosidad del 20%, una fracción de volumen de acero de 2% y de agregados en total de 51%. Los poros se modelan como cilindros alargados y el acero con una relación de aspecto de 40.

	<b>Pasta de cemento</b>	<b>Poros</b>	<b>Arena</b>	<b>Acero</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	44	0	79.8	250 - 280
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	12	0	32.3	70 - 82
<b>E (GPa)</b>	31.5	0	74.9	183 - 212
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.0	1	2.6	7.9

Tabla 3.12. Propiedades de la matriz y las inclusiones correspondientes al compuesto tetrafásico considerado.

En la figura 3.5 se muestra el comportamiento de la velocidad longitudinal al variar las propiedades elásticas del acero.

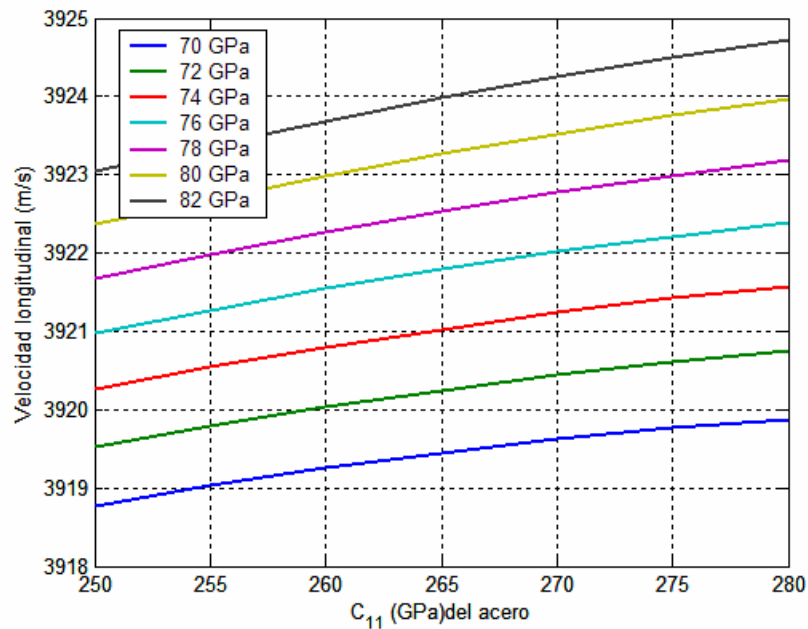


Figura 3.5. Influencia de las propiedades elásticas del acero en la velocidad longitudinal del mortero reforzado con fibra.

Podemos observar que el aumento del módulo transversal ( $C_{44}$ ) del acero provoca un mínimo aumento de la velocidad, de aproximadamente 5 m/s para el rango estudiado. Igualmente para un valor determinado de  $C_{44}$ , las variaciones de la velocidad con  $C_{11}$  son, para el caso más extremo ( $C_{44}=82$ ) de 1.7m/s. Por tanto puede concluirse que los cambios de las propiedades elásticas del acero no afectan a la velocidad longitudinal, a diferencia de lo que sucede con la relación de aspecto. Este comportamiento también se ha observado en la velocidad transversal, figura 3.6.

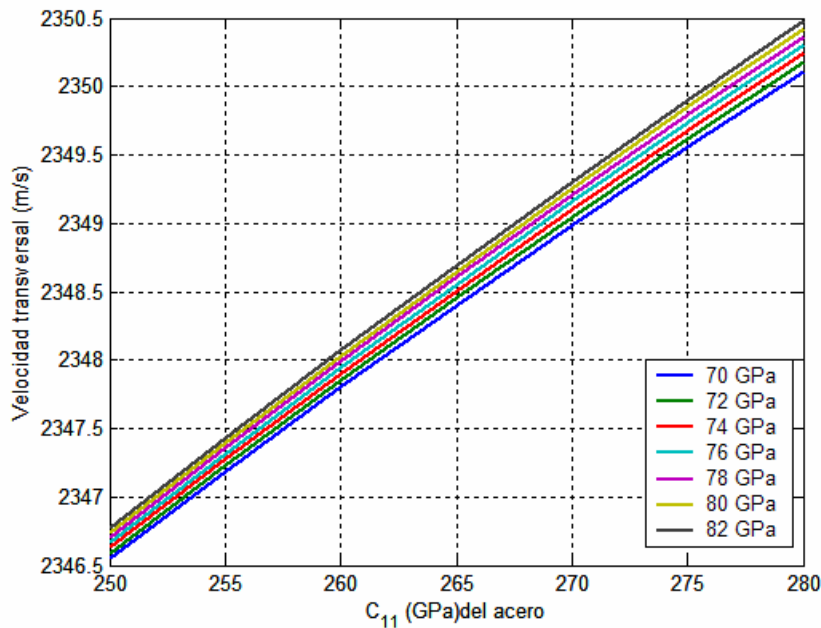


Figura 3.6. Influencia de las propiedades elásticas del acero en la velocidad transversal del mortero reforzado con fibra.

A continuación estudiamos la influencia de las constantes elásticas y la fracción de volumen de poros en la velocidad ultrasónica, para ello modelamos los poros como cilindros alargados de longitud infinita con relación de aspecto  $r_{ap}=100$  y variamos la porosidad entre 0.1 y 30 %. En la tabla 3.13 se muestran las propiedades de las fases constituyentes.

	<b>Pasta de cemento</b>	<b>Poros</b>	<b>Arena</b>	<b>Acero</b>
<b><math>C_{11}</math> (GPa)</b>	44	0	79.8	250 - 280
<b><math>C_{44}</math> (GPa)</b>	12	0	32.3	78.16
<b>E (GPa)</b>	31.5	0	74.9	199 - 204
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.0	1	2.6	7.9

Tabla 3.13. Propiedades de la matriz y las inclusiones correspondientes al compuesto tetrafásico considerado.

En la figura 3.7 se muestra la variación de la velocidad longitudinal con  $C_{11}$  del acero y la fracción de volumen de poros. Podemos observar cómo el aumento de la porosidad desde 0% hasta 30% en la pasta provoca una disminución de la velocidad de las ondas longitudinales de 1376m/s, siendo esta variación de la velocidad independiente de las constantes elásticas del acero, como se había visto anteriormente.

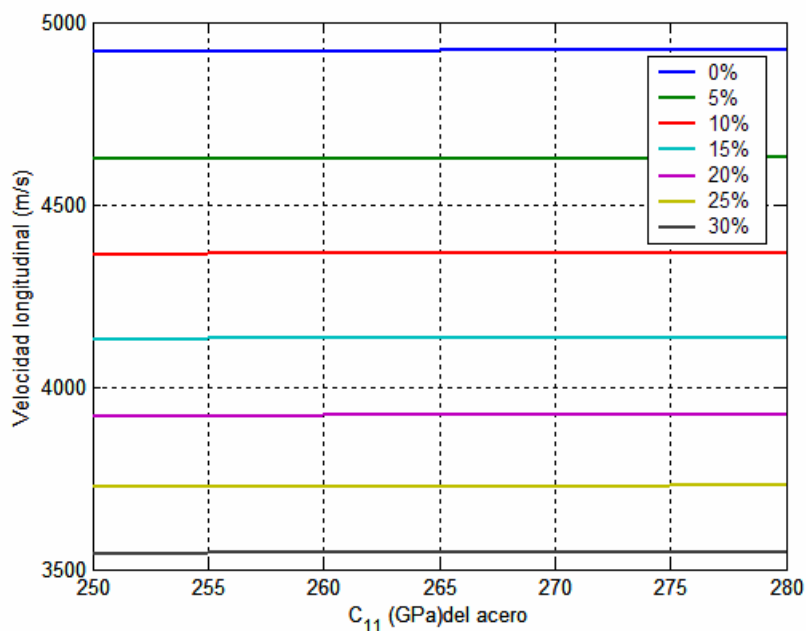


Figura 3.7. Influencia de la porosidad y el valor de la constante  $C_{11}$  del acero en la velocidad longitudinal del mortero reforzado con fibra.

En la figura 3.8 se muestran la influencia de las constantes elásticas y la fracción de volumen del acero en la velocidad longitudinal para una porosidad del 20%. Se puede observar que la velocidad longitudinal disminuye al aumentar la cantidad de acero. Sin embargo, la variación de las propiedades

elásticas no influye prácticamente en la velocidad, 120m/s para  $C_{11}=250\text{GPa}$  y 109m/s cuando  $C_{11}=280\text{GPa}$ .

A la vista de los resultados puede concluirse que las propiedades elásticas de las fibras de acero no influyen en la velocidad ultrasónica en contra de lo que sucede con su fracción de volumen.

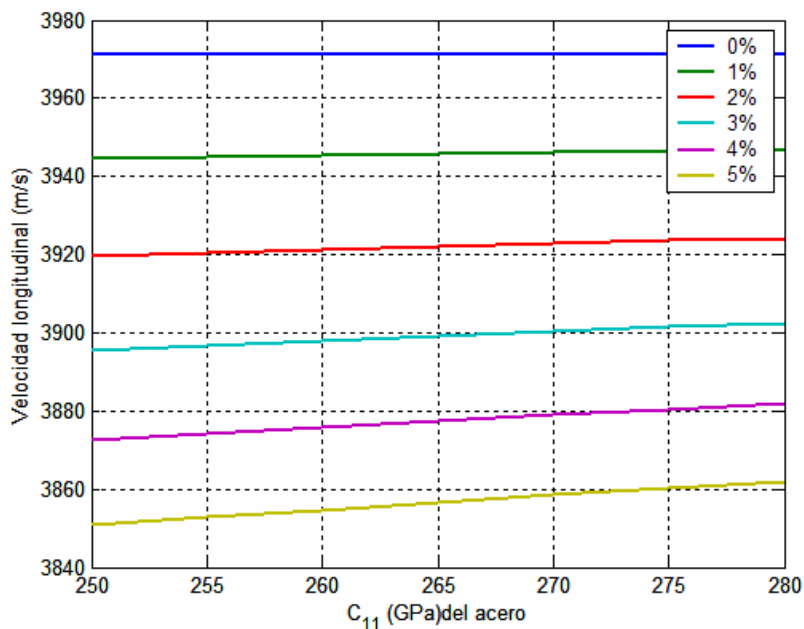


Figura 3.8. Influencia de las constantes elásticas y la fracción de volumen de acero en la velocidad longitudinal del mortero reforzado con fibra.

### 3.7. Predicción del comportamiento de la velocidad con el poro parcial o totalmente lleno de agua

La estructura porosa de los materiales cementicios, es una de las principales características microestructurales que influyen en los procesos de

degradación de estos materiales, siendo la responsable del transporte de sustancias hacia el interior de la estructura de hormigón. Tal y cómo se vio en el capítulo 1 de la presente memoria, la estructura porosa esta formada por una extensa red de poros interconectados que abarcan tamaños desde los nanómetros a los milímetros, dicha red puede estar parcial o totalmente llena de fluidos. Uno de los fluidos generalmente presente en las estructuras es el agua, que en dependencia del medio ambiente en el que está situada la estructura de hormigón, provocará daños por ciclos hielo – deshielo, procesos de difusión, procesos de mojado - secado, entre otros. Por lo general, los factores anteriormente mencionados se presentan acoplados unos con otros, lo cual hace muy compleja la aplicación de modelos que nos aporten información global sobre la durabilidad de los materiales cementicios.

En diversas investigaciones se ha estudiado la influencia del contenido del agua en la resistencia mecánica del hormigón mediante ensayos destructivos. Los ensayos de compresión uniaxial han sido los más utilizados para evaluar las variaciones debido al secado [Yurtdas, 04], aunque muestran importantes dispersiones en las variaciones de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

Entre los métodos no destructivos utilizados para estudiar el efecto del agua en el poro podemos mencionar la termografía [Poblete, 07] y la medida de la velocidad del pulso ultrasónico, [Ohdaira, 00]. No obstante, la precisión de estas medidas puede estar influenciada por un amplio conjunto de factores que

van desde las características de los materiales constituyentes pasando por el proceso de fabricación hasta las condiciones a las cuales se encuentra expuesto el material cementicio. Debido al amplio número de variables que pueden afectar las medidas ultrasónicas, se han desarrollado y aplicado modelos micromecánicos que nos permiten abordar el problema desde el conocimiento de las características microestructurales de los materiales cementicios.

En este apartado, evaluaremos el comportamiento de los materiales cementicios al variar el contenido de agua en la estructura porosa. Para dicho estudio aplicaremos los modelos micromecánicos multifásicos desarrollados a lo largo de la memoria, conjuntamente con técnicas de ensayos no destructivos por ultrasonidos.

Para estudiar el comportamiento de la velocidad en morteros con el poro parcial o totalmente lleno de agua, emplearemos el modelo tetrafásico. En trabajos anteriores [Hernández, 02], se considero que los poros podían estar completamente llenos de aire o de agua. Analizaremos en este trabajo un estado intermedio, en el que parte de la estructura porosa tiene aire y el resto de los poros están llenos de agua, considerando, por tanto, las siguientes fases en el compuesto: pasta de cemento, arena, poros con agua y poros con aire.

La geometría de los poros se evaluará considerando éstos como esferoides oblongos con una relación de aspecto de 1000, simulando los poros capilares; mientras que la arena se modelará como una esfera, puesto que se

ha comprobado [Hernández, 06] que el cambio de geometría influye muy poco en la velocidad ultrasónica.

En primer lugar analizaremos el comportamiento de la porosidad en la velocidad ultrasónica a medida que el poro se va llenando de agua. Para esto supongamos que tenemos una probeta de la cual conocemos las propiedades elásticas y densidad de la matriz y de la arena, tabla 3.14. En este caso variaremos la relación arena/cemento 1/1, 2/1 y 3/1, y la porosidad total, entre el 5% y 25%.

	<b>Pasta de cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Poros con aire</b>	<b>Poros con agua</b>
<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	38	82.9	0	2.2
<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	10	33.5	0	0
<b>E (GPa)</b>	26.43	77.78	0	0.00
<b>μ</b>	0.32	0.16	--	0.50
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.5	2.67	0	1
<b>r<sub>a</sub></b>		1	1000	1000

Tabla 3.14. Parámetros de las probetas empleadas en la simulación

En las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se muestra la influencia de la variación de la porosidad en la velocidad para diferentes relaciones arena/cemento, 1/1, 2/1 y 3/1, respectivamente. En estas gráficas se presenta la velocidad normalizada, en función de la velocidad longitudinal del poro lleno y la velocidad longitudinal del poro vacío.

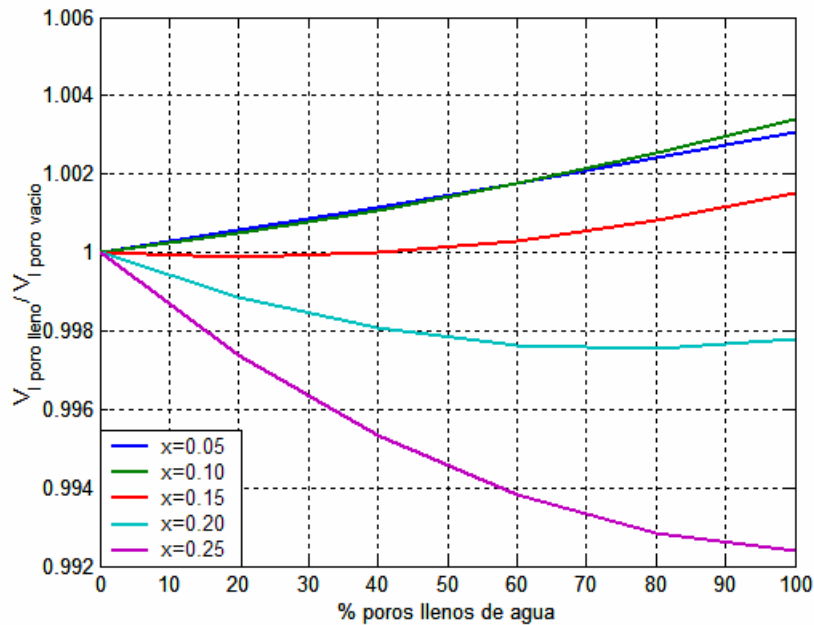


Figura 3.13. Influencia de la fracción de volumen de arena y porosidad en la velocidad para una relación 1/1 de arena/cemento

El comportamiento de la velocidad muestra ser muy dependiente de la porosidad. Se observa que a porosidades inferiores al 15%, la velocidad aumenta a medida que la estructura porosa se va llenando de agua. Mientras a porosidades superiores al 15% se produce un cambio de tendencia, disminuyendo la velocidad cuanto mayor sea la porosidad.

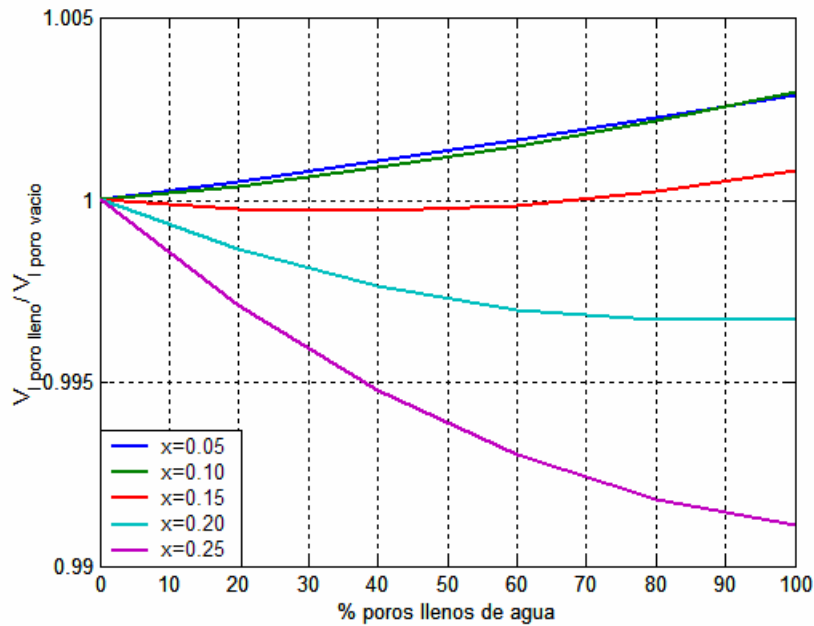


Figura 3.14. Influencia de la fracción de volumen de arena y porosidad en la velocidad para una relación 2/1 de arena/cemento

Si comparamos los gráficos para las distintas relaciones arena/cemento, se puede comprobar que el comportamiento es prácticamente el mismo que se ha descrito anteriormente, lo cual nos indica que la proporción de agregados finos (arena, en este caso) ejerce muy poca influencia en el velocidad del mortero a medida que su estructura porosa se llena de agua.

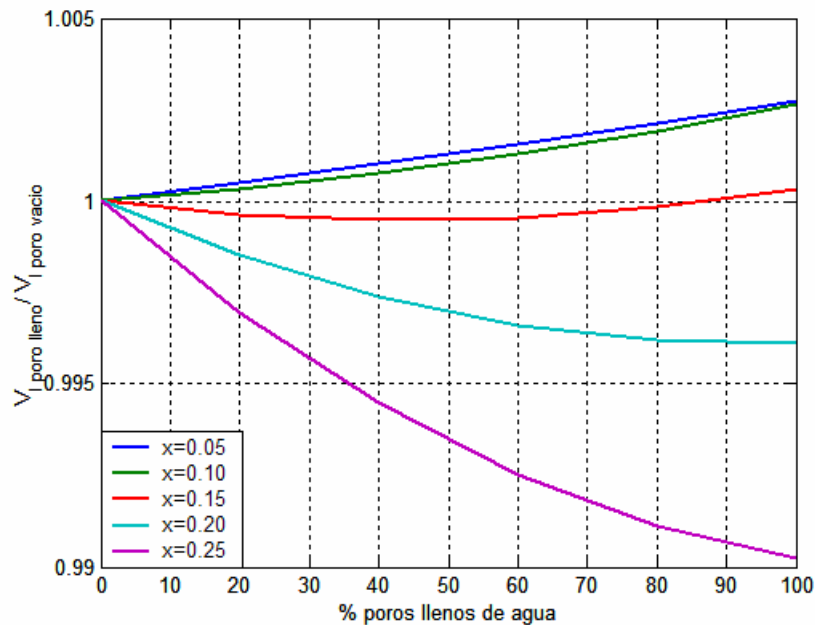


Figura 3.15. Influencia de la fracción de volumen de arena y porosidad en la velocidad para una relación 3/1 de arena/cemento

A continuación se analiza la influencia de las propiedades elásticas de la matriz en la velocidad, basado en el modelo tetrafásico. En este caso el módulo de elasticidad de pasta de cemento varía entre 20 y 45 GPa, mientras que la porosidad total se mantiene constante (15%). El resto de propiedades se mantienen constantes, ver tabla 3.14.

La figura 3.16 muestra la influencia del módulo de elasticidad de la matriz no porosa en la velocidad longitudinal. A partir de esta figura, podemos observar que la velocidad es muy susceptible a los cambios en las propiedades elásticas de la matriz en comparación con la arena. La matriz con mejores propiedades exhibe menos cambio en la velocidad que la matriz menos rígida, observando un cambio de comportamiento en torno a los 30 GPa.

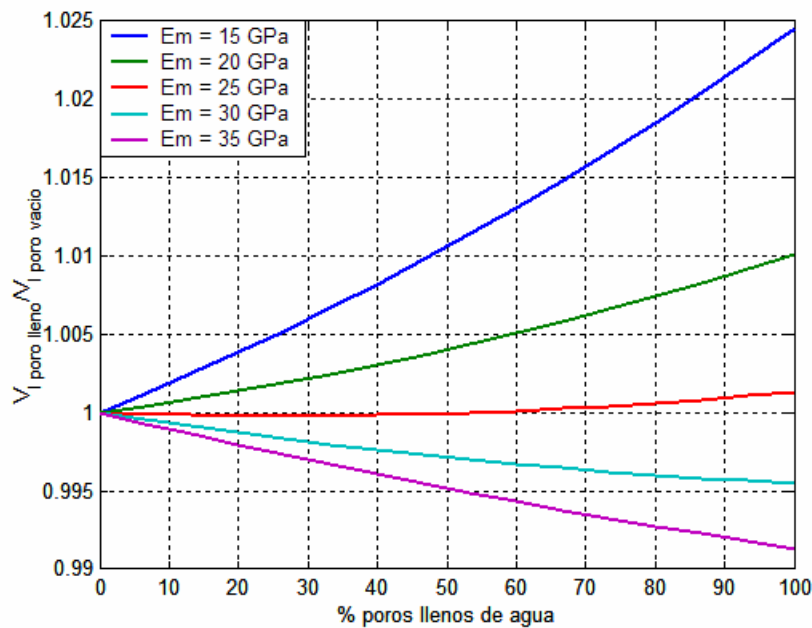


Figura 3.16. Influencia del módulo de elasticidad de la matriz en la velocidad longitudinal

### 3.8. Resumen.

La formulación y extensión del modelo micromecánico para materiales de N-fases nos ha permitido estudiar el comportamiento de la velocidad ultrasónica en materiales cementicios con fibras de acero y la influencia de la estructura porosa parcial o totalmente llena de agua. Para los diferentes casos analizados anteriormente podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Variación de la velocidad con la porosidad y las constantes elásticas de la matriz, para distintas relaciones de aspecto de los poros: Al

variar las propiedades elásticas de la pasta de cemento y la porosidad, cuando la arena y el acero son modelados como esferas, independientemente de la geometría del poro, puede verse que la velocidad es menor cuando parte de la arena se sustituye por acero. Además se observa que esta diferencia en la velocidad es independiente de la porosidad considerada, de las constantes elásticas de la matriz, y de la geometría del poro.

- Variación de la velocidad con las constantes elásticas de la matriz y la geometría del poro: La velocidad, tanto longitudinal como transversal es mayor para el material trifásico en el que no se considera el acero. La diferencia obtenida en la velocidad, (que con los datos considerados es del orden de 190m/s para la velocidad longitudinal y 120m/s para la transversal), no depende de las propiedades elásticas de la matriz, ni de la geometría del poro.
- Variación de la velocidad con la relación de aspecto del poro para distintas fracciones de volumen de acero: La velocidad obtenida es mayor en el caso del material trifásico, de tal forma que esta diferencia no depende significativamente de la geometría del poro, y sí de la fracción de volumen de acero.
- Variación de la velocidad con la porosidad de la pasta para distintas fracciones de volumen de acero: Nuevamente se observa que la velocidad disminuye cuando se añade acero al compuesto, aún cuando éste se encuentre en pequeñas cantidades.

- Variación de la velocidad con la relación de aspecto y fracción de volumen de acero presente en el compuesto: Cuando se sustituye parte de la arena presente en el compuesto trifásico por acero, aún cuando se considere que ambas inclusiones tienen la misma relación de aspecto, hay una variación significativa de la velocidad al añadir acero, de forma que ésta disminuye 290m/s al sustituir un 5% de la arena por acero, y 550m/s, para un 8% de acero.
- Variación de la velocidad con las constantes elásticas del acero para distintas porosidades de la pasta de cemento: Si comparamos este caso con el de un compuesto trifásico, vemos que al ser las constantes elásticas mayores para el acero que para la arena, las variaciones de la velocidad con  $C_{11}^w$  (independientemente de la porosidad de la pasta) son menores para el caso del acero.
- La variación de la velocidad ultrasónica cuando los poros se llenan de agua depende principalmente de las características elásticas de la matriz de cemento y de su porosidad total.

# **CAPÍTULO 4**

## **METODOLOGÍAS PARA LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA**

### **4.1. Ensayos no destructivos por ultrasonidos en materiales base cemento.**

En las grandes estructuras de hormigón, fabricadas in situ así como las producidas por unidades prefabricados, es de gran interés determinar la calidad del material. Dos de las magnitudes más utilizadas son la localización e identificación de defectos y la determinación de la resistencia a compresión del material. Aunque los métodos destructivos son los más empleados, en los

últimos 50 años los ensayos no destructivos y en particular los ensayos por ultrasonidos se han impuesto como una de las técnicas más utilizadas en la industria de la construcción. Muestra de ellos son las normas desarrolladas y ampliamente utilizadas en España, Europa y Estados Unidos.

La calidad de un hormigón normalmente es determinada por su resistencia a compresión y su homogeneidad. Esta calidad depende de muchos factores tales como el tipo y cantidad de cemento incluido, la resistencia de sus agregados, la relación agua/cemento, la condición de fraguado, endurecimiento (espesamiento de la mezcla) y curado, la edad del hormigón, el grado de humedad, etc. Todos estos factores hacen del hormigón un material heterogéneo y dinámico, lo cual limita las frecuencias de inspección que pueden ser utilizadas para este propósito a 100 kHz (o menos cuando examinamos distancias que exceden 1m).

Los parámetros ultrasónicos usados en la caracterización de materiales son la velocidad y la atenuación de las ondas ultrasónicas así como la caracterización del ruido ultrasónico proveniente de la estructura interna del material. De todos estos, el parámetro más utilizado para la estimación de la calidad de los materiales de construcción es la velocidad acústica. La medida de la velocidad ultrasónica en estos materiales puede suministrar información valiosa referida a sus propiedades elásticas, así como a determinar la posición de las grietas en los bloques del material.

Las propiedades que afectan la resistencia a compresión del hormigón también ejercen una influencia en la velocidad ultrasónica, aunque no siempre de la misma forma. Las peculiares características del hormigón, hacen imposible definir una relación específica entre su resistencia y la velocidad, para los distintos tipos de mezclas en términos de la influencia de los factores mencionados anteriormente. Sin embargo, un análisis estadístico de los resultados coleccionados hasta el presente, indica que esta relación existe. En la tabla 1 se muestra como se puede determinar la calidad y la resistencia a partir de la velocidad para una muestra cilíndrica de 16 cm en diámetro y longitud [Tobías, 67].

<b>Calidad del Hormigón</b>	<b>Velocidad de la onda longitudinal (m/s)</b>	<b>Resistencia a la compresión aproximada (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Muy pobre	Por debajo de 2000	
Pobre	2000-3000	Hasta 40
Ligeramente bueno	3000-3500	Hasta 100
Bueno	3500-4000	Hasta 250
Muy bueno	4000-4500	Hasta 400
Excelente	Por encima de 4500	Por encima de 400

*Tabla 4.1. Relación entre la velocidad longitudinal y la calidad del hormigón.*

La medida de la atenuación ultrasónica no es muy utilizada debido a la sensibilidad de esta medida al acoplamiento, la cual puede ser muy variable y a la heterogeneidad del material.

#### 4.2. Velocidad de una onda, velocidad de fase, de grupo y del frente de ondas.

El concepto de velocidad es fundamental en las aplicaciones de defectología, mediciones de espesores y determinación de propiedades mecánicas. A diferencia del clásico concepto de velocidad que tenemos de la mecánica, donde medimos el tiempo transcurrido durante la traslación de un cuerpo de una posición a otra, los conceptos de velocidad de fase y de grupo están asociados a la propagación de la onda ultrasónica.

Una solución a la ecuación de ondas (Ec. 2.7) es la propagación de una onda plana que puede expresarse mediante la ecuación:

$$u = u_0 e^{i(\omega t - kx)} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde  $\omega = 2\pi f$ , es la frecuencia angular, y  $k = 2\pi/\lambda$ , es el llamado módulo del vector de onda definido a través de la longitud de onda  $\lambda$ . Esta solución que refleja la propagación de una onda plana continua de frecuencia única  $f$  (propagación armónica), permite definir la velocidad de fase ( $V_f$ ):

$$V_f = \frac{\omega}{k} = \lambda f \quad (\text{Ec. 4.2})$$

que físicamente representa la propagación de un punto de fase constante, no de la onda en sí, pues ésta es de extensión infinita.

Si consideramos dos transductores, emisor y receptor, ambos estarán conectados en forma continua por una onda. Esto es muy diferente al caso de

un pulso, que sale de un emisor y llega a un receptor; donde se podría tener una analogía más cercana a la traslación de un cuerpo en mecánica.

La velocidad de propagación de grupo es aquella velocidad con la cual se desplaza la envolvente del tren de ondas y se define como:

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

En algunos cursos de propagación de ondas se asocia el concepto de velocidad de grupo al fenómeno de modulación, usado ampliamente en ondas de radio, se considera que la velocidad de grupo es aquella a la que viaja la información o la energía.

Si las ondas ultrasónicas no presentan ninguna dispersión, la velocidad de propagación de grupo es independiente de la longitud de onda, por lo que la velocidad de grupo coincide con la velocidad de fase.

La relación entre ambas velocidades, de fase y grupo, viene dada por:

$$V_g = V_f - \lambda \frac{dC}{d\lambda} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Ambas velocidades son iguales si  $V_f$  es independiente de  $\lambda$ . En caso contrario se produce la llamada dispersión, que se refiere a la dependencia de la velocidad con la longitud de onda. Su origen puede deberse a las características geométricas del material, o a las propiedades no elásticas del

mismo, y recibirán en cada caso, el nombre de dispersión geométrica o viscoelástica.

Un pulso, es la manera más habitual de utilizar las señales ultrasónica por tanto vamos a considerar un pulso estrecho en el tiempo. Tomando un centroide del mismo, podemos decir que este lugar geométrico, se propaga a la velocidad de grupo. ¿Cómo se explica la velocidad de fase? Para esto recordemos la teoría de Fourier, donde un pulso puede descomponerse en armónicos. Algo que existe limitado en el tiempo (y por tanto en el espacio) puede descomponerse, en una suma de senos y cosenos que tienen una extensión infinita. La integral

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{Ec. 4.5})$$

vista como una suma algebraica, realiza una superposición constructiva en la zona donde está realmente el pulso (suma verdadera) y se destruye la superposición fuera de dicha zona. Dichos armónicos se "mueven" ondulatoriamente con la velocidad de fase, de tal forma que permiten el desplazamiento del pulso (que se propaga a la velocidad de grupo), figura 4.1.

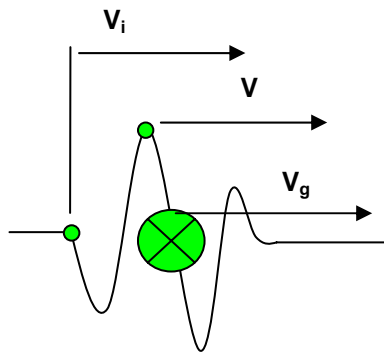


Figura 4.1. Velocidad de fase y de grupo de un pulso.

Por último, en una señal pulsada también se define la velocidad del frente de ondas  $V_i$  que es la velocidad con que se desplaza el inicio de la perturbación sónica. Asimismo en medios no dispersivos coincidirá con la velocidad de grupo y de fase. En medios dispersivos coincidirá con la mayor velocidad de fase entre las componentes frecuenciales del pulso ultrasónico.

### 4.3. Medida de la velocidad ultrasónica

Como ya hemos visto, la velocidad del sonido es una característica del material que depende de parámetros propios de su estructura interna, fundamentalmente de sus constantes elásticas y de su densidad, (ecuaciones 2.20 y 2.21), así como de otros factores, para el caso de materiales no homogéneos, como el contenido de poros o inclusiones, disposición de los componentes en materiales compuestos, etc; así como de la dispersión que puede provocar su estructura interna.

Además, existen otras causas que producen diferencias en la velocidad del sonido, entre las que se incluyen la temperatura, la tensión interna en el caso de materiales sólidos, presión, etc. La influencia de estos parámetros es más importante para materiales líquidos y gaseosos. La velocidad del acero, p.e. disminuye alrededor de 1m/s por grado centígrado hasta 1200°, pero en agua crece 3.05 m/s por grado entre 10° y 30°. Estos datos pueden ser del mismo orden o superiores a los que se producen en un experimento de caracterización donde se producen variaciones entre 0.1% y 1% de la velocidad nominal. Este hecho indica que las medidas han de ser muy precisas y deben realizarse en un ambiente muy controlado, fundamentalmente a lo que a temperatura se refiere, o bien corregir los efectos del medio ambiente sobre las medidas.

La medida de velocidad se basa normalmente en la medida del tiempo  $t$  que tarda un frente UT en recorrer una distancia conocida  $d$ :

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

La determinación de métodos precisos para medir el tiempo de vuelo de un frente ultrasónico es un tema clásico y muy importante en la literatura especializada, el cual abordaremos en los apartados siguientes.

En el dominio del tiempo, se trata de medir el tiempo que transcurre desde que el frente UT penetra en el material hasta que aparece el eco producido por un reflector situado a una distancia conocida (pulso-eco) o bien

el tiempo que tarda en llegar el frente ultrasónico desde un transductor a otro, atravesando entre medias el material inspeccionado (transmisión).

En ambas técnicas se deberá utilizar un sistema electrónico que generará y recibirá las señales eléctricas provenientes de uno o varios transductores ultrasónicos, que transforman la energía eléctrica en mecánica o viceversa. Para transferir la energía ultrasónica desde los transductores al hormigón se utilizan normalmente acoplantes. Estos son unos materiales que facilitan la transmisión de energía entre los transductores y la pieza a inspeccionar. Son adaptadores de impedancias acústicas que eliminan el aire existente entre el sólido a inspeccionar y los transductores, lo que permite disminuir la energía reflejada y aumentar la transmitida al y desde el material. La utilización de diferentes sustancias y métodos de acoplamiento variará la metodología de la medida de velocidad y la precisión de la misma.

La detección del pulso ultrasónico se puede realizar por métodos analógicos o por métodos digitales. En este último caso, se pueden utilizar algoritmos sencillos como la localización del máximo, mínimo, o flanco que supera un umbral, o complejos que incluyen correlaciones, convoluciones, transformadas de Fourier, etc. En términos generales la precisión alcanzada será mayor cuando mayor sea el número de bits de los datos, la frecuencia de muestreo o de temporización, el ancho de banda de la señal ultrasónica, la relación señal ruido y la complejidad del algoritmo utilizado.

La diferencia fundamental entre la medida de la velocidad ultrasónica en los hormigones con respecto a otro tipo de materiales, como por ejemplo los metálicos, es la falta de homogeneidad intrínseca del hormigón. Debido a la metodología de fabricación y a su composición el hormigón es un material muy dispersivo por lo que es necesario utilizar bajas frecuencias y por tanto disminuye la precisión en los métodos de medida de la velocidad. Hay aplicaciones donde esta pérdida de precisión no es importante ya que en general es menor que la propia heterogeneidad del material. Sin embargo en aplicaciones donde se estudia el comportamiento micromecánico del material es necesario mejorar la precisión en la localización del pulso para realizar una medida fiable de la velocidad y facilitar la caracterización de los materiales cementicios y la modelización de su comportamiento.

#### **4.3.1. Tipos de acoplamiento para la medida de la velocidad ultrasónica.**

Existen dos métodos fundamentales de transferir la energía entre el material y la pieza: el acoplamiento por contacto y el acoplamiento por inmersión.

La medida de velocidad por contacto se realiza poniendo directamente los transductores sobre el material a medir. Entre el material y los transductores se pone una fina capa de acoplante líquido o semi-líquido, (gel, aceite, vaselina, etc.) o bien se utiliza un acoplamiento seco (goma, plastelina, etc.).

Siempre el grosor del acoplante utilizado debe ser inferior a  $\lambda/4$  para que no se produzcan interferencias negativas en el pulso ultrasónico. Es el más usual en las medidas de velocidad en hormigón cuando no se requiere una alta precisión, ya que se puede realizar de manera manual y sin grandes equipamientos. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes a la hora de medir la velocidad con alta precisión, ya que la amplitud de la señal ultrasónica recibida es muy sensible a la manera de efectuar este acoplamiento. La amplitud de la señal varía con la cantidad y tipo de acoplante, con la rugosidad de la superficie y con la presión del contacto, lo que implica imprecisiones en los métodos de medida de la velocidad que dependen en algún grado de la amplitud de la señal.

La medida por inmersión se puede realizar sumergiendo los transductores y la probeta o pieza a inspeccionar en un mismo medio líquido, normalmente agua. La distancia entre los transductores y la superficie de la probeta tiene que ser al menos mayor que la anchura del pulso ultrasónico en el caso que se utilice una técnica de transmisión y mayor que el tiempo de recorrido dentro de la pieza en el caso que se utilice pulso-eco. Este método tiene la ventaja que la cantidad de energía que se transfiere al material permanece constante y que se facilita el barrido automático de las piezas. Tiene el gran inconveniente que es difícil (inspección mediante chorro de agua) y a veces imposible la inspección de grandes estructuras, pero sin embargo es muy adecuado para la inspección de probetas y testigos ya que la precisión y

repetitividad de las medidas de velocidad es elevada, y más si se utilizan sistemas de barrido automático.

#### 4.3.1.1 Medida de velocidad por contacto.

La velocidad ultrasónica en las probetas puede ser determinada a partir de:

- el tiempo de propagación a lo largo de una dimensión de la probeta,
- el error que se comete en la medida del tiempo de propagación, pues es necesario eliminar (o conocer) el tiempo que el frente ultrasónico tarda en atravesar componentes distintos que la pieza a inspeccionar (capa de adaptación del transductor, acoplante, etc.).
- la medida de la dimensión de la probeta

y utilizando la siguiente expresión:

$$V = \frac{d}{t - t_e} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

donde  $d$  es la dimensión de la probeta,  $t$  es el tiempo de propagación medido y  $t_e$  se refiere el error de medida. Para calcular este valor, puede utilizarse una probeta patrón del cuál se tiene que conocer el tiempo de propagación. La

diferencia entre el tiempo de propagación conocido y el tiempo de propagación medido en dicho bloque constituye el valor del error.

#### 4.3.1.2 Medidas de la velocidad por inmersión.

La medida de la velocidad en inmersión se calcula de dos maneras diferentes dependiendo si se utiliza la técnica de pulso-eco o transmisión.

En el caso del pulso eco se necesita determinar el tiempo,  $t_0$ , del eco de interfaz, que es cuando el pulso ultrasónico penetra en el material y el tiempo,  $t_d$ , de un reflector de profundidad conocida,  $d$ , normalmente se suele utilizar la superficie de la pieza contraria al interfaz, el eco de fondo.

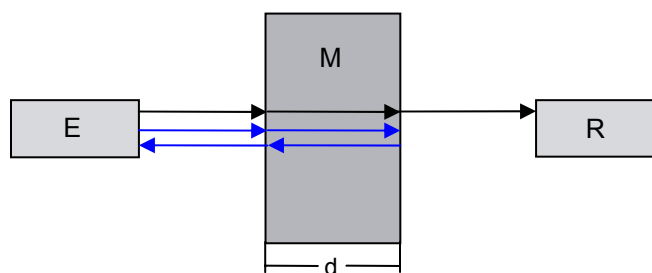


Figura 4.2. Montaje experimental para la caracterización de materiales.  
(en negro método de transmisión, en azul método de pulso-eco)

El cálculo de la velocidad se realiza mediante la sencilla expresión:

$$V = \frac{2 \cdot d}{t_d - t_0} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Cuando se utiliza la técnica de transmisión el cálculo de la velocidad puede hacerse utilizando la siguiente expresión:

$$V = \frac{d}{t - t_a + \frac{d}{V_a}} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

siendo  $d$  el espesor de probeta atravesado,  $t_a$  el tiempo correspondiente al pulso directamente transmitido por el agua de un transductor a otro,  $t$  el tiempo correspondiente cuando el pulso atraviesa la probeta y  $V_a$  la velocidad en el agua.

En este método hay que tener muy en cuenta la variación de la velocidad del agua con la temperatura que puede producir imprecisiones importantes. Para tener un valor exacto de este parámetro se puede medir la temperatura del agua, o de manera análoga a la inspección por contacto, emplear una probeta patrón para determinarla.

#### **4.3.2. Técnicas convencionales de medida de la velocidad ultrasónica.**

La técnica más usual en los equipos comerciales de ultrasonidos utilizados en la industria de la construcción, se basan en la detección del pulso ultrasónico por métodos analógicos y una posterior visualización del tiempo de propagación en una pantalla digital. Estos equipos miden solamente el tiempo que transcurre entre el que se emite el pulso ultrasónico y se detecta el flanco delantero de la envolvente del pulso ultrasónico recibido, este instante está determinado por la primera onda ultrasónica cuya amplitud es mayor que un umbral prefijado e invariable. Si ésta medida se realiza con precisión y teniendo

una buena relación señal ruido, la velocidad que medimos es la velocidad del frente de ondas. Si consideramos que a la frecuencia de estos equipos, las ondas ultrasónicas presentan poca dispersión en los materiales cementicios, la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia, y por tanto la velocidad del frente coincide con la de grupo y con la de fase. Esto significa para el equipo que la velocidad de impulso es igual a la velocidad de propagación de la onda longitudinal.

Para poder realizar una medición exacta del tiempo de recorrido, se necesita un flanco de impulso lo más vertical posible, es decir, debe hacer frecuencias elevadas de las ondas ultrasónicas. Como por otra parte únicamente se consiguen grandes penetraciones en materiales heterogéneos con ondas ultrasónicas de baja frecuencia, ha de buscarse un compromiso. Según las dimensiones y el grano basto de una probeta, pueden considerarse ondas con frecuencias entre 20 y 220 kHz. Teniendo en cuenta la expresión 3.20, por ejemplo, para un hormigón con  $v=4000$  m/s y frecuencias entre 20 y 220 kHz las longitudes de onda oscilan entre 2 y 20 cm.

El mejor resultado lo han dado las frecuencias entre 40 y 50 kHz ( $\lambda = 10$  cm). Esta longitud de onda suele ser suficientemente grande con relación al tamaño máximo de árido grueso esperado en los hormigones y el flanco del impulso sigue siendo relativamente vertical.

Sin embargo, estos sistemas dejan de ser efectivos cuando pretendemos determinar la velocidad en probetas normalizadas de mortero u

hormigón de tamaños aproximados o inferiores a la longitud de onda ó en otros elementos estructurales de espesores muy pequeños donde se está produciendo lo que se denomina dispersión geométrica. En estos casos es necesaria la utilización de transductores de mayor frecuencia, lo que implicaría aumentar la dispersión del material.

A esta limitación hay que añadir que la detección del eco empleando el método de corte por umbral da lugar a errores que frecuentemente son ignorados, y son debidos al hecho de que los ecos recibidos alcanzan el nivel de umbral algún tiempo después del principio exacto, lo que conlleva a que el eco objeto de estudio aparezca más lejos de su posición real. Si este retardo fuera constante se podría medir y eliminar de la medida pero sin embargo están asociados a amplitud, a la frecuencia y al ancho de banda de la señal detectada, lo que implica que varía con cualquiera de estos parámetros. Como ejemplo extremo, midiendo a lo largo de una probeta normalizada de hormigón con transductores de 50 Khz y ancho de banda del 20%, podemos tener errores de hasta 50  $\mu$ s en tiempos de tránsito del orden de 70  $\mu$ s en (0.3 m. a 4.300 m/s), si consideramos la amplitud máxima y mínima de detectable por un umbral fijado.

Por lo tanto para realizar una medida fiable mediante esta técnica es necesario que los cambios de amplitud entre las diferentes medidas estén en unos márgenes aceptables. Sin embargo, siempre que aumentemos la distancia entre el emisor y el receptor, disminuirá la pendiente del flanco delantero del pulso ultrasónico, por lo que si aumentamos la distancia entre los transductores se disminuye la velocidad medida. Otro motivo que puede ocasionar la disminución de la pendiente del flanco ultrasónico es un mal acoplamiento entre el transductor y el material (Figura. 4.3), lo que frecuentemente ocasiona mayores imprecisiones en la medida de la velocidad que el aumento de la distancia entre emisor y receptor.

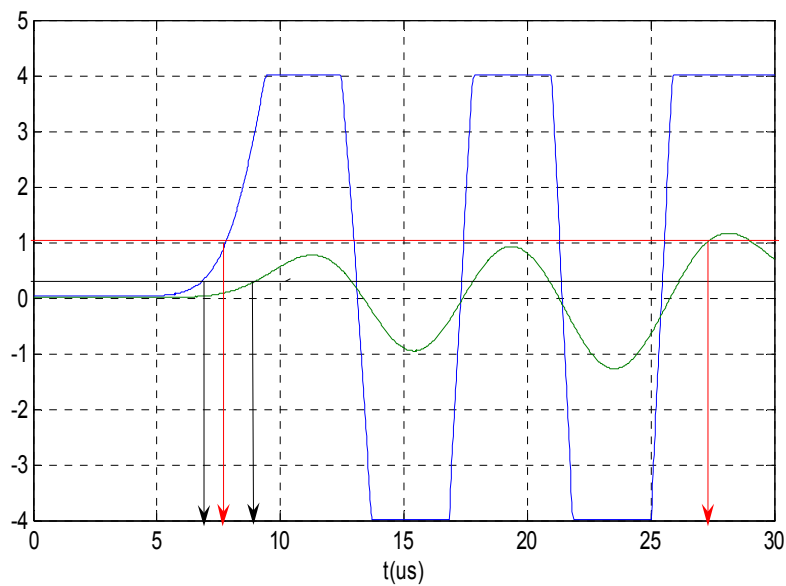


Figura 4.3. Error en la determinación del inicio del pulso ultrasónico de 54 KHz debido a variaciones en la amplitud de las señal transmitida a través de una probeta de hormigón (En negro umbral del 10%, en rojo umbral del 25%).

Por consiguiente, si se requiere medir la velocidad con mucha precisión o elementos espesores o piezas pequeñas se hace imprescindible emplear técnicas de procesamiento de señal más complejas para mejorar la precisión en la localización del pulso.

#### **4.3.3. Medida de la velocidad mediante procesamiento digital de señal.**

Como ya hemos visto, la medida de la velocidad se basa en la medida del tiempo que tarda un frente UT en recorrer una distancia conocida  $d$ . La exactitud de las medidas va a depender, por tanto, de la correcta estimación de dicho tiempo.

La precisión alcanzada en los métodos digitales es mayor en general al aumentar el número de bits de los datos, la frecuencia de muestreo y el ancho de banda de la señal ultrasónica, y disminuye cuando aumenta el nivel de ruido de la señal, de tal forma que si opera con niveles bajos de ruido, se obtiene la localización del pulso con desviaciones del orden al intervalo de muestreo ( $1/F_M$ , donde  $F_M$  es la frecuencia de muestreo).

La resolución en la medida de velocidad  $\Delta V$  (m/s) está determinada por:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta t}{t} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

que en función del tamaño de la pieza  $d$ , de la velocidad del sonido en el material,  $V$ , y de la frecuencia de muestreo  $F_M$  del conversor AD (o bien del contador) puede expresarse como:

$$\Delta V = \frac{V^2}{dF_M} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Si, por ejemplo, se quiere inspeccionar una capa de mortero de 1 cm de espesor y velocidad  $V_1 = 4000 \text{ m/s}$ ; aplicando la expresión anterior resultan las siguientes resoluciones de velocidad en función de la frecuencia de muestreo:

$F_M$ (MHz)	20	50	100	200	500	1000
$\Delta V$ (m/s)	80	32	16	8	3.2	1.6

*Tabla 4.2. Resoluciones de velocidad obtenidas, en función de la frecuencia de muestreo*

Es decir, si se quieren realizar medidas, con resolución de velocidad cercana 1 m/s se requiere alcanzar resoluciones en tiempo del orden de 1 ns, manteniendo al mismo tiempo una precisión del mismo orden. Si los espesores donde se mide la velocidad aumentan la precisión aumenta de manera proporcional.

Los sistemas de ultrasonidos y tarjetas de adquisición comerciales ocupan una gama de frecuencias de muestreo entre 40 MHz y 100 MHz suficientes para medir con suficiente precisión espesores de materiales cementicios superiores a 4 cm. Sin embargo cuando se busca medir la velocidad con espesores inferiores es conveniente utilizar sistemas que

alcanzan mayores cotas de frecuencia, o algoritmos que permiten obtener resultados con precisión por debajo de una muestra.

En los siguientes apartados expondremos los principales algoritmos digitales utilizados para la determinación de la velocidad. Entre los algoritmos cuya resolución depende de la frecuencia de muestreo se encuentran la detección del flanco inicial, máximo o mínimo del pulso ultrasónico. Entre los métodos que permiten mejorar esta precisión se expondrán la detección por cruce por 0 y doble cruce por 0, la utilización de las normas L1 y L2 [Parrilla, 91] y la información mediante la fase del espectro frecuencial.

#### **4.3.3.1 Detección de flanco, mínimo y máximo del pulso transmitido.**

Para la detección del flanco el método más habitual es el corte por umbral de manera equivalente a los métodos analógicos. La ventaja que tiene la detección mediante algoritmos digitales es que se puede variar dinámicamente el umbral de detección en función de la amplitud del pulso disminuyendo la variación del error de retardo al hacerlo independiente de la variación de amplitud. Sin embargo siempre estará limitado por el nivel de señal ruido existente en el pulso recibido por lo que tampoco será un método totalmente independiente de la amplitud y es difícil de utilizar en inspecciones pulso eco donde el umbral de detección está limitado por el ruido estructural.

La detección de la posición del máximo o mínimo absoluto en un intervalo de la señal ultrasónica es el algoritmo más fácil de implementar digitalmente. El error que se puede cometer es una longitud de onda ya que pequeñas variaciones en el interfaz de la pieza puede producir que el máximo o mínimo se desplace un ciclo de la señal. Para disminuir este error se puede utilizar la detección del máximo de la envolvente o del valor absoluto de la señal con lo que se consigue para disminuir el error a una semi-longitud de onda. Este método es el más adecuado para inspecciones pulso-eco donde los máximos correspondientes al eco de interfaz y al de fondo son fáciles de determinar.

#### **4.3.3.2 Detección del primer cruce por cero y doble cruce por cero.**

Estos dos métodos permiten mejorar la precisión de la técnica de umbral ya que lo hace más independiente de la amplitud y del ancho de banda del pulso ultrasónico. Una vez superado el umbral de detección, en vez de utilizar ese punto como inicio del pulso se obtiene la posición del primer punto de fase cero de la señal o los dos primeros puntos. Estos son puntos de pendiente máxima por lo que utilizando técnicas de interpolación se pueden obtener medidas de tiempo inferiores a una muestra. Como se basa en el umbral para que esta técnica sea precisa se requiere que la amplitud de los pulsos se mantenga dentro de un mismo orden, o lo que es lo mismo que el primer

semiciclo del pulso pueda ser detectado por el umbral, en ambos casos los errores no dependerán de la amplitud sino solamente de la posible variación frecuencial de los pulsos transmitidos y de las interferencias que se produzcan en el frente de ondas debidas a la dispersión. La diferencia entre el cruce por cero simple y el doble, es que en este último se puede medir la variación frecuencial y corregirla a cambio es más sensible a posibles interferencias en el frente de onda.

#### 4.3.3.3 Métodos basados en algoritmos de convolución.

Estos algoritmos se basan en *convolucionar* la señal del pulso ultrasónico  $e(t)$  con una transformación  $x(t)$  de otra señal que consideramos referencia  $r(t)$ . La expresión de la convolución en forma discreta es:

$$s(n) = \sum_{i=1, \dots, N} e(i) \cdot x(n-i) \quad (\text{Ec. 4.12})$$

siendo  $n = t/T_n$ , donde  $T_n$  es el periodo de muestreo, y  $N$  el número total de muestras. Existen dos transformaciones de la señal de referencia, la transpuesta y el filtro inverso, que producen que el desplazamiento del máximo  $s(t)$  respecto del origen de tiempos corresponda a la diferencia temporal entre el pulso ultrasónico y la señal de referencia. Conocida la posición temporal de la referencia podemos conocer la del pulso ultrasónico.

La transpuesta de la referencia se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$x(t) = F^{-1}(R(\omega)^*) \quad (\text{Ec. 4.13})$$

donde  $R(\omega)^*$  es el complejo conjugado de la transformada de Fourier de la señal de referencia  $r(t)$  y  $F^{-1}$  es la transformada inversa de Fourier. Si utilizamos esta transformación a  $s(n)$  se le denomina correlación cruzada entre la señal y la referencia. La correlación cruzada permite determinar la aparición periódica de los pulsos ultrasónicos, reduciendo además el efecto del ruido contenido en las señales. La autocorrelación es un caso especial de correlación cruzada, ya que correlaciona entre sí trazas de una secuencia de adquisiciones de la misma señal. Este es un algoritmo de especial interés para la medida de velocidad ya que produce un fuerte pico estrecho en el lugar donde estaba el pulso ultrasónico, incluso operando con bajos niveles de señal respecto al ruido. Es muy buen método para señales de baja relación señal-ruido, especialmente si se usan pulsos US codificados que permiten mantener altos niveles de intensidad, y producen picos muy limpios al aplicarles algoritmos de correlación.

Para obtener el filtro inverso se puede utilizar la siguiente expresión:

$$x(t) = F^{-1}(A(\omega)/R(\omega)) \quad (\text{Ec. 4.14})$$

donde  $R(\omega)$  es la transformada de Fourier de la señal de referencia  $r(t)$ ,  $A(\omega)$  es un filtro paso banda para limitar el filtrado inverso en la banda frecuencial de mayor relación señal ruido y  $F^{-1}$  es la transformada inversa de Fourier.

Además del filtro inverso, existen múltiples algoritmos en la literatura [Anaya, 92] que pueden realizar esta operación y se denominan algoritmos de deconvolución. Todos ellos permiten aumentar el ancho de banda de los pulsos manteniendo la información de fase, con lo que se mejora la precisión de las medidas de velocidad con pequeños espesores. Un inconveniente de este algoritmo es que aumenta el ruido de la salida.

#### 4.3.3.4 Normas L1 y L2

Estas normas buscan los valores del retardo que minimizan las diferencias entre la señal adquirida  $e(t)$  y una señal de referencia  $r(t)$ . El algoritmo permite operar bien sobre señales en radiofrecuencia (RF) o también sobre la envolvente. Se parte de un modelo analítico de la señal de referencia, y a continuación se realiza un proceso iterativo en el que se varía la fase en el modelo de referencia en valores inferiores a una muestra, hasta alcanzar un mínimo en el algoritmo:

$$\begin{aligned}
 \text{Norma } L1: \quad s(n) &= \sum_{i=1, \dots, N} |e(n+i) - r(i)| \\
 \text{Norma } L2: \quad s(n) &= \sum_{i=1, \dots, N} [e(n+i) - r(i)]^2
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 4.15}$$

La norma L2 presenta mejores resultados de precisión, pero estos tienen gran dependencia con el número de bits de los datos, frecuencia de muestreo y relación señal-ruido. Además requieren una fuerte carga computacional. Para trazas con datos de ocho bits y relación señal-ruido inferior a -20dB se pueden alcanzar precisiones del orden de una décima de muestra.

#### **4.3.3.5 Medida de la velocidad basada en el espectro de la señal**

Este método es muy útil para determinar la variación de la velocidad del sonido en función de la velocidad de un material patrón. Para ello aprovecha que una onda plana mantiene la información de fase en su propagación por el material. Supongamos que se realiza un experimento en transmisión para caracterizar dos materiales  $M_1$  y  $M_2$  de igual dimensión  $d$  pero velocidades  $c_1$  y  $c_2$  ligeramente diferentes. Como consecuencia de que  $c_1 \neq c_2$ , se recibirán dos pulsos desplazados un tiempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Las transformadas de Fourier de ambos pulsos están relacionadas de la forma:

$$F_2(w) = A(w, d) \cdot F_1(w) \exp(jw(t_2 - t_1)) \quad (\text{Ec. 4.16})$$

donde  $A(w, d)$  es un factor de corrección en amplitud debido a la atenuación, reflexión y difracción, fundamentalmente. Una relación entre ambas velocidades puede obtenerse entonces restando los espectros de fase  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ , resultando:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \Delta\phi / 2\pi f$$

y

$$\Delta c = c_2 - c_1 = d / t_2 - d / t_1$$
(Ec. 4.17)

que conducen a la expresión aproximada:

$$\Delta V = V_1^2 \Delta t_1 / d$$
(Ec. 4.18)

Operando con pulsos de banda ancha se tiene la gran ventaja de mantener la información de fase en toda la banda. A pesar de la existencia de ruido en la información de fase del espectro, se puede obtener un valor muy aproximado de  $\Delta t$  a partir de la recta de regresión de la fase, limitándose a aquellas frecuencias en que la relación señal ruido es suficientemente alta. Este método permite además obtener buenos resultados cuando en la señal existe más de un pulso ultrasónico, especialmente si los pulsos están separados. Una ventaja adicional, es que la información de fase mantiene prácticamente la misma resolución para distintas frecuencias de muestreo  $F_M$ , lo que permite obtener grandes precisiones sin necesidad de sobre muestrear la señal. Se han realizado pruebas sobre soluciones acuosas, con un transductor de 5MHz y  $F_M$  de 80 y 20 MHz. En ambos casos se han obtenido una resolución de tiempos  $\Delta t \leq 1.5\text{ns}$ , con un error máximo en la medida inferior a 2ns. [Hernández, 02]

#### **4.3.4. Comparación entre diferentes métodos de medida de velocidad.**

Tal y como se ha puesto de manifiesto en apartados anteriores, la medida de la velocidad del pulso ultrasónico depende de la correcta estimación del tiempo que tarda un frente ultrasónico en recorrer una distancia conocida  $d$ . Para comparar diferentes algoritmos se aplicarán a las mismas señales para comprobar las diferentes medidas de velocidad que se obtienen con los diferentes algoritmos. Para ello se van a utilizar las señales ultrasónicas obtenidas al atravesar en anchura una probeta de mortero prismática (40mm x 40mm x 160mm) fabricada según se indica en la norma UNE EN-196:2005 con relación  $a/c=0.60$ . En esta probeta se han considerado distintos niveles de saturación de agua que varían entre 0% y 18%. Inicialmente la probeta se secó en estufa hasta masa constante, para posteriormente sumergirla en un tanque de agua hasta alcanzar la saturación que se estimó en un 18%.

Las inspecciones, en todos los casos, se han realizado por el método de transmisión en agua con transductores de 1MHz, obteniéndose previamente una señal de transmisión en agua que se utilizará como referencia en los diferentes algoritmos y que aparece en la posición 0 del BSCAN (Figura. 4.4.)

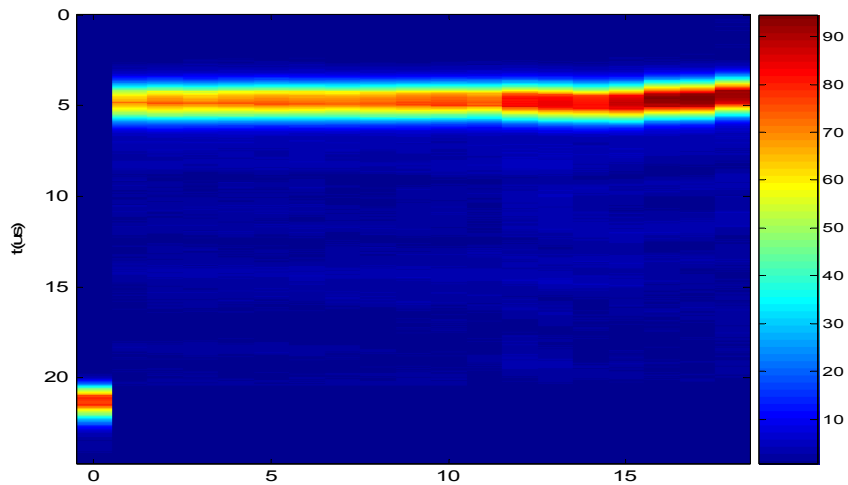


Figura 4.4. Bscan de la envolvente de las señales de transmisión.

Se observa cómo va aumentando la amplitud de la señal transmitida a medida que la probeta se satura de agua. Como el experimento se va a realizar en inmersión se utilizará la ecuación 4.9. Este método tiene la ventaja añadida que la mayor parte de los procesamientos digitales se obtiene la diferencia temporal entre un pulso y una referencia, por lo que si se utiliza como referencia el pulso transmitido por agua directamente obtendremos valor  $t-t_a$  de los diferentes procedimientos digitales.

Los resultados que se reflejan en la figura 4.6 son los métodos que están más relacionados con la velocidad de grupo y en la figura 4.7, los que buscan medir la velocidad del frente de ondas. Podemos observar que la diferencia entre ambos es del orden de 200 m/s, lo que implica que a 1 Mhz se están produciendo fenómenos de dispersión debidos al material.

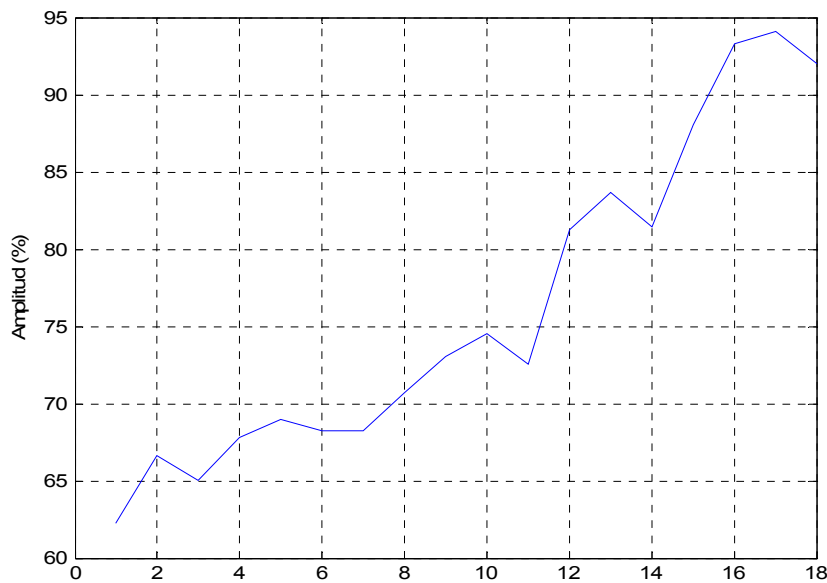


Figura 4.5. Amplitud de las señales transmitidas a través de la probeta.

En las gráficas puede apreciarse, que si exceptuamos las dos técnicas de umbral, la velocidad de la probeta con las distintas cantidades de agua saturada presentan las mismas variaciones. Va disminuyendo la velocidad hasta que se alcanza un mínimo en la medida 15 y posteriormente remonta hasta el máximo que se obtiene en la 18. Sin embargo, en las medidas obtenidas mediante la técnica del umbral presentan una pendiente creciente entre las medidas 1 y 18. Esto es debido a que la dependencia de las técnicas de umbral con la amplitud hace que la medida de velocidad siga aumentando según aumenta su amplitud (Figura. 4.5), siendo la del umbral variable un poco menos dependiente pero no lo suficiente para corregir esta tendencia.

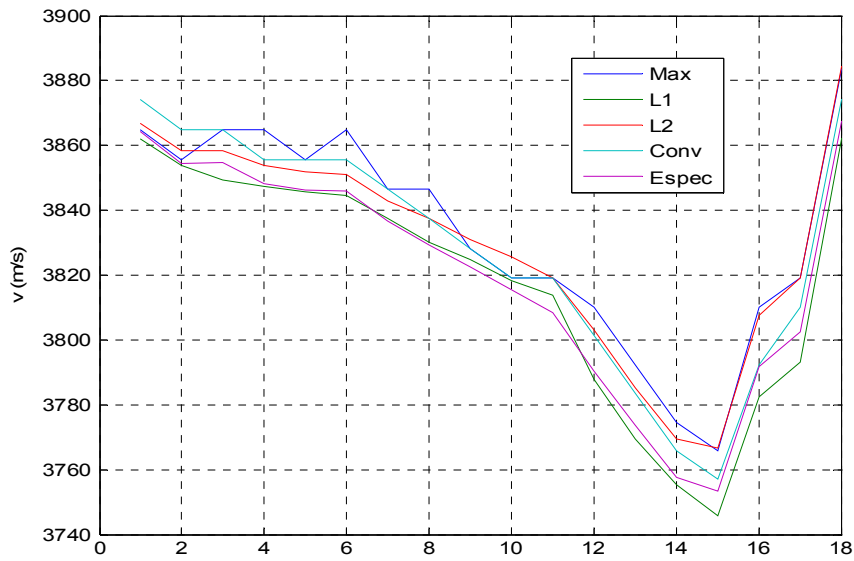


Figura 4.6. Comparación entre los diferentes métodos de medida de velocidad de grupo.

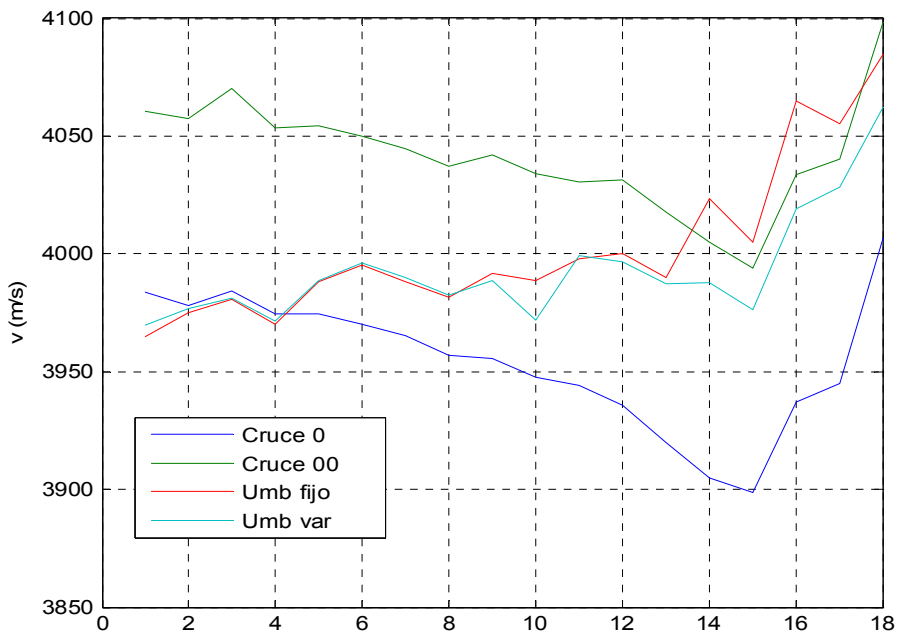


Figura 4.7. Comparación entre los diferentes métodos de medida de velocidad de frente de ondas.

Con respecto a las medidas de la velocidad de grupo, con todas los métodos se obtienen medidas semejantes, sin embargo tanto la técnica del máximo como la convolución presentan mayores imprecisiones.

La diferencia de las dos técnicas de cruce por cero está motivada porque la técnica del cruce simple no tiene en cuenta la variación frecuencial existente entre el pulso transmitido por agua y a través del material, que si corrige la del doble cero. Esta corrección permite reducir el retraso producido por la disminución de la frecuencia y por tanto se obtienen velocidades algo mayores.

Como conclusión final diremos que las técnicas de umbral no son válidas para medir pequeñas variaciones de velocidad por su gran dependencia de la amplitud. Entre las técnicas que miden la velocidad de grupo podemos escoger la que en principio parece más sencilla y presentan resultados equiparables, la detección del máximo del valor absoluto. Sin embargo conviene puntualizar que esta técnica es muy sensible a las interferencias producidas en el pulso, por ejemplo cuando las caras de las probetas no son paralelas, y por tanto exige que la geometría de las probetas y del ensayo sea muy regular.

Como hemos visto la técnica del doble cruce por cero es prácticamente independiente de la frecuencia y bastante independiente de la amplitud. Esta técnica nos permite bajar la frecuencia para disminuir los efectos de la dispersión del material. Sin embargo, el límite para bajar la frecuencia viene limitado por las dimensiones de las probetas empleadas con relación a la longitud de onda y a la anchura del pulso ultrasónico. Esta técnica es la que

usualmente utilizaremos en la comprobación experimental del modelo propuesto que se desarrollará en el siguiente capítulo.

Las variaciones de velocidad empleando uno u otro método en la medida de la posición del pulso pueden parecer pequeñas, sin embargo, va a depender de las diferencias que queramos medir a la hora de validar los modelos teóricos propuestos en este trabajo. Como podemos comprobar en el ejemplo expuesto, las variaciones entre los métodos de medida son equiparables a las variaciones de velocidad producidas por la absorción de agua. Por tanto si se quiere analizar éste fenómeno debe establecerse un correcto método para la determinación de la velocidad ultrasónica y no mezclar resultados obtenidos con diferentes métodos de medida.

#### **4.4. Resumen**

De los parámetros ultrasónicos que con frecuencia se emplean en la caracterización de materiales el más utilizado para la estimación de la calidad de los materiales de construcción es la velocidad acústica, pues ésta es una característica del material que depende de parámetros propios de su estructura interna. Por tanto su determinación da una valiosa información.

Teniendo en cuenta que la medida de velocidad se basa normalmente en la medida del tiempo  $t$  que tarda un frente UT en recorrer una distancia

conocida  $d$ , la determinación de métodos precisos para medir el tiempo de vuelo de un frente ultrasónico es un tema muy importante que es necesario abordar.

En este capítulo se han expuesto diferentes metodologías para la medida de la velocidad ultrasónica, tanto en inmersión como en seco, así como los métodos disponibles para la medida de la velocidad mediante el procesamiento digital de la señal ultrasónica. Entre los algoritmos más sencillos, cuya resolución depende de la frecuencia de muestreo, se encuentran la detección del flanco inicial, máximo o mínimo del pulso ultrasónico. Otros métodos más complejos que incluyen correlaciones, convoluciones, transformadas de Fourier, etc. permiten mejorar esta precisión. En este trabajo se han expuesto la detección por cruce por 0 y doble cruce por 0, la utilización de las normas L1 y L2 y la información mediante la fase del espectro frecuencial.

En la última parte del capítulo se ha hecho una comparación de los métodos citados y una valoración de los más adecuados para realizar las medidas en los materiales cementicios. Para comparar los algoritmos se han aplicado éstos a las mismas señales de forma que sea posible analizar las diferentes medidas de velocidad que se obtienen.

Aunque las variaciones de velocidad obtenidas empleando uno u otro método pueden parecer pequeñas, estas diferencias pueden ser significativas en función de los valores que quieran determinarse.

Los resultados obtenidos en la comparación de los algoritmos pueden resumirse como sigue:

- Las técnicas de umbral no son válidas para medir pequeñas variaciones de velocidad por su gran dependencia de la amplitud.
- La técnica del doble cruce por cero es prácticamente independiente de la frecuencia y bastante independiente de la amplitud. Esta técnica nos permite bajar la frecuencia para disminuir los efectos de la dispersión del material. El límite para bajar la frecuencia viene dado por las dimensiones de las probetas empleadas con relación a la longitud de onda y a la anchura del pulso ultrasónico.
- Las técnicas que miden la velocidad de grupo presentan resultados equiparables, siendo la más sencilla la detección del máximo del valor absoluto. Sin embargo esta técnica es muy sensible a las interferencias producidas en el pulso, y por tanto exige que la geometría de las probetas y del ensayo sea muy regular.

# **CAPÍTULO 5**

## **VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

### **5.1. Objetivos de la validación experimental.**

En los capítulos anteriores se planteó que los materiales cementicios pueden ser estudiados a partir de las propiedades de cada una de sus fases constituyentes. Con tal fin, se han revisado los modelos de homogenización clásicos, y se ha realizado un análisis teórico de los modelos micromecánicos bifásico y trifásico [Hernández, 02] que ha permitido una valoración de las aportaciones y limitaciones de estos modelos. A partir de las conclusiones obtenidas se ha formulado la extensión del modelo micromecánico para

materiales con N-fases y posteriormente se ha realizado un estudio teórico de la influencia de los diferentes parámetros del modelo, para el caso de un material tetrafásico, en la velocidad de las ondas ultrasónicas.

La validación experimental que se plantea tiene por objetivo comprobar los resultados teóricos obtenidos a partir del modelo micromecánico tetrafásico expuesto en el capítulo 3. Los objetivos a analizar son:

- I. Estimar las variaciones de la velocidad al incluir agregados cuyas constantes elásticas difieren significativamente entre sí.
- II. Comprobar las variaciones de la velocidad cuando los poros se encuentran parcialmente llenos de agua.

## **5.2. Metodología.**

Para alcanzar los objetivos planteados, se realizarán ensayos destructivos y no destructivos sobre probetas de mortero. Para lo cual se han diseñado dos experimentos que se corresponden con los objetivos planteados anteriormente:

1. Estudiar la influencia de la adición de acero al mortero, evaluando la relación de aspecto de éste (Experimento I).

2. Estudiar la influencia del volumen de agua contenido en la estructura porosa, evaluando la relación agua/cemento (Experimento II)

Con el fin de conseguir el objetivo I se fabricaron probetas de mortero con inclusiones de acero de diferentes relaciones de aspecto, y se procedió del siguiente modo:

- ◆ Ensayos destructivos de porosidad, según metodología Rilem (ver anexo 2).
- ◆ Medida de la velocidad ultrasónica por métodos no destructivos.
- ◆ Aplicación del modelo tetrafásico.
- ◆ Comparación de los resultados experimentales con el comportamiento teórico descrito por el modelo.

Para el objetivo II, se fabricaron probetas de mortero con distintas relaciones agua/cemento para variar la porosidad y la siguió la siguiente metodología:

- ◆ Ensayos destructivos de porosidad según metodología Rilem (ver anexo 2).
- ◆ Determinación de la cantidad de agua presente en las probetas de mortero.
- ◆ Medida de la velocidad ultrasónica.

- ◆ Aplicación del modelo tetrafásico.
- ◆ Comparación de los resultados experimentales con las predicciones teóricas del modelo.

### 5.3. Descripción de las probetas.

Las probetas de mortero han sido fabricadas en el Laboratorio de Química de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, siguiendo el método descrito en la norma UNE EN-196-1:2005. Una vez colocada la mezcla en los moldes, éstos se introdujeron en la cámara húmeda durante 24 horas a temperatura de  $21\pm 1^\circ\text{C}$  y una humedad relativa entre el 95-100%, tal y como indica la norma UNE 196-3. Transcurridas las 24 horas, las probetas se desmoldaron y se sumergieron inmediatamente en agua para continuar su curado hasta los 28 días. Para evitar variaciones microestructurales en las probetas debido a las condiciones de almacenamiento, usualmente mantenemos las muestras en saturación hasta el momento de realizar los ensayos de caracterización, tanto destructivos y como no destructivos.

Para el experimento I se han utilizado cemento tipo I 42.5 R/SR de la Sociedad Financiera y Minera S.A. Mientras que para las probetas del

experimento II se ha utilizado un cemento tipo II/AL. Las composiciones químicas de los cementos empleados se exponen en la tabla 5.1.

Tipo de cemento	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Caliza
Cemento II 32.5 A-L	56.2%	18.5%	6.3%	4.0%	1.2%	17%
Cemento I 42.5 R/SR	65 %	10 %	3.22 %	4.81 %	---	

Tabla 5.1. Descripción de los cementos utilizados.

Las probetas utilizadas, han sido probetas prismáticas normalizadas, indicándose sus dimensiones en la figura 5.1.

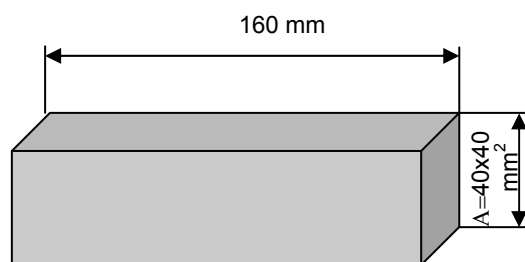


Figura 5.1. Probeta utilizada para los ensayos

### 5.3.1. Dosificaciones.

Para el experimento I se fabricaron 4 juegos de probetas de mortero, de 3 probetas cada juego, un juego sin adición de acero (al cual llamaremos testigo) y los tres restantes con inclusiones de acero de diferentes relaciones de aspecto. Las dosificaciones utilizadas en la fabricación de estas probetas se recogen en la tabla 5.2. Se ha utilizado una relación agua/cemento de 0.45,

una relación agregados/cemento constante (en volumen) de 0.5, aproximadamente, en todos los grupos, y arena de sílice calibrada (0.5 mm), procedente del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Las fibras de acero utilizadas tienen un diámetro de 0.3mm y una longitud de 4mm para las cortas (denominadas fibras cortas) y 18mm en el caso de las largas (denominadas fibras largas), mientras que las inclusiones esféricas son de 2mm de diámetro (las llamaremos bolas de acero). No se han utilizado fibras de acero comerciales debido al tamaño de probeta seleccionado para los experimentos.

<b>Tipo probeta</b>	<b>arena (g)</b>	<b>cemento (g)</b>	<b>agua (g)</b>	<b>acero (g)</b>
<b>testigo</b>	639	320	144	---
<b>bolas acero</b>	662	331	149	133.8
<b>fibras cortas</b>	672	336	151	133.8
<b>fibras largas</b>	688	344	155	133.8

*Tabla 5.2. Dosificaciones de las probetas de mortero del Experimento I.*

Para los ensayos destructivos se ha tomado un trozo de cada probeta, de aproximadamente 15 mm., de uno de sus extremos. Mientras que los ensayos no destructivos se han realizado a lo largo de la probeta.

En el caso del experimento II se fabricaron dos 2 juegos de probetas. Cada juego consta de 24 probetas divididas en 4 grupos de 6 probetas cada grupo. Un juego de 3 probetas de cada grupo fue destinado para los ensayos destructivos y las restantes se utilizaron para la caracterización mediante la velocidad de las ondas ultrasónicas. Para obtener diferentes porosidades se

varió la relación agua/cemento (en realidad se cambiaba la relación agua/mezcla de cemento y arena, manteniendo la proporción de arena constante) de 0.45, 0.50, 0.55 y 0.60. Se ha empleado arena de sílice calibrada (0.5 mm) procedente del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. La tabla 5.3 muestra las dosificaciones utilizadas en la fabricación de las muestras del experimento II.

<b>Relación a/c</b>	<b>Gramos (por amasada)</b>		
	<b>Arena (g)</b>	<b>Cemento (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
0.45	1350	450	202.5
0.50	1350	450	225.0
0.55	1350	450	247.5
0.60	1350	450	270.0
0.65	1350	450	292.5

*Tabla 5.3 Dosificaciones de las probetas de mortero del Experimento II.*

#### **5.4. Resultados de los ensayos destructivos.**

Los ensayos destructivos de porosidad abierta, según metodología descrita en el anexo 2, se realizaron en el Laboratorio de Química de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, tanto para el experimento I como para el experimento II.

En la tabla 5.4 se exponen los resultados de los ensayos de porosidad abierta y densidad para los morteros correspondientes al experimento I.

Tipo probeta	Porosidad	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
testigo	0.1868	2570
<b>bolas acero</b>	0.1926	2780
<b>fibras cortas</b>	0.2509	2720
<b>fibras largas</b>	0.2587	2720

Tabla 5.4. Resultados del ensayo de porosimetría, Experimento I.

Se puede apreciar como la adición de acero, tanto fibras como inclusiones esféricas, provocan un aumento de la porosidad y de la densidad con respecto a la probeta testigo de mortero; siendo éste incremento más significativo en las fibras. Aunque se observa que la longitud de la fibra tiene poca influencia en la porosidad.

A partir de las dosificaciones y la porosidad medida se determinaron las fracciones de volumen de las diferentes fases constituyentes, las cuales se muestran en la tabla 5.5.

Tipo probeta	v <sub>m</sub>	v <sub>p</sub>	v <sub>a</sub>	v <sub>w</sub>
testigo	0.3082	0.1868	0.5050	0
<b>bolas acero</b>	0.2858	0.1926	0.4888	0.0329
<b>fibras cortas</b>	0.2274	0.2509	0.4892	0.0324
<b>fibras largas</b>	0.2204	0.2587	0.4892	0.0317

Tabla 5.5. Fracciones de volumen de las fases constituyentes del mortero, para el Experimento I.

Los subíndices m, a, p y w, citados en la tabla anterior, se refieren a la matriz y las inclusiones, arena, poros y acero, respectivamente.

En la tabla 5.6 se muestran los parámetros medidos en los ensayos destructivos para el experimento II. Se puede observar cómo al aumentar la relación agua/cemento se incrementa el volumen de poros, lo cual concuerda con lo expresado en el capítulo 1: el exceso de agua provoca que el gel C-S-H no rellene el volumen libre en la matriz endurecida, generándose una porosidad capilar que dependerá del volumen de agua añadido.

Relación a/c	Porosidad	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0.45	0.1595	2300
0.50	0.1804	2295
0.55	0.1994	2290
0.60	0.2081	2285

Tabla 5.6. Porosidad medida en las probetas de mortero, Experimento II.

A partir de la porosidad medida y de las dosificaciones utilizadas para la fabricación calculamos las fracciones de volumen de los constituyentes del mortero, los cuales se muestran en la tabla 5.7.

Relación a/c	v <sub>a</sub>	v <sub>m</sub>	v <sub>p</sub>
0.45	0.6016	0.2280	0.1704
0.50	0.5859	0.2393	0.1748
0.55	0.5710	0.2475	0.1815
0.60	0.5569	0.2553	0.1879

Tabla 5.7. Fracciones de volumen de las fases constituyentes del mortero, para el Experimento II.

Los subíndices  $m$ ,  $a$  y  $p$ , citados en la tabla anterior, se refieren a la matriz de pasta de cemento y a las inclusiones de arena y poros, respectivamente.

### **5.5. Montaje experimental para la medida de la velocidad.**

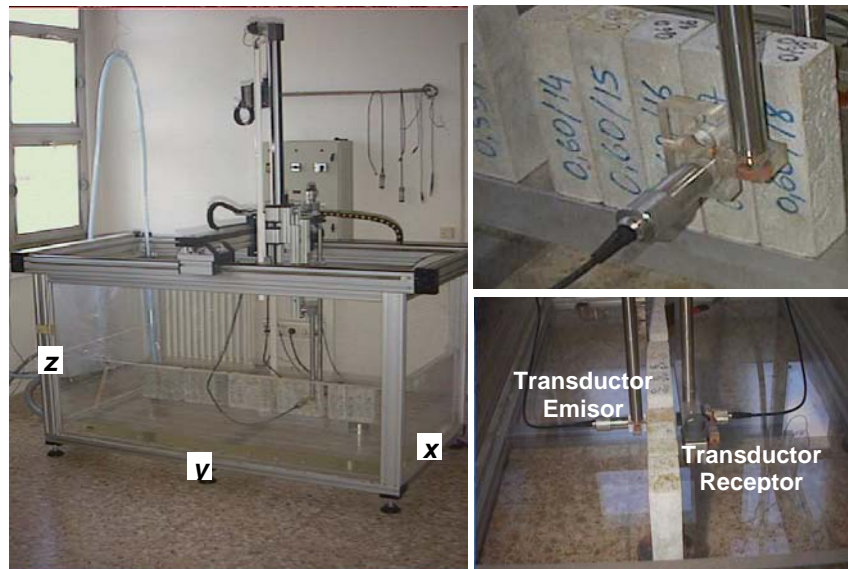
Para la caracterización de los compuestos de cemento mediante ensayos no destructivos por ultrasonidos utilizaremos la medida de la velocidad de las ondas ultrasónicas. Estas medidas han sido realizadas después de concluido el proceso de maduración de las probetas (28 días).

La técnica de inspección seleccionada es el método de transmisión, utilizando dos transductores, uno emisor y otro receptor, colocados a cada lado de la pieza. La información obtenida se basa en la medida del tiempo de propagación para evaluar la velocidad de las ondas ultrasónicas.

#### **5.5.1. Descripción de la metodología para el Experimento I.**

El método empleado en este caso ha sido la transmisión de las ondas ultrasónicas en agua, y el sistema de inspección utilizado para la generación y recepción de las señales ultrasónicas ha sido el sistema automático SENDAS [Fritsch, 96], equipo desarrollado en el Instituto de Automática Industrial del

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. El montaje experimental utilizado se muestra en la figura 5.2.



*Figura 5.2. Montaje experimental para las medidas de velocidad.  
Experimento I.*

Las medidas con acoplamiento en agua permiten que los pulsos que se reciben sean de banda más ancha con lo cual se mejoran las medidas, hay una mayor eficiencia y es posible usar transductores de frecuencias más altas. El barrido se realiza en el plano yz, y el hecho de hacerlo de forma automática y con acoplamiento en agua permite tener una buena repetitividad de la medida.

Las probetas se han colocado dentro del tanque de medidas una al lado de la otra, ordenadas. El tanque de medidas nos permite realizar barridos automáticos en cualquiera de las tres direcciones, x, y, z. Este sistema es controlado desde un ordenador el cual se encarga de sincronizar el movimiento del sistema de inspección con la generación y adquisición de los pulsos

ultrasónicos, alcanzando una velocidad máxima de  $1 \text{ m/s}$  y una precisión en la posición mejor que  $0.2 \text{ mm}$ . En nuestro caso hemos realizado el barrido con una velocidad de adquisición de  $50 \text{ mm/s}$  y un paso de adquisición de  $2 \text{ mm}$  en el eje 'y' y  $4 \text{ mm}$  en el eje 'z'. Esto generó gran volumen de datos por lo que para calcular las velocidades se han tomado la media de aproximadamente 320 señales por probeta correspondientes a las zonas centrales de las misma, para eliminar los efectos de bordes.

Para calcular la velocidad de propagación  $v_L$  en inmersión se ha utilizado la siguiente expresión:

$$v_L = \frac{X_c}{t_c - t_{\text{agua}} + \frac{X_c}{v_{\text{agua}}}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Siendo  $X_c$  el espesor de material atravesado ( $40 \text{ mm}$ ),  $t_{\text{agua}}$  el tiempo correspondiente al máximo de la señal en transmisión cuando solo hay agua,  $t_c$  el tiempo correspondiente al máximo cuando la señal atraviesa el centro de la probeta y  $v_{\text{agua}}$  a la velocidad en el agua que se ha calculado ( $1.483 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ).

### 5.5.2. Descripción de la metodología para el Experimento II.

La técnica de inspección seleccionada es la transmisión por contacto a lo largo de la probeta, figura 5.3. Se han utilizando dos transductores Panametrics de  $500 \text{ kHz}$ . (A413) colocados en el centro de las caras laterales. Se ha utilizado el pulser-receiver del sistema SENDAS de banda ancha y un

osciloscopio digital TiePie HS3 para la adquisición de las señales, muestreando a 50 MHz y con 12 bits de resolución. El acoplamiento utilizado ha sido un gel de uso médico.

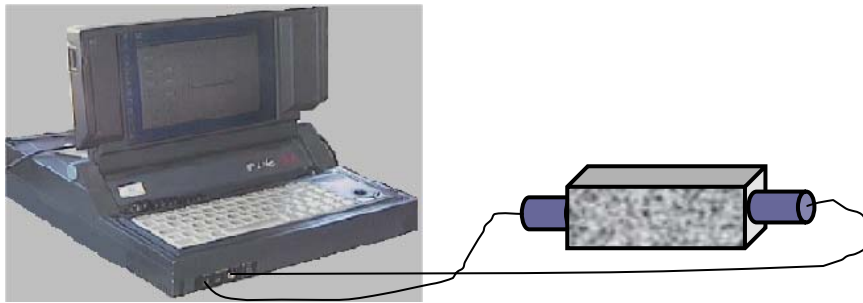


Figura 5.3. Montaje experimental para las medidas de velocidad en el Experimento II.

Las señales adquiridas se procesan digitalmente y se obtiene el tiempo de transmisión utilizando el primer cruce por cero, ya que se considera que a la frecuencia utilizada (donde la longitud de onda,  $\lambda$ , es mayor que 10 veces el diámetro de los dispersores,  $D$ ) los efectos de la dispersión en el mortero se pueden despreciar y se puede utilizar la velocidad de fase para realizar las medidas.

La velocidad  $v_L$  se calcula según la siguiente expresión, utilizando el error de medida en un bloque patrón para eliminar los problemas de acoplamiento:

$$v_L = \frac{X_c}{t_c - error} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Siendo  $X_c$  el espesor de mortero atravesado (aproximadamente 160 mm),  $t_c$  el tiempo correspondiente al máximo cuando la señal atraviesa el centro

de la probeta y *error* se refiere al error de medida. Este valor se calcula a partir de la medida de un bloque patrón (probeta de aluminio) de velocidad conocida, hallando la diferencia entre el tiempo de propagación conocido (velocidad longitudinal 6320 m/s) y el medido en el bloque patrón.

La metodología utilizada para determinar el contenido de agua en la estructura porosa se describe a continuación:

1. Introducción de las probetas horizontalmente en un tanque con agua a 23° C (en ambiente de laboratorio) durante 48 horas, para lograr la mayor saturación posible.
2. Posteriormente se sacan las probetas del tanque y se procede a su secado a 80° C dentro del horno durante 72 horas.
3. Transcurridas las 72 horas, se sacan las probetas del horno y se colocan en el laboratorio hasta alcanzar la temperatura ambiente.
4. Se procede a medir la longitud (en m) y el peso de las probetas (en kg) y se adquieren las señales ultrasónicas. Conjuntamente con las probetas de mortero se realizan las mismas operaciones a una probeta testigo de aluminio, que se utiliza para calibrar todos equipos en cada medida.
5. Una vez realizadas las medidas, se sumergen las probetas en agua y cada cierto espacio de tiempo (30 a 60 minutos), se sacan, se seca la superficie y se pesan, si el incremento de peso es significativo, se realizan las medidas del punto 4.

La fracción de volumen de poros llenos de agua ( $v_w$ ) se determina a partir del peso de la probeta a medida que se llena de agua y de las fracciones de volumen de las fases constituyentes: matriz (m), arena (a) y poros con aire (p), calculadas para cada grupo de probetas, (tabla 5.7), mediante la siguiente expresión:

$$v_w = 1 - v_m - v_p - v_a \quad (\text{Ec. 5.3})$$

#### **5.6. Resultados de la medida de la velocidad ultrasónica.**

##### **EXPERIMENTO I**

El mapa de velocidades, para cada una de las probetas de mortero con y sin inclusiones de acero medida a la frecuencia de 2 MHz, se muestra en la figura 5.4.

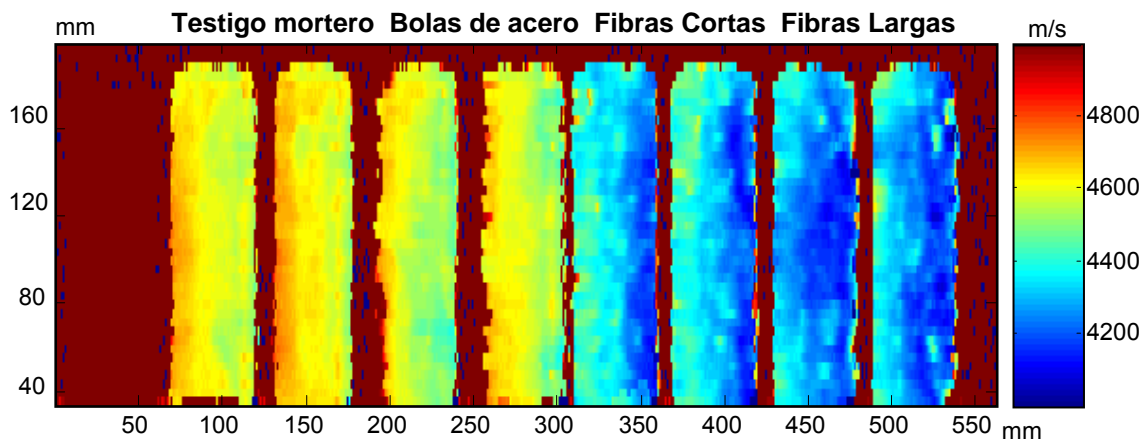


Figura 5.4. Mapa de velocidades medidas en las probetas de mortero a 2 MHz.

En la gráfica anterior se muestran las velocidades medidas a lo largo de toda la probeta. Las probetas se encuentran ordenadas como se ha señalado en la gráfica, correspondiendo la imagen más a la izquierda a la probeta de aluminio, que se ha usado como patrón para calibrar los equipos de medida. Se puede observar en la figura, cómo se diferencian los distintos tipos de morteros con y sin inclusiones de acero, siendo muy llamativa la diferencia de velocidad entre las probetas testigo de mortero y las probetas con inclusiones de fibra de acero (tanto corta como larga). La no uniformidad de colores dentro de cada una de las probetas muestra las discontinuidades y defectos internos que presentan las mismas.

En la figura 5.5 se muestra la velocidad media para cada grupo de mortero con y sin inclusiones de acero. Se puede observar cómo la adición de acero al mortero provoca una reducción importante de su velocidad, aproximadamente 100 m/s. Además se constata que a medida que aumenta la

relación de aspecto de las inclusiones de acero (por encima de 1, la cual corresponde a las fibras), la disminución de la velocidad es aún mayor (250 m/s, cuando pasamos de inclusiones esféricas a fibras cortas). Estos resultados nos permiten asegurar que los ensayos no destructivos por ultrasonidos son una buena herramienta para caracterizar materiales cementicios con inclusiones de acero.

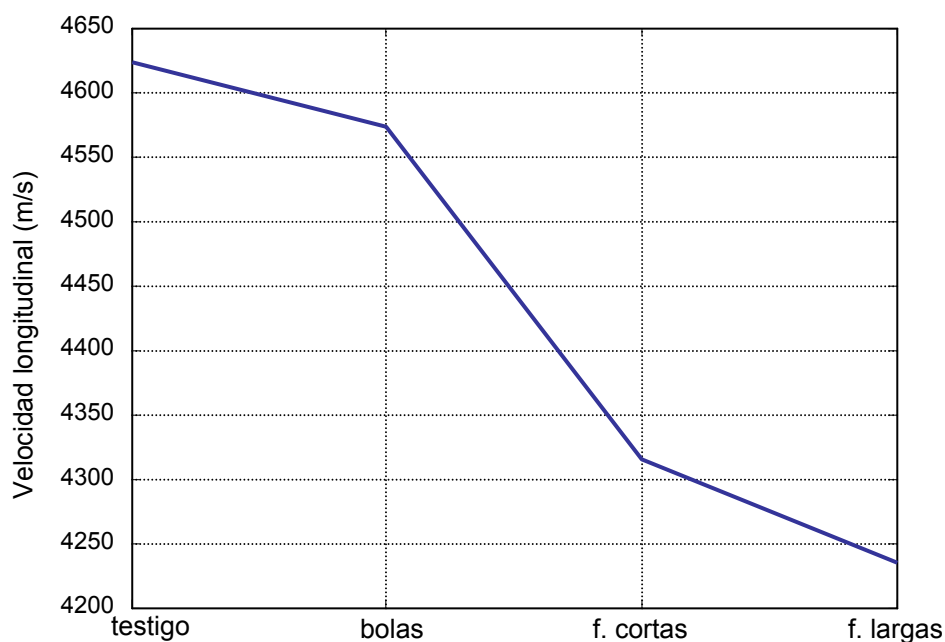


Figura 5.5. Velocidad longitudinal de las probetas de mortero con inclusiones de acero de diferentes relaciones de aspecto.

## **EXPERIMENTO II**

La variación de la velocidad longitudinal en las probetas de mortero a medida que los poros se llenan de agua se muestra en la figura 5.6. Se observa como a medida que aumenta la relación agua/cemento disminuye la

velocidad longitudinal y los diferentes grupos se encuentran bien diferenciados. También, se aprecia que a medida que la estructura porosa se va llenando de agua, la velocidad ultrasónica disminuye, siendo este descenso más acusado en las probetas de mortero con mayor relación agua/cemento.

El hecho de que la estructura porosa de los diferentes grupos de morteros estudiados no se llene completamente de agua, puede ser debido a que cierta cantidad de aire haya quedado atrapado durante el proceso de absorción de agua por capilaridad, así como a las características reales de la estructura porosa, lo cual concuerda con lo observado por [Wilson, 91].

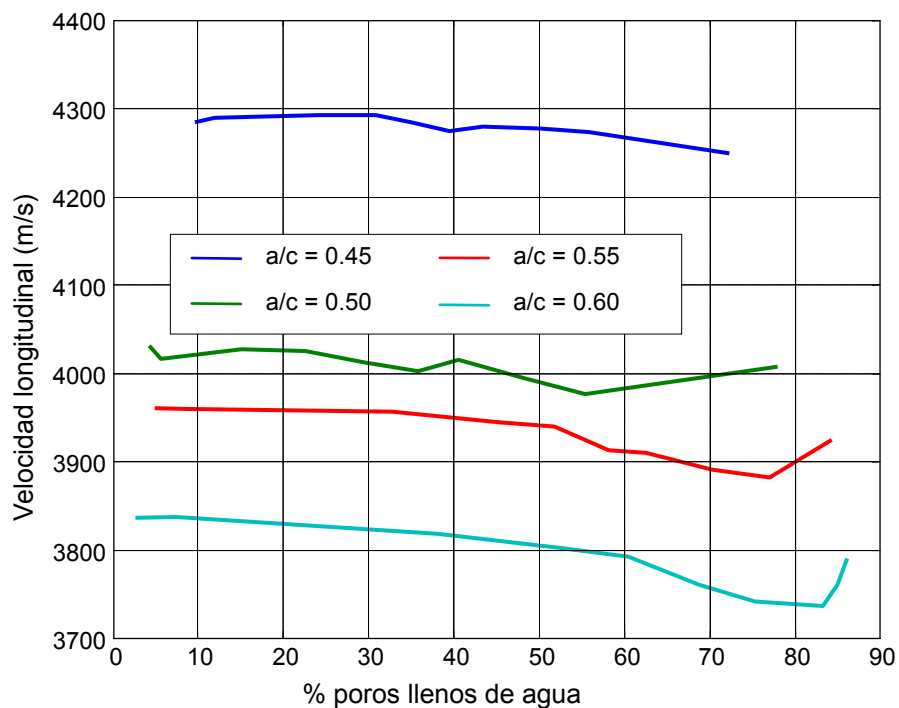


Figura 5.6. Velocidad longitudinal de las probetas de mortero parcialmente llenas de agua.

El aumento de la porosidad abierta y del diámetro de poro con la relación a/c, éste último medido por porosimetría de intrusión de mercurio por agua. [Hernández, 02] se corresponde con los mayores volúmenes de poros llenos de agua. Durante el proceso de mojado, la tensión superficial disminuye, la compresión en el sólido se alivia y hay aumento del volumen, expansión [Wittmann, 73]. Dicha tensión superficial produce tensión de compresión en partículas, y depende de la cantidad de agua adsorbida físicamente.

### **5.7. Estimación de la velocidad y las constantes elásticas a partir del modelo micromecánico.**

Para estimar tanto la velocidad ultrasónica como las constantes elásticas en compuestos de cemento de 4 fases se aplicará el modelo micromecánico tetrafásico expuesto en el capítulo 3.

#### **5.7.1. Constantes elásticas.**

Consideremos el mortero compuesto de una matriz sólida (pasta de cemento sin poros) y tres tipos de inclusiones. Si suponemos que todas las fases son isotrópicas, el tensor de constantes elásticas para materiales con 4 fases (ecuación 3.9) se reduce a dos constantes elásticas independientes  $C_{11}$  y  $C_{44}$ , en notación reducida:

$$\begin{aligned}
C_{11} = & C_{11}^m + \frac{\nu^a [C_{11}^a - C_{11}^m - \frac{4}{3}(C_{11}^a - C_{11}^m)] (\langle T_{1111}^a \rangle + 2\langle T_{1122}^a \rangle)}{\nu^m + \nu^a \langle T^a \rangle + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^w \langle T^w \rangle} \\
& + \frac{\nu^p [C_{11}^p - C_{11}^m - \frac{4}{3}(C_{11}^p - C_{11}^m)] (\langle T_{1111}^p \rangle + 2\langle T_{1122}^p \rangle)}{\nu^m + \nu^a \langle T^a \rangle + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^w \langle T^w \rangle} \\
& + \frac{\nu^w [C_{11}^w - C_{11}^m - \frac{4}{3}(C_{11}^w - C_{11}^m)] (\langle T_{1111}^w \rangle + 2\langle T_{1122}^w \rangle)}{\nu^m + \nu^a \langle T^a \rangle + \nu^p \langle T^p \rangle + \nu^w \langle T^w \rangle} \\
& + \frac{\frac{8}{3}\nu^a (C_{44}^a - C_{44}^m) \langle T_{1212}^a \rangle + \frac{8}{3}\nu^p (C_{44}^p - C_{44}^m) \langle T_{1212}^p \rangle + \frac{8}{3}\nu^w (C_{44}^w - C_{44}^m) \langle T_{1212}^w \rangle}{\nu^m + 2\nu^a \langle T_{1212}^a \rangle + 2\nu^p \langle T_{1212}^p \rangle + 2\nu^w \langle T_{1212}^w \rangle}
\end{aligned}$$

(Ec. 5.4)

$$C_{44} = C_{44}^m + \frac{\nu^a (C_{44}^a - C_{44}^m) 2 \cdot \langle T_{1212}^a \rangle + \nu^p (C_{44}^p - C_{44}^m) 2 \cdot \langle T_{1212}^p \rangle + \nu^w (C_{44}^w - C_{44}^m) 2 \cdot \langle T_{1212}^w \rangle}{\nu^m + 2\nu^a \langle T_{1212}^a \rangle + 2\nu^p \langle T_{1212}^p \rangle + 2\nu^w \langle T_{1212}^w \rangle}$$

(Ec. 5.5)

donde el subíndice m se refiere a la matriz y los subíndices a, p, w a las inclusiones.  $T_{ijkl}$  son las componentes del tensor de Wu, las cuales se calculan según [Wu, 66]

### 5.7.2. Estimación del módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad de los compuestos de cemento puede calcularse a partir de las constantes elásticas globales  $C_{11}$  y  $C_{44}$ , obtenidas anteriormente, mediante la siguiente relación:

$$E = \frac{C_{44}(3C_{11} - 4C_{44})}{C_{11} - C_{44}} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

## **5.8. Aplicación del modelo tetrafásico al mortero al Experimento I.**

### **5.8.1. Hipótesis para la aplicación del modelo tetrafásico al Experimento I.**

Para aplicar el modelo tetrafásico a nuestras probetas con inclusiones de acero debemos partir de las siguientes consideraciones:

- Se considera el material formado por cuatro fases: matriz (pasta de cemento) y tres tipos de heterogeneidades (poros, arena y acero).
- Como los poros forman una extensa red interconectada y más de las  $\frac{3}{4}$  partes son poros capilares, modelamos la geometría de éstos como cilindros elípticos alargados, para facilitar el trabajo y estar más cerca de la realidad, imponemos que la sección transversal de estos cilindros sea circular; y que se encuentran distribuidos aleatoriamente en la matriz. Con este dato, podemos establecer la solución de Eshelby para el tensor  $\mathbf{S}$  y calcular el tensor de Wu  $\mathbf{T}$ .
- Las propiedades elásticas de la arena se suponen conocidas ( $C_{11a}=82.9$  GPa y  $C_{44a}=33.5$  GPa) y dada la forma redondeada de los granos, éstos se modelan con geometría esférica distribuidos aleatoriamente en la matriz.
- Las constantes elásticas de la pasta de cemento sin poros se calculan a partir de los cálculos realizados con el modelo bifásico [Hernández, 02], tabla 5.8.

En la tabla 5.8 se muestran las propiedades elásticas y densidad de las fases constituyentes.

	<b>C<sub>11</sub> (GPa)</b>	<b>C<sub>44</sub> (GPa)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Matriz</b>	79.5	19.3	2.57
<b>Arena</b>	81.6	33.0	2630
<b>Acero</b>	253.1	76.9	7900
<b>Agua</b>	2.2	0	1000

Tabla 5.8. Propiedades elásticas y densidad de las fases constituyentes

### 5.8.2. Resultados de la aplicación del modelo tetrafásico para los morteros con inclusiones de acero.

A partir de los datos de las propiedades de las fases constituyentes (tabla 5.8), y de las hipótesis planteadas anteriormente, se aplica el modelo micromecánico propuesto para la caracterización de los morteros con inclusiones de acero. En el caso del mortero (testigo) se aplicó el modelo trifásico planteado en [Hernández, 02]. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.7 y 5.8.

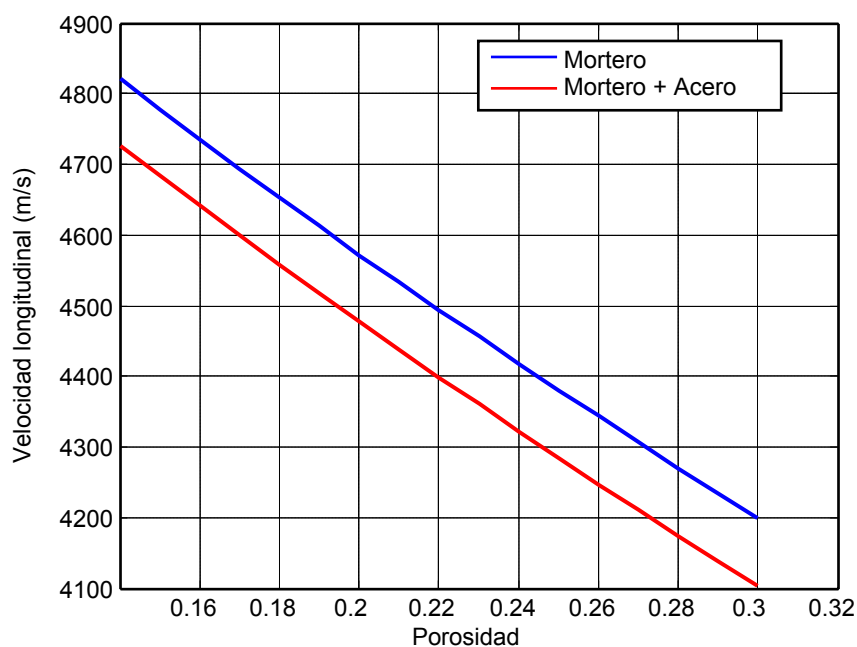


Figura 5.7. Curva que representa la función teórica que relaciona la velocidad longitudinal y la porosidad para los distintos materiales estudiados.

La figura 5.7 muestra la función teórica que relaciona la porosidad y la velocidad longitudinal, obtenida a partir de la aplicación del modelo, para el mortero y los morteros con inclusiones de acero. Cada curva representa el comportamiento de cada grupo de mortero con y sin inclusiones de acero. Se ha representado sólo una curva para los diferentes grupos de morteros con inclusiones de acero porque se ha comprobado que las diferentes geometrías no tienen influencia en la velocidad (apenas una variación de 20 m/s). En la gráfica se puede observar cómo la adición de partículas de acero provoca una disminución de la velocidad en todo el rango de porosidad estudiado, lo cual se corresponde con el comportamiento teórico observado en la figura 3.3 del capítulo 3.

En la figura 5.8 se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del modelo tetrafásico en las probetas de mortero con inclusiones de acero. Se puede observar cómo a medida que aumenta la relación de aspecto del acero la velocidad longitudinal disminuye, lo cual concuerda con lo observado en el estudio teórico presentado en el capítulo 3 (figura 3.5). Es decir, la porosidad capilar influye más que la variación de la geometría de las inclusiones de acero.

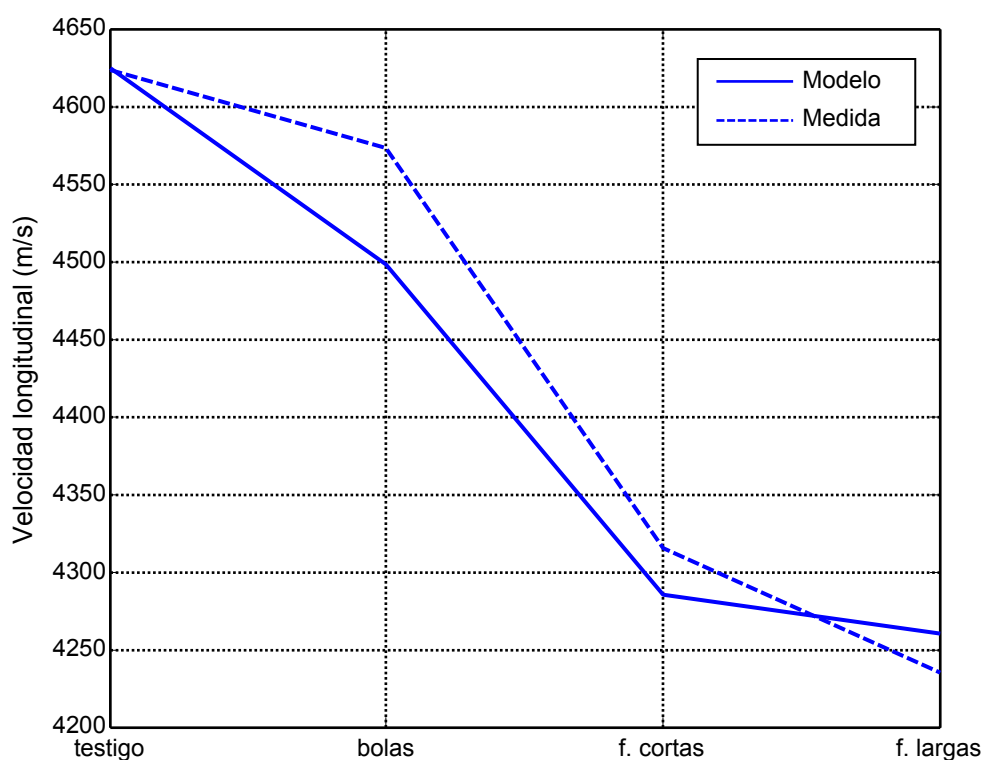


Figura 5.8. Velocidad longitudinal medida y estimada teóricamente mediante el modelo tetrafásico.

En la gráfica también se muestra una comparación entre la velocidad medida por ultrasonidos y la velocidad estimada por el modelo micromecánico. Se puede observar que la diferencia de los resultados experimentales frente a los del modelo no es muy significativa. En la tabla 5.9 se indican los errores

que se cometen en la predicción de la velocidad longitudinal para cada grupo de probetas analizado y se constata que estos errores son inferiores al 2%.

	<b>Testigo</b>	<b>Bolas</b>	<b>Fibras cortas</b>	<b>Fibras largas</b>
<b>Error (%)</b>	0.03	-1.6376	-0.6945	0.6016

*Tabla 5.9. Errores cometidos en la predicción de la velocidad longitudinal.*

Gracias a la concordancia entre el comportamiento teórico y experimental, puede afirmarse que el modelo tetrafásico es una herramienta útil para la caracterización de compuestos de cemento con inclusiones de acero o cualquier otro tipo de fibra, a partir del conocimiento de sus materiales constituyentes.

## **5.9. Aplicación del modelo tetrafásico al mortero al Experimento II.**

### **5.9.1. Hipótesis para la aplicación del modelo tetrafásico al Experimento II.**

Para aplicar el modelo tetrafásico a las probetas cuyos poros están parcialmente llenos de agua consideraremos:

- El mortero se caracteriza como un compuesto tetrafásico: matriz (pasta de cemento de constantes elásticas conocidas) y tres tipos de heterogeneidades (arena, poros con aire y poros con agua).
- Los poros se modelan como cilindros circulares alargados distribuidos aleatoriamente en la matriz.
- Se modela la arena como esferoides esféricos y con propiedades elásticas conocidas.

En la tabla 5.10 se muestran las propiedades elásticas y densidad de las fases constituyentes para los distintos grupos de morteros. Las constantes elásticas de la matriz no porosa han sido calculadas a partir de la metodología descrita en la figura 5.9, tomada de [Hernández, 04]. La densidad se calculo a partir de la medida de la porosidad abierta.

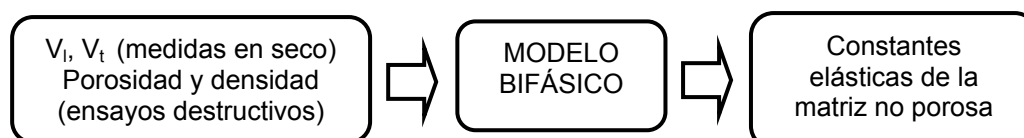


Figura 5.9. Diagrama de flujo para la estimación de las constantes elásticas de la matriz no porosa de la pasta de cemento.

Relación a/c	$C_{11m}$ (GPa)	$C_{44m}$ (GPa)	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )
0.45	46	12	2300
0.50	35	11	2295
0.55	35	10.75	2290
0.60	31	10.75	2285

Tabla 5.10. Propiedades elásticas y densidad de las fases constituyentes.

### 5.9.2. Resultados de la aplicación modelo tetrafásico para los morteros parcialmente llenos de agua.

Para comprobar experimentalmente la influencia de la cantidad de agua presente en los poros, en la velocidad del compuesto, se ha aplicado el modelo tetrafásico con las hipótesis planteadas anteriormente.

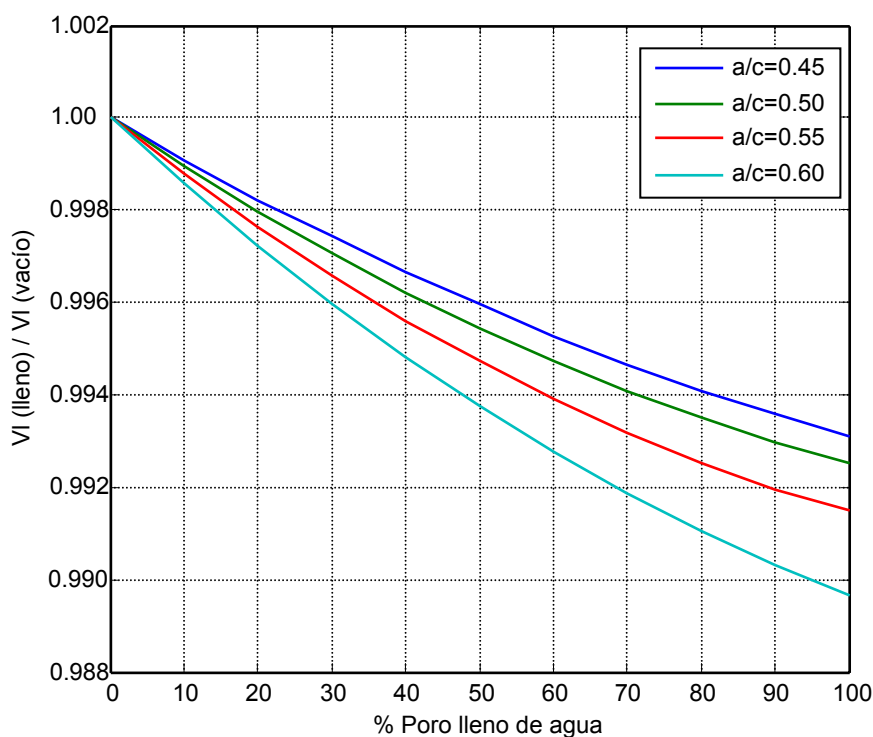


Figura 5.10. Velocidad longitudinal al aumentar la cantidad de agua presente en los poros, respecto a una probeta seca.

En la figura 5.10 se muestra la función teórica que relaciona la velocidad longitudinal con la porosidad, a medida que la estructura porosa se va llenando de agua. Cada curva representa un grupo de porosidad determinada por la relación agua/cemento, la cual determina las propiedades de la matriz. Se puede observar como las curvas se ordenan por relación agua/cemento, siendo

las de mayor velocidad la correspondiente a la menor relación a/c y por consiguiente menor porosidad.

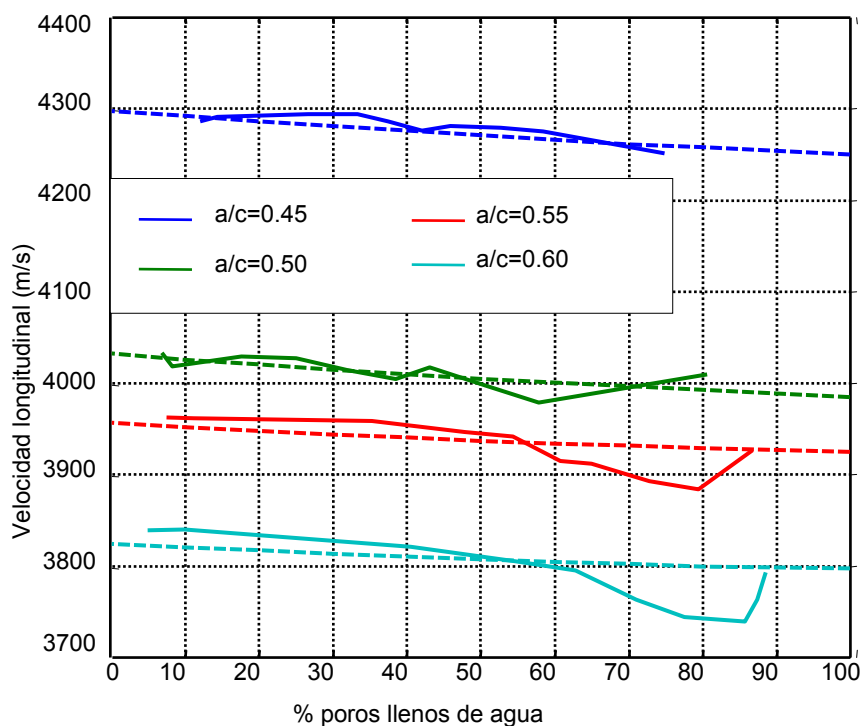


Figura 5.11. Comparación entre la velocidad longitudinal, teórica (línea de puntos) y medida por ultrasonidos (línea continua).

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo tetrafásico se muestran en la figura 5.11, así como una comparación entre la velocidad medida por ultrasonidos y el comportamiento teórico descrito por el modelo micromecánico. Se puede apreciar como a medida que la estructura porosa se va llenando de agua disminuye la velocidad longitudinal, siendo esta disminución más acentuada en el grupo de mortero con mayor relación agua/cemento. Este comportamiento coincide con el obtenido en el estudio teórico realizado en el capítulo 3. Además, se constata que las variaciones de

las propiedades elásticas de la matriz no porosa tienen más influencia que los cambios que se producen en la estructura porosa al llenarse de agua.

En la gráfica anterior se puede observar la concordancia de la tendencia general en la variación de la velocidad. Además se aprecia que, si bien la predicción no es exacta, se acerca bastante, logrando predecir la velocidad con errores medios inferiores al 1%, tabla 5.11. La falta de ajuste total puede ser debida a que el proceso de llenado de los poros no es uniforme [Yurtdas, 06] y a que la medida de la velocidad se realizó en la parte central de las probetas.

<b>Rel. a/c</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>	<b>0.55</b>	<b>0.60</b>
<b>Error (%)</b>	-0.2022	-0.2065	-0.2553	0.6821

*Tabla 5.11. Errores cometidos en la predicción de la velocidad longitudinal, Experimento II.*

Se ha comprobado teórica y experimentalmente que la variación de la velocidad ultrasónica, a medida que los poros se llenan de agua, es muy dependiente de la porosidad y de las características elásticas de la matriz no porosa, que vienen dadas por la relación agua/cemento. Este comportamiento concuerda con el observado por [Yurtdas, 06].

La concordancia entre el comportamiento teórico a partir de los modelos micromecánicos y la medida de la velocidad ultrasónica, nos permite afirmar que la utilización de dichos modelos se muestra como una herramienta más para profundizar en la caracterización de los materiales cementicios. Además, la metodología propuesta nos muestra resultados más alentadores que los

ensayos destructivos para la caracterización de la estructura porosa parcial o totalmente llena de agua.

# **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS**

### **6.1. Conclusiones**

La complejidad de un material como es el hormigón, y el creciente número de estructuras con síntomas de deterioro prematuro por acción de diferentes procesos agresivos lleva a la necesidad de incrementar el conocimiento científico del material para determinar, sin dañar el hormigón, el estado de éste y minimizar tanto los costes de reparación como los de mantenimiento.

El hormigón es un material heterogéneo y poroso. Las heterogeneidades dificultan el estudio del material y las predicciones de su comportamiento, mientras que su estructura porosa, condiciona la durabilidad, pues es la que facilita los procesos destructivos que generalmente comienzan en la superficie.

Tanto la durabilidad como las propiedades de los compuestos de cemento se caracterizan actualmente mediante ensayos destructivos, lo que supone una reparación de la estructura tras el ensayo, asociada con un elevado coste y un tiempo de experimentación alto.

La problemática planteada anteriormente justifica el objetivo de esta tesis, que ha sido el planteamiento de un modelo micromecánico N-fásico para la caracterización de materiales compuestos, a partir de la velocidad acústica, considerando la porosidad como una fase más dentro del material.

Como resultado de este trabajo se han obtenido las conclusiones que se indican a continuación, las cuáles influyen en los siguientes campos de investigación: caracterización ultrasónica de materiales, micromecánica de los materiales compuestos y durabilidad de materiales cementicios. Éstas se pueden concretar en:

1. Se ha planteado una revisión general de la microestructura de los materiales cementicios. Para ello se ha usado una división en escalas

de longitudes mecánicas a través de las cuales se pueden estudiar las propiedades químicas y físicas del material.

2. Se han revisado los modelos de homogenización clásicos que permiten estudiar las propiedades globales del material a partir de las propiedades de sus fases constituyentes. Los resultados de estos modelos se han comparado con las medidas de velocidad ultrasónica, poniendo de manifiesto que estos modelos no pueden ser aplicados a los materiales cementicios porosos. Los trabajos previos en el campo de la micromecánica continua, han motivado la profundización en modelos micromecánicos para estimar propiedades mecánicas a grandes longitudes de escala tomando como base las propiedades del material en longitudes de escala inferiores.
3. Se ha analizado el modelo micromecánico bifásico que desarrolló Jeong para estudiar las propiedades elásticas de cerámicas de alúmina con inclusiones elipsoidales orientadas arbitrariamente dentro de la matriz. Suponiendo que los materiales cementicios pueden considerarse formados por una matriz con diferentes inclusiones donde la porosidad es una de ellas, se ha estudiado el modelo trifásico desarrollado por Hernández. Este modelo ha dado buenos resultados, sin embargo, presenta el problema de que el hormigón no siempre puede considerarse como un material trifásico.

4. Partiendo de los modelos bifásico y trifásico se ha formulado la extensión teórica del modelo micromecánico para materiales de N-fases,
5. Se ha realizado un estudio teórico, a partir del modelo micromecánico N-fásico formulado, del comportamiento de las velocidades ultrasónicas para un material formado por cuatro fases (pasta, poros, arena y acero) variando parámetros como la porosidad, geometría de las inclusiones, fracción de volumen y propiedades elásticas del acero. Para los diferentes casos analizados se han extraído las siguientes conclusiones:
  - Un aumento de la porosidad produce una disminución de la velocidad longitudinal y transversal.
  - La velocidad ultrasónica disminuye al aumentar la fracción de volumen de acero.
  - La consideración de los poros como esferoides lenticulares afecta más significativamente a la velocidad ultrasónica que los poros modelados como esferoides oblongos.
  - La geometría de las inclusiones de acero ha mostrado tener gran influencia en la velocidad ultrasónica. Este comportamiento difiere completamente del observado en la arena, la cual no afecta prácticamente a la velocidad.

- Variaciones en las propiedades elásticas del acero no afectan a la velocidad, a diferencia de lo que ocurre con la relación de aspecto.
6. Se ha estudiado teóricamente el comportamiento de la velocidad ultrasónica en morteros cuya estructura porosa se encuentra parcialmente llena de agua, para lo cual se han considerado cuatro fases, pasta de cemento, arena, poros con aire y poros con agua. En este caso se han realizado variaciones en la relación arena/cemento, fracción de volumen de poros con aire y agua y propiedades elásticas de la matriz, obteniéndose las siguientes conclusiones:
- La relación arena/cemento no afecta a la variación del comportamiento de la velocidad a medida que la estructura porosa se llena de agua.
  - A medida que los poros se van llenando de agua la velocidad aumenta. Se ha observado que para porosidades inferiores al 15%, hay un cambio de tendencia en el comportamiento de la velocidad.
  - La velocidad ultrasónica ha mostrado ser muy susceptible a los cambios en las propiedades elásticas de la matriz de pasta de cemento no porosa. La matriz con mejores propiedades elásticas

experimenta menores cambios en la velocidad que aquella menos rígida.

7. Para la validación experimental se han realizado dos experimentos con probetas de mortero. Para el experimento I se fabricaron cuatro juegos de probetas, añadiendo en tres de ellos inclusiones de acero con distintas relaciones de acero, para estimar las variaciones de la velocidad al incluir agregados cuyas constantes elásticas difieren significativamente entre si. Para el experimento II se fabricaron dos juegos de 24 probetas cada uno, con distintas porosidades, sometiéndose a las probetas a un proceso de inmersión para obtener distintos contenidos de agua en los poros, de forma que puedan evaluarse los cambios en la velocidad debidos a este proceso. En cada caso se han realizado medidas destructivas (porosidad según metodología Rilem) y no destructivas (velocidades ultrasónicas)..
8. Las medidas experimentales han puesto de manifiesto que:
  - La porosidad aumenta cuando se añade acero al mortero y cuando aumenta la relación de aspecto de éste.
  - La porosidad aumenta al aumentar la relación agua/cemento.
  - La velocidad ultrasónica disminuye cuando se añade acero a las probetas de mortero.

- La velocidad longitudinal está muy influenciada por la relación de aspecto del acero, siendo menor cuando ésta aumenta.
  - La velocidad ultrasónica disminuye cuando aumenta la relación agua/cemento.
  - Cuando la estructura porosa se llena de agua, la velocidad disminuye, siendo este descenso más acusado para las probetas de mortero con mayor relación agua/cemento.
9. Se ha particularizado el modelo micromecánico N-fásico para materiales cementicios con 4 fases, y se ha aplicado al mortero con inclusiones de acero y para caracterizar la estructura porosa parcialmente llena de agua.
10. La aplicación del modelo micromecánico al mortero con inclusiones de acero, ha permitido predecir la velocidad longitudinal del material con errores inferiores al 2%.
11. La aplicación del modelo micromecánico tetrafásico para caracterizar el mortero ha permitido obtener la función teórica que relaciona la velocidad longitudinal con la porosidad, a medida que la estructura porosa se va llenando de agua. Cada curva representa un grupo de porosidad determinada por la relación agua/cemento, la cual determina las propiedades de la matriz. Se ha observado que las

curvas se ordenan por relación agua/cemento, siendo las de mayor velocidad la correspondiente a la menor relación a/c y por consiguiente menor porosidad.

12. La comparación entre las medidas obtenidas por ultrasonidos y el comportamiento teórico descrito por el modelo ha mostrado muy buena concordancia de la tendencia general en la variación de la velocidad, con errores inferiores al 1%. La falta de ajuste total puede ser debida a que el proceso de llenado de los poros no es uniforme, comportamiento éste también observado por otros investigadores.
13. La concordancia observada entre los resultados teóricos obtenidos con la aplicación del modelo tetrafásico y las medidas experimentales mediante ultrasonidos, nos permiten afirmar que los modelos micromecánicos son una herramienta útil para la caracterización de los compuestos cementicios, a partir del conocimiento de sus materiales constituyentes.

## **6.2. Líneas de investigación futura**

En esta tesis se ha formulado y desarrollado un modelo micromecánico para materiales de N-fases que permite determinar las

propiedades del compuesto, a partir de las propiedades de los materiales constituyentes. Aunque se han realizado numerosas aportaciones y se ha observado muy buenas correlaciones entre los ensayos destructivos y no destructivos, se hace necesario profundizar en determinados aspectos microestructurales así como ampliar la aplicación del modelo a un conjunto más amplio de materiales multifásicos. Por lo cual se prevé un trabajo adicional relacionado con las siguientes líneas de futuro.

Respecto al modelo micromecánico:

- Estudiar y analizar la limitaciones del modelo multifásico planteado.
- En este trabajo se han considerado una función de distribución de orientaciones en la cual las inclusiones estaban distribuidas aleatoriamente dentro de la matriz. Pero dado el desarrollo de los materiales compuestos y su adecuación a diferentes aplicaciones se hace necesario el estudio y formulación de función de distribuciones en las cuales las inclusiones se encuentren alineadas con respecto a un eje o plano u otra disposición que se haga necesaria.

Respecto al material:

- Ampliar los conocimientos acerca de los mecanismos de la adsorción de la estructura porosa y su relación con las propiedades globales de los materiales cementicios.
- Abordar la caracterización de morteros reforzados con fibras orientadas longitudinalmente o en un plano.
- Ampliar la casuística de los materiales a caracterizar mediante modelos N-fásicos, a los compuestos de fibra de carbono

Respecto a los ensayos no destructivos por ultrasonidos:

- Desarrollar metodologías de ensayos que permitan relacionar la velocidad ultrasónica con parámetros de adsorción como permeabilidad, entre otros.

## ANEXO 1

### Notación estándar de subíndices abreviados

Para reducir la complejidad del tensor de constantes elásticas es usual utilizar las propiedades de simetría de dicho tensor y trabajar con la notación de subíndices abreviados.

Debido a que los tensores de esfuerzos y deformaciones son simétricos, el tensor de constantes elásticas  $\mathbf{C}$  también será simétrico:

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk} \quad (\text{A1.1})$$

Por lo cual el número de constantes independientes del tensor de cuarto rango  $\mathbf{C}$  se reduce de 81 a 21 constantes. No obstante el tensor  $\mathbf{C}$  podrá seguir experimentando reducciones en función de la propiedades cristalográficas.

Las constantes  $C_{ijkl}$  se relacionan con las constantes de Voigt  $C_{ij}$  como se muestra en la tabla A1.1 para casos generales.

ij \ kl	11	22	33	23	31	12
11	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$
22	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$	$C_{25}$	$C_{26}$
33	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	$C_{34}$	$C_{35}$	$C_{36}$
23	$C_{41}$	$C_{42}$	$C_{43}$	$C_{44}$	$C_{45}$	$C_{46}$
31	$C_{51}$	$C_{52}$	$C_{53}$	$C_{54}$	$C_{55}$	$C_{56}$
12	$C_{61}$	$C_{62}$	$C_{63}$	$C_{64}$	$C_{65}$	$C_{66}$

Tabla A1.1. Relación entre las constantes  $C_{ijkl}$  y las constantes elásticas de Voigt

La reducción de subíndices nos permite pasar de un tensor de cuarto orden a una matriz de 6x6. Debemos aclarar que esta matriz no mantiene las propiedades del tensor  $\mathbf{C}$ .

## ANEXO 2

### **Porosimetría.**

La caracterización de la estructura porosa de los materiales base cemento, es uno de los aspectos más importantes de cara a la caracterización microestructural de estos materiales. La mayor parte (que son también los más extendidos) de los métodos de medida de la porosidad en materiales base cemento - exceptuando los realizados mediante microscopía óptica o electrónica, o los realizados mediante dispersión de rayos-X a bajos ángulos -, implican la determinación de la densidad de estos materiales mediante el contacto con algún tipo de sustancia líquida o gaseosa: mercurio, metal de Wood's, galio, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, metanol, etanol, isopropanol, helio.

La medida de la densidad es también la determinación de la porosidad, dado que ambas están relacionadas:

$$P(\%) = 100 * (1 - [m / (\rho * V)]) \quad (\text{Ec. A2.1})$$

donde  $m$  es la masa del material,  $\rho$  es su densidad real y  $V$  es el volumen del material. Conviene resaltar que, la medida de la porosidad realizada por los métodos que implican el contacto con sustancias líquidas o gaseosas, nos proporciona información acerca de la porosidad abierta o accesible, es decir, aquellos poros que se encuentran interconectados con el exterior. Este tipo de medidas no nos permitiría medir aquellos poros no interconectados - bien burbujas de aire ocluidas o poros no interconectados con el exterior -, ni aquellos poros cuyo tamaño no permite la entrada del líquido o gas que estemos usando para la medición. Como se indicará más adelante, es importante referir la medida de porosidad, al método empleado - tipo de líquido o gas, temperatura de secado, metodología - dado que el cambio de esas variables condiciona el resultado final obtenido.

La normativa existente, tanto UNE [UNE, 01] como ASTM [ASTM, 97] sobre la medida de la porosidad en morteros y hormigones, implica la medida de la porosidad/densidad mediante medidas en saturación del material. Para ello es preciso saturar el material con agua, determinar las masas - hidrostática y superficie seca saturada - y secar el material. A este respecto, el RILEM emitió una recomendación para la medida de la porosidad según estos métodos [Rilem, 84].

En esta memoria se ha utilizado la recomendación de la RILEM con algunas modificaciones introducidas a partir del conocimiento del grupo de investigación en el cual se ha desarrollado esta tesis. Es necesario señalar que lo referente a los ensayos de porosimetría ha sido investigado y desarrollado especialmente por el Lic. Ignacio Segura, quién nos ha brindado todo el apoyo necesario.

La metodología utilizada para los ensayos de porosimetría se describe a continuación.

### **Porosidad mediante saturación a vacío.**

Se trata de otra técnica destructiva para la medida de la porosidad. El fundamento de esta técnica es muy sencillo, ya que la medida de la porosidad se basa en la determinación de la densidad por el principio de Arquímedes.

En este trabajo de investigación se ha seguido el procedimiento descrito en la recomendación RILEM, que posibilita una saturación más eficiente de las muestras, por dos motivos: la extracción del aire acumulado en los poros y la aplicación de una sobrepresión facilitan la entrada del agua, en comparación con otros procedimientos. El procedimiento operatorio es sencillo, y empleamos el dispositivo experimental que se muestra en la figura A2.1, que nos permite realizar el ensayo descrito en la recomendación:

1. Secar la muestra, hasta masa constante, a 105° C.

2. Colocar la muestra en un recipiente de vacío, manteniendo el vacío durante al menos 24 horas. Disponer otro recipiente con agua que ha estado sometida, al menos 2 horas, a la misma presión absoluta que el recipiente anterior.
3. Trasvasar el agua de su recipiente al que contiene las probetas, evitando romper el vacío del sistema. Cuando la muestra está totalmente sumergida, se incrementa la presión en el sistema hasta alcanzar la presión atmosférica.

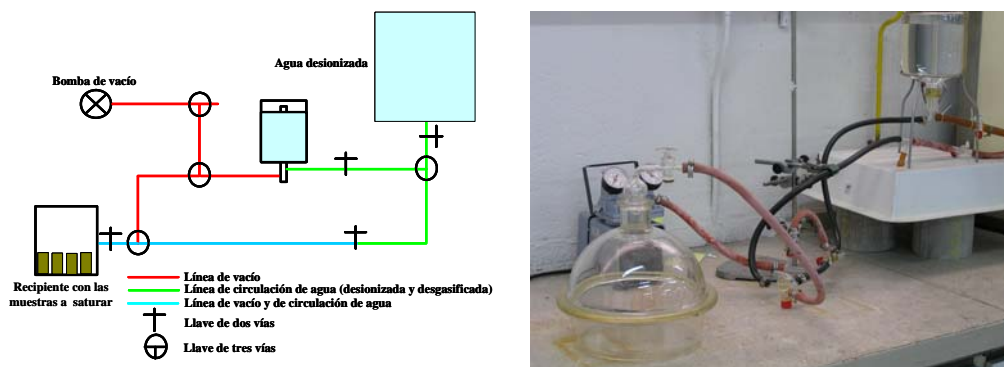


Fig. A2.1. Dispositivo experimental empleado para la saturación de las muestras a vacío.

Este procedimiento implicaría, por lo menos, 72 horas para poder determinar la porosidad de la muestra: 24 horas de secado, 24 de vacío y 24 horas en inmersión, además del tiempo necesario para secar posteriormente la muestra. El tiempo de ensayo puede ser reducido, según indica [García de Arriba, 94], pudiendo realizarse el ensayo de saturación en menos de 12 horas: 4 horas de vacío, 4 de inmersión a vacío y 4 horas de inmersión a presión atmosférica. Además, en nuestro caso hemos relegado la etapa de secado al

final de todo el proceso y hemos reducido la temperatura a 80° C, para evitar en la medida de lo posible la formación de porosidad adicional y el daño en los compuestos hidratados.

Para la realización de los ensayos de porosidad por saturación a vacío, el único pretratamiento que se realizó en la muestra fue el de reducir el tamaño de la muestra.



## ANEXO 3

Las propiedades elásticas de los materiales compuestos dependen de la distribución de orientaciones de las inclusiones en la matriz. En estos materiales la proporción de las heterogeneidades en las distintas direcciones se especifica por la función de distribución de orientación,  $I(\phi, \theta, \psi)$ , donde los argumentos  $\phi, \theta, \psi$  son los ángulos de Euler que describen la orientación de las inclusiones con respecto a los ejes globales del compuesto.

La función de distribución se define como:

$$f(g)dg = \frac{dV(g)}{V_f} \quad (\text{Ec. A3.1})$$

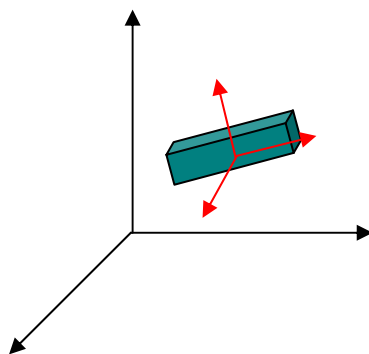
donde  $V_f$  representa el volumen de inclusiones,  $dV(g)$  es el volumen de inclusiones cuya orientación esta dentro del rango  $[g + (g+dg)]$  y  $f(g)dg$  expresa la probabilidad de que una inclusión con una orientación dada se encuentre dentro del intervalo  $[g + (g+dg)]$ .

Se requiere que:

$$\oint f(g)dg = 1 \quad (\text{Ec. A3.2})$$

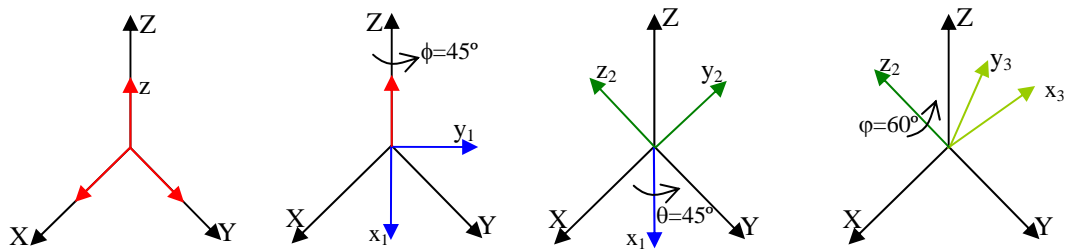
Para describir la orientación en el espacio de un cuerpo rígido se necesitan tres parámetros, dentro de los diferentes parámetros posibles se ha seleccionado los ángulos de Euler ( $\phi, \theta, \varphi$ ).

Los ángulos de Euler nos permiten mediante rotaciones sucesivas pasar de un sistema de referencia a otro, es decir, pasar del sistema de referencia de las inclusiones al sistema de referencia del compuesto, figura A3.1.



*Figura A3.1. Sistema de referencia del compuesto y de las inclusiones*

Si hacemos coincidir los sistemas de referencia, podemos describir las tres rotaciones posibles. La primera rotación alrededor del eje z, viene dada por el ángulo  $\phi$  (puede girar entre 0 y  $2\pi$ ). La segunda rotación es alrededor del nuevo eje x,  $x_1$ , representada por el ángulo  $\theta$  (puede girar entre 0 y  $\pi$ ). La última rotación es alrededor del nuevo eje z,  $z_2$ , representada por el ángulo  $\varphi$  (puede girar entre 0 y  $2\pi$ ), ver figura A3.2.



*Figura A3.2.Ángulos de Euler*

La función de distribución definida en el espacio de Euler se expresa como:

$$\oint f(g)dg = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{\phi=2\pi} \int_0^{\theta=\pi} \int_0^{\varphi=2\pi} \Gamma(\phi, \theta, \varphi) \text{sen}\theta d\phi d\theta d\varphi \quad (\text{Ec. A3.3})$$

donde  $\Gamma(\phi, \theta, \varphi)$  es la función de distribución de orientaciones, que nosotros usamos.

Casos particulares de la función de distribución.

Caso 1. Si consideramos que las inclusiones están orientadas aleatoriamente,  $\Gamma(\phi, \theta, \varphi)$  es constante e independiente de los ángulos de Euler  $(\phi, \theta, \varphi)$ .

Caso 2. Si la inclusión isotrópica es estirada en un eje cualquier, se mantiene la isotropía alrededor de la dirección del estiramiento, por lo que la función de distribución será independiente del ángulo correspondiente a la dirección del estiramiento, y dependerá de los dos ángulos restantes.

Si consideramos que las inclusiones son esferoides, solo se necesitan los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  para especificar la distribución de orientaciones y si además están orientadas aleatoriamente ( $\Gamma(\phi, \theta) = \text{constante}$ ), la función de distribución de orientaciones se reduce a:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} T(\phi, \theta) \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{Ec. A3.4})$$

Las características de las inclusiones incluyen la geometría además de su orientación y fracción de volumen. En general, la geometría de una inclusión se puede describir aproximadamente por elipsoides (figura A3.3), los cuales se caracterizan por sus tres radios axiales.

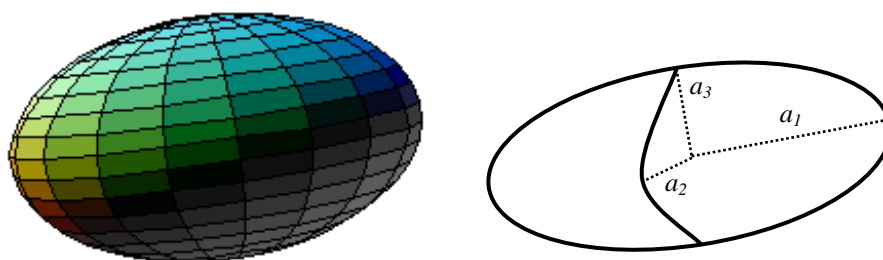


Figura A3.3. Elipsoide que describe la forma general del poro.  
( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  radios del elipsoide)

En nuestro caso consideraremos que las inclusiones tienen forma de esferoide que es un caso particular de elipsoide con dos semiejes iguales. Cuando el esferoide es achatado por sus polos, tal que el eje desigual sea menor que los otros dos ( $a_1 = a_2 > a_3$ ) estamos en presencia de un esferoide lenticular (figura A3.4 a). Cuando el esferoide es alargado por sus polos, tal que su radio desigual es mayor que los otros dos ( $a_1 > a_2 = a_3$ ) obtendremos un esferoide oblongo (figura A3.4 b). Para facilitar la nomenclatura en las formulaciones, se considera que siempre se cumple  $a_1 \geq a_2 \geq a_3$ .

Las inclusiones esferoidales pueden ser caracterizados por su relación de aspecto,  $\alpha$ , y por la función de distribución de orientación que corresponda. Si definimos la relación de aspecto como la relación entre el eje desigual y los dos ejes coincidentes, entonces  $\alpha = a_3/a_1 < 1$  para un esferoide lenticular. Del mismo modo  $\alpha = a_1/a_3 > 1$  para un esferoide oblongo, y  $\alpha = 1$  para el caso de las inclusiones esféricas.

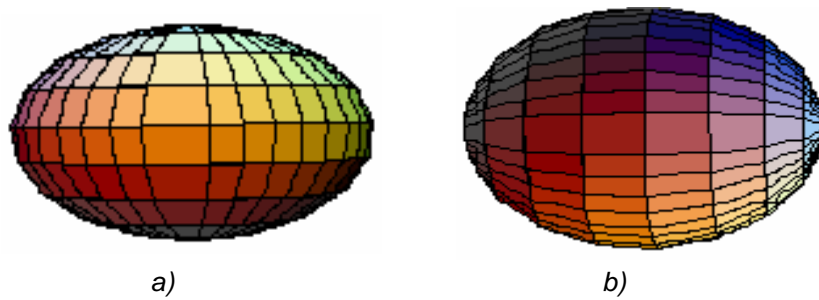


Figura A3.4. Casos particulares de un esferoide.  
a) esferoide lenticular  
b) esferoide oblongo

Los esferoides lenticulares en su caso límite pueden caracterizarse como discos circulares o elípticos ( $\alpha \rightarrow 0$ ) mientras que los esferoides oblongos en el límite son cilindros de longitud infinita.

En el modelo micromecánico la geometría del poro se caracteriza mediante el tensor de Eshelby  $\mathbf{S}$ . Para una matriz isotrópica,  $\mathbf{S}$  está dado por la relación de Poisson de la matriz y por la relación de aspecto o el tamaño relativo de los tres ejes de la inclusión  $a_1$ ,  $a_2$ , y  $a_3$ . La solución dada por Eshelby [Eshelby, 57] para las distintas formas especiales de inclusión parte de la resolución de integrales elípticas estándar y considerando que las deformaciones (y por lo tanto los esfuerzos) son uniformes dentro de la inclusión.

Los componentes del tensor de Eshelby se pueden consultar en [Mura, 87]

## **ANEXO 4**

### **Sistemas de representación de la información de las señales ultrasónicas.**

Existe una convención para denominar las imágenes que se obtienen de las inspecciones ultrasónicas. La información que se obtiene en la inspección ultrasónica se puede representar como imágenes tipo A, B, C y D.

El más extendido es el de representación tipo A, en el que las indicaciones aparecen como deflexiones verticales de la base de tiempos.

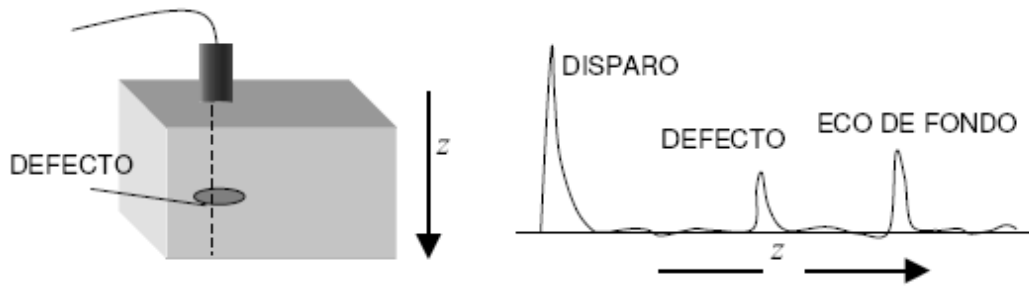


Fig. A4.1. Exploración manual de una pieza con defecto y visualización de la traza en clase A con la interpretación de las formas de onda

La localización de defectos en grandes zonas se realiza mediante imágenes bidimensionales. Generalmente se dan tres tipos de representación:

Representación tipo B: en este caso se visualiza una sección de la pieza en las direcciones profundidad-longitud. Se representa con falso color o escala de grises la intensidad de cada traza en clase A como una línea vertical, que se yuxtapone a la siguiente. Da una gran información de la tipología y posición de los defectos

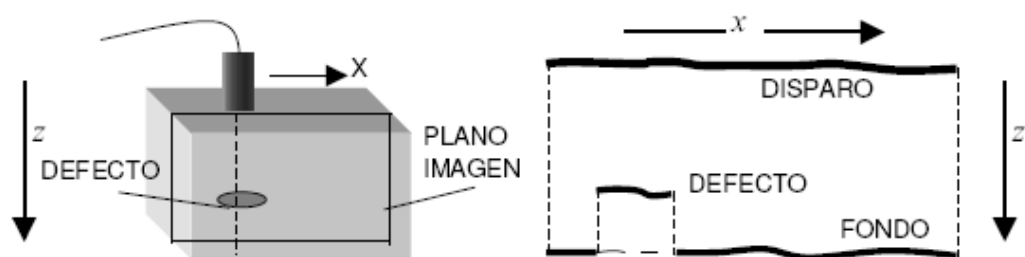


Figura A.4.2. Barrido lateral (a lo largo del eje x) e imagen tipo B. Puede verse cómo el defecto oculta parcialmente, en ocasiones de forma total) el eco de fondo, así como una mayor precisión en su ubicación y forma.

Representación tipo C: la imagen en clase B proporciona sólo un corte de la pieza inspeccionada en la dirección del alzado. En clase C se representa la amplitud máxima de la señal en las direcciones lateral-longitud, esto es, en planta. Permite la localización rápida de zonas con defectos, si bien se pierde la información de profundidad.

Representación tipo D: análoga a la anterior, donde se representa con una escala de color o grises la profundidad en lugar de la amplitud. El conjunto de las imágenes en clase C y D proporcionan una imagen en 3D de la pieza, con información de amplitud y posición del mayor de los ecos. Se pierde, por tanto información de varios defectos situados uno encima de otro a diferente profundidad. A partir de esta representación y teniendo el espesor de la muestra se puede obtener el mapa de velocidades, en el material bajo estudio.

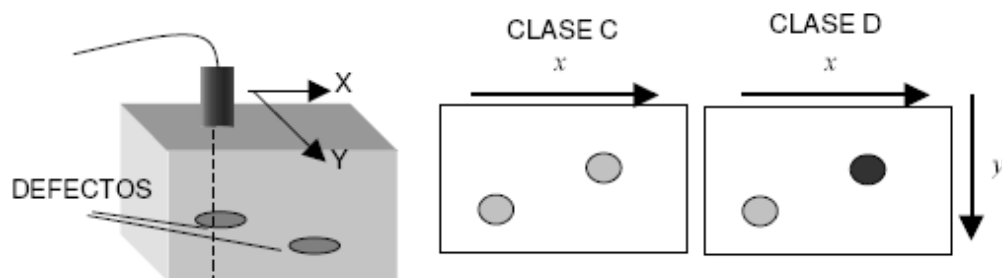


Figura A.4.3. Barrido a lo largo de los ejes  $x$  e  $y$  e imágenes tipo C y D. Ambas son representaciones en planta. La imagen en clase C contiene información de amplitud de señal (se supone ambos defectos iguales a distintas profundidades). La imagen en clase D indica la profundidad con el color



## REFERENCIAS

- [Acker, 01] Acker, P. et al. Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms. En: Ulm, f. –J., Bazant, Z. and Wittmann, F., Editors, Proc. Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, CONCREEP-6@MIT, pages 15-25, Cambridge, Ma, 2001. Elsevier, Oxford UK
- [ASTM, 97] ASTM C 642-97 Standard test method for specific gravity, absorption and voids in hardened concrete. 1997, ASTM. p. 2.

- [Baalbaki, 92] Baalbaki, W et al. On predicting Modulus of elasticity in high-strength concrete. ACI Materials Journal, Vol. 89, N° 5, pp. 517-520, 1992
- [Barnes, 79] Barnes, B.D. et al. Micro-morphology of the interfacial zone around aggregates in portland-cement mortar. Journal of the American Ceramic Society. 62 pp. 21-24, 1979
- [Bernard, 03] Bernard, O et al. A multiscale micromechanics-hydration model of early-age elastic properties of cement-based materials. Cement and Concrete Research, 33, pp. 1293-1309, 2003
- [Brouwers, 04a] Brouwers, H.J.H. The Works of Powers and Brownyard revisited: Part I. Cement and Concrete Research, 34, pp. 1697-1716, 2004
- [Brouwers, 04b] Brouwers, H.J.H. The Works of Powers and Brownyard revisited: Part II. Cement and Concrete Research, 35, pp. 1922-1936, 2004
- [Canovas, 02] Canovas, M.F. Hormigón. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Edición 2002.

- [Constantinides, 02] The elastic properties of calcium leached cement pastes and mortars: A multi-scale investigation. MSc thesis, MIT, 2002. Publicado como MIT-CEE Report 02-1, 2002
- [Constantinides, 04] Constantinides, G. et al. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. Georgios Constantinides et al. Cement and Concrete Research 34 pp. 67–80, 2004.
- [Constantinides, 06] Invariant mechanical properties of calcium silicate hydrates (C-S-H) in cement based materials: instrumented nanoindentation and microporo-mechanical modelling. Tesis Doctoral, MIT, 2006
- [Counto, 64] Counto, U.J. The effect of the elastic modulus of the aggregate on the elastic modulus, creep and creep recovery of concrete, Magazine of Concrete Research, 16, No. 48, pp. 129-138, 1964
- [Daponte, 89] Daponte, P. et al. Crack Detection Measurements in Concrete. Proc. Of Microcomputer Application Conf., Los Angeles, Dec. 14-16, pp 123-127, 1989

- [Eshelby, 57] Eshelby, J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. Proc. Royal Society London, A241, pp. 376-396, 1957
- [Faucon, 98] Faucon, P. Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physio-chemical mechanisms of water degradation. Cement and Concrete Research, 28 pp. 847-857, 1998.
- [Feldman, 68] Feldman, R.F. A model for hydrated portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. Materials and Structures, 1 pp. 509-519, 1968
- [Fritsch, 96] Fritsch, C. et al. SENDAS: an approach to modular digital processing for automated NDE. Second Conference on NDE Applied to Process Control on Composite Fabrication, ST Louis, oct 1996.
- [García de Arriba, 94] García de Arriba, et al, Determinación de la porosidad y la permeabilidad del hormigón endurecido. Hormigón y Acero, 1994. 193: p. 105-116.
- [Haecker, 05] Haecker, C.J. et al Modelling the lineal elastic properties of Portland cement paste Cement and Concrete Research. Vol 35 (10) pp. 1948-1960, 2005

- [Hashin, 63] Hashin, Z. et al. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics Solids*. Vol 11 pp 127-140, 1963
- [Heinbockel, 96] Heinbockel, J.H. Introduction to tensor calculus and continuum mechanics. Department of Mathematics and Statistics, Old Dominion University, 1996
- [Hernández, 00] Hernández, M.G. et al. Porosity Estimation of Concrete by Ultrasonic NDE. *Ultrasonics*, Vol. 28, (1-8), pp 531-533, March 2000.
- [Hernández, 02] Hernández, M.G. Aplicación de la micromecánica a la caracterización ultrasónica de compuestos de cemento. Tesis Doctoral, UPM, 2002
- [Hernández, 04] Hernández, M.G. et al. Effect of the fluid in the inclusions of the cement paste on the ultrasonic velocity. *Ultrasonics* Vol. 42, pp. 865-869, 2004.
- [Hernández, 06] Hernández M.G., et al. Formulation of a new micromechanic model of three phases for ultrasonic characterization of cement based materials. *Cement and Concrete Research* Vol. 36 (4), pp. 609-616, 2006

- [Heukamp, 03] Heukamp, F.H. Chemomechanics of Calcium Leaching of Cement-Based Materials at different scales: The role of CH-dissolution and C-S-H degradation on Strength and Durability Performance of Materials and Structures. Tesis Doctoral, MIT, 2003
- [Hill, 52] Hill, R. Proceedings of the Physical Society of London, Vol. 65 A, pp. 349. 1952.
- [Hirsch, 62] Hirsch, T.J. Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate, Proceedings of the American Concrete Institute, Vol. 59, pp. 427-452, 1962
- [Jennings, 00] Jennings, H.M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. Cement and Concrete Research, 30, pp. 101-116, 2000
- [Jennings, 07] Jennings, H.M., et al. "A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste". Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 329-336, 2007
- [Jeong, 96] Jeong, H. et al. "Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micromechanics and ultrasonic velocity". NDT & E. International, Vol 29, N° 2, pp. 95-101, 1996.

- [Kino, 87] Kino, G. Acoustic waves: Devices, Imaging and Analog Signal Processing. Prentice Hall, 1987
- [Krautkrämer, 90] Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H. Ultrasonic Testing of Materials. Springer-Verlag. Pp 522-524, 1990
- [Kuster, 74] Kuster, G.T. et al. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I. Theoretical formulations. Geophysics Vol. 39 pp 587-606, 1974
- [Landau, 69] Landau, L.D. et al. Teoría de la Elasticidad. Reverté, 1969.
- [Mehta, 93] Mehta, P.K. et al. Concrete: Structures, Properties and Materials. 2<sup>nd</sup> edition. Prentice Hall, 1993
- [Modry, 73] Modry, S et al. Pore structure and properties of materials. Vols. I a VI. Academia Prague, 1973
- [Mori, 73] Mori, T. et al. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. Acta Metallurgical, Vol. 21, Nº 5, pp. 571-574, 1973
- [Mura, 87] Mura, T. Micromechanics of defects in solids, 2<sup>nd</sup> edition, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1987.

- [Neville, 00] Neville, A.M. Properties of concrete. Fourth edition, Prentice Hall, 2000
- [Odergard, 03] Odegard G.M. et al Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites. Composites Science and Technology 63 pp 1671-1687
- [Ohdaira, 00] Ohdaira, E et al. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE, Ultrasonics, Vol. 38, 2000, pp. 546-552, 2000
- [Parrilla, 91] Parrilla, M. et al. Digital Signal Processing Techniques For High Accuracy Ultrasonic Range Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 40 nº4 pp759-763, 1991
- [Poblete, 07] Poblete, A et al. Thermographic measurement of the effect of humidity in mortar porosity, Infrared Physics & Technology, Vol. 49, pp. 224-227,2007.
- [Richardson, 99] Richardson, I. The nature of C-S-H in hardened cements. Cement and Concrete Research, 29 pp. 1131-1147, 1999
- [Richartz, 69] Richartz, W. Acerca del desarrollo de la estructura porosa y la resistencia de la pasta de cemento. Düsseldorf Beton, Nº 5, pp 203-206, Mayo 1969.

- [Rilem, 84] Recommendation, CPC 11.3 Absorption of water by immersion under vacuum. 1984, RILEM
- [Taylor, 04] Taylor, H. Cement Chemistry. 2<sup>nd</sup> edition. Thomas Telford Publishing, 2004
- [Tennis, 00] Tennis, P.D. et al. Model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. Cement and Concrete Research, 30 pp. 855-863, 2000
- [Tobío, 67] Tobío, J. M. Ensayos no destructivos, métodos aplicables a la construcción. Patronato de Investigación Científica y Técnica "Juan de la Cierva" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Febrero 1967
- [UNE, 01] UNE-EN 12390-7 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido. 2001, AENOR. p. 11.
- [Wilson, 91] Wilson, M. A. Water movement in Porous Building Materials-X. Absorption from a Small Cylindrical Cavity. Building and Environment, Vol. 26, pp. 143-152, 1991.
- [Wittmann, 73] Wittmann, F. H.. Interaction of hardened cement paste and water. J. Am. Ceram. Soc., 56, nº 8, pp. 409-15 (1973).

- [Wu, 66] Wu, T.T. The effect on inclusion shape on the elastic moduli of a two phase material. International Journal of Solids Structure, Vol. 2, pp. 1-8, 1966
- [Yaman, 02] Yaman I.O. et al. Active and Non-Active Porosity in Concrete Part II: Evaluation of Existing Models. RILEM Journal of Materials and Structures. Vol 35, pp 110-116 March 2002
- [Yurtdas, 04] Yurtdas, I et al. Triaxial mechanical behaviour of mortar: Effects of drying. Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1131-1143, 2004
- [Yurtdas, 06] Yurtdas, I. et al. Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying. Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 7, pp. 1286-1293, 2006