

Trabajo de Investigación CST/MIH

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Por:

ALVARO ALEJANDRO MARTINEZ MERCADO

MARZO DE 2017

Autor / Author: Martinez Mercado, Alvaro Alejandro	Fecha / Date:	
Titulo / Title: Evaluación Por Medio De Técnicas No Destructivas Del Daño Producido Por Ataque Externo De Sulfatos En Mortero De Cemento Portland		
Directores del Trabajo / Supervisores: Jorge Juan Payá Bernabeu José María Monzó Balbuena	Código / Code: CST/MIH	N° paginas/ Pages:
Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		
Palabras clave / Keywords: Sulfatos, Métodos no destructivos, Expansión, NIRAS, DEMEC, Espectroscopia Acústica, Ultrasonido		
Código Unesco: 3305.05 Tecnología del hormigón 3312.02 Aglomerantes		



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Resumen

De los ataques químicos que afectan al hormigón, el ataque por sulfatos presenta patologías estudiadas por muchos autores por las consecuencias negativas que producen los agentes agresivos a las estructuras de hormigón. En el presente estudio se evalúa el deterioro de la matriz cementante de mortero de cemento portland por ataque externo de sulfatos de magnesio y de sodio, utilizando dos tipos de cementos, CEM I-52,5R y CEM II/A-L 42,5R.

Para la evaluación del ataque externo de sulfatos se utilizó dos técnicas no destructivas de manera paralela, la técnica de espectroscopia acústica (nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy, NIRAS) y ultrasonidos, las cuales se contrastaron con el ensayo tradicional de mediciones de expansión en las probetas prismáticas de mortero.

El ensayo de espectroscopia acústica demuestra ser una técnica confiable, con la cual se puede evaluar los daños a las probetas prismáticas de mortero utilizadas en el estudio, a través del módulo de elasticidad dinámico y la comparación del parámetro histerético, permitiendo conocer la evolución del daño por ataque externo de sulfatos a lo largo del tiempo.

El ensayo de ultrasonidos de igual manera nos aporta información sobre la calidad del mortero utilizado en el estudio, aunque con respecto al ataque agresivo utilizado no es concluyente debido a la naturaleza externa del mismo, ya que el ataque de sulfatos al cabo de 100 días solamente tiene una penetración aproximada de unos pocos milímetros; esto implica que la señal recorrería un 87,5% de probeta casi sana (en el caso de penetración de unos 10mm), lo cual hizo que los resultados de velocidad y atenuación del pulso ultrasónico no presentaran cambios significativos a lo largo del desarrollo del estudio.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Abstract

The concrete is affected by different types of chemical attacks. The sulphates attacks presents pathologies that have been studied by diverse authors due to the negative consequences that these aggressive agents produce to concrete structures. This study evaluates the deterioration of the cement matrix of Portland cement mortar by external attack of magnesium and sodium sulfates using two types of cements, CEM I-52,5R and CEM II / A-L 42,5R.

For the evaluation of the external sulphates attack two non-destructive techniques were used in parallel, the technique of nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy (NIRAS) and ultrasounds. Both techniques were contrasted with the traditional test of expansion measurements in the prismatic mortar specimens.

The acoustic spectroscopy test showed to be a reliable technique, which it is possible to evaluate the damages to the prismatic mortar specimens used in this study. The evaluation was carried out by the measure of the elasticity dynamic modulus and the comparison of the hysteretic parameter, allowing to know the evolution of the damage by external sulphates attack over time.

The ultrasonic test also gives us information about the quality of the mortar used in this study, although with respect to the aggressive attack used in this study it is not conclusive. This fact is due to the external attack of sulphates after 100 days only has a penetration of approximately a few millimeters. This low penetration implies that the signal would travel 87.5% of a specimen almost healthy (in the case of penetration of about 10 mm), which made the results of velocity and attenuation of the ultrasonic pulse did not present significant changes throughout the development of the study.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Contenido

1	Introducción	11
2	Objetivos	11
3	Estado del arte	12
3.1	Ataque por sulfatos	12
3.1.1	Ataque externo por sulfatos (AES)	13
3.2	Evaluación de daño por técnicas de expansión	15
3.3	Evaluación de daño por técnicas de espectroscopia acústica.....	16
3.4	Evaluación de daño por técnicas de ultrasonidos.....	19
4	Método experimental	21
4.1	Materiales	21
4.1.1	Cemento	21
4.1.2	Arena	22
4.1.3	Sulfato de sodio.....	22
4.1.4	Sulfato de magnesio	22
4.1.5	Agua.....	22
4.2	Dosificación del mortero	23
4.3	Equipos y procedimientos	23
4.3.1	Amasado, elaboración, desmoldado y curado de probetas.....	23
4.3.2	Ensayos mecánicos.....	27

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.3.3	Preparación de soluciones de ataque	29
4.3.4	Medición de expansión	30
4.3.5	Equipo y procedimiento para mediciones por espectroscopia acústica NIRAS..	33
4.3.6	Equipo y procedimiento para mediciones por ultrasonidos	37
5	Resultados Y Discusión	39
5.1	Resistencias Mecánicas	39
5.2	Medidas de expansión (DEMEC)	40
5.3	Ensayo Espectroscopia Acústica (NIRAS)	43
5.3.1	Resultados probetas CEM II/A-L 42,5R.....	43
5.3.2	Resultados probetas CEM I-52,5R	46
5.4	Ensayo mediante técnica de ultrasonidos	50
5.4.1	Velocidad de pulso ultrasónico	50
5.4.2	Atenuación de pulso ultrasónico.....	52
6	Conclusiones.....	53
6.1	Conclusiones.....	53
6.2	Futuras líneas de investigación	55
7	Referencias	56
8	Agradecimientos	59

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Contenido de Ilustraciones

Ilustración 1 Ampliación del espectro en el modo principal de flexión con diferentes energías de impacto	17
Ilustración 2 Acelerograma con respecto al tiempo	18
Ilustración 3 (a) Velocidad de la onda longitudinal (b) atenuación versus frecuencia en mortero.	21
Ilustración 4 Amasadora usada en el ICITECH.....	24
Ilustración 5 Molde para probetas prismáticas 40 x 40 x 160 mm	25
Ilustración 6 Compactadora del molde normalizado	26
Ilustración 7 Prensa electromecánica	28
Ilustración 8 Método de carga de los tres puntos	29
Ilustración 9 Preparación de la disolución con un agitador magnético	29
Ilustración 10 Probeta prismática lista con los DEMEC pegados	30
Ilustración 11 Equipo Demec	31
Ilustración 12 Adhesivo X60 para pegado de galgas extensiométricas	31
Ilustración 13 Calibración de equipo DEMEC.....	32
Ilustración 14 Medición de una cara en una probeta prismática con el equipo DEMEC.....	32
Ilustración 15 Configuración del equipo para END NIRAS	33
Ilustración 16 Esquema del equipo para END NIRAS	34
Ilustración 17 Probeta lista para impacto del martillo.....	35
Ilustración 18 Señal en dominio tiempo	35

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Ilustración 19 Señal en dominio frecuencia (se observa el modo de vibración transversal de una probeta prismática 4x4x16 cm).....	36
Ilustración 20 Ejemplo de tono burst transmitido y recibido [22]	38
Ilustración 21 Grafico de las resistencias a flexión iniciales en serie M4.....	40
Ilustración 22 Grafico de las resistencias a compresión iniciales en serie M4	40
Ilustración 23 Expansiones M1-0,55-52,5, M2-0,55-52,5, y M3-0,55-52,5.....	41
Ilustración 24 Expansiones M1-0,55,42,5, M2-0,55,42,5, y M3-0,55,42,5	41
Ilustración 25 Módulo Elástico Dinámico Probetas M1-42,5-0,55 (agua)	43
Ilustración 26 Módulo Elástico Dinámico Probetas M2-42,5-0,55 (sulfato magnésico)	44
Ilustración 27 Módulo Elástico Probetas M3-42,5-0,55 (sulfato sódico)	44
Ilustración 28 Parámetro histerético M1-42,5-0,55 (agua)	44
Ilustración 29 Parámetro histerético M2-42,5-0,55 (sulfato magnésico)	45
Ilustración 30 Parámetro histerético M3-42,5-0,55 (sulfato sódico).....	45
Ilustración 31 Módulo Elástico Probetas M1-52,5-0,55 (agua).....	47
Ilustración 32 Módulo Elástico Probetas M2-52,5-0,55 (sulfato magnésico)	48
Ilustración 33 Módulo Elástico Probetas M3-52,5-0,55 (sulfato sódico)	48
Ilustración 34 Parámetro histerético M1-52,5-0,55 (agua)	48
Ilustración 35 Parámetro histerético M2-52,5-0,55 (sulfato magnésico)	49
Ilustración 36 Parámetro histerético M3-52,5-0,55 (sulfato sódico).....	49
Ilustración 37 Grafica comparativa de la velocidad del pulso ultrasónico en función del tiempo	51

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Ilustración 38 Atenuación frecuencia 200khz	52
Ilustración 39 Atenuación frecuencia 500kHz.....	52
Ilustración 40 Atenuación frecuencia 700kHz.....	53

Contenido de Tablas

Tabla 1 Porcentajes composición química del Clinker del cemento CEM I-52,5R	22
Tabla 2 Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN	22
Tabla 3 Velocidades de la pala mezcladora.....	24
Tabla 4 Resumen de códigos utilizados en el estudio.....	27
Tabla 5 Agentes agresivos por código utilizado en el estudio	34
Tabla 6 Valores de configuración señal sinusoidal y burst	38
Tabla 7 Media y desviación estándar de los resultados de resistencias mecánicas	39

Contenido de Ecuaciones

Ecuación 1 Etringita primaria	12
Ecuación 2 Transformación de etringita en monosulfoaluminato de calcio	13
Ecuación 3 Primer paso de etringita secundaria.....	13
Ecuación 4 Segundo paso de etringita secundaria.....	13
Ecuación 5 Formula de expansión según ASTM C1012.....	16
Ecuación 6 Módulo elástico	18

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Ecuación 7 Parámetro histerético	19
Ecuación 8 Velocidad de ondas P y su relación con el módulo elástico dinámico.....	20
Ecuación 9 Módulo elástico dinámico.....	20
Ecuación 10 Velocidad de ondas P	20
Ecuación 11 Modulo Elástico Dinámico	36
Ecuación 12 Parámetro histerético	37
Ecuación 13 Atenuación	39

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

NOMENCLATURA QUÍMICA UTILIZADA

Nombre del Compuesto	Formula Química	Nomenclatura
Cal	CaO	C
Sílice	SiO ₂	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	A
Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	F
Agua	H ₂ O	H
Trióxido de Azufre	SO ₃	Ŝ
Oxido de Magnesio	MgO	M
Silicato Tricálcico (alita)	3CaO · SiO ₂	C ₃ S
Silicato Bicálcico (belita)	2CaO · SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO · Al ₂ O ₃	C ₃ A
Silicatos cálcicos hidratados	3CaO · 2 SiO ₂ · XH ₂ O	C-S-H
Hidróxido de calcio (portlandita)	Ca(OH) ₂	CH
Sulfato cálcico dihidratado	CaSO ₄ · 2H ₂ O	CŜH ₂
Sulfato de Sodio	Na ₂ SO ₄	-
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	-
Sulfato de Magnesio 7-hidratado	MgSO ₄ · 7H ₂ O	-

1 Introducción

La vida de las estructuras de hormigón depende de las condiciones ambientales en las que se encuentran y la calidad misma del hormigón. Como resultado del ataque de agentes agresivos tales como los sulfatos, se producen un significativo número de problemas relacionados con el hormigón. En el caso de ataque por sulfatos, la matriz cementante se ve dañada debido a las reacciones expansivas que se producen en el hormigón endurecido por la formación de etringita en la mayoría de los casos del ataque por sulfatos, y en otros casos la formación de yeso que debilita la misma.

En este trabajo se pretende estudiar el ataque externo de sulfatos al hormigón por medio de ensayos no destructivos tales como la espectroscopia acústica, ultrasonidos, y medición de expansiones. De igual manera, se pretende realizar la comparación entre los resultados de las diferentes técnicas y poder observar el efecto de los agentes agresivos en las propiedades del hormigón.

2 Objetivos

- Producir el ataque externo de sulfatos en morteros de cemento Portland para generar su degradación por medio de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y sulfato de magnesio (MgSO_4).
- Evaluar por ensayos no destructivos (espectroscopia acústica, ultrasonidos y expansión) los cambios en la matriz cementante del mortero provocados por el ataque de cada uno de los agresivos en un periodo de tiempo determinado.
- Comparar los resultados obtenidos, en lo que al cambio de la matriz cementante se refiere, entre los distintos tipos de ensayos realizados, y adicionalmente comparar los resultados obtenidos por cada uno de los ataques de los dos agentes agresivos ensayados.

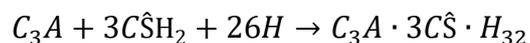
3 Estado del arte

3.1 Ataque por sulfatos

En el caso del hormigón son escasas o nulas las circunstancias bajo las cuales es atacado por agentes químicos sólidos secos, para que se logre un ataque agresivo los agentes químicos deben de estar presentes en soluciones y con una concentración superior a la mínima. Como observación positiva tenemos que el hormigón se comporta satisfactoriamente bajo diferentes condiciones atmosféricas, también con aguas dulces y una gran parte de los suelos frecuentemente encontrados en la naturaleza, aunque existen algunos ambientes químicos que producen un deterioro en el mismo y para los cuales se deben de tomar medidas específicas para evitar o reducir su velocidad de deterioro.[1]

En el ataque de sulfatos se producen dos fenómenos, la formación de etringita que puede generar un aumento de volumen generando expansión en el hormigón, y la formación de yeso que puede generar que el hormigón pierda su consistencia sólida y disminuir su resistencia, ambos casos dañinos para la matriz cementante.

En el hormigón tenemos dos tipos de etringita, la etringita primaria (Ecuación 1) se genera ya que en el proceso de hidratación del cemento: el aluminato tricálcico reacciona con el yeso dando paso a la formación de la misma, y debido que la mezcla se encuentra en estado plástico la etringita se distribuye dentro de la mezcla sin ser un causante de daño. La presencia de sulfatos en el cemento Portland se necesita (en el proceso de molienda durante la fabricación del cemento) como controlador de la velocidad del fraguado del conglomerante.



Ecuación 1 Etringita primaria

Al disminuir la concentración de sulfatos y existir un exceso de aluminato cálcico, estos reaccionan para transformarse en monosulfoaluminato de calcio (Ecuación 2).

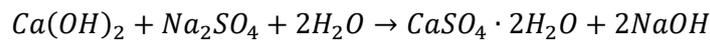
EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND



Ecuación 2 Transformación de etringita en monosulfoaluminato de calcio

En cambio, la etringita secundaria se presenta cuando el hormigón ya no se encuentra en su estado plástico, esto puede suceder cuando el hormigón es sometido a fuentes externas de sulfatos tales como suelos con sales de sulfato o internamente por exceso de sulfatos en los mismos materiales. La formación de esta etringita en estado endurecido conlleva problemas para el hormigón ya que al encontrarse en este estado la expansión de la etringita causa tensión interna provocando fallos en el mismo.[2]

La formación de la etringita secundaria comúnmente se produce en dos pasos, en primer lugar, la formación de yeso secundario por una relación de sustitución entre la portlandita y el sulfato respectivo (Ecuación 3):



Ecuación 3 Primer paso de etringita secundaria

En segundo lugar, la formación de la etringita por la reacción entre el yeso secundario y los aluminatos cálcicos hidratados (Ecuación 4):



Ecuación 4 Segundo paso de etringita secundaria

3.1.1 Ataque externo por sulfatos (AES)

El ataque externo de sulfatos (AES) es el proceso más frecuente o tradicional de ataque al hormigón mediante la interacción química del anión sulfato proveniente de suelos ricos en sulfatos o cualquier fuente externa rica en los mismos; los suelos que contienen sulfatos de sodio, calcio, potasio o magnesio son las principales fuentes de ion sulfato en aguas subterráneas.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

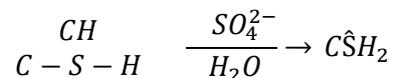
Para que el AES pueda ocurrir deben de producirse tres condiciones simultáneamente:

- Alta permeabilidad del hormigón;
- Ambiente rico en sulfatos;
- Presencia de agua.

En caso de solo ocurrir dos de las condiciones mencionadas el ataque no llega a producirse, sin permeabilidad no puede ingresar el sulfato a la matriz, sin los sulfatos no hay agente de ataque y sin la presencia de agua no hay método de transporte del sulfato del exterior hacia el interior.

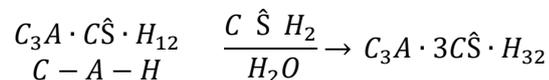
El daño relacionado con el AES se manifiesta de varias formas incluyendo el agrietamiento y el desprendimiento, aunque la manifestación específica del daño relacionado con el AES depende de cuál de los tres procesos químicos siguientes es predominante[2]:

1. El ataque de sulfato sobre el CH y el C-S-H para formar yeso:



Este proceso puede causar expansión y desprendimiento, pero lo más importante es la pérdida de la resistencia y adherencia de la pasta de cemento debido a la descalcificación del C-S-H que es el responsable de la capacidad ligante de la pasta de cemento. Este problema puede suceder con todas las sales de sulfato excepto con el sulfato de calcio o sulfato de magnesio[2].

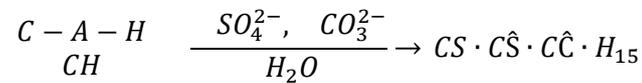
2. El ataque de sulfato sobre los aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H) y el monosulfoaluminato cálcico hidratado (C₃A · C \hat{S} · H₁₂₋₁₈) para formar etringita:



Este proceso es el principal responsable de las fisuras y del desprendimiento como resultado de la expansión producida por la etringita secundaria; este proceso puede ocurrir con todas las sales de sulfatos (incluyendo el sulfato de calcio) excepto con el magnesio[2].

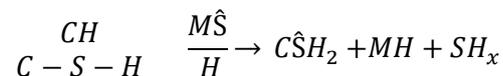
EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

3. El ataque de sulfatos sobre los C-S-H y CH en la presencia del ion carbonato para formar taumasita:



La formación de la taumasita es acompañada por la más severa pérdida de resistencia y adhesión, esta es capaz de transformar el hormigón duro en una masa débil, ya que una parte significativa de C-S-H puede ser destruida; este proceso puede ocurrir con cualquiera de los sulfatos en atmósfera húmeda y bajas temperaturas[2].

4. Ataque de sulfatos sobre el C-S-H por el sulfato de magnesio:



En este tipo de ataque no se produce etringita, aun así, se produce la pérdida de resistencia y adhesión de la pasta de cemento debido a la descalcificación del C-S-H y formación de sulfato cálcico hidratado. Debido a la alta insolubilidad del hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$, se produce el sellado inicial de los poros de la matriz cementante, lo cual puede retrasar la velocidad inicial de expansión y de pérdida de resistencia[2].

3.2 Evaluación de daño por técnicas de expansión

Se ha podido observar que la expansión del hormigón está relacionada de manera significativa con la concentración de la solución agresiva y la relación agua-cemento.

Concentraciones más altas producen una mayor expansión y, además, la relación de agua-cemento más alta resulta en una menor densidad del hormigón, y por ende mayor porosidad conectada, que también conlleva en una velocidad más alta del proceso.[3]

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Al utilizar el procedimiento según la norma ASTM C1012 existe una tendencia de la desviación estándar al realizar mediciones por un solo operador [4]:

1. En cementos mixtos si la expansión por sulfatos se encuentra entre 0,04% a 0,07% la desviación estándar es del 0,010%.
2. En cementos tipo-II si la expansión por sulfatos se encuentra entre 0,04% a 0,07% la desviación estándar es del 0,005%.
3. En cementos tipo-V si la expansión por sulfatos fue de 0,04% a 0,07% la desviación estándar es del 0,003%.

Para el cálculo del cambio de longitud a cualquier edad se realiza siguiendo la siguiente ecuación (Ecuación 5):

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100$$

Ecuación 5 Formula de expansión según ASTM C1012

Donde:

- ΔL es el cambio de longitud a una edad específica en %,
- L_x es la lectura del espécimen a una edad específica x ,
- L_i es la lectura inicial del espécimen,
- L_g es la longitud nominal.

3.3 Evaluación de daño por técnicas de espectroscopia acústica

La espectroscopia acústica es un ensayo no destructivo (END), en el que un material, en este caso las probetas de pasta, mortero, u hormigón de cemento Portland, se someten a un impacto, empiezan a vibrar con unos modos de vibración y unas frecuencias que dependerán fundamentalmente de la geometría del elemento ensayado, de las propiedades intrínsecas del material y de las condiciones de contorno

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

La espectroscopia acústica de resonancia no lineal o medición NIRAS (nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy) permite el control de una serie de frecuencias de resonancia y el cambio de estos valores de frecuencia con el aumento de energía del impacto.[5]–[7]

La principal ventaja de obtener las frecuencias de resonancia por un impacto de martillo es que excita varios modos de vibración simultáneamente ya que el impacto tiene una amplia gama de frecuencias. En la Ilustración 1 se puede observar diferentes niveles de energía de impacto en ensayo NIRAS para el modo principal de flexión[8].

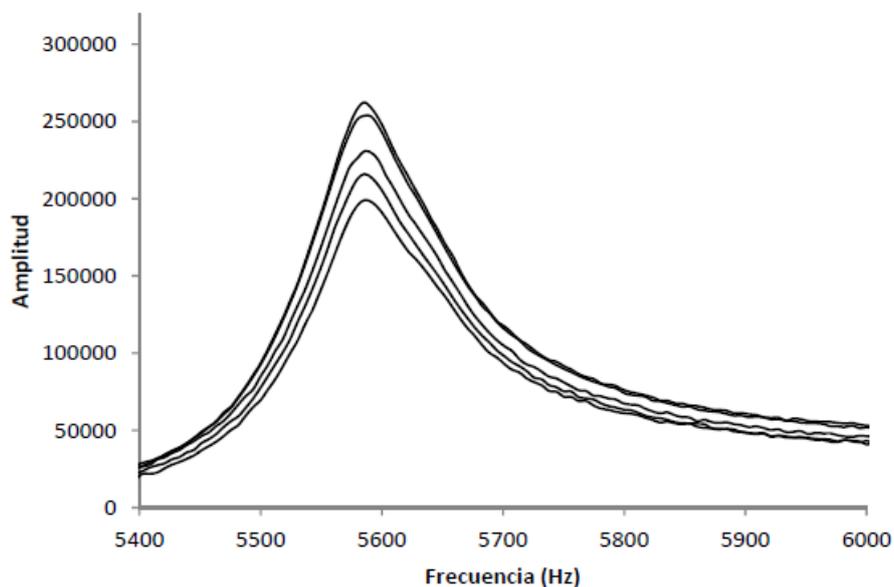


Ilustración 1 Ampliación del espectro en el modo principal de flexión con diferentes energías de impacto

Ahora, cuando más dañado se encuentra un material tenemos más imperfecciones en la estructura tales como el aumento en número y tamaño de fisuras además de que el material se disgrega debido a la falta de adhesión de la pasta; debido a que el hormigón es un material heterogéneo manifiesta su comportamiento elástico con presencia de perturbaciones de primer y segundo orden. Esta no linealidad histerética se asocia a la separación interfacial entre los diferentes constituyentes y cambia con el progreso del daño. El módulo elástico E de un material con efectos histeréticos no lineales por este método puede ser asumido por la siguiente ecuación (Ecuación 6) [7][9] .

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

$$E = E_0 * [1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \alpha(\Delta \varepsilon + \varepsilon * \text{Signo}(\dot{\varepsilon}))]$$

Ecuación 6 Módulo elástico

Donde:

- E_0 es el modulo elástico lineal.
- β y δ son los coeficientes que representan las anarmonicidades cúbicas y cuadráticas.
- $\Delta \varepsilon$ es la amplitud de la deformación
- ε es la deformación, $\dot{\varepsilon}$ es el diferencial de deformación con el tiempo $d\varepsilon/dt$
- α es la medida de la histéresis
- Signo es la función que dependiendo de $\dot{\varepsilon}$ le da el signo, de manera que si $\dot{\varepsilon} > 0$ vale 1 y si $\dot{\varepsilon} < 0$ vale -1 y si $\dot{\varepsilon} = 0$ vale 0.

Una de las consecuencias de la propiedad no lineal histerética de estos materiales es la disminución de las frecuencias de resonancia con mayor amplitud de excitación. Este cambio en la frecuencia de resonancia puede utilizarse para caracterizar directamente el estado de daño del material. En la ilustración 2 podemos ver un ejemplo de atenuación de la señal en función del tiempo en un acelerograma[7].

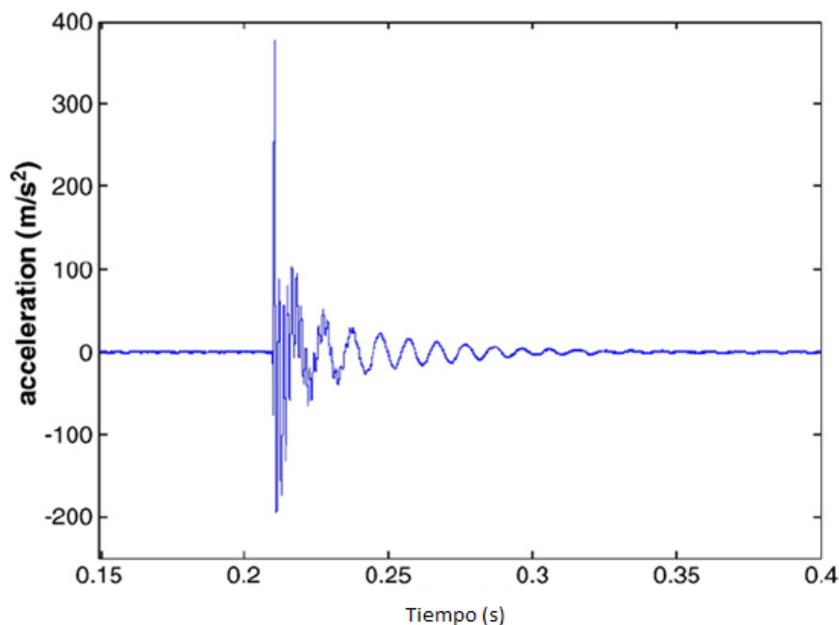


Ilustración 2 Acelerograma con respecto al tiempo

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

El parámetro histerético α es una medida de las histéresis del material y está relacionada con la frecuencia de vibración, esto se ve reflejado en la siguiente ecuación (Ecuación 7):

$$\frac{f_0 - f}{f_0} \propto \alpha \cdot \Delta \varepsilon$$

Ecuación 7 Parámetro histerético

Donde:

- f_0 es la frecuencia de vibración
- f es la frecuencia de vibración con impacto de elevada energía
- $\Delta \varepsilon$ es la variación relativa de la amplitud de la deformación.

En conclusión, la técnica NIRAS es un ensayo no destructivo eficaz para detectar y evaluar los cambios micro estructurales en morteros y estructuras de hormigón[7], [10], [11],[12].

3.4 Evaluación de daño por técnicas de ultrasonidos

Los ensayos que tienen como herramienta el uso de ultrasonidos son muy variados, tenemos desde la medición de la velocidad del pulso ultrasónico hasta los basados en la reflexión de las ondas. Es una herramienta de evaluación no destructiva que mide la atenuación en materiales fuertemente heterogéneos tales como los cementicios; se dispone de un transmisor de ondas mecánicas cuya frecuencia sea del tipo ultrasónico, las ondas emitidas por el transductor se propagan a través del sólido de diferentes maneras y son recogidas en un receptor ultrasónico a partir del cual se traduce la información.[13]

La velocidad de las ondas ultrasónicas P en un medio depende de las constantes elásticas de dicho medio, es decir del módulo elástico, de la densidad (ρ) y del coeficiente de Poisson dinámico (ν), de acuerdo con la ecuación (Ecuación 8):[14], [15]

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

$$V_p^2 = \frac{E_d(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

Ecuación 8 Velocidad de ondas P y su relación con el módulo elástico dinámico.

A partir de la velocidad de las ondas P, se puede calcular el módulo elástico dinámico con la siguiente ecuación (Ecuación 9):

$$E_d = V_p^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Ecuación 9 Módulo elástico dinámico

Ahora, la velocidad de las ondas ultrasónicas P se puede calcular simplemente dividiendo la longitud recorrida por el tiempo de vuelo que transcurre desde que se emite la onda en un punto hasta que la onda llega al receptor, utilizando la siguiente ecuación (Ecuación 10) :[14]

$$V_p = \frac{L}{\tau}$$

Ecuación 10 Velocidad de ondas P

Además tenemos los factores que influyen en las medidas de velocidad del impulso, tales como:[14]

- El tipo de hormigón
- Contenido de humedad
- Temperatura del hormigón
- Longitud de trayectoria
- Forma y tamaño de la muestra de ensayo
- Grietas

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

En la ilustración 3 se puede observar una muestra de la velocidad de onda experimental y teórica además de la atenuación para una muestra.[16]

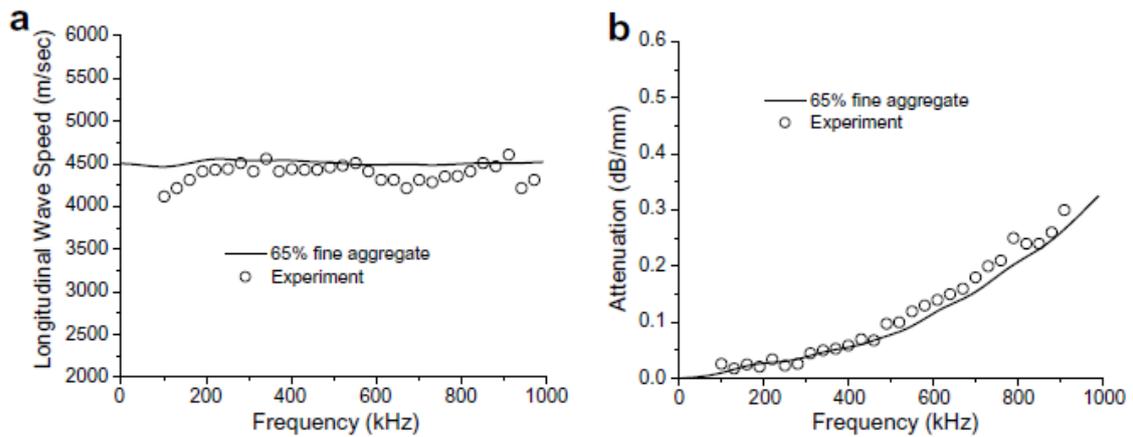


Ilustración 3 (a) Velocidad de la onda longitudinal (b) atenuación versus frecuencia en mortero.

En estudios sobre el uso de ultrasonidos como técnica no destructiva se han observado varias tendencias, tales como el cambio de atenuación y la velocidad de pulso debido al crecimiento de las micro fisuras[17], además que el aumento de la frecuencia de resonancia de los transductores aumenta la sensibilidad al crecimiento de las grietas, y en tercer lugar que la amplitud fundamental disminuye cuando el daño aumenta.[18]–[20]

4 Método experimental

4.1 Materiales

4.1.1 Cemento

Para este experimento se utilizó dos tipos de cementos, un cemento tipo CEM I-52,5R y un segundo con adición de caliza CEM II/A-L 42,5R ambos de la empresa CEMENTVAL. En el caso del cemento CEM I-52,5R la composición química de su clinker se presenta en la tabla 1; el segundo cemento es un CEM II/A-L 42,5R y su composición química es la misma de la tabla 1 para el 82,7% de clinker y el resto es 17,3% de caliza.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Tabla 1 Porcentajes composición química del Clinker del cemento CEM I-52,5R

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	P. Fuego	CaO lib
20 - 22	4,5 – 5,5	2,5 – 3,5	61 - 67	0,5 – 1,5	1 - 2	0,2 – 0,5	0,5 – 1,5

4.1.2 Arena

Para la elaboración de los morteros se usó arena normalizada CEN, según las indicaciones del apartado 5 de la norma UNE-EN-196 2005, esta debe cumplir con la distribución granulométrica especificada en la tabla 2, y el contenido de humedad debe de ser inferior al 0,2%. [21]

Tabla 2 Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN

Dimensiones malla cuadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Residuo acumulado sobre tamices (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

4.1.3 Sulfato de sodio

Para crear la disolución de sulfato de sodio se utilizó sulfato de sodio anhidro puro (Na₂SO₄), de la marca Panreac.

4.1.4 Sulfato de magnesio

Para crear la disolución de sulfato de magnesio se utilizó sulfato de magnesio 7-hidratado (MgSO₄·7H₂O) de la marca Panreac.

4.1.5 Agua

Ya que no es un ensayo de validación se utilizó agua potable como dice la norma UNE-EN-196 2005. [21]

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.2 Dosificación del mortero

La composición del mortero utilizada fue 450 ± 2 gr de cemento, 1.350 ± 5 gr de arena, y $247,5 \pm 1$ gr de agua[21], para obtener una relación agua-cemento de 0,55, se elaboraron ocho amasadas de las cuales cuatro fueron con cemento CEM I-52,5R y las restantes con CEM II/A-L 42,5R ambas con una relación agua-cemento de 0,55.

4.3 Equipos y procedimientos

4.3.1 Amasado, elaboración, desmoldado y curado de probetas.

4.3.1.1 *Proceso de amasado de probetas*

Se usó una amasadora (Ilustración 4) que se encuentra en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) la cual cumple con las características requeridas en la norma UNE-EN-196-1 para la elaboración de morteros, la amasadora debe constar esencialmente de:

- Un recipiente de acero inoxidable de una capacidad aproximada de cinco litros, con la forma típica y dimensiones especificado en la norma y equipado de manera que pueda ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, pueda ajustarse y mantenerse con precisión.
- Una pala de acero inoxidable, de forma típica, medidas y tolerancias como las indicadas en la norma, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas, con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente. Los dos sentidos de rotación deben ser opuestos, y la relación entre las dos velocidades no debe ser un número entero.

Palas y recipientes deben formar un juego que siempre debe utilizarse conjuntamente, la holgura entre pala y recipiente debe comprobarse regularmente.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

La holgura de (3 ± 1) mm se refiere a la situación cuando la pala, en el recipiente vacío, se coloca tan próxima como sea posible a la pared. Cuando la medida directa es difícil, son útiles los medidores sencillos de tolerancias ("galgas de precisión").



Ilustración 4 Amasadora usada en el ICITECH

La amasadora debe de trabajar a las velocidades dadas en la tabla 3 cuando se amase el mortero.

Tabla 3 Velocidades de la pala mezcladora

	Rotación min^{-1}	Movimiento planetario min^{-1}
Velocidad lenta	140 ± 5	62 ± 5
Velocidad rápida	285 ± 10	125 ± 10

Se pesó el cemento y el agua con una balanza para luego proceder con mezcla, los tiempos de las diferentes etapas de amasado se refieren a los tiempos de marcha y paro de la amasadora y deben de mantenerse dentro de los ± 2 segundos.

El procedimiento de amasado debe ser el siguiente:

- Se vierte el agua y el cemento dentro del recipiente, teniendo cuidado para evitar pérdidas de agua o de cemento;

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

- Inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el cemento, se pone en marcha la amasadora a velocidad lenta, iniciándose los tiempos de amasado. Adicionalmente se registra el tiempo, al minuto más cercano, como “tiempo cero”.
- Después de 30 s de amasado, se añade regularmente la arena durante los 30 s siguientes. Se pone la amasadora a la velocidad rápida y se continua el amasado durante otros 30 s;
- Se para la amasadora durante 90 s. En los primeros 30 s, se retira por medio de una espátula de goma o de plástico todo el mortero adherido a las paredes laterales y al fondo del recipiente y se coloca en el centro de la amasadora;
- Se continua el amasado a velocidad rápida durante 60 s.

4.3.1.2 *Proceso de elaboración de probetas*

Tamaño de las probetas: Se utilizaron probetas prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm como dice la norma UNE-EN-196-1 en el apartado 4.5 [21], el molde utilizado se muestra en la ilustración 5 que se dispone en el ICITECH.



Ilustración 5 Molde para probetas prismáticas 40 x 40 x 160 mm

Compactadora: La compactadora a utilizar en el siguiente proceso es la que se muestra en la ilustración 6, este se encuentra de igual manera en el ICITECH y cumple con la norma UNE-EN-196-1.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND



Ilustración 6 Compactadora del molde normalizado

Enmoldado de las probetas: Se procede inmediatamente después de la preparación del mortero, con el molde y la tolva firmemente unidos a la mesa de la compactadora, se introduce directamente de la cubeta de la amasadora, en una o varias veces, con una cuchara adecuada, la primera de las dos capas de mortero (cada una aproximadamente de 300 g) en cada compartimento del molde.

Se extiende la capa uniformemente, utilizando la espátula grande, mantenida verticalmente y con sus ensanchamientos en contacto con el borde superior de la tolva, pasándola a lo largo de cada compartimento del molde, hacia delante y hacia atrás. A continuación, se compacta la primera capa de mortero con 60 golpes con la compactadora. Se introduce la segunda capa de mortero, asegurándose de que hay excedente de mortero, se iguala con la espátula pequeña, y se compacta la capa con otros 60 golpes.

Se retiró con precaución el molde de la mesa de sacudidas y se separa la tolva. Inmediatamente, se quita el exceso de mortero con la regla plana, manteniéndola casi vertical pero inclinada en la dirección del movimiento, con lentos movimientos transversales de sierra, una vez en cada dirección. Se repite este procedimiento con la regla plana mantenida a un ángulo más agudo para alisar la superficie[21].

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Para finalizar se retiró el mortero que queda en el perímetro del molde como consecuencia del enrasado y luego se identificó cada amasada en este con el código que se especifica en la tabla 4.

Tabla 4 Resumen de códigos utilizados en el estudio

Código	Tipo de cemento
M1-52,5-0,55	CEM I-52,5R
M2-52,5-0,55	CEM I-52,5R
M3-52,5-0,55	CEM I-52,5R
M4-52,5-0,55	CEM I-52,5R
M1-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5R
M2-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5R
M3-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5R
M4-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5R

4.3.1.3 Curado y desmoldado de las probetas

Para el curado inmediatamente se introdujeron los moldes en la cámara húmeda del ICITECH la cual se encuentra permanentemente a 20 °C y 100% de humedad, se colocó sobre el molde una lámina de vidrio de aproximadamente 210 mm x 185 mm x 6 mm de espesor, como dice la norma en la cámara el aire húmedo tiene acceso a todos los lados del molde.

Para desmoldar como dice la norma, se tomó en cuenta que para ensayos a edades superiores a 24hrs el desmoldado se realizara a 24hrs después del enmoldado, se identificaron debidamente con la numeración escogida y se procedió a sumergirlas de manera horizontal en agua con cal para seguir con el curado.

4.3.2 Ensayos mecánicos

Para tener datos iniciales de las resistencias a compresión de las probetas antes del ataque de sulfatos y su posterior comparación, se destinó la amasada con código M4 para el ensayo de flexión y compresión.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.3.2.1 *Equipo de ensayos mecánicos a compresión y flexión*

El equipo utilizado fue una prensa electromecánica (Ilustración 7) ubicada en el edificio del Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, con un sistema de captación de datos incorporado que da la fuerza aplicada a la probeta para su posterior cálculo.



Ilustración 7 Prensa electromecánica

4.3.2.2 *Procedimiento para la realización de ensayo mecánico*

Para resistencia a flexión se utilizó el método de carga de los tres puntos como se muestra en la ilustración 8, se colocó el prisma en la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos de soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes, se aplicó la carga verticalmente mediante los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se incrementó uniformemente; para el ensayo de resistencia a compresión se ensayaron los semi-prismas rotos del ensayo a flexión.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND



Ilustración 8 Método de carga de los tres puntos

4.3.3 Preparación de soluciones de ataque

Para preparar el ataque externo se tomó la decisión de utilizar como agentes agresivos el sulfato de sodio (Na) y el de magnesio (Mg), en el caso del magnesio la disolución se preparó a un 5% de concentración en peso y el sodio a un 10%; en la Ilustración 9 se puede ver parte del proceso de agitación cuando se preparaba la disolución.



Ilustración 9 Preparación de la disolución con un agitador magnético

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.3.4 Medición de expansión

La expansión se ensayó en las amasadas M1, M2, y M3 de CEM I-52,5R y CEM II/A-L 42,5R, en total seis amasadas; en un inicio se realizaron lecturas con un intervalo de tres días y cuando ocurrió la primera estabilización se cambió a lecturas a intervalos de siete días.

4.3.4.1 Equipo para medición de expansiones

Los discos de extensometría mecánica (DEMEC): en primer lugar, fueron pegados en dos caras adyacentes de la superficie de las probetas prismáticas a una distancia aproximada de 100mm debido que es la medida base que utiliza el equipo DEMEC, este procedimiento finalizado se puede observar en la ilustración 10.



Ilustración 10 Probeta prismática lista con los DEMEC pegados

Equipo DEMEC (Mechanical Strain Gauge): Es el equipo que se utilizó para medir las expansiones respectivas a la expansión en cada una de las caras de las probetas prismáticas, el equipo utilizado es el modelo ID-C112MB de la marca Mitutoyo Corporation y posee una precisión de una micra, lo podemos ver en la ilustración 11.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND



Ilustración 11 Equipo Demec

4.3.4.2 Proceso de medición de las expansiones

En primer lugar, el pegado de los DEMEC en todas las probetas de las seis series que se iban a someter al ataque, tanto las M1 de control en agua, y luego en las M2 y M3 para control del Magnesio y Sodio respectivamente; para poder generar una superficie en la cual los DEMEC adquirieran el agarre para poder soportar el tiempo de ataque en las disoluciones estas zonas se prepararon por lijado y se secaron para evitar que la humedad afectara al adhesivo X60. Dicho adhesivo se encuentra formado de dos componentes de la marca HBM (Ilustración 12) y se utiliza habitualmente para el pegado de las galgas extensiométricas. Una vez colocados los DEMEC se dejaron las probetas 24 horas a temperatura ambiente para asegurar una perfecta fijación de los mismos a la superficie de las probetas.



Ilustración 12 Adhesivo X60 para pegado de galgas extensiométricas

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Medición de las expansiones: Cada vez que se llevó a cabo el control de las expansiones con el equipo se realizó de la siguiente forma:

- Calibrar el equipo cada inicio de una jornada de mediciones (ilustración 13);
- Medición de la distancia entre los DEMEC en cada una de las caras de las probetas prismáticas (ilustración 14);
- Registro de los datos para su posterior análisis.



Ilustración 13 Calibración de equipo DEMEC



Ilustración 14 Medición de una cara en una probeta prismática con el equipo DEMEC

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.3.5 Equipo y procedimiento para mediciones por espectroscopia acústica NIRAS

4.3.5.1 Equipo

En la ilustración 15 se muestra la configuración del equipo utilizado para el ensayo NIRAS, los componentes son:

- Elemento para generar el impacto: En el ensayo NIRAS se utilizó un martillo fijado en un soporte con un pivote que le permite girar para generar el impacto desde distintas alturas para generar distintas fuerzas de impacto;
- Captador acelerómetro piezométrico: sirve para captar la aceleración que experimenta la probeta cuando se provoca el impacto del martillo.
- Amplificador de señal: se encarga de proporcionar la tensión de polarización necesaria para el acelerómetro, así como acondicionar y amplificar la señal captada para que sea adquirida y digitalizada por el equipo receptor.
- Equipo receptor y de tratamiento de la señal: El equipo receptor es un osciloscopio de marca Tektronix modelo MDO2014 junto con el computador donde se trató la señal por medio del programa NIRAS desarrollado dentro del proyecto coordinado ONDATEST (BIA 2014-55311-C2-1-P y 2014-55311-C2-2-P).

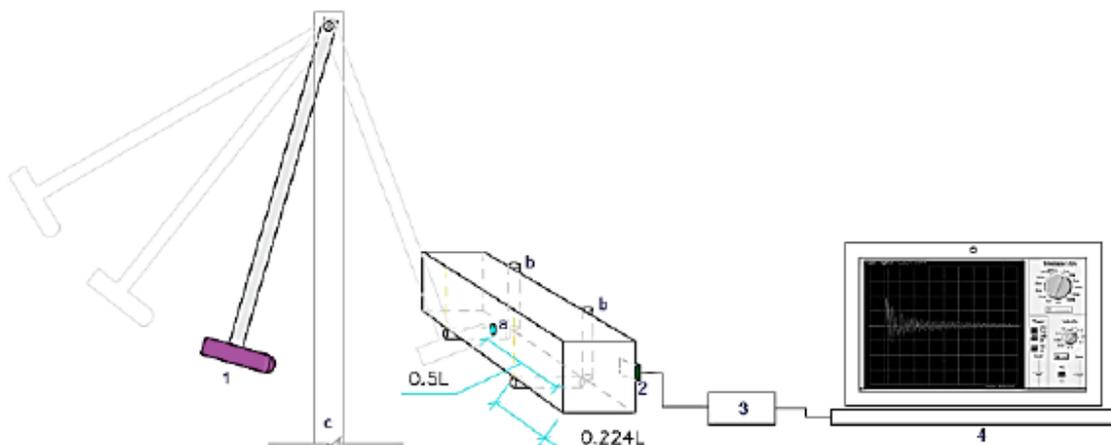


Ilustración 15 Configuración del equipo para END NIRAS

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.3.5.2 Procedimiento del END NIRAS

Se evaluó un total de 18 probetas ya que cada amasada consta de 3 probetas, la explicación de los códigos se encuentra en la tabla 5. Una vez listo todo el sistema de adquisición se preparó la probeta pegando en una esquina determinada cinta doble cara para poder adherir el acelerómetro, además siempre se mantuvo la misma posición para todas las lecturas.

Tabla 5 Agentes agresivos por código utilizado en el estudio

Código	Tipo de cemento	Agente Agresivo	Porcentaje	Cantidad de Probetas
M1-52,5-0,55	CEM I-52,5R	H ₂ O	-	3
M2-52,5-0,55	CEM I-52,5R	MgSO ₄	5%	3
M3-52,5-0,55	CEM I-52,5R	Na ₂ SO ₄	10%	3
M1-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5 R	H ₂ O	-	3
M2-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5 R	MgSO ₄	5%	3
M3-42,5-0,55	CEM II/A-L 42,5 R	Na ₂ SO ₄	10%	3
			TOTAL	18

La probeta prismática se colocó en posición siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 215 (Ilustración 16 y 17) [12], para activar el módulo de vibración fundamental transversal.

La probeta se colocó en un soporte diseñado específicamente para este ensayo dentro del proyecto ONDATEST.

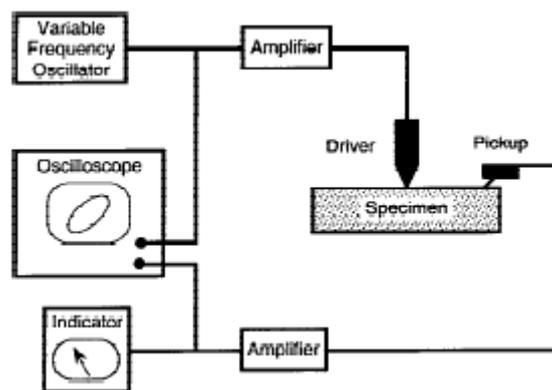


Ilustración 16 Esquema del equipo para END NIRAS

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

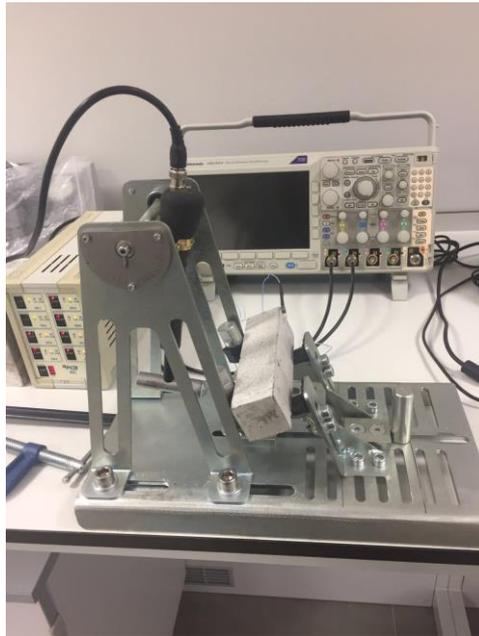


Ilustración 17 Probeta lista para impacto del martillo

Se buscó el modo de vibración fundamental a flexión porque es el más sensible para detectar los daños causados por los agentes agresivos en las probetas prismáticas. La finalidad del método es determinar el parámetro histerético el cual mide el cambio de frecuencia a diferentes energías, debido a esto se impactó la probeta prismática diez veces a diferentes alturas para provocar este cambio de energía, dando como resultado en cada uno de los golpes la ilustración 18 y 19 como ejemplo de lectura.

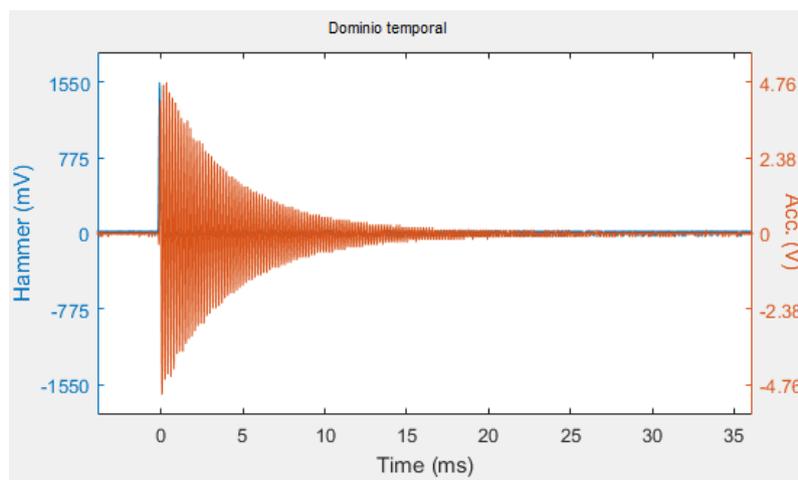


Ilustración 18 Señal en dominio tiempo

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

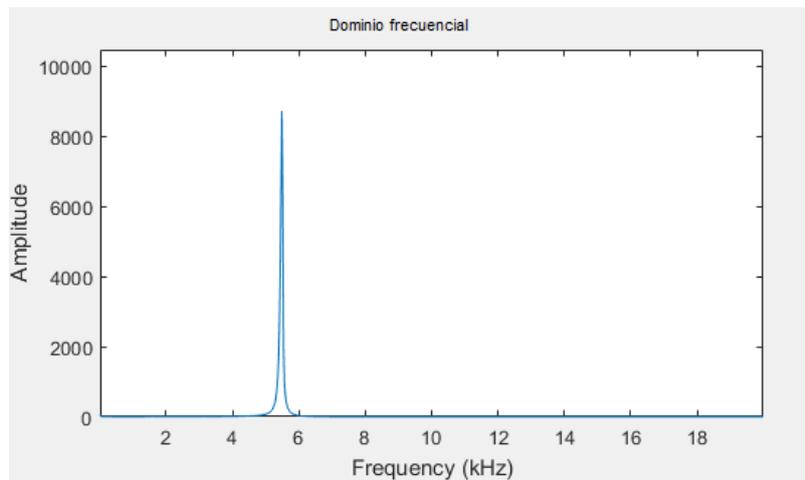


Ilustración 19 Señal en dominio frecuencia (se observa el modo de vibración transversal de una probeta prismática 4x4x16 cm)

4.3.5.3 Cálculo utilizado en el END NIRAS

Una vez obtenida la frecuencia fundamental transversal de la probeta prismática se realizó el cálculo del módulo elástico dinámico en base a la norma ASTM C215 [12] utilizando la ecuación 11:

$$E = CMn^2$$

Ecuación 11 Modulo Elástico Dinámico

Donde:

- M = la masa de la probeta, kg
- n = la frecuencia transversal fundamental, Hz
- C = es $0.9464 \left(\frac{L^3 T}{bt^3}\right)$ para un prisma
- L = es la longitud de la probeta
- t, b = son las dimensiones de la sección de la probeta
- T = es el factor de corrección que depende del radio de giro.

Además, para el cálculo del parámetro histerético se utilizó la ecuación 12 ya que se realizó el registro del espectro de vibración a través de un acelerómetro.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

$$\alpha' = \frac{\Delta f}{\frac{f_o}{\Delta A}}$$

Ecuación 12 Parámetro histerético

Donde:

- $\Delta f = f_o - f$ es la diferencia de frecuencias para un modo de vibración entre el ensayo de baja energía y otro de alta energía,
- f_o es la frecuencia de un ensayo de baja energía,
- $\Delta A = \frac{A-A_o}{A_o}$ es la diferencia de la intensidad de señal entre los impactos de mayor y de menor energía dividido entre la intensidad del impacto de menor energía.

4.3.6 Equipo y procedimiento para mediciones por ultrasonidos

Se evaluó un total de 18 probetas como se explicó para la medición del END NIRAS, la edad de adquisición es la misma que la utilizada en la técnica NIRAS ya que se obtuvieron los datos el mismo día, la explicación de los códigos se encuentra en la tabla 4.

4.3.6.1 Equipo de ultrasonidos

Para la transmisión y recepción se usaron dos transductores de tipo K1S-C de banda ancha, la recepción de la señal ultrasónica y amplificada fue capturada por un osciloscopio Handyscope HS3 de la marca TiePie con una frecuencia de muestreo de 25 MHz.

La señal fue registrada por un ordenador portátil con un software de control de equipamiento desarrollado en base Matlab por el equipo conjunto de ICITECH (Grupo de Investigación en Química de los Materiales, GIQUIMA) y de iTeam (Grupo de Tratamiento de Señal, GTS) (proyecto ONDATEST) el cual genera, adquiere y almacena las señales.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

4.3.6.2 Procedimiento del END por ultrasonido

De igual manera que en el END NIRAS las mediciones se realizaron en todos los juegos de probetas M1, M2 y M3, las probetas prismáticas se colocaron con los transductores de frente en el sentido longitudinal de las mismas; se utilizaron dos tipos de ondas en este estudio, sinusoidal y burst; en la tabla 6 se muestran los valores con que se configuró el programa para emitir los dos tipos de señales.

Tabla 6 Valores de configuración señal sinusoidal y burst

Parámetro	Valor
Amplitud de la señal (Vp)	1
Frecuencia	100-1000 kHz, incremento de 5 kHz
Tiempo entre frecuencias	1 seg.
Numero de ciclos	5

La señal registrada por el ordenador es procesada para posteriormente realizar los cálculos, para este estudio se tomará en cuenta la velocidad de pulso ultrasónico y la atenuación, en la ilustración 20 se muestra un ejemplo de una señal tipo burst.

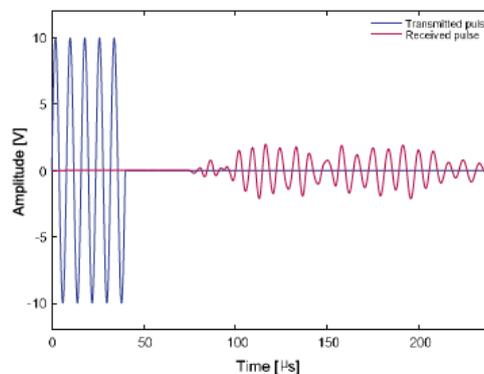


Ilustración 20 Ejemplo de tono burst transmitido y recibido [22]

La velocidad de pulso ultrasónico se calculó tomando en cuenta la longitud de la probeta prismática y el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la onda (Ecuación 13).

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

La atenuación (α_{mat}) se calculó como la diferencia entre la energía emitida y la energía recibida dividida por la longitud de la probeta (Ecuación 12), además el valor $\alpha_{equ}(f_o)$ es un valor de calibración de la atenuación generada por el equipo.

$$\alpha_{mat}(f_o) = \frac{E_{tx}(f_o) - E_{rx}(f_o) - \alpha_{equ}(f_o)}{L}$$

Ecuación 13 Atenuación

Donde:

- $E_{tx}(f_o)$ es la energía emitida
- $E_{rx}(f_o)$ es la energía recibida
- $\alpha_{equ}(f_o)$ es la atenuación generada por el equipo
- L es la longitud de la probeta

5 Resultados Y Discusión

5.1 Resistencias Mecánicas

Para el estudio sólo se han obtenido las resistencias mecánicas de las series M4 de ambos tipos de cemento; en la ilustración 21 se pueden ver los resultados de las pruebas de resistencias a flexión, y en la ilustración 22 los resultados de las resistencias a compresión, además en la tabla 7 se muestran las medias con las desviaciones estándar (SD) de los resultados.

Tabla 7 Media y desviación estándar de los resultados de resistencias mecánicas

		Resistencia a Flexión	Resistencia a Compresión
CEM I-52,5R	Media	10,30 MPa	60,50 MPa
CEM I-52,5R	SD	0,86 MPa	3,38 MPa
CEM II/A-L 42,5R	Media	7,71 MPa	43,47 MPa
CEM II/A-L 42,5R	SD	0,28 MPa	1,05 MPa

De esto se puede decir que la preparación de las probetas fue correcta, las probetas de resistencia teórica 52,5 MPa en la práctica dieron una media de 60,50 MPa y las probetas de resistencia teórica 42,5 MPa dieron una media de 43,7 MPa; las medias de flexión dieron 10,30 MPa para las probetas de 52,5 y 7,71 MPa para las probetas de 42,5.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

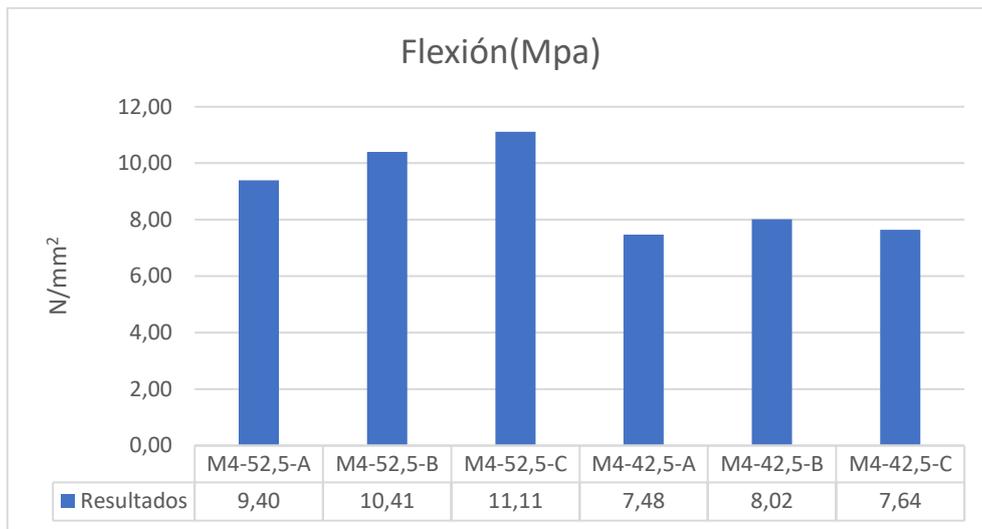


Ilustración 21 Grafico de las resistencias a flexión iniciales en serie M4

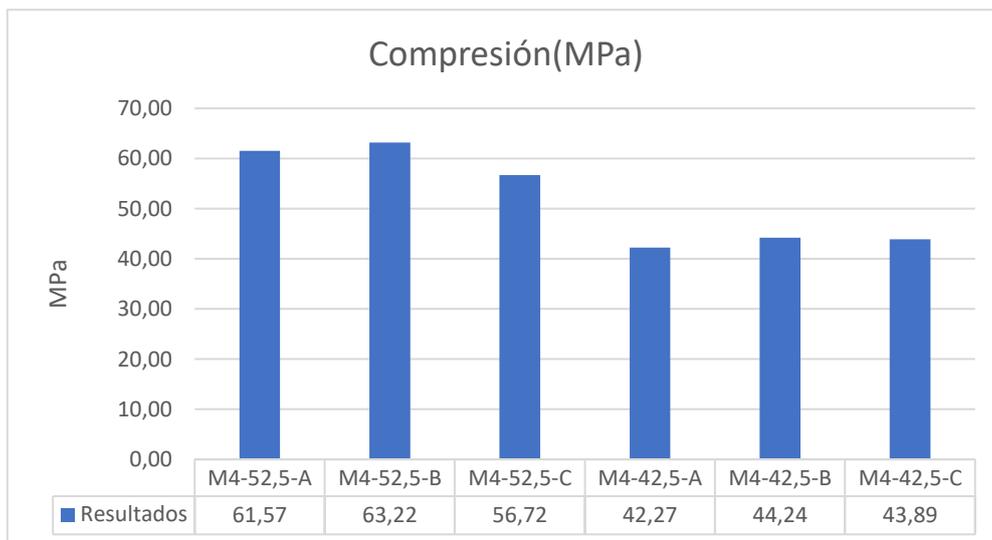


Ilustración 22 Grafico de las resistencias a compresión iniciales en serie M4

5.2 Medidas de expansión (DEMEC)

Los cálculos de las expansiones se realizaron siguiendo el método de la norma ASTM C1012 la cual da la Ecuación 5 para el cálculo del cambio de longitud[4], los resultados de las probetas M1, M2, y M3 hasta 100 días de se muestran en las ilustraciones 23 y 24.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

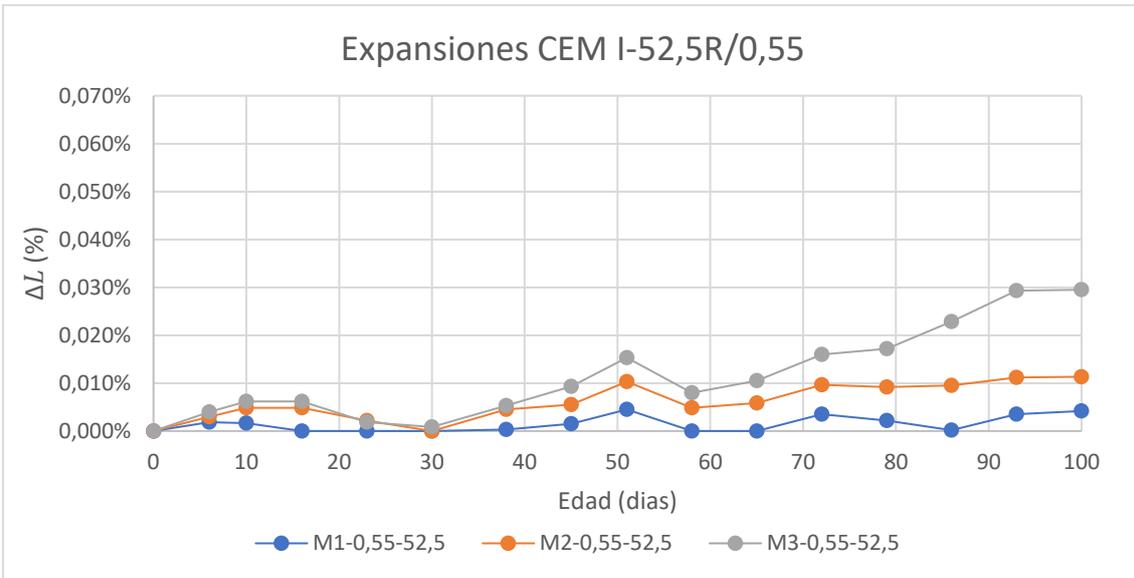


Ilustración 23 Expansiones M1-0,55-52,5, M2-0,55-52,5, y M3-0,55-52,5

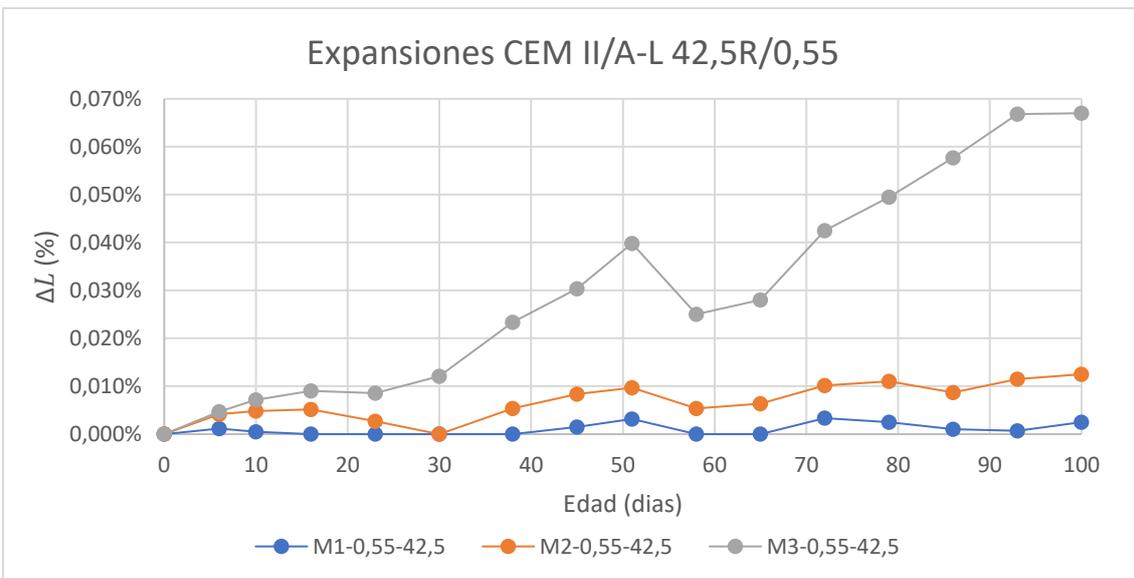


Ilustración 24 Expansiones M1-0,55,42,5, M2-0,55,42,5, y M3-0,55,42,5

De estos resultados se puede expresar que:

- Se tomó como base de expansión los ocho días ya que de cero a ocho días se pudo observar que se produjo una ligera expansión debido a la saturación de la probeta.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

- Se observó en el caso del ataque del sulfato de sodio como agente agresivo que existe una expansión en la mezcla de CEM II/42,5R que inicia a los 23 días de ataque y en el caso del CEM I-52,5R se inició a los 30 días aproximadamente.
- En cambio, en el ataque de sulfato de magnesio como agente agresivo se observó que hubo poca expansión. Es evidente que se requiere el seguimiento a edades superiores. Los bajos valores de expansión en el periodo estudiado pueden ser debidos a la formación de brucita, que rellena los poros y que impide inicialmente la difusión de los aniones sulfato.
- Como se esperaba las probetas sometidas solamente al agua, a los ocho días se detuvo la expansión por saturación y al cabo de los 100 días se comporta de igual manera.
- Las probetas sometidas al ataque del sulfato de sodio como agente agresivo a los 100 días presentaron los valores de 0,0295% para el CEM I-52,5R y de 0,067% para el CEM II/A-L 42,5R. A pesar de que se trata del mismo tipo de clinker y que en el cemento de tipo II la cantidad de clinker es menor, es muy posible que la menor resistencia mecánica de los morteros con cemento de tipo II permita una expansión más fácil y a edades más tempranas. Por otra parte, los morteros con cemento de tipo I tendrán una porosidad menor dado que tienen mayor cantidad de productos de reacción, lo cual dificulta la difusión de los sulfatos.
- Las probetas sometidas al ataque del sulfato de magnesio como agente agresivo a los 100 días presentaron los valores de 0,0113% para el CEM I-52,5R y de 0,0125% para el cemento CEM II/A-L 42,5R.
- De igual manera las probetas de control sometidas solamente al agua a los 100 días presentaron los valores de 0,0042% para el CEM I-52,5R y de 0,0025% para la mezcla del cemento CEM II/42,5R.
- Las variaciones que se pueden lograr observar en las gráficas relativos a ciertas caídas en los valores de expansión se deben al cambio de temperaturas a lo largo del tiempo de duración del experimento. A pesar de haber intentado realizar las medidas a temperatura constante, se han producido bajadas de temperatura en la sala de medidas que pueden dar lugar a valores más bajos.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

5.3 Ensayo Espectroscopia Acústica (NIRAS)

5.3.1 Resultados probetas CEM II/A-L 42,5R

Una vez obtenidas las frecuencias de los ensayos por medio de la ecuación 11 se procedió a calcular el módulo elástico dinámico y el parámetro histerético. En la ilustración 25 se muestra el resultado de la variación del módulo elástico dinámico de las probetas de control sumergidas en agua.

En la ilustración 26 se muestra el avance de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de magnesio, y por último en la ilustración 27 se muestra el avance de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de sodio.

Para el cálculo del parámetro histerético se utilizó la ecuación 12. En la ilustración 28 se puede observar el cambio del parámetro histerético en las probetas de las probetas de control sumergidas en agua, en la ilustración 29 se muestra el cambio de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de magnesio, y por último en la ilustración 30 se muestra el cambio de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de sodio; en todas estas gráficas se muestran los valores individuales obtenidos para cada probeta de la serie, y el valor promedio calculado.

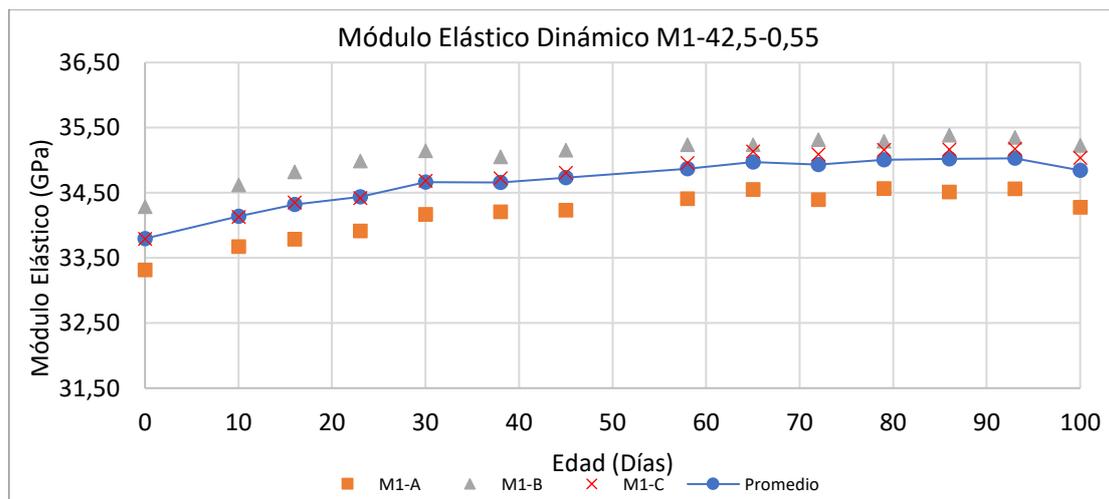


Ilustración 25 Módulo Elástico Dinámico Probetas M1-42,5-0,55 (agua)

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

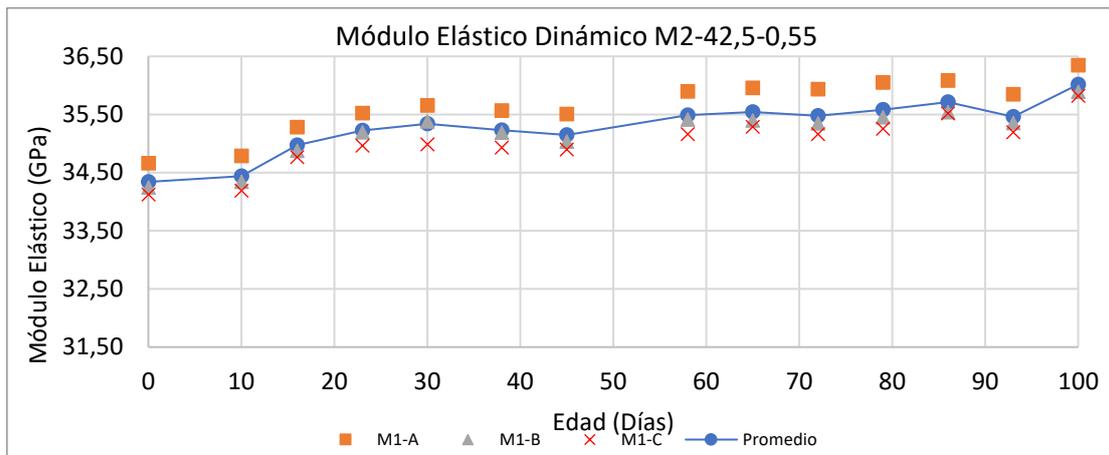


Ilustración 26 Módulo Elástico Dinámico Probetas M2-42,5-0,55 (sulfato magnésico)

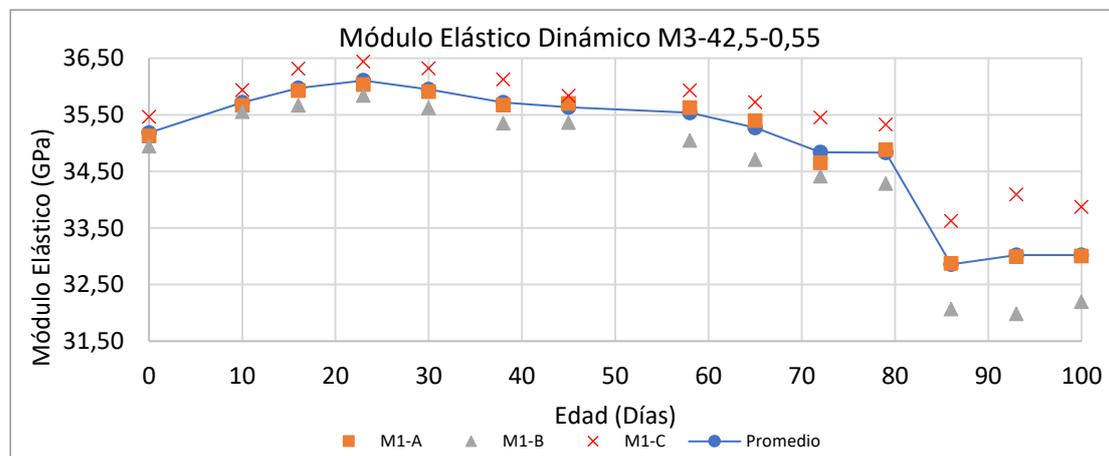


Ilustración 27 Módulo Elástico Probetas M3-42,5-0,55 (sulfato sódico)

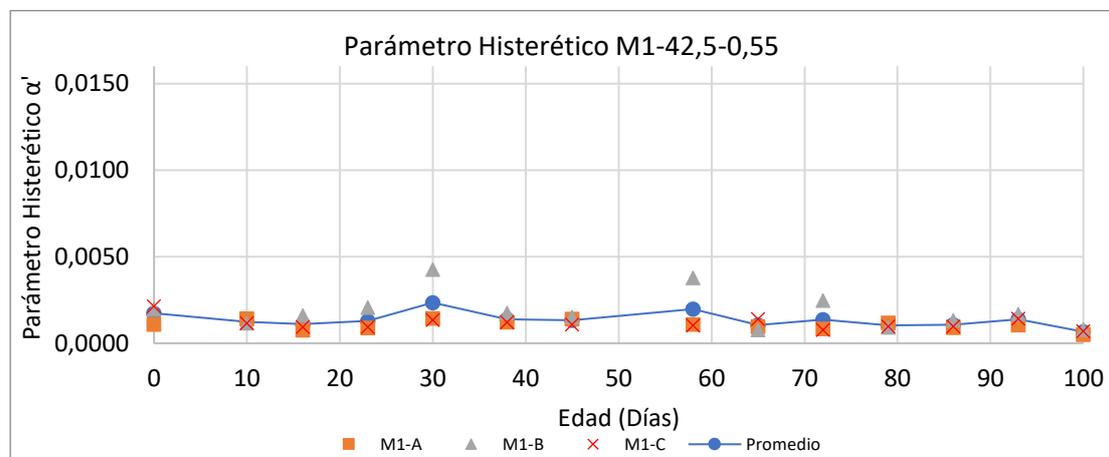


Ilustración 28 Parámetro histerético M1-42,5-0,55 (agua)

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

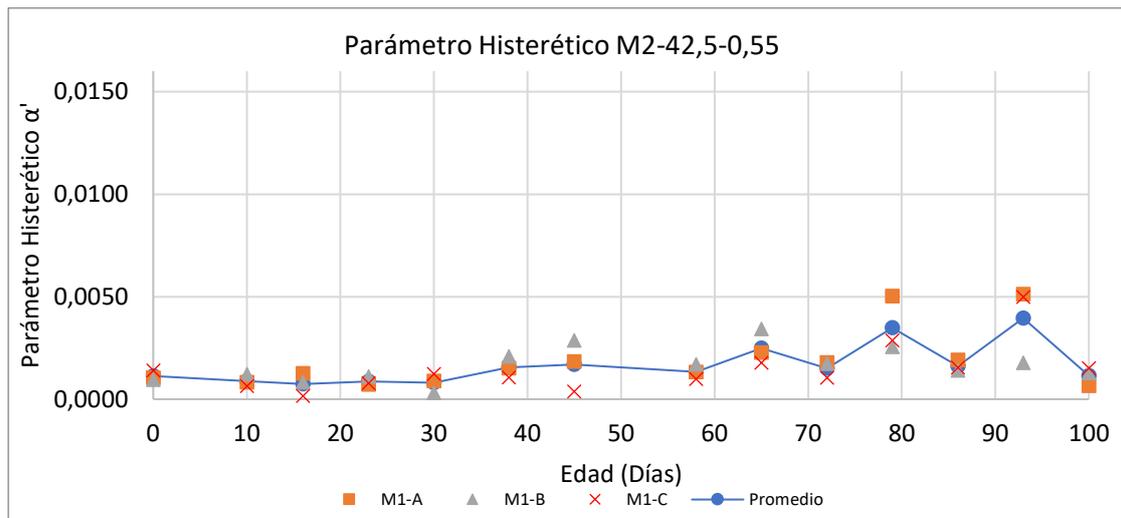


Ilustración 29 Parámetro histerético M2-42,5-0,55 (sulfato magnésico)

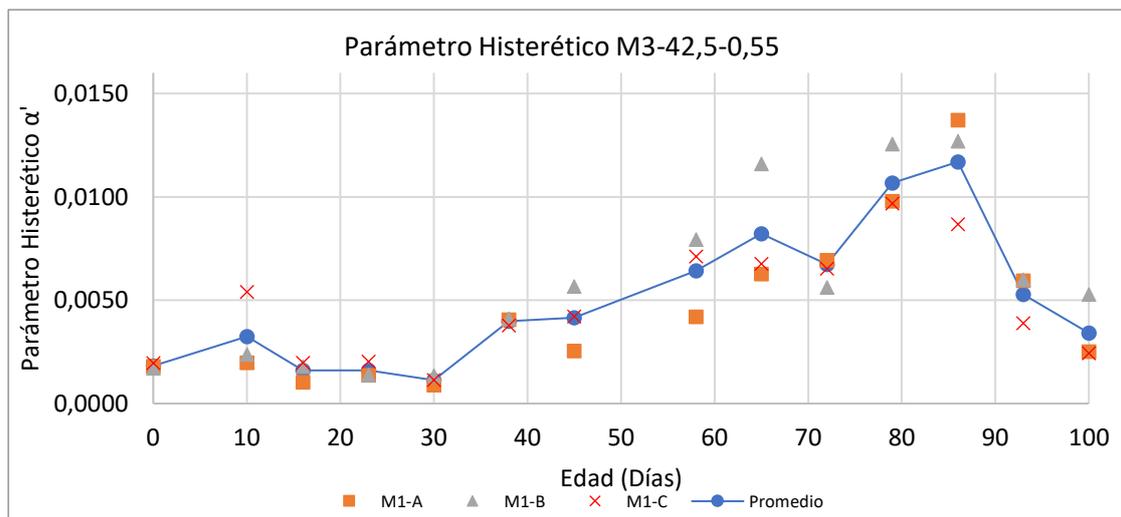


Ilustración 30 Parámetro histerético M3-42,5-0,55 (sulfato sódico)

De estos resultados se puede expresar que:

- Con respecto al módulo elástico dinámico de las probetas sumergidas en agua se puede observar el aumento natural debido al progreso del endurecimiento y ganancia de resistencia de las probetas sin ningún tipo de ataque agresivo llegando a un máximo de 35,03GPa.
- En el caso del módulo elástico dinámico de las probetas sometidas al sulfato de magnesio se observa un aumento más lento pero similar al caso del agua.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

- El sulfato de sodio es el que produce a los 100 días una disminución del módulo elástico dinámico, a partir de los 38 días empieza esa disminución y al llegar a los 100 días el módulo elástico dinámico es de 32,85GPa existiendo una disminución del 5% con respecto a las probetas control sumergidas solamente en agua. Se observa que a tiempos cortos (0-30 días) se produce un incremento del módulo, pero a partir de esa edad se advierte un descenso, el cual se atribuye a la degradación del material por el efecto del sulfato. Se observa, además, que sobre los 80 días de inmersión, se produce una caída significativa del módulo.
- La desviación estándar de los datos de las probetas sumergidas en agua es de 0,463GPa, de las probetas sumergidas en sulfato de magnesio es de 0,325GPa, y las probetas sumergidas en sulfato de sodio es de 0,470GPa.
- El parámetro histerético nos enseña también el daño provocado a las probetas, y debido a esto a los 100 días el parámetro histerético de las sumergidas en agua es de 0,00067, de las sumergidas en sulfato de magnesio es de 0,0011, y de las sumergidas en sodio es de 0,0034.
- La variación del parámetro histerético entre la muestra control y las muestras sumergidas en sulfato de magnesio es de 71%, en cambio, con respecto a las muestras sumergidas en sulfato de sodio la variación es de un 408%.
- Para el caso del ataque con sulfato de sodio, se identifica un incremento del valor del parámetro histerético hacia el día 30, mientras que el valor máximo está centrado hacia el día 80; ambas edades coinciden en cierta medida con los cambios observados para el módulo elástico. El descenso observado en el parámetro histerético desde 80 a 100 días puede estar asociado a la formación de sustancias (etringita, yeso dihidrato) que rellenan las fisuras. Es necesario seguir el estudio con el tiempo para confirmar este estado que puede ser transitorio.

5.3.2 Resultados probetas CEM I-52,5R

De igual manera obtenidas las frecuencias de los ensayos por medio de la ecuación 11 se procedió a calcular el módulo elástico dinámico y el parámetro histerético.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

En la ilustración 31 se muestra el resultado del avance del módulo elástico dinámico de las probetas de control sumergidas en agua, en la ilustración 32 se muestra el avance de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de magnesio, y por último en la ilustración 33 se muestra el avance de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de sodio.

Para el cálculo del parámetro histerético se utilizó la ecuación 12, en la ilustración 34 se puede observar el cambio del parámetro histerético en las probetas de las probetas de control sumergidas en agua, en la ilustración 35 se muestra el cambio de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de magnesio, y por último en la ilustración 36 se muestra el cambio de las probetas sumergidas en el agente agresivo compuesto por sulfato de sodio.

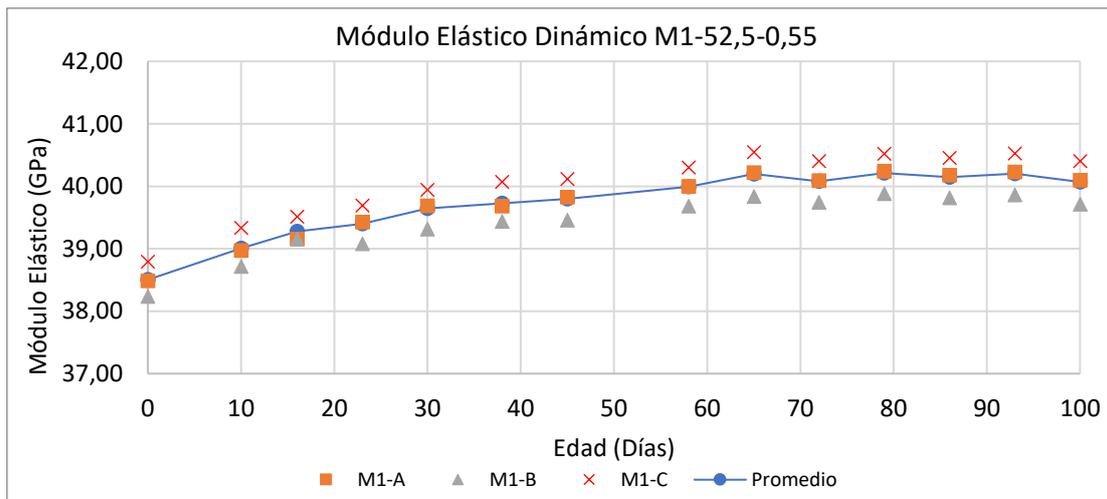


Ilustración 31 Módulo Elástico Probetas M1-52,5-0,55 (agua)

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

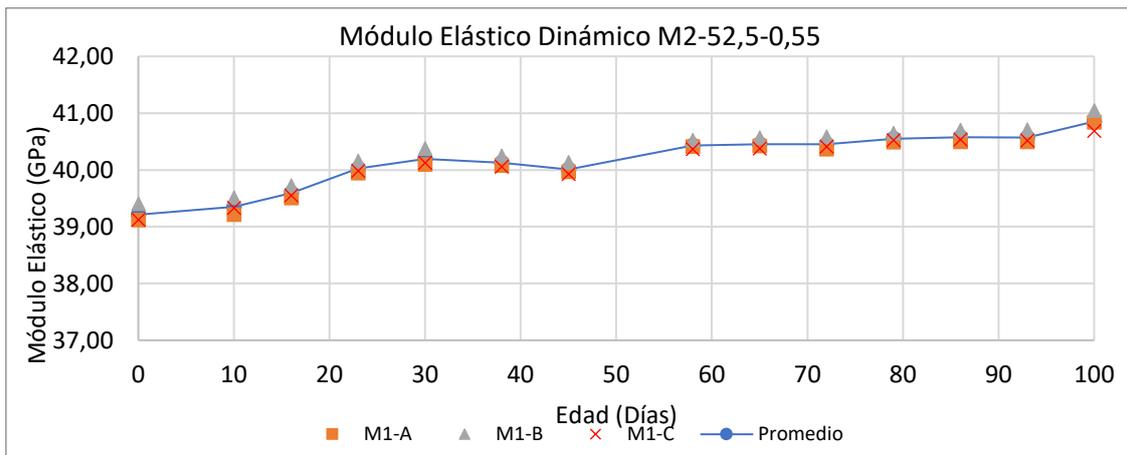


Ilustración 32 Módulo Elástico Probetas M2-52,5-0,55 (sulfato magnésico)

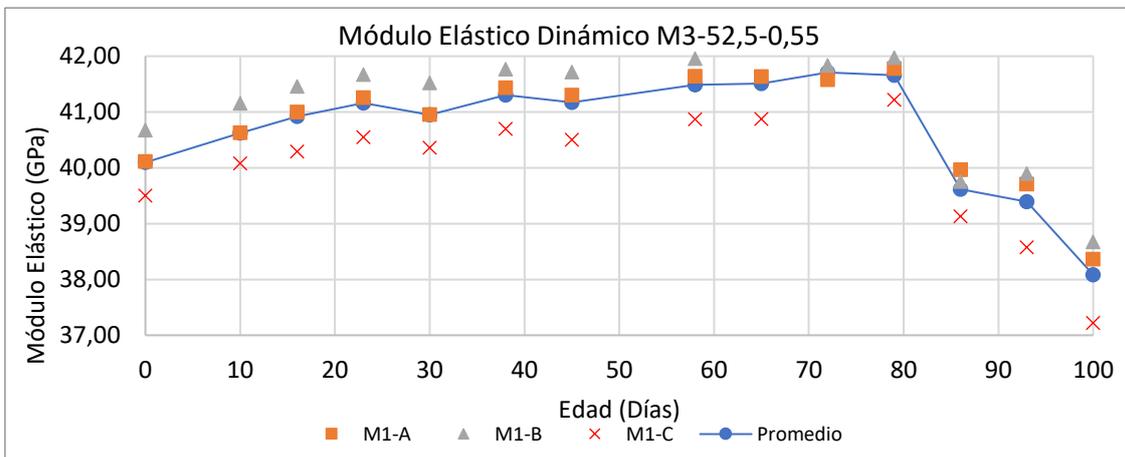


Ilustración 33 Módulo Elástico Probetas M3-52,5-0,55 (sulfato sódico)

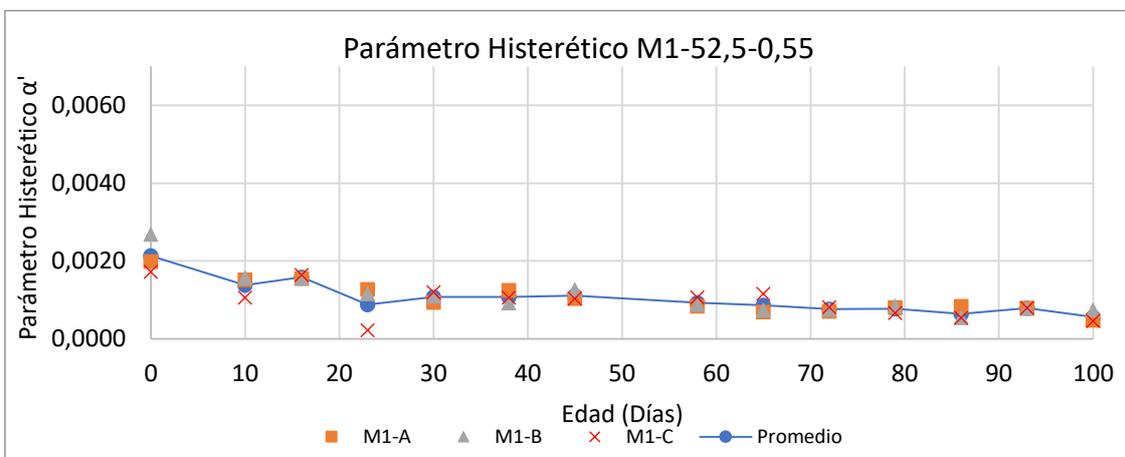


Ilustración 34 Parámetro histerético M1-52,5-0,55 (agua)

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

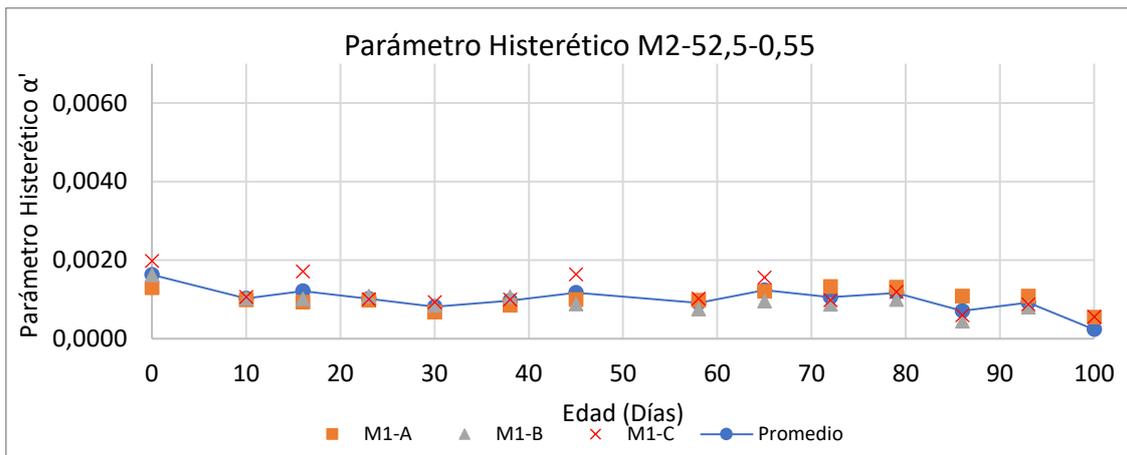


Ilustración 35 Parámetro histerético M2-52,5-0,55 (sulfato magnésico)

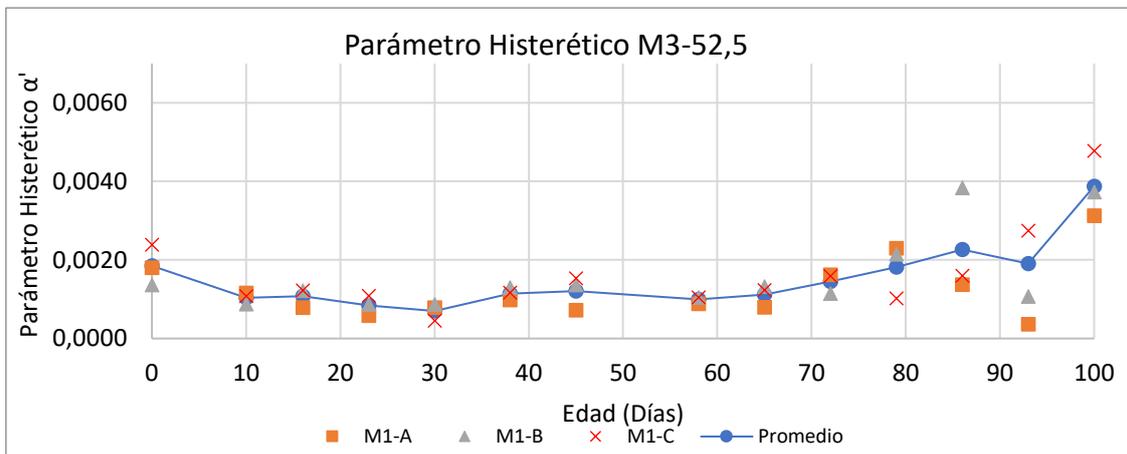


Ilustración 36 Parámetro histerético M3-52,5-0,55 (sulfato sódico)

- Con respecto al módulo elástico dinámico de las probetas sumergidas en agua se puede observar el aumento natural debido al progreso del endurecimiento y ganancia de resistencia de las probetas sin ningún tipo de ataque agresivo llegando a un máximo de 40,21GPa.
- En el caso del módulo elástico dinámico de las probetas sometidas al sulfato de magnesio se observa un aumento más lento.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

- El sulfato de sodio es el que produce a los 100 días una disminución del módulo elástico dinámico, a partir de los 80 días empieza esa disminución y al llegar a los 100 días el módulo elástico dinámico es de 38,08GPa existiendo una disminución del 5% con respecto a las probetas control sumergidas solamente en agua. En este caso se observa el incremento del módulo durante 80 días aproximadamente, pero a partir de esa edad se advierte un descenso, el cual se atribuye a la degradación del material por el efecto del sulfato.
- La desviación estándar de los datos de las probetas sumergidas en agua es de 0,318GPa, de las probetas sumergidas en sulfato de magnesio es de 0,127GPa, y las probetas sumergidas en sulfato de sodio es de 0,788GPa.
- El parámetro histerético nos enseña también el daño provocado a las probetas, y debido a esto a los 100 días el parámetro histerético de las sumergidas en agua es de 0,00056, de las sumergidas en sulfato de magnesio es de 0,00023, y de las sumergidas en sodio es de 0,0039.
- La variación del parámetro histerético entre la muestra control y las del ataque con sulfato de magnesio es de 58%, en cambio con respecto a las muestras sumergidas en sulfato de sodio la variación es de un 589%.

5.4 Ensayo mediante técnica de ultrasonidos

5.4.1 Velocidad de pulso ultrasónico

Con el uso de la ecuación 8 se calculó las velocidades de pulso ultrasónico, una vez obtenidas las velocidades se realizó una corrección para descartar todos los datos que diferían más del 20% de la media, el resultado se puede observar en la ilustración 37. Se observa una evolución muy similar en los tres casos respectivos para cada tipo de cemento, velocidades más altas para CEM I-52,5R como se ve en la gráficas y más bajas para CEM II/A-L 42,5R.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

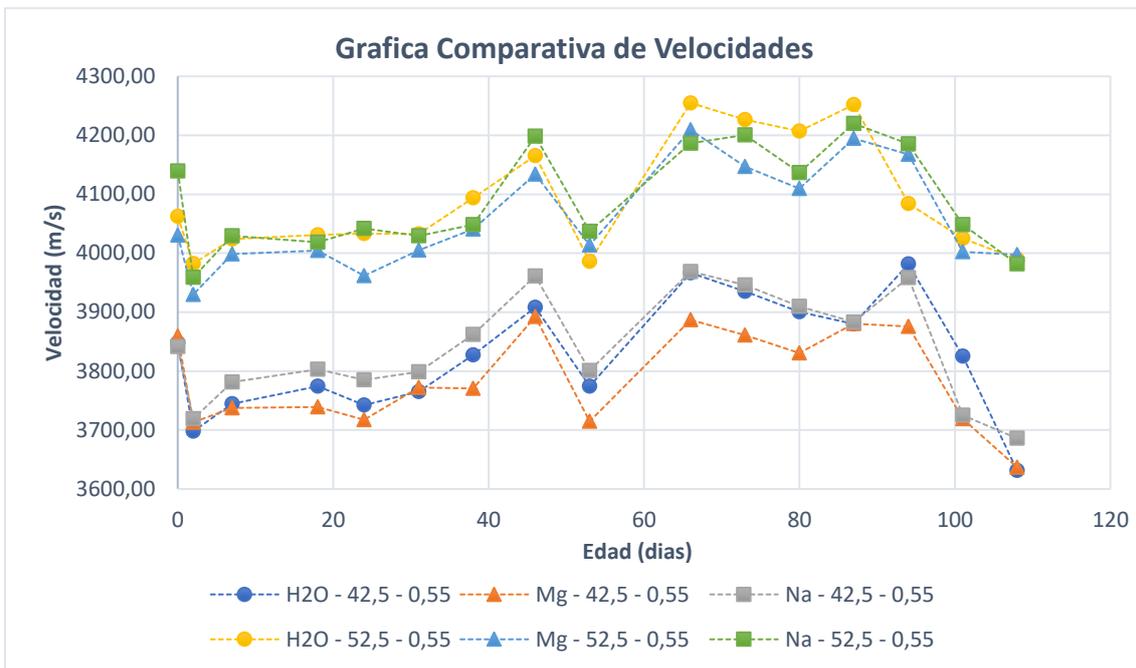


Ilustración 37 Gráfica comparativa de la velocidad del pulso ultrasónico en función del tiempo

Se puede resumir que:

- En el caso de mezclas donde se utilizó CEM II/A-L 42,5R se han obtenido velocidades máximas de 3981m/s para la muestra control sumergida en H₂O, 3892m/s para las probetas sumergidas en sulfato de magnesio, y por ultimo 3968m/s en las que se encontraban sumergidas en sulfato de sodio.
- Luego, al observar los resultados de las mezclas donde se utilizó CEM I-52,5R las velocidades máximas fueron de 4255 m/s para la muestra control en H₂O, 4209m/s para las probetas sumergidas en sulfato de magnesio, y por ultimo 4220m/s para las que se encontraban sumergidas en sulfato de sodio.

En ninguno de los casos se ve una disminución significativa de la velocidad del pulso ultrasónico que pueda indicar que se estuviera produciendo un daño interno revelador. Este comportamiento puede ser debido a que el ataque es de tipo externo, de modo que existe un gradiente de ataque, que hace que el corazón de la probeta esté intacto y que por tanto la velocidad apenas se ve modificada.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Solamente los extremos de la probeta (por el modo de medir la velocidad) son los que pueden tener una cierta influencia en los valores, pero seguramente dicha influencia será menor que la propia dispersión de la medida realizada.

5.4.2 Atenuación de pulso ultrasónico

Para el cálculo de la atenuación del pulso ultrasónico se utilizó la ecuación 13, una vez obtenidos los resultados se utilizó las frecuencias de 200kHz, 500kHz, y 700kHz para realizar comparaciones y obtener conclusiones del estudio, en la ilustración 38, ilustración 39 e ilustración 40 se muestran los resultados de cada frecuencia correspondientemente.

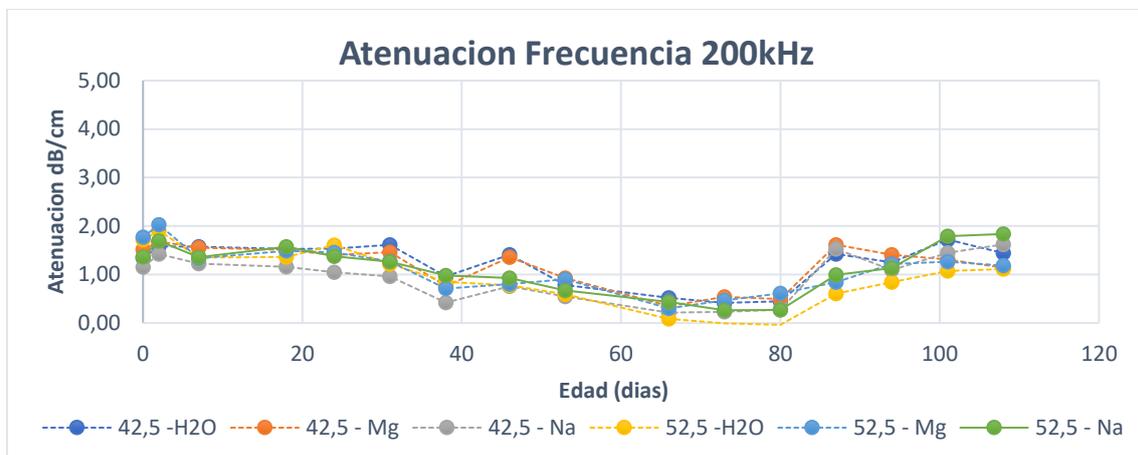


Ilustración 38 Atenuación frecuencia 200khz

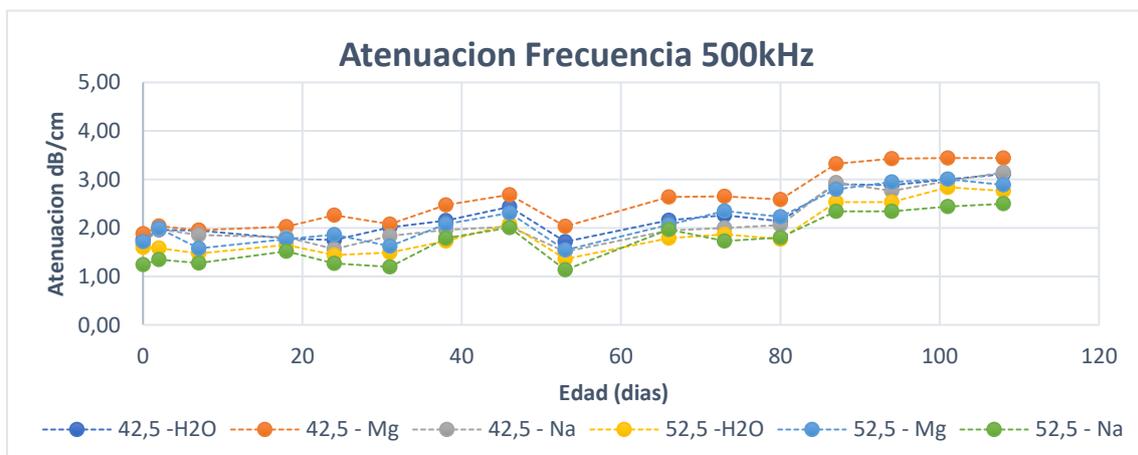


Ilustración 39 Atenuación frecuencia 500khz

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

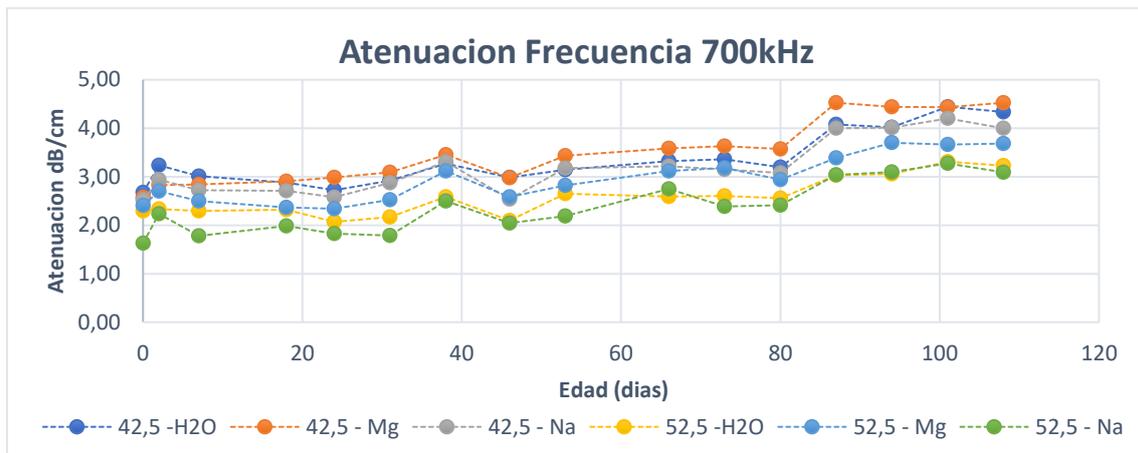


Ilustración 40 Atenuación frecuencia 700kHz

De estos resultados se puede expresar que:

- Observando los resultados de 500kHz y 700kHz se observa que las atenuaciones mayores se dan en las mezclas donde se utilizó CEM II/A-L 42,5R, al contrario del CEM I-52,5R que presenta las atenuaciones más bajas. Esto tiene una coherencia con el valor de la resistencia mecánica y la menor porosidad que habitualmente tienen los morteros de CEM I-52,5R.
- Al igual que en el caso de la velocidad de pulso ultrasónico, dado que el interior de la probeta no está afectado, no se advierten diferencias significativas entre los diferentes ataques analizados en el período de tiempo estudiado.

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

- Los resultados de resistencia mecánica nos indican que la preparación de las probetas fue correcta y que no debería de ser un factor significativo de intervención en los resultados del resto de los ensayos que se practicaron a lo largo del estudio.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

- Los resultados de las expansiones nos sugieren que uno de los factores que influyen en la capacidad del hormigón para ser atacado por sulfatos es el tipo de cemento utilizado, ya que en este estudio las probetas preparadas con CEM I-52,5R muestran menos expansión con un comienzo más tardío, al contrario de las probetas preparadas con CEM II/A-L 42,5R que en este caso a edades tempranas empezó a dar indicios de expansión; además, las probetas sumergidas en sulfato de sodio son las únicas que presentan tal expansión a 100 días de estudio; en el caso de las probetas sumergidas en sulfato de magnesio se observa la falta del inicio del proceso de expansión, esto debido a la formación de brucita en el exterior que no permite la difusión de los aniones sulfato.
- Los resultados del módulo elástico dinámico en el ensayo NIRAS son concluyentes y confirman los resultados observados en expansiones, las probetas sumergidas en agua y en sulfato de magnesio muestran el ascenso del módulo elástico dinámico y a los 100 días aún no ha comenzado el descenso; esto demuestra que aún no se han producido daños por el ataque de los agentes agresivos en el caso del sulfato de magnesio; en cambio las probetas sumergidas en sulfato de sodio tiene un ascenso pero de igual manera que las expansiones de las probetas preparadas con CEM II/A-L 42,5R presentan el descenso del módulo elástico alrededor de los 30 días y las probetas preparadas con CEM I-52,5R presentan el descenso a los 90 días, lo cual nos confirma que el ataque del agente agresivo se está produciendo.
- Los resultados del parámetro histerético del ensayo NIRAS sirven como punto de comparación respecto a las probetas sin daño: según la variación relativa del parámetro histerético las probetas sumergidas en el agente agresivo sulfato de magnesio presenta poca cantidad de daño, pero la variación relativa de las probetas control con respecto a las probetas sumergidas en el agente agresivo sulfato de sodio sí demuestra que empieza a existir un daño debido a su aumento; esto comprueba las conclusiones obtenidas por las expansiones y el módulo dinámico elástico de este mismo ensayo.
- Los resultados de pulso ultrasónico no dan información significativa en cuanto al proceso de expansión, debido a que el núcleo de la probeta permanece intacto.

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

- Los resultados de atenuación del pulso ultrasónico tampoco dan información sobre un daño interno de las probetas, al cabo de 100 días. Según otros estudios realizados en este campo, se conoce que las concentraciones de sulfato bajan a partir de los 10mm de penetración [24], [25], recordando que las lecturas de ultrasonido se hicieron longitudinalmente la distancia entre los transductores fue de 160mm, es decir que un 87,5% del recorrido de la señal recorrió probeta con una baja concentración de sulfatos, por lo tanto esto sería el causante que tanto la velocidad del pulso ultrasónico y la atenuación no presenten cambios al cabo de 100 días de ataque agresivo.

6.2 Futuras líneas de investigación

El estudio actual solo se realizó con una duración de 100 días debido al tiempo disponible, se puede seguir con las probetas actuales para analizar los daños que se provocarán a mayor tiempo por los agentes agresivos:

- Inicio de expansiones de las probetas sumergidas en sulfato de magnesio,
- Daño a mayor tiempo de las probetas sumergidas en sulfato de sodio,
- Ensayos de resistencia mecánica al final del estudio para obtener resultados y correlacionarlos con los resultados finales de los ensayos de técnicas no destructivas,
- Estudio de la microestructura de las matrices cementantes.

Observando los efectos de los agentes agresivos en las probetas prismáticas utilizadas en este estudio, se deben de realizar variaciones del mismo estudio teniendo en cuenta:

- Distintos tipos de cementos,
- Distintos tipos de relaciones agua/cemento,
- El uso de adiciones para analizar el comportamiento hacia los ataques,
- Realizar ataques en probetas de hormigón para comparar los resultados obtenidos con las probetas de mortero.

7 Referencias

- [1] ACI 201.2R, "Guía para la Durabilidad del Hormigón," *Durabilidad Del Hormigón*, pp. 1–59, 2001.
- [2] M. Collepardi, "A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 4–5 SPEC, pp. 401–407, 2003.
- [3] H. Song, J. Chen, and J. Jiang, "An Internal Expansive Stress Model of Concrete under Sulfate Attack," *Acta Mech. Solida Sin.*, vol. 29, no. 6, pp. 610–619, 2016.
- [4] ACI, "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution," *ACI C1012*, vol. 11, no. C, pp. 1–7, 2010.
- [5] K. Van Den Abeele, P. A. Johnson, and A. Sutin, "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS)," *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 12, no. 1, pp. 17–30, 2000.
- [6] J. N. Eiras, T. Kundu, M. Bonilla, and J. Payá, "Nondestructive monitoring of ageing of alkali resistant glass fiber reinforced cement (GRC)," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 32, no. 3, pp. 300–314, 2013.
- [7] J. Chen, A. R. Jayapalan, J. Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, "Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 914–923, 2010.
- [8] V. F. Genovés Gómez, "Evaluación del comportamiento de morteros de cemento Portland frente al ataque por sulfatos mediante técnicas de vibración," p. 52, 2012.
- [9] K. J. Leńicki, J. Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, "Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique," *NDT E Int.*, vol. 44, no. 8, pp. 721–727, 2011.
- [10] V. Genovés, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Eiras, and J. Payá, "Preliminary study on short-term sulphate attack evaluation by non-linear impact resonance acoustic spectroscopy technique," *Constr. Build. Mater.*, vol. 78, pp. 295–302, 2015.
- [11] J. Carette and S. Staquet, "Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 196–208, 2015.
- [12] C. C. Test, T. Drilled, C. Ag-, and B. Statements, "Standard Test Method for Fundamental Transverse , Longitudinal , and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

1,” pp. 1–7, 2015.

- [13] M. Molero, I. Segura, S. Aparicio, M. G. Hernández, and M. A. G. Izquierdo, “On the measurement of frequency-dependent ultrasonic attenuation in strongly heterogeneous materials,” *Ultrasonics*, vol. 50, no. 8, pp. 824–828, 2010.
- [14] UNE-EN 12504-4, “Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos,” *AENOR Asoc. Española Norm. y Certificación*, 2006.
- [15] V. M. Malhotra and N. J. Carino, “Handbook on nondestructive testing of concrete,” *New York*, pp. 1–365, 2004.
- [16] B. C. Kim and J. Y. Kim, “Characterization of ultrasonic properties of concrete,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 36, no. 2, pp. 207–214, 2009.
- [17] K. Y. Jhang, “Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: A Review,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 10, no. 1, pp. 123–135, 2009.
- [18] A. A. Shah, Y. Ribakov, and C. Zhang, “Efficiency and sensitivity of linear and non-linear ultrasonics to identifying micro and macro-scale defects in concrete,” *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 905–916, 2013.
- [19] A. A. Shah and Y. Ribakov, “Non-destructive evaluation of concrete in damaged and undamaged states,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3504–3511, 2009.
- [20] A. A. Shah and Y. Ribakov, “Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 10, pp. 4095–4102, 2009.
- [21] UNE-EN 196-1, “Métodos de ensayo de cementos - Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas,” *Eur. Stand.*, pp. 1–33, 2005.
- [22] V. Genovés, J. Gosálbez, R. Miralles, M. Bonilla, and J. Payá, “Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution,” *Ultrasonics*, vol. 60, pp. 88–95, 2015.
- [23] R. G. Solís Carcaño, É. I. Moreno, and W. R. Castillo Pak, “Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados,” *Ingeniería*, vol. 8, no. 2, pp. 41–52, 2004.
- [24] J. Bernal Camacho, S. Mahmoud Abdelkader, E. Reyes Pozo, and S. Monteagudo Viera, “Estudio de la influencia de los medios con presencia de sulfatos en hormigones con cementos sulforresistentes y adiciones minerales. Parte 1. Hormigones expuestos a

EVALUACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL DAÑO PRODUCIDO POR
ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

sulfato sódico (Na_2SO_4),” *Rev. la Constr.*, vol. 12, no. 3, pp. 36–46, 2013.

- [25] M. Abdelkader, “Estudio de la influencia de los medios con presencia de sulfatos en hormigones con cementos sulforresistentes y adiciones minerales. Parte 2. Hormigones expuestos a sulfato magnésico (MgSO_4),” vol. 12, no. 3, pp. 36–46, 2013.

8 Agradecimientos

El primer agradecimiento es para mis padres, por estar siempre presente y por su apoyo para poder cumplir esta nueva meta en mi vida.

Agradecer a mis directores Jorge Juan Payá Bernabéu y José María Monzó Balbuena por el valioso tiempo que han dedicado para que este trabajo fuera posible, por compartir su experiencia, sus conocimientos y calidad investigadora para poder llevar a cabo este estudio.

Al equipo del ICITECH que me ayudo en todo el proceso, a Lourdes por ayudarme en varias fases de este estudio, a Vicente por su gran apoyo en todo lo que tuvo que ver con las técnicas no destructivas, a Viki, Alba, Manolo, por ofrecer el buen ambiente de trabajo durante los meses que estuve realizando este estudio en el ICITECH.

A mis compañeros en el ICITECH, Daniel y Ricardo por ayudar durante todo momento y crear un excelente ambiente de trabajo y compartir su experiencia, por la ayuda y el compañerismo que mostraron a lo largo de todo el estudio.

Al proyecto ONDATEST, ya que son la base de las herramientas que fueron utilizadas en proceso de este estudio.

A mis compañeros de master, por todas las horas de estudio, trabajos y actividades extracurriculares que pudimos desarrollar en todo el tiempo juntos durante el master.

A Cementval por facilitar materiales necesarios para llevar a cabo este estudio.