FANSIRAS: UN NUEVO ALGORITMO, BASADO EN LA SEÑAL DE ESPECTROSCOPIA ACÚSTICA POR IMPACTO, PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS Y SU ESTADO DE DETERIORO

J. PAYÁ¹, V. GENOVÉS¹, J. MONZÓ¹, A. CARRIÓN², J. GOSÁLBEZ², M.V. BORRACHERO¹

¹ Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, València, España.

² Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTeaM), Universitat Politècnica de València, València, España.

RESUMEN

Los morteros y hormigones presentan comportamiento histerético no lineal que puede ser aprovechado para evaluar su grado de deterioro. Una forma de analizar estos parámetros es la aplicación de la técnica NIRAS (Non-linear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy), si bien requiere de un número elevado de impactos realizados con diferentes niveles de energías. Este procedimiento puede simplificarse significativamente usando un nuevo algoritmo de análisis de la señal: el algoritmo FANSIRAS (Flipped Accumulative Non-linear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy). Estos métodos se han aplicado a morteros con y sin daño térmico comparándose sus resultados. Tras este estudio se demuestra que el nuevo algoritmo consigue proporcionar excelentes resultados para la caracterización del daño en hormigón, con una carga experimental menor.

Palabras clave: Hormigón; Daño; Acústica no lineal; FANSIRAS; Impacto.

ABSTRACT

Concrete and mortar exhibit a nonlinear hysteretic behaviour which can be used to evaluate the internal damage of the material. One way to analyze these parameters is by means of NIRAS technique (Non-linear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy), which requires a high number of impacts at different amplitudes over the same sample. This procedure can be simplify by using a new signal processing algorithm called FANSIRAS (Flipped Accumulative Non-linear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy). Both methods have been applied over pristine and thermal damaged mortars in order to compare the results. This study demonstrates that the new algorithm achieve excellent results for the damage characterization in concrete with less experimental tests.

Keywords: Concrete; Damage; Non-linear acoustics; FANSIRAS; Impact.

RESUMO

Argamassas e concretos exibem um comportamento histerético não-linear que pode ser usado para avaliar seu grau de deterioração. Uma maneira de analisar esses parâmetros é a aplicação da técnica NIRAS (Espectroscopia Acústica de Ressonância de Impacto Não-Linear), embora seja necessário um alto número de impactos feitos com diferentes níveis de energia. Este procedimento pode ser significativamente simplificado usando um novo algoritmo para analisar o sinal: o algoritmo FANSIRAS (Espectroscopia Acústica de Ressonância de Impacto Não-Linear Acumulativa Invertida). Estes métodos foram aplicados em argamassas com e sem danos térmicos comparando seus resultados. Após este estudo, é demonstrado que o novo algoritmo consegue fornecer excelentes resultados para a caracterização de danos no concreto, com menor carga experimental.

Palavras-chave: Concreto; Dano; Acústica não linear; FANSIRAS; Impacto

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el hormigón armado es el material más utilizado a nivel mundial debido a su bajo coste y su gran versatilidad y rendimiento a la hora de diseñar todo tipo de edificaciones y construcciones civiles como puentes, viaductos y túneles. Debido a su gran impacto e importancia, muchas líneas de investigación se centran en el estudio de este material: diseño de mezclas y estructuras, optimización, sostenibilidad, etc. La continua contribución a la mejora de este material y su uso es evidente y necesaria (Aitcin, 2014).

De todas las disciplinas que rodean al estudio de la ciencia y tecnología del hormigón, el campo de los Ensayos No Destructivos (END) es uno de los más importantes en la actualidad. Nuestras estructuras y materiales necesitan ser inspeccionadas y monitorizadas para detectar posibles daños y deterioros en etapas lo más tempranas posibles. En este contexto, muchas técnicas END se han desarrollado recientemente, contribuyendo de manera positiva en la comunidad científica y las diferentes áreas de la industria. Las llamadas técnicas Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) han sido desarrolladas y aplicadas de forma satisfactoria en geomateriales durante los últimos años, revelando una alta sensibilidad a la fisuración y procesos de micro-fisuración en materiales no homogéneos y sólidos granulares. A pesar de la complejidad de este comportamiento, todas estas técnicas se basan en la misma física subyacente: el ablandamiento (disminución) del módulo de Young con el incremento de la amplitud de deformación del elemento bajo estudio. Una excitación dinámica con una amplitud creciente es la forma más utilizada para activar este fenómeno y, de esa forma, obtener las señales de vibración necesarias para calcular los correspondientes parámetros no lineales. Por lo tanto, varias repeticiones en un ensayo dinámico son necesarias para establecer una relación correcta entre amplitud de deformación y la rigidez del material (Guyer et al, 1999; Payán et al, 2014; Van den Abeele, 2000). Los autores de este trabajo proponen la nueva técnica FANSIRAS (Flipped Accumulative Nonlinear Single Impact Resonance Acoustic Spectroscopy) para monitorizar el comportamiento no lineal del hormigón a partir del análisis de una única señal de excitación. Dicha técnica se comparará con un ensayo más tradicional NIRAS (Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy), el cual también estima el parámetro no lineal, pero requiere de múltiples señales de excitación. Con el fin de establecer relaciones y comparativas entre ambas técnicas partiendo de una base conocida y consolidada, se analizará el daño térmico producido a diferentes temperaturas en morteros normalizados de cemento Portland

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Materiales y probetas

Se realizaron 6 amasadas de una mezcla de mortero de cemento Portland normalizado (UNE EN 196-1:2005) (agua/cemento = 0.5) compuesto por 450 g de cemento español CEM I-52.5-R, 1350 g de arena de origen silíceo 0/2 mm de baja absorción, y 225 g de agua para obtener 18 probetas de dimensiones 40x40x160 mm³. Después del proceso de amasado, los moldes de acero rellenos se almacenaron en cámara húmeda (20 °C y 100 % H.R.) durante 24 horas. Posteriormente, se desmoldaron las probetas y se almacenaron en la cámara húmeda durante 60 días con la intención de que sus constantes elásticas se estabilizaran.

Una vez curadas, las probetas se colocaron en un horno a 40°C hasta que la probeta presentó una variación de peso no mayor de 1%. Por último, se sometieron las probetas a la temperatura correspondiente (40°C, 90°C, 150°C, 250°C, 400°C, 525°C) durante 3 horas en un horno con un error inferior a 5°C respecto a la temperatura deseada. El tratamiento consistió en alcanzar la temperatura concreta a una velocidad de 2 ° C por minuto. Una vez se alcanzó la temperatura se mantuvo durante 3 horas. Tras ese tiempo, el horno se apagó y se dejó enfriar lentamente durante al menos 24 horas.

Figura 1. Configuración de ensayo de vibración sobre probeta prismática de mortero.

2.2 Disposición de ensayo

Las probetas se colocaron en unos soportes metálicos inclinados como se aprecia en la figura 1. En esta figura se puede observar un martillo instrumentado, el cual está fijado a un soporte con un eje metálico, que permite la rotación libre del martillo. Eso permite que el impactador pueda adoptar diferentes ángulos de inicio de movimiento para reducir o incrementar la energía de impacto sobre la superficie de la probeta. El impacto se realiza en una de las caras prismáticas de $40 \times 160 \text{ mm}^2$. En la esquina superior de la probeta se coloca el acelerómetro para registrar la señal de vibración. La información se transmite vía USB a un ordenador donde un software de control almacena y procesa los datos. Cada probeta ensayada es analizada con 10 impactos con amplitud ascendente ..

2.3 NIRAS y FANSIRAS

La técnica Non-linear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy (NIRAS) es una técnica utilizada para la obtención del parámetro histerético de materiales con estructura mesoscópica. Esta técnica se basa en golpear a una probeta con 10 impactos de amplitud creciente, registrando su vibración y, posteriormente, relacionando la amplitud de la señal con la frecuencia de vibración del elemento ensayado estableciendo una regresión lineal, cuya pendiente es el valor de dicho parámetro histerético α_{NIR} .

La técnica de procesado Flipped Accumulative Non-Linear Single Impact Resonance Acoustic Spectroscopy (FANSIRAS) (Carrión et al, 2018) solo necesita de una única señal de reverberación para obtener una estimación precisa del parámetro histerético α_{FAN} , el cual está relacionado con el cambio de frecuencia y amplitud (ablandamiento del módulo).

Para ello, el algoritmo obtiene de señales de múltiples amplitudes mediante diferentes ventanas temporales aplicadas sobre la misma señal. En la figura 2 puede verse el esquema de obtención de las señales para ambas técnicas y la metodología empleada en cada caso para el cálculo de los parámetros de interés.

Las señales resultantes en ambas técnicas, son trasladadas al dominio frecuencial para estimar una regresión lineal a lo largo de los picos de máxima amplitud (A) y sus correspondientes valores de frecuencia (f).

La frecuencia de resonancia en régimen lineal, f_0 , se obtiene a partir de la intersección del ajuste lineal descrito anteriormente con el eje de frecuencias, mientras que las pendientes de dicho ajuste, α_{NIR} y α_{FAN} , son proporcionales al comportamiento no lineal del material. Ambos parámetros son proporcionales al nivel de daño de las probetas analizadas, es decir una mayor cantidad de fisuras, o una mayor cantidad de contactos internos cuando la probeta entra en resonancia, provocando de esta forma una reducción significativa de la frecuencia cuanto mayor es la amplitud de la señal analizada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras realizar el procesado de las señales temporales en el test de vibración, se seleccionó la señal de mayor intensidad, correspondiente al impacto número 10, para calcular el parámetro α_{FAN} . El parámetro α_{NIR} se calcula teniendo en cuenta todos los impactos realizados. A parte de estos parámetros que caracterizan el comportamiento no lineal del material, puede extraerse la frecuencia de resonancia, f_0 , y con ella calcular el módulo dinámico del material, proporcional a la rigidez.

Figura 2. Esquema de procesado de señales de vibración para las técnicas NIRAS y FANSIRAS

En la figura 4 se muestran los resultados de módulo dinámico calculados a partir de la frecuencia de resonancia lineal de las muestras tratadas térmicamente.

Como puede apreciarse, se produce una caída constante en la rigidez de los elementos a medida que aumenta la temperatura de exposición. Los valores inferiores a 10 GPa tras un tratamiento de 525 °C indican una pérdida muy alta de la rigidez del material, producida principalmente por la descomposición térmica de silicatos cálcicos hidratados y gran parte de la portlandita, Ca(OH)_2 , del sistema.

También se puede observar como la caída de la rigidez a partir de los 250 °C es más acentuada, debido a que no solo se pierden productos resistentes de la pasta de cemento Portland, sino que también se genera una fisuración notable y distribuida en las zonas de contacto de árido con la pasta.

Figura 4. Resultados de módulo dinámico calculados a partir de la frecuencia lineal en función de la temperatura de exposición de las probetas de mortero.

En la figura 5 se muestran los resultados del parámetro histerético para NIRAS y FANSIRAS en función de las temperaturas de exposición. Como puede observarse, no hay cambios sustanciales antes de los 250 °C debido a que, a pesar de que se descomponen una parte importante de los productos de hidratación de la matriz, no se observa una fisuración de la probeta.

A partir de 250 °C, el proceso de fisuración comienza y se acentúa a medida que aumenta la temperatura de exposición para ambos parámetros. Por tanto, podemos destacar que estas técnicas permiten ser muy sensibles a la fisuración del material, a pesar que exista una caída más o menos continua de la rigidez con el incremento del daño generado con el tratamiento térmico al que se somete el mortero.

La diferencia de sensibilidad de ambos parámetros también es notable, obteniéndose valores mayores de no linealidad para el caso de α_{NIR} . Esta diferencia se debe principalmente la naturaleza de la señal obtenida durante el ensayo: para obtener el parámetro de α_{NIR} , la probeta ha tenido que ser golpeada de forma consecutiva 10 veces. Estos materiales que tienen un comportamiento no lineal histerético, presentan memoria a corto y largo plazo, por lo que no dejar que la probeta se relaje afecta en el valor del parámetro extraído. En el caso de α_{FAN} , el material solo se golpea una única vez por lo que el estado de la memoria del material es diferente al caso anterior.

Figura 5. Resultados del parámetro histerético extraído con las técnicas NIRAS y FANSIRAS para todas las temperaturas analizadas

4. CONCLUSIONES

El presente estudio analiza una técnica de procesamiento nueva, FANSIRAS que permite obtener información sobre la no linealidad de un material heterogéneo a partir de una única medida. Se ha analizado conjuntamente la obtención de los parámetros no lineales α_{NIR} y α_{FAN} por medio de las técnicas de NIRAS y FANSIRAS respectivamente y se ha empleado para monitorizar el deterioro de probetas de hormigón cuando se someten a daño térmico y la temperatura de exposición aumenta. A pesar de las diferencias en la naturaleza de la señal y el estado previo de relajación de las probetas al análisis dinámico, los parámetros no lineales analizados mantienen una coherencia en los resultados para ambas técnicas. Las dos técnicas empleadas indican que no hay cambios sustanciales en los parámetros no lineales hasta después de los 250 °C, debido a que, a pesar de que se descomponen parte de los productos de los productos de hidratación de la matriz, no se detecta una fisuración de la probeta. A partir de 250 °C, el proceso de fisuración se acentúa a medida que aumenta la temperatura viéndose reflejado en los parámetros α_{NIR} y α_{FAN} . En el caso del análisis del módulo dinámico se produce un decrecimiento lineal a medida que la temperatura aumenta, siendo aparentemente más sensible a los cambios derivados de la pérdida de masa de la matriz de cemento Portland.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (Gobierno de España) y a los fondos FEDER, por la concesión de los proyectos coordinados BIA2017-87573-C2-1-P y BIA2017-87573-C2-2-P.

6. REFERENCIAS

- Aitcin, P.C. (2014), *Binders for durable and sustainable concrete*, CRC Press.
- Carrión, A., Genovés, V., Pérez, G., Payá, J., Gosálbez, J. (2018), *Flipped Accumulative Non-Linear Single Impact Resonance Acoustic Spectroscopy (FANSIRAS): A novel feature extraction algorithm for global damage assessment*, Journal of Sound and Vibration 432, 454 – 469.

- Guyer, R. A, Johnson, P. A. (1999), *Nonlinear Mesoscopic Elasticity: Evidence for a New Class of Materials*, Physics Today. 52 (4). 30.
- Payan, C., Ulrich, T.J., Le Bas, P.Y., Saleh, T., Guimaraes, M., (2014), *Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization: Application to concrete thermal damage.*, The Journal of the Acoustical Society of America. 136 (2), 537.
- Van Den Abeele, K., Carmeliet, J., Ten Cate, J. A., Johnson, P. A., (2000), *Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS)*, Research in Nondestructive Evaluation, 12 (1), 17–30.