

Resumen

Las construcciones de hormigón deben ser diseñadas para perdurar en el tiempo manteniendo su integridad mecánica y sus condiciones de servicio durante la vida útil para la que han sido proyectadas. A este respecto, la evaluación del hormigón y sus constituyentes tanto en laboratorio como en ensayos *in situ* es, por tanto, esencial para garantizar las condiciones de servicio requeridas al hormigón. El ensayo de determinación de las frecuencias de resonancia ha sido tradicionalmente empleado para determinar la integridad mecánica de testigos de hormigón, en la evaluación de la conformidad de mezclas de hormigón en diversos ensayos de durabilidad, y en la terminación de propiedades constitutivas como son el módulo elástico y el factor de amortiguamiento. Las condiciones del ensayo de determinación de las frecuencias de resonancia en probetas de hormigón, están actualmente normalizadas por organizaciones como ASTM —*American Society for Testing Materials*— o recomendadas por RILEM —*International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures*—. Su uso es referido en estándares para la evaluación de la durabilidad del hormigón frente a ciclos hielo-deshielo y a ataque por sulfatos. Sin embargo, esta técnica no destructiva no solo ha sido aplicada bajo estas normativas si no que ha sido ampliamente apelada para la evaluación de las propiedades mecánicas en todo tipo de ensayos de durabilidad. La evolución del daño es comúnmente evaluada a partir de la reducción del módulo dinámico, producido como resultado de cualquier proceso de fisuración.

El comportamiento mecánico del hormigón es intrínsecamente no lineal y presenta histéresis. Como resultado de un comportamiento tensión-deformación con histéresis, el módulo elástico depende de la deformación. En ensayos dinámicos, la no linealidad del material se manifiesta por una disminución de las frecuencias de resonancia, la cual es inversamente proporcional a la amplitud de excitación. Este fenómeno es normalmente denominado como dinámica rápida. Una vez la excitación cesa, el material experimenta un proceso de relajación por el cual, el módulo elástico es restaurado a aquel en situación de reposo. Este fenómeno es denominado como dinámica lenta. Estos fenómenos —dinámicas rápida y lenta— encuentran su origen en la fricción interna del material. Por tanto, en materiales basados en cemento, la presencia de microfisuras y las interfaces entre sus constituyentes juegan un rol importante en la no linealidad mecánica del material. En el contexto de evaluación de la durabilidad del hormigón, la evolución del daño está basada en el incremento de histéresis, como resultado de cualquier proceso de fisuración.

En esta tesis se investigan tres técnicas diferentes las cuales utilizan el impacto como medio de excitación de las frecuencias de resonancia. La primera técnica consiste en determinar las frecuencias de resonancia a diferentes energías de impacto. La técnica es denominada en inglés: *Nonlinear Impact Resonant Acoustic Spectroscopy* (NIRAS). Ésta consiste en relacionar el

detrimento que el material experimenta en sus frecuencias de resonancia, con el aumento de la amplitud de la excitación. La relación entre la frecuencia de resonancia y la amplitud de excitación es utilizada para evaluar el comportamiento no lineal. En esta tesis, la técnica NIRAS es empleada en morteros de cemento Portland de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, producidos con diferentes relaciones agua/cemento y árido/cemento. Los morteros son sometidos a diferentes procesos de degradación. En particular, el programa experimental incluye la evaluación de las propiedades dinámicas de los morteros cuando son sometidos a ciclos hielo-deshielo, y a niveles incrementales de carga a compresión. Los resultados demuestran que los parámetros derivados del comportamiento mecánico no lineal varían en mayor medida que las variaciones de los parámetros estándar (lineales) como son la frecuencia de resonancia o la atenuación. También, el programa experimental incluye la investigación del efecto de la humedad interna y la microfisuración por secado. Los resultados demuestran que el secado puede inducir microfisuras y tanto más, en aquellas relaciones agua/cemento bajas y con menor proporción de árido. La generación de microfisurado es detectada mediante la técnica NIRAS. Además, los resultados señalan que la humedad interna es capaz de aliviar los mecanismos que dan lugar al comportamiento no lineal. Por otra parte, la configuración NIRAS adoptada en este estudio permite la observación de los modos fundamentales de resonancia a flexión y longitudinal de forma simultánea. Durante la cuantificación del comportamiento no lineal, se observa que diferentes familias de modos de vibración exhiben un comportamiento diferente. Las causas precisas de este comportamiento son aún desconocidas, pero es plausible atribuir las a diferencias de comportamiento no lineal en acciones a compresión y cortante.

La técnica NIRAS es empleada en esta tesis también para evaluar la durabilidad de materiales compuestos de cemento reforzados con fibras. La incorporación de fibras al hormigón mejora sus propiedades mecánicas de tenacidad y resistencia a la tracción, y ayuda a controlar los procesos de fisuración. Las fibras constituyen un defecto en sí mismo y contribuyen a la no linealidad del material, la cual depende además de las características de la interfaz entre la fibra y la matriz cementante. Sin embargo, en muchos casos la durabilidad de las fibras se ve comprometida en la matriz ~~cementante~~ de cemento, lo que causa un menoscabo de las propiedades mecánicas. En este sentido, el hormigón reforzado con fibra de vidrio es un caso de especial interés. El proceso de degradación de las fibras de vidrio consiste en un caso especial de corrosión bajo tensión, por el cual la fibra acaba combinándose químicamente con los productos de hidratación, lo cual debilita la fibra y endurece la interfase. Por tanto, a medida que las fibras de vidrio se deterioran, el material reduce su comportamiento no lineal. Los resultados demuestran que la técnica NIRAS es sensible a las modificaciones microestructurales que se producen durante la degradación de las fibras de vidrio en el hormigón. Estas medidas pueden ser extrapoladas a la evaluación de la durabilidad de otros materiales reforzados con fibras.

La segunda técnica consiste en investigar el comportamiento no lineal mediante el análisis de la señal correspondiente a un solo impacto. Ésta consiste en determinar las propiedades

instantáneas de frecuencia, atenuación y amplitud. Esta técnica se denomina, en inglés, *Nonlinear Single Impact Resonant Acoustic Spectroscopy* (NSIRAS). Se proponen dos técnicas de extracción del comportamiento no lineal mediante el análisis de las variaciones instantáneas de frecuencia y atenuación. La primera técnica consiste en la discretización de la variación de la frecuencia con el tiempo, mediante un análisis basado en *Short-Time Fourier Transform* (STFT). La segunda técnica consiste en un ajuste por mínimos cuadrados de las señales de vibración a un modelo que considera las variaciones de frecuencia y atenuación con el tiempo. La técnica de ajuste por mínimos cuadrados provee estimaciones de la amplitud de la señal, más precisas que aquellas obtenidas con la técnica de extracción basada en STFT. Sin embargo, el uso de la técnica basada en STFT puede ser recomendado en aquellas señales que contengan múltiples modos de vibración. En este último caso, el método de ajuste por mínimos cuadrados puede ser excesivamente complicado. Además, se comparan las técnicas NIRAS y NSIRAS. La dependencia entre frecuencia y amplitud difieren entre los ensayos NIRAS y NSIRAS. La dependencia entre frecuencia de resonancia y amplitud exhibe una dependencia de orden superior cuando es investigada en un solo impacto, mientras que la dependencia es lineal —frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a la amplitud de excitación—. Este efecto es atribuido al fenómeno de dinámica lenta. Se propone entonces en descomponer la variación de frecuencia de resonancia como aquella estrictamente proporcional a la amplitud de la señal, y aquella que desvía la relación entre frecuencia y amplitud de la proporcionalidad. Al realizar esta descomposición se observa que NIRAS y NSIRAS determinan valores similares de la constante de proporcionalidad. Este procedimiento permite cuantificar el comportamiento no lineal. La aplicación de las técnicas de extracción NSIRAS se demuestra en morteros y hormigones sometidos a ciclos de hielo-deshielo, choque térmico y carbonatación.

NIRAS y NSIRAS están especialmente indicados para ensayos de durabilidad en condiciones de laboratorio, o en todo caso, en aquellas aplicaciones en los que el ensayo estándar de resonancia puede ser empleado. Sin embargo, su uso queda excluido para aplicaciones de evaluación de estructuras de hormigón. De hecho, aun son pocos los estudios que han conseguido extrapolar las posibilidades de la evaluación no lineal a las condiciones reales de estructuras de hormigón. La tercera técnica empleada en esta tesis puede ser empleada para la evaluación de estructuras *in situ*. La técnica se trata de un ensayo acusto-elástico en régimen dinámico. En inglés *Dynamic Acoustic Test* (DAET). Además de NSIRAS y NIRAS, las variaciones de módulo elástico de resonancia mediante los métodos NIRAS y NSIRAS con la amplitud proporcionan un comportamiento “promedio” y no permiten derivar las variaciones del módulo elástico en un solo ciclo de vibración. Actualmente, la técnica DAET es la única que permite investigar todo el rango de fenómenos no lineales en el material. Por otra parte, a diferencia de otras técnicas DAET, en este estudio se emplea como “contraste” una onda continua. El uso de una onda continua permite investigar las variaciones relativas del módulo elástico, para una señal transitoria como la que es obtenida mediante un impacto. Además, permite

la inspección de elementos mediante el acceso por una sola cara. Esto, es especialmente importante para aplicaciones *in situ*.