



## HORMIGONES CON NANOADICIONES Y FIBRAS DE ACERO

Lucea, I.<sup>a</sup>, Chacón, V.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos E.T.S.I.C.C.P Madrid, Profesor Titular, Departamento Ingeniería de la Construcción.

<sup>b</sup> Ingeniero Civil U.M.R.P.S.X.CH., Master en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales UPM, E-mail: vladimir-chaconm@gmail.com

### RESUMEN

Con objeto de mejorar las prestaciones de los materiales y en particular los materiales de construcción, se está estudiando la incorporación de nano partículas y fibras de acero en la fabricación de morteros y hormigones. El presente trabajo consistió en determinar la influencia que pueden poseer las nano adiciones de Sílice y Alúmina con las fibras de acero en un hormigón convencional. El primer ensayo se inició con la adición de 2% de nano-sílice, 2% de nano-alúmina. El segundo ensayo se realizó con hormigón convencional con adición de 2% de nano-sílice, 2% de nano-alúmina y 0.25% (en volumen de la mezcla) de fibras de acero. Y por último el tercer ensayo se realizó añadiendo 2% de nano-sílice, 2% de nano-alúmina y 0.51% (en volumen de la mezcla) de fibras de acero. Posterior a su realización, se procedió a someter las probetas a ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta, resistencia a flexotracción, permeabilidad, módulo de elasticidad y coeficiente de poisson con el fin de conocer el comportamiento una vez añadidas las nanoadiciones y fibras de acero. Los resultados muestran que la incorporación de las fibras de acero mejora las propiedades del hormigón convencional conjuntamente con las nanoadiciones.

### ABSTRACT

In order to improve the performance of materials and in particular construction materials, the incorporation of nanoparticles and steel fibers in the manufacture of mortars and concrete is being studied. The present work consisted in determining the influence that the nano additions of Silica and Alumina can have with the steel fibers in a conventional concrete. The first test started with conventional concrete with the addition of 2% nano-silica, 2% nano-alumina. The second test was carried out with conventional concrete with the addition of 2% nano-silica, 2% nano-alumina and 0.25% (by volume of the mixture) of steel fibers. And finally, the third test was carried out by adding 2% nano-silica, 2% nano-alumina and 0.51% (by volume of the mixture) of steel fibers. After its completion, the specimens were subjected to tests of compressive strength, indirect tensile strength, flexural strength, permeability, modulus of elasticity and poisson's ratio in order to know the behavior once the nanoadditions and fibers had been added. of steel. The results show that the incorporation of the steel fibers improves the properties of conventional concrete together with the nanoadditions.

**Key words:** Concrete, Behaviour, Nano-Additions, Nano-Silica, Nano-Alumina, Steel Fibers.

## INTRODUCCIÓN

El hormigón convencional se puede definir de forma simplificada como un material compuesto, que es utilizado en la industria de la construcción de obra civil o de edificación constituido por cuatro grupos principales: cemento, áridos gruesos, áridos finos y agua. Donde el cemento en conjunto con el agua, forman una pasta aglomerante que permite unir los áridos que tienen que cumplir con unas propiedades mecánicas, granulométricas y químicas.

Los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen, en el Anejo 14 de la Instrucción Española del Hormigón (EHE-08), como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Las fibras validas dentro de la norma para HRF se clasifican en tres grandes grupos: fibras de acero, Fibras Poliméricas y Fibras inorgánicas.

No considera dentro de la norma aquellos HRF cuya distribución y/o orientación de las fibras sea forzada o aquellos con dosificación en fibras superior al 1.5% en volumen.

Según el ACI 116R-00, el HRF es una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas aleatoriamente distribuidas. Las fibras pueden ser naturales o artificiales según su naturaleza y tienen como fin reforzar la masa del hormigón incrementando la resistencia a la tracción, disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos por adherencia de las fibras. Por otro lado, la adición de fibras disminuye los efectos de la retracción por fraguado y aumenta la resistencia al impacto y a la fatiga.

Las fibras se han utilizado como refuerzo desde la antigüedad. Históricamente, los pelos de caballo se utilizaban en el mortero y la paja en ladrillos de barro. A principios de 1900, las fibras de asbesto (amianto) se utilizaban en el hormigón, y, en la década de 1950 surge el concepto de materiales compuestos y el hormigón reforzado con fibras fue uno de los temas de interés.

La primera patente de hormigón reforzado con elementos metálicos se realizó en California en 1874 por (A. Berard). Consistía en una piedra artificial que utilizaba acero granular procedente de desechos para el refuerzo del hormigón. A partir de ese momento han aparecido numerosas patentes.

En 1911 Graham, utilizó por primera vez estas fibras para incrementar la resistencia y estabilidad del hormigón armado convencional. Cabe destacar la patente de G. Martin en 1927, en California en cual, describe la adición de alambres de acero rizados en el hormigón empleado en tuberías.

A partir de los años 50 se realizan numerosos trabajos de investigación sobre hormigones reforzados con fibras de acero (las fibras metálicas son fundamentalmente de acero en sus variantes de bajo o medio contenido en carbono, acero inoxidable y de acero galvanizado). Entre

los estudios realizados cabe destacar los de Romualdi, Batson y Mandel en 1963.[4] y [5].

No obstante, debemos destacar que las fibras metálicas han tenido una mayor presencia a lo largo de los años como adición a materiales de construcción.

El efecto beneficioso de las fibras en el incremento de ductilidad del hormigón sometido a flexión, ha sido ampliamente estudiado en los últimos años (Carmona et al., 2008). En la actualidad, de entre las diversas aplicaciones de este hormigón, la de construcción de pavimentos y revestimientos de túneles con hormigón reforzado con fibras de acero han tenido gran éxito.

Tanto las propiedades mecánicas como durables de un material cementicio, dependen, en gran medida, de la cantidad de silicatos de calcio hidratados o geles hidratados (CSH), en la estructura de la matriz de la pasta de cemento, y de la interfaz árido-pasta (ITZ). Para mejorar dichas propiedades se utilizan, desde hace mucho tiempo, diferentes adiciones en las mezclas (cenizas volantes, humo de sílice y escorias de alto horno). El auge de la nanotecnología en las últimas dos décadas, atrajo considerable interés científico de la industria de la construcción, debido al alto potencial en la utilización de nano partículas en materiales cementicios. Estos permiten una reingeniería de los productos existentes y el diseño de nuevos materiales de altas prestaciones [3].

El caso particular de la adición de óxido de silicio de tamaño nanométrico, o nano sílice (nSi) ha despertado un creciente interés por su conocida actividad puzolánica, que es mayor que la del humo de sílice debido a su mayor superficie específica. La nSi puede reaccionar con el hidróxido de calcio o portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), produciendo una mayor cantidad de CSH y por tanto mejorando su resistencia mecánica a edades tempranas [4-8], además de densificar la matriz. Así, el tamaño y cantidad de cristales de portlandita se ven significativamente disminuidos, agrupándose en los poros pequeños de la pasta cerrando los mismos. Como consecuencia hay una reducción del tamaño de poros y un refinamiento en la estructura porosa, resultando un hormigón más compacto y por tanto mejorando las propiedades durables del hormigón.

Son varios los autores que han estudiado la influencia de nSi y nSi con cenizas volantes o con escorias de alto horno en hormigones convencionales [7-8] y en hormigones autocompactantes [9-10]. En todos los casos, la adición de nano sílice se utiliza con un coeficiente de eficacia 1, obteniendo mejoras en la resistencia a compresión y en la permeabilidad al agua. Sin embargo, son muy pocos los trabajos en los que se estudia la influencia de la nSi en las propiedades durables de hormigones autocompactantes [10].

Una de las propiedades que definen la durabilidad de un hormigón es la penetración de los iones cloruros. Aunque la presencia de estos iones dentro del hormigón no lo debilitan, si pueden despasivar las armaduras y producir su corrosión. El principal proceso de transporte

natural de estos iones en el interior de un hormigón es el de difusión. Sin embargo, en condiciones de laboratorio se puede evaluar la penetración de cloruros mediante ensayos acelerados de migración. Distintos autores han establecidos las relaciones de equivalencia entre los coeficientes de migración y difusión [11]. Actualmente y con el fin de reducir la complejidad de los ensayos, está siendo utilizada la resistividad eléctrica para evaluar la resistencia a la penetración de agresivos [12].

El objetivo de este trabajo es estudiar las características en estado fresco y endurecido de tres mezclas de hormigón autocompactante con 0%, 2,5% y 5% de adición de nSi con el fin de determinar la influencia de estas en las propiedades de autocompactabilidad, resistencia a compresión, porosidad y distribución porosa, contenido de portlandita, así como en la penetración de cloruros.

La nano sílice está compuesta por partículas esféricas de tamaño nanométrico, que tienen la misma composición química que la micro sílice, por tanto, su compuesto mayoritario lo es SiO<sub>2</sub>, que a su vez posee propiedades puzolánicas. La principal diferencia entre la nano sílice y la micro sílice es su tamaño.

Las nanopartículas reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, ocasionando que se produzcan el gel C-S-H que mejora las propiedades resistentes. A diferencia del Gel C-S-H de origen cemento, el de origen nano sílice posee una baja densidad de defectos cristalinos, lo que posibilita según las teorías de cristalización que crezcan nuevas cantidades de gel C-S-H sobre este también con una baja densidad de defectos y, por ende, de propiedades mecánicas óptimas. Al reaccionar provoca una disminución de tamaño de poros, lo que implica menos porosidad y una menor permeabilidad. Esto se puede traducir como una mejora a la propiedad de durabilidad de un hormigón.

La nanoalúmina son partículas de escala nanométrica que reaccionan con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación de los aluminatos cálcicos. La velocidad de esta reacción es proporcional a la cantidad de área superficial disponible de la partícula para reaccionar, por tanto, se puede añadir nano alúmina con una alta pureza y finura para mejorar las propiedades del hormigón (Salemi et al, 2013). Las propiedades mecánicas del hormigón como la resistencia a compresión y tracción pueden incrementar. Un aumento en la durabilidad del agua ya que logran disminuir la penetración de cloruro y absorción de agua (Shekari, 2011).

En la revista "Transportation Research Board" en el artículo "Nanotechnology in Concrete Materials" muestra una investigación sobre el efecto de la nano alúmina en las propiedades mecánicas del mortero. Zhenhua et al. 2006 en su investigación encontró que la nano alúmina era muy efectiva para incrementar el módulo de elasticidad de los morteros hasta un 143%. Siendo este incremento para un 5% de nano alúmina con un tamaño de partícula aproximado de 150 nm. Para la resistencia a compresión los resultados obtenidos no estaban muy

claro cual fue el efecto. Se cree que la nano alúmina durante el proceso de la hidratación del cemento, esta rellena los poros entre la interfase pasta-arena, creando una zona de transición más densa con menos porosidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ENSAYOS PARA HORMIGÓN CONVENCIONAL

Se realizó la campaña experimental para obtener datos y entender el comportamiento del Hormigón convencional con la adición de nano sílice, nano alúmina y un porcentaje de fibras de acero. En esta campaña experimental, se realizaron tres amasadas de 70 litros de hormigón.

**Tabla 1. Nomenclatura de las amasadas realizadas**

| Descripción                                                                                                    | Nomenclatura                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Hormigón convencional con 2% de adición de nano sílice y nano alúmina.                                         | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                                  |
| Hormigón convencional con 2% de adición de nano sílice, nano alúmina y 0.25 % (en volumen) de Fibras de acero. | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.25%(20kg/m <sup>3</sup> ) |
| Hormigón convencional con 2% de adición de nano sílice, nano alúmina y 0.51 % (en volumen) de Fibras de acero. | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m <sup>3</sup> ) |

### Cemento. -

El cemento utilizado ha sido del tipo CEM I 52.5 R/SR de Lafarge, las respectivas propiedades físicas, químicas y mecánicas se recogen en la tabla.

**Tabla 2. Propiedades físicas, químicas, mecánicas del cemento**

| Propiedades del cemento                            | Especificaciones<br>UNE 80303-1:2001 y RC-08 |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <i>Composición en masa</i>                         |                                              |
| Clínker                                            | 95 - 100 %                                   |
| Componentes minoritarios                           | 0 - 5 %                                      |
| <i>Exigencia químicas</i>                          |                                              |
| Perdida por calcinación                            | ≤ 5.0 %                                      |
| Residuo insoluble                                  | ≤ 5.0 %                                      |
| Sulfato                                            | ≤ 4.0 %                                      |
| Cloruros                                           | ≤ 0.10 %                                     |
| C <sub>3</sub> A (del clínker)                     | ≤ 5.0 %                                      |
| C <sub>3</sub> A + C <sub>4</sub> AF (del clínker) | ≤ 22.0 %                                     |
| <i>Exigencia mecánicas</i>                         |                                              |
| Resistencia a 2 días                               | 30 N/mm <sup>2</sup>                         |
| Resistencia a 28 días                              | 52.5 N/mm <sup>2</sup>                       |
| <i>Exigencias físicas</i>                          |                                              |
| Inicio de fraguado                                 | ≥ 45 min                                     |
| Expansión (Le Chatelier)                           | ≤ 10 mm                                      |

Especificaciones: Cemento gama especial Lafarge, España.

### Áridos. -

Los áridos empleados han sido tanto arena de río como grava rodada. El tamaño máximo de árido grueso se ha fijado en 12 mm. La disponibilidad de este árido para la preparación de todas las amasadas justifica esta decisión



de diseño, aunque la Instrucción EHE-08 [1], permite usar hasta un tamaño máximo de 25 mm.

La Japan society of civil Engineers, plantea que el valor óptimo del tamaño máximo del árido sea inferior a la mitad de la longitud de la fibra. Los tamaños máximos del árido mayores a 20 mm no son recomendables, aunque algunos estudios se han empleado áridos de hasta 38 mm con resultados satisfactorios (ACI 544.3R-08, 2008).

#### Fibras de Acero. -

**Tabla 3. Propiedades de la fibra Dramix RC-65/35-BN**

| Propiedades                                 | Dramix RC-65/35-BN |
|---------------------------------------------|--------------------|
| Longitud (mm)                               | 35                 |
| Diámetro (mm)                               | 0.55               |
| Esbeltez                                    | 64                 |
| Fibras/kg                                   | 14500              |
| Densidad (kr/m <sup>3</sup> )               | 7850               |
| Resistencia a tracción (N/mm <sup>2</sup> ) | 1100               |
| Contenido de Carbono                        | Bajo               |
| (Según EN 10016-2-C9D)                      |                    |

#### Superplastificante. -

Para la elaboración de las tres mezclas de hormigón se ha utilizado el aditivo superplastificante "Sika Viscocrete 5720".

**Tabla 4. Propiedades físicas/químicas Sika Viscocrete 5720**

|                                | Sika viscocrete 5720                      |
|--------------------------------|-------------------------------------------|
| Tipo                           | Policarboxilato modificado en base acuosa |
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1.09                                      |
| Contenido de Sólidos (%)       | Aprox. 36                                 |
| PH (%)                         | Aprox. 4                                  |
| Base                           | Reductor de agua                          |

#### Nano Sílice. -

La nano sílice utilizada como adición corresponde a la marca Levasil 200/40%, la cual se presenta como dispersión acuosa.

**Tabla 5. Propiedades nano sílice Levasil**

| Propiedades                          | Nano sílice Levasil 200/40 |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )       | 1.295                      |
| pH 20°C                              | 10.3                       |
| Viscosidad (mPa.s)                   | 9.21                       |
| Riqueza (%)                          | 40.54                      |
| Área superficial (m <sup>2</sup> /g) | 205                        |

#### Nano Alúmina. -

La nano alúmina utilizada como adición corresponde a la marca Vicar S.A.

**Tabla 6. Propiedades nano alúmina.**

| Propiedades                                     | Nano alúmina Sub micronica |
|-------------------------------------------------|----------------------------|
| Área superficial Específica (m <sup>2</sup> /g) | 7 - 8                      |
| Tamaño de la Partícula                          |                            |
| D10% (μm)                                       | 0.26                       |
| D50% (μm)                                       | 0.36                       |
| D90% (μm)                                       | 0.55                       |
| Análisis químico                                |                            |
| Si O <sub>2</sub> (%)                           | 0.05                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)              | 99.70                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)              | 0.03                       |
| CaO (%)                                         | 0.03                       |
| MgO (%)                                         | 0.08                       |
| Na <sub>2</sub> O (%)                           | 0.09                       |

#### Dosificación. -

Para la dosificación, se prepararon y ensayaron tres mezclas de hormigón. Se empleo nano sílice y nano alúmina como adición (dosificada en peso del cemento), no como sustituto del cemento. Además, se incorporaron fibras de acero en dos amasadas.

Una mezcla con nano sílice (2% del peso del cemento) y nano alúmina (2% del peso del cemento) la que representa la mezcla de control. Dos mezclas con nano adiciones y la incorporación de fibras de acero de 20 kg/m<sup>3</sup> (0.25% en volumen de la mezcla) y 40 kg/m<sup>3</sup> (0.51% en volumen de la mezcla) respectivamente.

En todas las mezclas se han mantenido constantes tanto el contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup> como la relación agua/cemento. El contenido de áridos fue fijo en todas las mezclas.

**Tabla 7. Dosificación de Hormigones (kg/m<sup>3</sup>).**

| Componente         | Descripción          | Designación de la mezcla |                   |                   |
|--------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
|                    |                      | H+nAd                    | H+nA-d+F.A[0.256] | H+nA-d+F.A[0.512] |
| Cemento            | CEM I 52.5 R/SR      | 400                      | 400               | 400               |
| Relación (a/c) *   |                      | 0.4                      | 0.4               | 0.4               |
| Nano sílice        |                      | 8<br>(2%)                | 8<br>(2%)         | 8<br>(2%)         |
| Fibra de Acero     | Dramix RC-65/35-BN   |                          | 20<br>(0.256%)    | 40<br>(0.512%)    |
| Nano Alúmina       |                      | 8<br>(2%)                | 8<br>(2%)         | 8<br>(2%)         |
| Agua               |                      | 160                      | 160               | 160               |
| Áridos             | Arena                | 650                      | 650               | 650               |
|                    | Grava 6/12           | 1200                     | 1200              | 1200              |
| Superplastificante | Sika Viscocrete 5720 | 4<br>(1%)                | 6<br>(1.5%)       | 8<br>(2%)         |

(\*) Relación a/c: Relación agua/cemento



## CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES EN ESTADO FRESCO

El ensayo del cono de abrams se encuentra enmarcado bajo la norma UNE-EN 12350-2:2006 (Ensayos de hormigón fresco Parte 2 Ensayo de asentamiento).

Los resultados obtenidos en el cono de Abrams para cada una de las muestras son las siguientes:

**Tabla 8. Tipo de consistencia y asentamiento.**

| Ensayo                                                       | Asentamiento (cm) | Tipo de Consistencia |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|
| H (nSi)-2.0%; (nAl)-2.0%                                     | 6                 | Blanda               |
| H (nSi)-2.0%; (nAl)-2.0%; F.A.-0.25% (20 kg/m <sup>3</sup> ) | 8                 | Blanda               |
| H (nSi)-2.0%; (nAl)-2.0%; F.A.-0.51% (40 kg/m <sup>3</sup> ) | 6                 | Blanda               |

## CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES EN ESTADO ENDURECIDO

En este apartado se describe los ensayos del hormigón con nano adiciones y fibras de acero en estado endurecido. La siguiente tabla indica el tipo de ensayo realizado y su respectiva normativa.

**Tabla 9. Ensayos realizados y normativas**

| Ensayos                          | Norma                 |
|----------------------------------|-----------------------|
| Resistencia a Compresión         | UNE EN 12390-3 (2009) |
| Módulo de Elasticidad y Poisson  | UNE 83316             |
| Tracción Indirecta (brasileño)   | UNE EN 12390-6        |
| Rotura por Flexotracción         | UNE 83509 (2004)      |
| Penetración de Agua bajo presión | UNE EN 12390-8        |
| Índice de tenacidad              | UNE 83510 (2004)      |

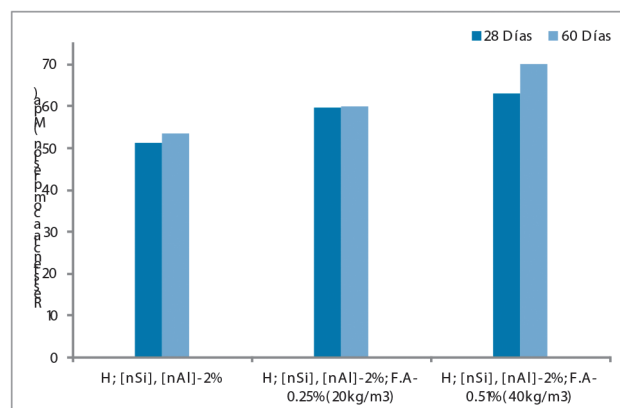
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ENSAYO RESISTENCIA A COMPRESIÓN

A continuación, se recogen los resultados del ensayo de resistencia a compresión en probetas cilíndrica a 28 y 60 días. También se representa de forma gráfica la cual muestra la evolución.

**Tabla 10. Resultado ensayo resistencia a compresión probetas cilíndricas.**

| Hormigón                                                  | R. Compresión 28 días (MPa) | R. Compresión 60 días (MPa) |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| H[nSi]-2.0%; [nAl]-2.0%                                   | 51.3                        | 53.6                        |
| H[nSi]-2.0%; [nAl]-2.0%; F.A.-0.25%(20kg/m <sup>3</sup> ) | 59.6                        | 60.0                        |
| H[nSi]-2.0%; [nAl]-2.0%; F.A.-0.51%(40kg/m <sup>3</sup> ) | 63.0                        | 69.9                        |



**Figura 1. Resistencia a compresión probeta cilíndrica 28 y 60 días**

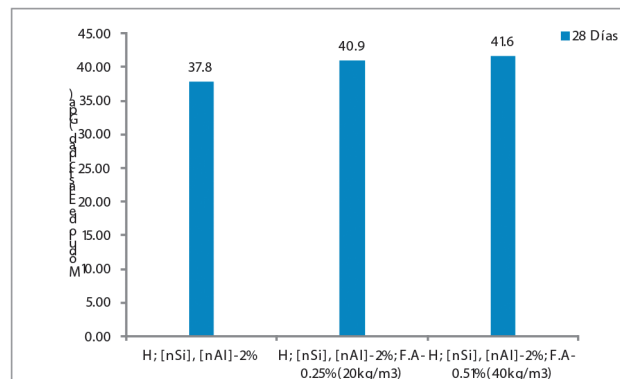
De los resultados con probetas cilíndricas se puede observar en el caso del Hormigón convencional con nano adiciones, un leve incremento de 4% de 28 a 60 días; por otra parte, en el hormigón con nano adiciones y con fibras (20 kg/m<sup>3</sup>) no se notó un incremento significativo a diferencia del hormigón reforzado con mayor cantidad de fibras de acero (40 kg/m<sup>3</sup>), en donde este obtuvo un incremento de 9%.

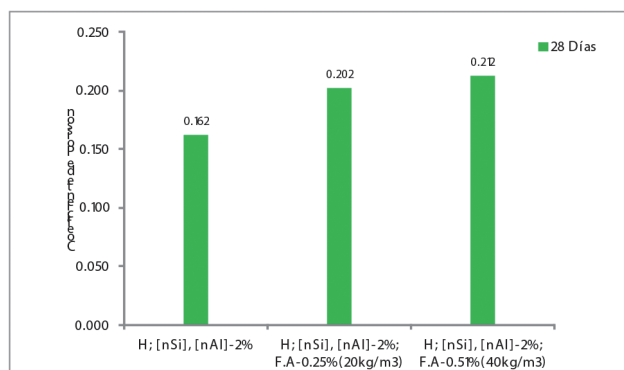
### ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON

Los resultados del ensayo de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, obtenidos bajo la normativa UNE 83316, son los que se recogen en la tabla N°11. se muestra el resultado del valor promedio de los hormigones ensayados.

**Tabla 11. Resultado coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad**

| Hormigón                                                  | Coefficiente de Poisson | Módulo de Elasticidad (GPa) |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| H[nSi]-2.0%; [nAl]-2.0%                                   | 0.162                   | 37.87                       |
| H[nSi]-2.0%; [nAl]-2.0%; F.A.-0.25%(20kg/m <sup>3</sup> ) | 0.202                   | 40.90                       |
| H[nSi]-2.0%; [nAl]-2.0%; F.A.-0.51%(40kg/m <sup>3</sup> ) | 0.212                   | 41.63                       |



**Figura 2. Módulo de Elasticidad**

**Figura 3. Módulo de Poisson**

La adición de fibras con bajas dosificaciones no incrementa o incrementan muy poco en el parámetro de módulo de elasticidad. Su efecto es más significativo cuando se utilizan fibras de elevados módulos y mayores proporciones de fibra como 2% en volumen. La escasa eficacia en el incremento de estas propiedades se debe, a su distribución y orientaciones aleatorias, en relación con la orientación de los esfuerzos. Por lo tanto, es importante conseguir, durante el proceso de fabricación una distribución homogénea de las fibras dentro de la matriz.

### ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE AGUA BAJO PRESIÓN

El ensayo se realizó bajo la norma UNE EN 12390-8. De lo cual nos sirvió para obtener el área y la profundidad máxima de penetración.

**Tabla 12. Resultados Profundidad de Penetración de agua bajo presión**

|   | Probeta                  | Penetración área (mm²) |              |          | Profundidad media de penetración (mm) | Profundidad máxima de penetración (mm) |
|---|--------------------------|------------------------|--------------|----------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|   |                          | Cara Izquierda         | Cara Derecha | Promedio |                                       |                                        |
| 1 | H+nA (control)           | 1540.8                 | 1485.0       | 1512.9   | 10.0                                  | 14.3                                   |
| 2 | H+nA (control)           | 2293.0                 | 2070.5       | 2181.7   | 14.5                                  | 17.0                                   |
|   | media                    |                        |              |          | 12.2                                  | 15.6                                   |
| 1 | H+nA+F. Acero (20 kg/m³) | 2655.4                 | 2397.2       | 2526.3   | 16.8                                  | 22.2                                   |
| 2 | H+nA+F. Acero (20 kg/m³) | 3142.2                 | 3129.0       | 3135.6   | 20.9                                  | 40.2                                   |
|   | media                    |                        |              |          | 18.8                                  | 30.0                                   |
| 1 | H+nA+F. Acero (40 kg/m³) | 1828.8                 | 2067.3       | 1948.0   | 12.9                                  | 21.1                                   |
| 2 | H+nA+F. Acero (40 kg/m³) | 941.6                  | 1215.9       | 1078.7   | 7.1                                   | 17.1                                   |
|   | media                    |                        |              |          | 10.0                                  | 19.1                                   |

Por lo tanto, los ensayos de agua bajo presión realizados en los diferentes amasados cumplen con los parámetros para hormigones en masa o armados, así como también para hormigones cuyo fin son los elementos pretensados tal como la Tabla 13 Impermeabilidad del hormigón EHE. Por otro lado, en los resultados mostrados en la tabla 12, se puede observar un caso especial en la probeta de 20 kg/m³ de fibras de acero en donde la media cumple con dificultades el límite establecido, debido a causas ajenas al control de los ensayos.

**Tabla 13. Impermeabilidad del hormigón, EHE**

| Clase de exposición ambiental                                               | Especificaciones para la profundidad máxima | Especificaciones para la profundidad media |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados) | 50 mm                                       | 30 mm                                      |
| IIIc, Qc, Qb (solo en caso de elementos pretensados)                        | 30 mm                                       | 20 mm                                      |

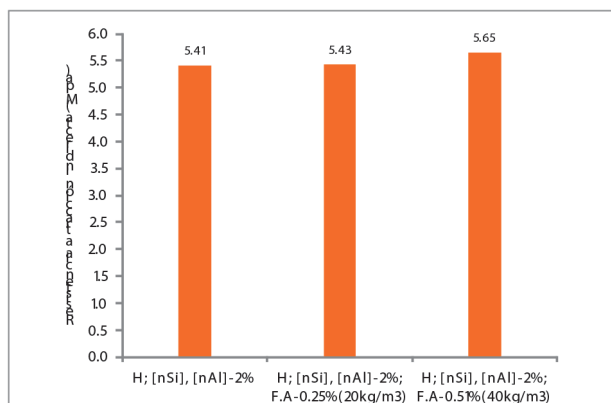
La mayoría de los estudios coinciden en afirmar que la incorporación de nano-SiO<sub>2</sub> produce cambios microestructurales que resultan en un incremento de las resistencias mecánicas, activador de las reacciones puzolánicas, reducción de la permeabilidad y por tanto mejora de las propiedades durables (Zyganitidis et al., 2011; Schmidt et al., 2013).

### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Los resultados del ensayo de tracción indirecta, obtenidos bajo la normativa UNE EN 12390-6 (2010), En la tabla 14, se muestra el resultado del valor promedio de los hormigones ensayados.

**Tabla 14. Resultado promedio del ensayo a tracción indirecta (Ensayo brasileño) para cada tipo de hormigón estudiado**

| Hormigón                                   | Carga de Rotura (KN) | Resistencia a Tracción (MPa) |
|--------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                    | 382.1                | 5.41                         |
| H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;FA-0.25%(20kg/m³) | 383.7                | 5.43                         |
| H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;FA-0.51%(40kg/m³) | 399.4                | 5.65                         |


**Figura 4. Resistencia a tracción indirecta**

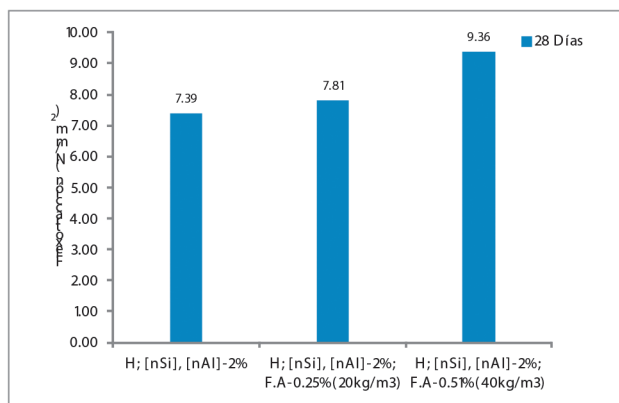
Se puede observar que no existe una diferencia significativa en el aumento de la resistencia a tracción indirecta del hormigón con nano adiciones en comparación con el hormigón con nano adiciones y fibras de acero.

### ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN

Los resultados del ensayo, obtenidos bajo la normativa UNE 83509:2004, el ensayo se realizó a los 28 días. En la tabla 15 se muestra el resultado del valor promedio de los hormigones ensayados.

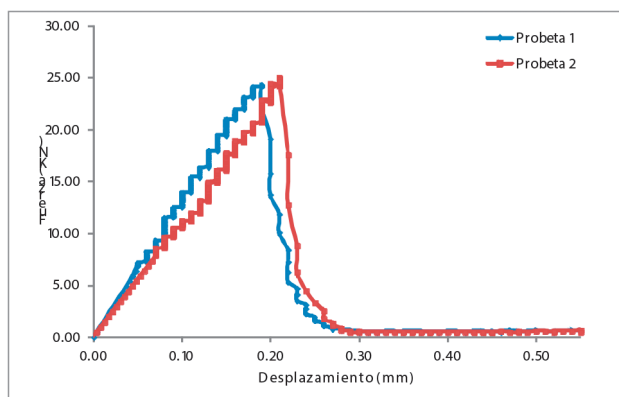
**Tabla 15. Resultados Ensayo a Flexotraccción**

| Hormigón                                  | Tipo de probeta | Carga de Rotura máx. (KN) | Tensión por Flexotraccción (N/mm²) |
|-------------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|
| H[nSi]-2.0%;[nAl]-2.0%                    | Prismática      | 24.65                     | 7.39                               |
| H[nSi]-2.0%;[nAl]-2.0%;F.A-0.25%(20kg/m³) | Prismática      | 26.02                     | 7.81                               |
| H[nSi]-2.0%;[nAl]-2.0%;F.A-0.51%(40kg/m³) | Prismática      | 31.21                     | 9.36                               |



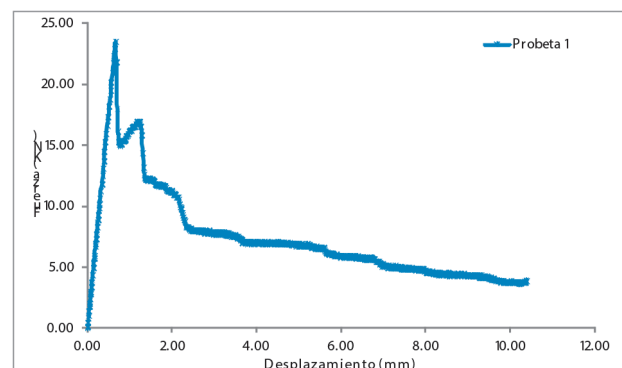
**Figura 5. Resultado ensayo a flexotraccción**

Se puede observar que no existe una diferencia notable entre el hormigón con nano adiciones y el otro con fibras (figura 4.12), lo que nos indica que la proporción de fibras de acero de 20 kg/m³ incorporada no es suficiente para aumentar la tensión a flexotraccción, pero en cuanto a la tenacidad el aumento es poco notorio.



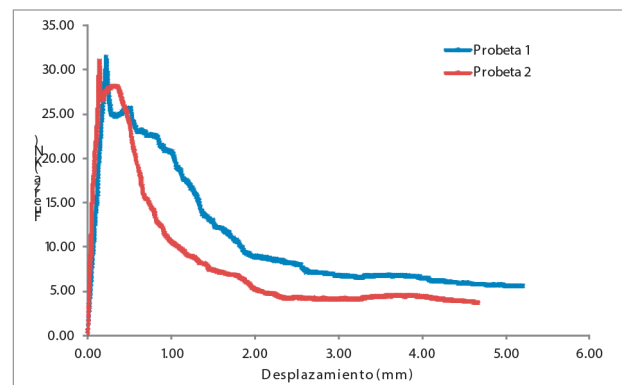
**Figura 6. Ensayo a Flexotraccción en H[nSi][nAl].**

Como se puede observar en la figura 5, la relación tensión deformación es prácticamente lineal hasta que se llega a la primera fisura donde existe una pérdida de carga causada por la pérdida de cohesión. Verificando lo que nos indica Maya L.; también existe una tenacidad muy baja.



**Figura 7. Ensayo a Flexotraccción en H[nSi][nAl] F.A (20-kg/m³)**

La adición de una proporción de fibras de acero activa un comportamiento dúctil, se forman microgrietas que conectadas entre sí forman grietas más grandes, además de aumentar la carga máxima. Las fibras sirven de puente entre ambas caras de la superficie de fractura, lo cual significa una mejora de la capacidad de soportar la carga después de rebasado el pico máximo (Post fisura) y un aumento de la tenacidad.



**Figura 8. Ensayo a Flexotraccción en H[nSi][nAl] F.A (40-kg/m³)**

Una vez alcanzada su límite elástico y producido la primera fractura, la acción de las fibras realiza un cocido de los lados de las fracturas que controla la fisuración moderando y retrasando su crecimiento. Como vemos en la figura 6.

Los Hormigones con nano adiciones y fibras de acero de 20 y 40 kg/m³ mostraron aumentos en la carga pico de 5% y 21% respectivamente en comparación con el hormigón de referencia.

La norma ASTM indica que, si debemos tomar en cuenta el efecto que produce la compactación en los parámetros de la tenacidad y resistencia a flexotraccción, debido a que varía para una misma probeta compactada



mediante vibración interna o externa. El efecto de la vibración externa provoca un alineamiento de las fibras según planos paralelos a la superficie de vibrado mientras que este efecto no se produce en la vibración interna. En este proyecto se hizo la compactación con vibración externa mediante una mesa vibrante.

## DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD E ÍNDICE DE TENACIDAD

La tenacidad e índice de tenacidad está enmarcada en la norma UNE 83510, y el ensayo ASTM C 1018-98. Los índices de tenacidad y los factores de resistencia residual reflejan el comportamiento del hormigón con fibras bajo una carga estática a flexión.

La tenacidad es prácticamente cuantificada como el área bajo la curva – fecha, los valores de la tenacidad dependen del contenido de fibras como la esbeltez.

**Tabla 16. Resultados Tenacidad**

|   | Hormigón                                    | Tenacidad (N m) |       |       |       |
|---|---------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|
|   |                                             | 1 mm            | 2 mm  | 3 mm  | 4 mm  |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                     | 0.33*           | -     | -     | -     |
| 2 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                     | 0.56*           | -     | -     | -     |
|   | media                                       | 0.45*           | -     | -     | -     |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.25%(20kg/m³) | 13.13           | 26.40 | 35.06 | 42.45 |
|   | media                                       | 13.13           | 26.40 | 35.06 | 42.45 |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m³) | 21.96           | 35.52 | 43.38 | 50.08 |
| 2 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m³) | 19.76           | 27.52 | 31.90 | 36.26 |
|   | media                                       | 20.86           | 31.52 | 37.64 | 43.17 |

Nota. No fue posible obtener más índices de tenacidad.

(\*) menos de 1 mm

Los índices de tenacidad y los factores de resistencia dependen de la resistencia a compresión del hormigón, dimensiones de la viga (probeta ensayada), de la cantidad de fibra adicionada, del tipo de fibra y su distribución dentro de la masa. [40]

**Tabla 17. Resultados Índice de tenacidad**

|   | Hormigón                                    | Índices de tenacidad (I) |                 |                 |                 |
|---|---------------------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|   |                                             | I <sub>5</sub>           | I <sub>10</sub> | I <sub>20</sub> | I <sub>30</sub> |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                     | 1.30                     | -               | -               | -               |
| 2 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                     | 1.14                     | -               | -               | -               |
|   | media                                       | 1.22                     | -               | -               | -               |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.25%(20kg/m³) | 3.38                     | 5.15            | 7.88            | 9.76            |
|   | media                                       | 3.38                     | 5.15            | 7.88            | 9.76            |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m³) | 4.16                     | 7.44            | 10.98           | 13.25           |
| 2 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m³) | 4.37                     | 7.37            | 10.43           | 12.33           |
|   | media                                       | 4.26                     | 7.41            | 10.71           | 12.79           |

Los factores de resistencia residual tabla 18, nos indican por ejemplo R<sub>5,10</sub> y R<sub>10,20</sub> representan el nivel medio de la resistencia que conserva el material después de producirse la primera fractura, para los intervalos de

deflexión 5.5δ y 10.5δ, respectivamente, expresada en porcentaje de la carga en el momento de la primera fractura, siendo δ la deformación al producirse la primera fisura.

También nos recomiendan como ensayo optativo, el ensayo a flexión japonés JCI-SF4 para obtener los parámetros f<sub>e,3</sub> y R<sub>e,3</sub>, como características de la tenacidad del material. Estos parámetros permiten también comparar la tenacidad de diferentes compuestos cementíceos.

**Tabla 18. Resultados Factores de resistencia residual.**

|   | Hormigón                                    | Factores de resistencia residual (R%) |                    |                    |
|---|---------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|
|   |                                             | R <sub>5,10</sub>                     | R <sub>10,20</sub> | R <sub>20,30</sub> |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                     | -                                     | -                  | -                  |
| 2 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0%                     | -                                     | -                  | -                  |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.25%(20kg/m³) | 35.4                                  | 27.4               | 18.7               |
|   | media                                       | 35.4                                  | 27.4               | 18.7               |
| 1 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m³) | 65.4                                  | 35.4               | 22.7               |
| 2 | H[nSi]-2.0% ;[nAl]-2.0% ;F.A-0.51%(40kg/m³) | 60.0                                  | 30.6               | 19.0               |
|   | media                                       | 62.7                                  | 33.0               | 20.9               |

Es preciso proponer el estudio de Hormigones con otros tipos de fibras y nano adiciones como las fibras de carbono y el nanohierro. Por lo tanto comprobar los beneficios que estas llevan.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

La adición de nano partículas mejora significativamente la resistencia del material a la penetración de cloruros, si bien la magnitud de la variación depende en función del parámetro evaluado.

Con respecto a la consistencia de los hormigones con nano adiciones y fibras de acero es necesaria la utilización de superplastificantes, debido a que reduce la trabajabilidad del mismo. La cantidad de superplastificante se va incrementando al añadir fibras de acero.

La incorporación de nano sílice y nano alúmina en la fabricación de hormigones generan cambios microestructurales en la matriz mejorando sus prestaciones.

La incorporación de nano adiciones mejora el comportamiento de los hormigones convencionales frente a la penetración de agua. Desde el punto de vista comparativo, el hormigón convencional con nano adiciones, ha mostrado un comportamiento ante la penetración de agua bajo presión mejor que el del hormigón al incorporar fibras de acero.

Cuando se añadió un mayor número de fibras al hormigón con nanoadiciones, se produjo una mejora en la tenacidad, ya que esta depende de la cantidad de fibras que se encuentren en la zona donde se provoca la primera fisura.

Algo que podemos destacar en los ensayos de flexotracción, es la diferencia de resistencia entre el hormigón con solo nano adiciones ante los hormigones con nanoadiciones y fibras de acero (20 kg/m<sup>3</sup> y 40 kg/m<sup>3</sup> respectivamente); se pudo observar un incremento progresivo de la resistencia a medida que se aumentaba la cuantía de fibras de acero en las amasadas, alcanzando de esta forma una diferencia de resistencia entre la primera (control) y última amasada (40 kg/m<sup>3</sup>), un valor de 20% entre ambas.

Claramente las nanopartículas están muy recomendadas para hormigones que vayan a estar en ambientes muy agresivos y con ayuda de las fibras de acero se puede obtener elementos estructurales de mucha durabilidad y prestación. Aplicándolos en pavimentos de Hormigón, recubrimientos en túneles, etc.

Las nano adiciones en el campo de la construcción, permitirá la fabricación de nuevos materiales más resistentes su utilización incrementará también el nivel de seguridad de las construcciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Fernández Cánovas Manuel. "Hormigón" 10ª Edición. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid 2013.
- [2]. S.P Shah, G.B Batson. Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications. American Concrete Institute. 1987.
- [3]. EHE (2008). Anejo 14, Recomendaciones para la utilización de Hormigones con Fibras.
- [4]. Fernández Cánovas, M. "Hormigones con fibras: tecnología y propiedades generales". Hormigón y Acero, nº. 228-229, 2º, pp. 167-176.
- [5]. Rodríguez López, F. y Prado Pérez-Seoane, D. "Hormigón con la incorporación de fibras". Revista de Obras Públicas, Octubre 1984, pp. 779-796.
- [6]. Massicotte B. (2000). "Fibre Reinforced Concrete: An structural Perspective", Rilem Proceedings 15, BEFIB.
- [7]. Naaman, A.E. "Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites". Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, November 2003, pp. 242.
- [8]. ACI (1996). State of art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.IR-96. ACI Fannington Hillis, MI.
- [9]. Hannant, D. J (1978). "Fiber Cements and Fiber Concretes", J. Wiley, 215 pp.
- [10]. Revista Cemento Año 6. "Durabilidad de las Estructuras".
- [11]. B. Massicotte (2002). "Mix Disign For SFRC Bridge Deck Construction", Rilem Proceedings 15, BEFIB.
- [12]. Naaman, A.E (2000). "Fibre Reinforcements for Concrete: looking back, looking ahead", Rilem Proceedings 15, BEFIB.
- [13]. Ronald F. Zollo (1996). "Fiber Reinforced Concrete: An overview after 30 years of Development".
- [14]. Rossi, P. (2000), "Ultra-High Performance Fibre Reinforced Contretes (UHPFRC): General visión" BEFIB.
- [15]. Apuntes de Máster de Estructuras, Cimentaciones y Materiales, Hormigones especiales.
- [16]. Cochrane, John T. (2003). "Flexural Creep Behaviour of Fibre Reinforced Concrete under High Temperatures". Máster of Applied Science Dalhouse University, Canada.
- [17]. Y.S 2007, "Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC".
- [18]. ACHE. (2000). "Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero", Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigones don Fibras.
- [19]. G.E 1993. "Propiedades Mecánicas y adherencia de hormigones con fibras de acero contaminados con cloruros". Tesis Doctoral E.T.S. Arquitectura, Valencia.
- [20]. A.E 1999, "Behaviour of Normal and Steel Fibre-Reinforced Concrete Under Impact of small projectiles", Cement and Concrete Research, Vol 29. Pag 1807-1814.)
- [21]. W.Z 2008, "Steel-Starin relationship of relationship of Steel Fibre-Reinforced Concrete Under Dynamic Compression", Construction and Building Materials, vol 22 pag 811-819.
- [22]. M.Y.-A 2009, "Impact resistance of Steel fibrous concrete containg fibres of mixed aspect radio", Construction and building Materials, vol 23.
- [23]. Yazici S. (2007). "Effect of Aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC", Const.
- [24]. Ding. Y. (2000). "Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fibre Reinforced Concrete at Early Age", Construction and building Materials, Vol. 21, pp. 1250-1253.
- [25]. Nemkumar B. (1995). "Concrete Reinforced with Steel Fibres. Part II: toughness Characterization", ACI Materials Journal.
- [26]. B.B 2002. "Failure and Toughness of Steel Fibre Reinforced Concrete Under Tension and shear" UPC.
- [27]. V.M. "Behaviour of Fibre Reinforced High-Strength Concrete Under Direct Shear", ACI journal.
- [28]. D. N. (1975). "Rilem Symposium: Fibre Reinforced Cement and Concrete", Ed. Construction Press.

[29]. Giaccio.G April 1986. "Concrete Reinforced with Collated Steel Fibres", ACI Journal.

[30]. Serna. P. (2008). "Evolution of the Flexural Behaviour of Pre-Cracked SFRC in Marine Environment", Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Application, pp. 595-605.

[31]. Granju J. (2005). "Corrosion of Steel Fibre Reinforced Concrete from the Cracks", Cement and Concrete Research.

[32]. N. D. (2000). "Final report on Durability of steel Fibre Reinforced Concrete", Subask 5.1 durability of SFRC, Brite Euram Project BRPR-CT98-0813.

[33]. O'Neil. E. (September 1999). Durability of Fibre-reinforced concrete Under flexural Stress in a Severe Marine Environment", U.S. Army Engineer Research and Development Center.

[34]. Maya L. "Estudio de las Estructuras Aporticadas Prefabricadas con uniones basadas en hormigones con fibras", Tesis Doctoral ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

#### **NORMATIVAS**

AENOR - UNE 83316 Determinación del módulo de elasticidad en compresión. 1996.

AENOR - UNE 83501 Hormigón con Fibras, toma de muestras de hormigón fresco. 2004.

AENOR - UNE 83504 Hormigón con Fibras, fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio. 2004.

AENOR - UNE 83509 Hormigón con Fibras, rotura por flexotracción. 2004.

AENOR - UNE 83510 Hormigón con Fibras, determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura. 2004.

AENOR - UNE - EN 12390-2 Ensayos de hormigón endurecido, fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. 2009.

AENOR - UNE - EN 12390-3 Ensayos de hormigón endurecido, determinación de la resistencia a compresión de probetas. 2009.

AENOR - UNE - EN 12390-6 Ensayos de hormigón endurecido, resistencia a tracción indirecta de probetas. 2010.

AENOR - UNE - EN 12390-8 Ensayos de hormigón endurecido, profundidad de penetración de agua bajo presión. 2009.

AENOR - UNE - EN 14889-1 Fibras para hormigón, fibras de acero. 2008.