

State of the art in behavior to concrete fatigue

Estado del arte en el comportamiento a la fatiga de hormigones

PEDRO JOSÉ ZEVALLOS TURRIAGA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
p.zevallos@alumnos.upm.es

ADRIANA JIMÉNEZ PÉREZ

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
a.jimenezp@alumnos.upm.es

Although, most researchers and scholars agree on the properties of steel fibers reinforced concrete, as a composite material in comparison to various structural reinforcements, there are different perspectives regarding the behavior of this material subjected to cyclic loads that lead to fatigue. This paper reviews the state of art on the results and findings of several investigators regarding the aforementioned topic. The main objective is to discuss experimental results and models propose by several investigators since the last decade of the XX century until nowadays. Moreover, what the authors of this paper have considered the most important methodologies to perform laboratory tests and various experimental models in order to describe the fatigue response of SFRC. Lastly, recently developed lines of studies are proposed and discussed how are these related to lately developed applications for infrastructure projects.

SFRC, Fatiga, Steel-fiber reinforced concrete, Dynamic loading.

Aunque la mayoría de investigadores coinciden en las buenas propiedades del hormigón armado con fibras de acero, como material compuesto en comparación con diversas armaduras estructurales, existen diferentes perspectivas en cuanto al comportamiento de este material sometido a cargas cíclicas que conducen a la fatiga. Este artículo revisa el estado del arte sobre los resultados y hallazgos de varios investigadores en relación con el tema mencionado. El objetivo principal es discutir los resultados y modelos experimentales propuestos por varios investigadores desde la última década del siglo XX hasta la actualidad. Por otra parte, se analizan las metodologías que los autores de este trabajo han considerado como las más importantes para realizar pruebas de laboratorio y diversos modelos experimentales con el fin de describir la respuesta a la fatiga del SFRC. Por último, se proponen líneas de estudios desarrolladas recientemente y se discute cómo se relacionan con las aplicaciones desarrolladas recientemente para proyectos de infraestructura.

SFRC, Fatiga, Hormigón armado reforzado con fibras, Cargas dinámicas.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC1) es un material compuesto, de base cementicia y reforzado con fibras o filamentos de acero. La adición de fibras de acero al hormigón, aportan características ampliamente investigadas desde mediados del siglo pasado y que hoy en día forman parte del estado del conocimiento. Entre ellas se destacan un incremento en la tenacidad, mejora sustancial en la ductilidad, control y reducción de las fisuras, mejora en la capacidad del hormigón a resistir impacto y abrasión, entre otras. [1]

Las primeras investigaciones establecen que el incremento de una de las propiedades más importantes del hormigón: resistencia a flexión es gracias al acero, pero en este caso la incorporación de las fibras de acero en la matriz del hormigón mejora propiedades adicionales, desde la resistencia al agrietamiento, impacto y al desgaste; este aporte ha permitido el incremento del uso de este material compuesto en todo tipo de estructuras sujetas a condiciones críticas de cargas, muchas de ellas cíclicas.

Por esta razón, devino necesario el análisis del comportamiento del hormigón bajo cargas cíclicas de fatiga.

Zanuy et al [2], describen a este proceso como microfisuración bajo tensiones de tracción originadas como resultado de la heterogeneidad de la microestructura del hormigón, la falla por fatiga encuentra lugar bajo la repetición de cargas.

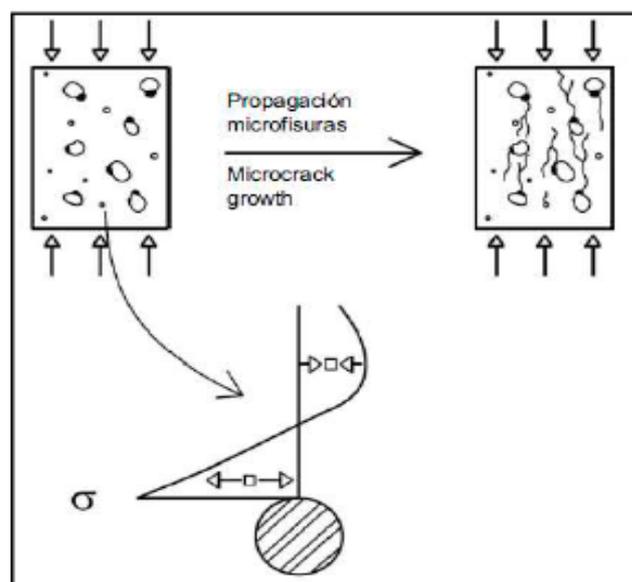


Fig. 1. Microfisuración en el hormigón y sus tensiones transversales [2].

Dicha microfisuración descrita en dos fases por Zanuy, C., Albajar, L., & De la Fuente, P [2], como: “La primera fase se corresponde con la formación de microfisuras en el interfaz árido – pasta y se caracteriza por un deterioro importante de las propiedades del hormigón. Ocupa aproximadamente el 10-15% de la vida a fatiga. La segunda fase describe la propagación estable de las microfisuras y se caracteriza por

una velocidad de crecimiento de la deformación y reducción del módulo constantes. La segunda fase se extiende hasta el 80-90% de la vida a fatiga”

El crecimiento de las microfisuras internas están principalmente asociadas con el incremento de las cargas y de la intensidad del ciclo de carga, se clasifican como se observa en la tabla a continuación:

Ciclos bajos de Fatiga			Ciclos altos de Fatiga				Ciclos super elevados de Fatiga		
1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹
Estructuras sujetas a terremotos			Pavimentos de aeropuertos y puentes		Carreteras y ferrovías de puentes, pavimentos de carreteras		Estructuras de tráfico masivo rápido		Estructuras marítimas

Tabla 1. Clasificación de estructuras sometidas a cargas cíclicas. [3] (traducción por los autores)

La primera clasificación refiere a un menor incremento de carga a niveles de esfuerzos altos, mientras que los ciclos altos de fatiga se caracterizan por un sin número de incrementos de carga en un bajo nivel de esfuerzo a los que pueden estar sujetos diferentes pavimentos de hormigón rígido específicamente. [4] Si bien este tipo de análisis ha surgido de un proceso experimental ensayado en probetas (cilindros, viguetas y cubos) sus investigaciones han determinado proporcionalidades de fibras en el hormigón, dimensiones y comportamientos en cuanto a la disposición de las mismas empleados en diseños futuros de hormigones con fibras.

2. PRIMERAS INVESTIGACIONES

De las primeras probetas ensayadas años 80 y 90, se determinan una serie de características básicas de las fibras necesarias de conocer antes de efectuar su aplicación en diferentes matrices de hormigón, por lo que se establecen dos ecuaciones principales que establecen dos características esenciales del material compuesto hormigón-fibra; Chang et al [1] afirma en sus investigaciones que el Área de superficie/contacto de una fibra viene dado por Eq. (1):

$$Af = 2 \frac{\pi d^2}{4} + \pi dL \quad (1)$$

Donde d es el diámetro de la fibra y L su longitud. [1]

Mientras que el número de fibras por cada m³ de hormigón viene dado por la ecuación Eq. (2):

$$N = \frac{p/100}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) * L} \quad (2)$$

De los primeros análisis y ensayos en probetas se ha obtenido un estándar de longitud de fibras desde los 36, 48 y 60mm de longitud para hormigones con áridos de hasta 19mm de tamaño y cementos Portland tipo I. [4] Años después y a partir de múltiples investigaciones realizadas al respecto de esta tecnología de refuerzo, se realizaron análisis de comportamientos más exactos, resultados exitosos determinaron longitudes y nuevas formas de fibras de acero, así como algunas de sus propiedades mecánicas que se ilustran en la tabla a continuación:

Características	Tipos de fibras		
	H	N	C
Forma	gancho	anclaje-uña	rizado
Geometría de la sección transversal	redonda	redonda	redonda
Longitud (L) (mm)	60	54	60
Diámetro (d) (mm)	0.8	1	1
Ratio de esbeltez (L/d)	75	54	60
Peso por fibra (g)	0.23	0.350	0.372
Cantidad fibras por kg	4340	2854	2688
Esfuerzos de tensión (Mpa)	1045	-	-

Tabla 2. Características de los principales tipos de fibras [5] (traducción por los autores)

Desde fibras rectilíneas o perfiladas, rectas, onduladas, de sección circular, rectangular o irregular; dicha forma característica incide en la adherencia con el hormigón aumentando o disminuyendo su resistencia a la tensión como se muestra en la tabla superior.

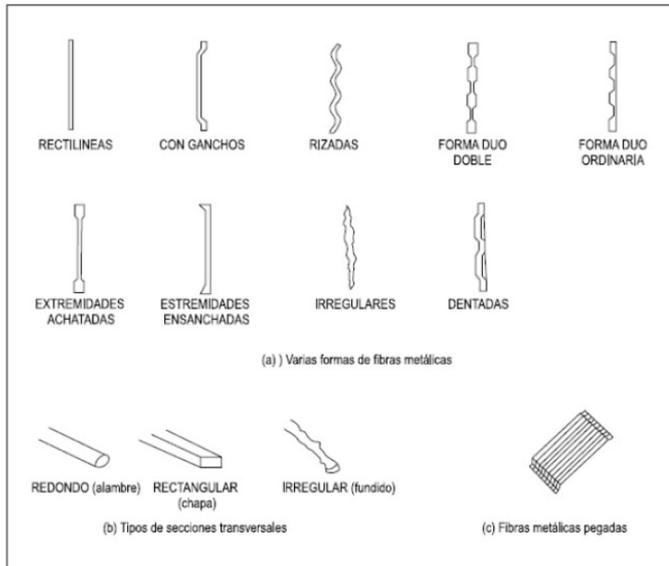


Fig. 2. Sección y Formas de fibras de acero [6].

La variedad de formas y tamaño de estas fibras ha permitido emplearlas para diferentes usos, desde hormigones de alta resistencias, hormigones ligeros, hormigón proyectado y en prefabricados; destacando su aplicabilidad y propiedades mecánicas que le aporta a la matriz del hormigón siendo estas la combinación ideal para solicitaciones especiales de hormigón.

Si bien, los investigadores concuerdan en muchas de las propiedades del material compuesto, como las mencionadas anteriormente; existen diferentes perspectivas en cuanto al comportamiento de dicho material sometido a cargas cíclicas que lleven a la fatiga. El hormigón reforzado con fibras de acero, además de sus beneficios técnicos, es en la actualidad el sistema de refuerzo más utilizado en ciertas aplicaciones, por la rapidez de ejecución y la optimización de recursos que esto supone para el proyecto. Por estas razones, el estudio y modelación del comportamiento a fatiga, deviene muy importante en estructuras reforzadas con SFRC y expuestas a cargas cíclicas a lo largo de su vida útil, como son; carreteras, ferrovías, puertos, puentes, aeropuertos, autopistas y pisos industriales. [7]

3. DIFERENTES APROXIMACIONES AL ESTUDIO DE FATIGA

Durante los últimos años del siglo XX y principios del siglo XXI, se desarrollan múltiples investigaciones con la finalidad de encontrar modelos que puedan describir con mayor precisión el comportamiento a fatiga, así es como múltiples autores [8]

[9] desarrollan investigaciones con diferentes tipos de fibras y contenidos. Chang y otros [1], proponen formulas prácticas en base a curvas S-N*² donde sugieren que a medida que se incrementa el contenido de fibra, también se incrementa la resistencia a la flexión. Adicionalmente, a medida que se incrementa el contenido de fibra y se incrementa la proporción entre el largo de la fibra y el diámetro de la misma (relación de aspecto), se puede observar mayor resistencia del elemento sometido a cargas de cíclicas.

En publicaciones más recientes, Chandrashekar et al [10] aportan datos significativos para mejorar la aproximación a describir el comportamiento a fatiga de hormigones reforzados con fibra de acero. En base a los resultados obtenidos de someter a cargas cíclicas probetas hasta fallar por fatiga, los autores proponen diagramas S-N con sus correspondientes curvas de regresión y correlación estadística que varía entre 0.884 y 0.925. Basados en estas pruebas, llegan a la conclusión que se puede establecer una correlación estadística significativa y más aún, proponen ecuaciones que describen la relación entre el ciclo de fatiga y el nivel de esfuerzo a los que esta sometido una probeta. Se compararon probetas con diferentes cuantías de fibra, en función de esta característica, Chandrashekar et al [10] aseguran que a medida que se incrementa la cantidad de fibra o cuantía de fibra en el hormigón, mejora también las propiedades mecánicas de elemento. Los estudios mencionados, están orientados a pavimentos rígidos de carreteras y vías donde se pueden esperar cargas cíclicas a tan críticas como sea el tráfico previsto. En función de esto, los autores de la investigación concluyen que a partir de la mejora de las propiedades por la inclusión de fibras de acero; se pueden reducir los espesores de pavimentos en al menos 8% comparado con hormigones convencionales. En este sentido, una de las aplicaciones con mayor potencial en cuanto a reducción de costos, tiempo de ejecución y menor impacto ambiental; es justamente el refuerzo de pavimentos rígidos en vías y carreteras. Una de las conclusiones más importantes de esta investigación es que los ciclos de carga son determinantes en cuanto al comportamiento del material se refiere.

Un modelo de simulación de comportamiento a fatiga de SFRC, para altos ciclos de repetición de carga, has sido propuesto por Tang et al [11]. Los autores parten primero de un modelo matemático de simulación de comportamiento a fatiga basado en leyes constitutivas del material compuesto, que luego llevan al campo experimental, obteniendo resultados similares; tanto teóricos como experimentales. De este estudio, podemos encontrar conclusiones que aportan significativamente al conocimiento del material compuesto. La primera conclusión a la que llegan, Tang et al [11] es que, la curva de la envolvente para la relación de deformación por tensión de tracción uniaxial, se formula de acuerdo con la

*2 Curvas S-N (o curvas de Wohler): donde S es amplitud del esfuerzo y N el número de ciclos de esfuerzo para llegar a la fractura. Estos gráficos son una representación de deterioro progresivo del material.

cantidad de fibras (dosificación) y la forma de las fibras utilizadas; más aún, concluyen que la envolvente para SFRC difiere mucho de la del hormigón de similares características, pero sin refuerzo. Por otro lado, complementan la conclusión de su trabajo argumentando que, a partir de la verificación experimental, para elevados ciclos de carga, el daño por fatiga se puede predecir la misma formulación que se utiliza para un concreto sin refuerzo; sin importar cuanto difieran las curvas envolventes anteriormente mencionadas.

Estudios posteriores, amplían la investigación en diferentes tipos de cargas cíclicas y la velocidad de fisuración de elementos de hormigón reforzados con fibra de acero. Zhang et al [12], describen como puede variar la carga última que soporta un elemento que está sometido a ciclos bajos de carga comparado con elevados ciclos de carga, conclusión que puede ser aplicable para estructuras que se prevé sufran temblores durante su vida útil, característica de interés especialmente en zonas sísmicas. Para este estudio, los autores optaron por aplicar seis velocidades de carga diferentes, desde 10-3 mm/s a 103 mm/s. Las conclusiones en base a los resultados que obtuvieron se pueden sintetizar en que la carga pico o carga última que puede resistir un SFRC, es sensible a la velocidad de carga y descarga. Por tanto, el efecto en la carga máxima es menor para un ciclo bajo de carga, mientras que es significativamente mucho mayor el efecto en la carga máxima si sometemos el elemento a un ciclo alto de carga. Otro resultado importante es que en para una situación o sistema de carga prácticamente estática (3.33×10^{-3} mm/s) la velocidad de fisuración permanece casi

constante por el efecto de las fibras de acero y su propiedad de inhibir la propagación de fisuras y el efecto de puente que se desarrolla entre agregados. [12]

Similarmente, Germano et al [13] investigan el efecto de las variaciones de los ciclos de carga en el comportamiento de hormigones reforzados con fibras de acero. Los autores usan probetas con 0.5% y 1% en volumen de dosificación de fibra. En este caso, se mantuvo constante la amplitud del ciclo, mientras se variaba el nivel de carga. Las conclusiones a las que llegaron los autores son variadas y en definitiva distintas de las que proponen autores previamente analizados. La primera conclusión es que una cuantía de 0.5% en volumen de fibra, muestra mejor desempeño que una cuantía de 1%. Los autores argumentan que posiblemente la razón de este resultado es que al existir un mayor número de fibras implica también una mayor discontinuidad en el plano de fractura. Por otro lado, concluyen que los hormigones reforzados con fibras de acero parecen responder efectivamente cuando están sometidos a cargas de ciclo bajo (típicamente relacionados con actividad sísmica) donde generalmente se tienen menos ciclos con niveles superiores de esfuerzos. Adicionalmente concluyen que los SFRC muestran como característica fundamental alta disipación de energía para todos los niveles de carga considerados en el estudio, comparados con hormigones simples. Finalmente, concluyen que sus resultados obtenidos les permiten obtener satisfactoriamente curvas S-N para predecir el desempeño a flexión para cargas cíclicas. A continuación, un esquema del experimento realizado por Germano et al, donde constan los parámetros estudiados.

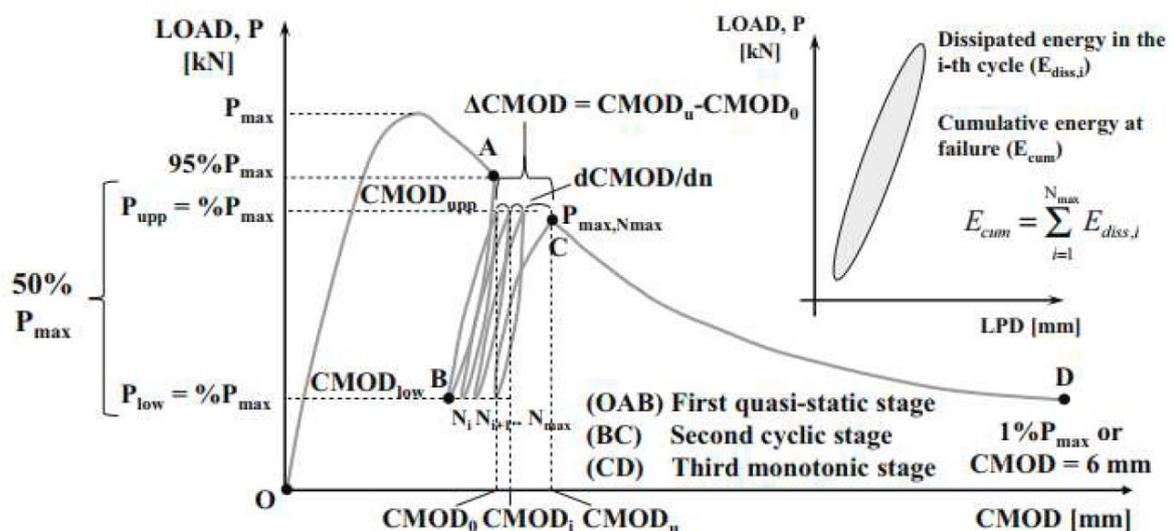


Fig. 3. Esquema de parámetros estudiados para cargas a fatiga [13].

Se han propuesto varios modelos experimentales, si bien similares, pero no generalizables al respecto del comportamiento a fatiga de los SFRC. Es común encontrar diferentes conclusiones para estudios similares. Tarifa et al [14], explican la alta dispersión en los resultados y modelos

experimentales; por la heterogeneidad del material, pero principalmente, a causa de la aleatoria excentricidad de la carga durante la aplicación de cargas cíclicas. Los autores desarrollan una metodología de ensayo con un dispositivo esférico que les permite uniformidad en la aplicación de

carga. Los resultados de sus ensayos demuestran que si bien los valores medios de excentricidad reportados por los ensayos con el dispositivo y sin el dispositivo, no varían significativamente; por otro lado, la desviación estándar es de un orden de magnitud menor en las pruebas realizadas con el dispositivo propuesto. Mas aún, el uso del dispositivo mostró un incremento de 3 y hasta 6 veces el valor promedio de vida del espécimen antes de fallar por fatiga, al mismo tiempo que se redujo significativamente la desviación estándar del número de ciclos para llegar a la falla por fatiga. Por estas razones, aseguran que una indeseada o incontrolada excentricidad en la aplicación de la carga acorta la vida del material compuesto sometido a cargas cíclicas e incrementa la dispersión en los resultados.

Otro grupo de investigadores, Ríos et al [15], aseguran que pueden predecir con un nivel de exactitud alto, el parámetro de fatiga, en base a un modelo probabilístico de dos pasos que a su vez está constituido por investigaciones previas de otros autores, integrando sus respectivos resultados. Esta perspectiva es muy diferente a la expuesta en párrafos anteriores puesto que los autores no realizan sus propios muestreos; por el contrario, desarrollan un modelo matemático de dos pasos para estimar el desempeño a fatiga, a partir de un universo de resultados de múltiples autores. El modelo se basa en el método de máxima verosimilitud, siendo este comúnmente utilizado para estimar parámetros en base a otras observaciones anteriores. Estas estimaciones son realmente una maximización de la probabilidad de ocurrencia y, por tanto, este modelo es posible aplicarlo si se tiene un número de mediciones suficientemente alto para obtener una distribución estadística inicial.

$$PF(N; \sigma_{max}, f, R) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\sigma_{max} \left(\frac{\sigma_0}{2f\Delta\sigma} \right)^a - \sigma_{min0}}{\lambda} N^{\alpha(1-R)} \right]^k \right\} \quad (3)$$

La ecuación 3 [15], representa el modelo estadístico desarrollado por Ríos et al, donde los parámetros 4 parámetros (λ , k , a , α) se obtienen de datos experimentales comparables, esto es para una frecuencia de carga determinada. Los autores concluyen que con el modelo propuesto pueden predecir los parámetros de fatiga tanto para un hormigón sin refuerzo como para un SFRC. Cada uno de los 4 factores o variables del modelo (λ , k , a , α) recogen correspondientemente las características del aporte mecánico de las fibras (λ), la dispersión de los resultados de fatiga por flexión (k), mientras que los factores restantes (a , α) dependen en el tipo de material y la frecuencia de carga respectivamente.

4. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Adicionalmente a la línea de investigación principal, descrita anteriormente, existen otras líneas de investigación de

especial interés que en su mayoría nacen de la necesidad de la industria por nuevas soluciones. Una de estas líneas es la que desarrollan Kaur et al [16], donde analizan la variación del comportamiento a fatiga de hormigones reforzados con fibra de acero, cuando se integra en la mezcla de hormigón otros materiales como puede ser por ejemplo sílica, caliza, entre otros. Para realizar estos estudios, se aplican los modelos y procedimientos de ensayo de especímenes que han sido utilizados por muchos de los investigadores discutidos anteriormente. Kaur et al [16], utilizan la distribución de Weibull y curvas S-N para desarrollar su investigación. La conclusión principal es que se puede alargar la vida de elementos sometidos a cargas cíclicas por efecto de añadir a la formulación del SFRC fracciones pequeñas de cenizas volantes, metacaolín, humo de sílice y polvo de piedra caliza. Adicionalmente, los autores concluyen que estos SFRC de composición especial, se podrían aplicar eficazmente a infraestructuras como son autopistas, carreteras, pistas de aeropuertos y pavimentos en general.

Otras líneas de investigación de especial interés práctico son los hormigones autocompactantes reforzados con fibra de acero y como éstos se comportan a fatiga. Poveda et al [18], analizan el efecto e influencia de la cantidad de fibra y las propiedades mecánicas en el desempeño a fatiga de SFRC autocompactantes. Los resultados de este estudio son consistentes en cuanto a las mejoras en las propiedades mecánicas como en la investigación desarrollada Murali et al [19]. Estos últimos, argumentan que su investigación al respecto de este tema, tiene especial interés y está motivada por las nuevas aplicaciones de SFRC, típicamente relacionadas con hormigones en pavimentos de carreteras, plataformas marítimas sumergidas en aguas profundas y puentes; donde predominan las cargas de fatiga por flexión. Dado el crecimiento de las aplicaciones de hormigón reforzado con fibras de acero, es necesario desarrollar un modelo unificado para predecir el comportamiento a fatiga del mismo. Es de especial interés dado que la confiabilidad estructural comúnmente depende del estado en el que se encuentran los materiales durante su vida útil.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo acelerado de aplicaciones de SFRC para las nuevas infraestructuras, ha dejado abierta la pregunta y consecuente incertidumbre sobre el comportamiento que estas van a tener durante su vida útil o de servicio; puntualmente, aquellos elementos que estarán sometidos a cargas severas y cíclicas, tanto de origen mecánico como natural. En cuanto al desempeño de hormigones reforzados con fibra de acero, parece haber una relación directa entre la dosificación, características geométricas de la fibra y anclaje; con respecto al desempeño ante cargas cíclicas (ya sean estas de ciclo alto o bajo de carga).

Todos los autores concuerdan que en las pruebas realizadas

con SFRC, se evidencia una reducción significativa de fisuras y apertura de las mismas, por tanto, garantizando una mayor integridad física del elemento durante su vida útil. Esta relación permite hoy en día, si bien no cuantificar con precisión, tener la certeza de mejorar el desempeño de hormigones convencionales al incluir fibras de acero en su matriz. Otra característica fundamental que concluyen los investigadores es la capacidad significativamente mejorada de un SFRC de absorber y disipar energía comparada con otros sistemas de refuerzos y hormigones convencionales.

Si bien se evidencia un avance durante los últimos años en cuanto a la caracterización de las propiedades fundamentales de SFRC con respecto a los esfuerzos que producen fatiga, no hay un modelo o formulación ampliamente reconocido y generalizable que defina dicho comportamiento. Posiblemente, la manera de ensayar que más se utiliza en la actualidad, no sea la más apropiada dada la alta dispersión que, en términos generales, presentan los resultados de las investigaciones. Es importante lograr desarrollar un sistema común de ensayos que permita efectivamente comparar los resultados de varios investigadores, al mismo tiempo que retomar investigaciones realizadas previamente y continuar su desarrollo. Por otro lado, hay mucho camino aún por recorrer en cuanto al diseño del modelo estadístico-matemático que sea de aplicación general y que permita aproximar valores de diseño con precisión. En este sentido, es sumamente importante ampliar la cantidad y profundidad de las investigaciones de hormigones reforzados con fibras de acero a fatiga, ya que ésta es una característica o parámetro fundamental de diseño del material compuesto; en especial tomando en cuenta las aplicaciones en las que se utiliza en la actualidad, donde las cargas cíclicas son determinantes para la estructura. Finalmente, los campos nuevos de investigación que se han mencionado en el documento son solamente una selección de los que se han considerado más representativos, sin embargo, la conclusión a la que hemos llegado es que el campo de investigación tiene un enorme potencial de desarrollo. El mercado ofrece nuevos retos y oportunidades para nuevas aplicaciones e innovación con la tecnológica SFRC; en definitiva, lo que en su momento motivó el desarrollo de esta tecnología, hoy parece tan solo una de muchas aplicaciones y el potencial sigue siendo por ahora incalculable.

6. REFERENCIAS

- [1] Chang, D. H., & Chai, W. K. (1995). Flexural fracture and fatigue behavior of steel fiber-reinforced concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 156(1–2), 201–207.
- [2] Zanuy, C., Albajar, L., & De la Fuente, P. (2011). El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural. *Materiales de Construcción*, 61(303), 385–399.
- [3] Lee, M. K., & Barr, B. I. G. (2004). An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 299–305.
- [4] Heeralal, M., Kumar, R., & Rao, Y. V. (2009). Flexural fatigue characteristics of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRRAC). *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 7(1), 19–33. <https://doi.org/10.2298/FUACE0901019H>
- [5] Mailhot, T., Bissonnette, B., Saucier, F., & Pigeon, M. (2001). Flexural fatigue behavior of steel fibre reinforced concrete before and after cracking. *Materials and Structures*, 34(6), 351–359.
- [6] Irías, A. (2013). Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibra o solo fibras.
- [7] Germano, F., & Plizzari, G. A. (2012, September). Fatigue behavior of SFRC under bending. In *Proceedings of the Eighth RILEM Intl. Symp. on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities*, (BEFIB 2012) (pp. 19-21).
- [8] Soroushian, P., & Bayasi, Z. (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 88(2), 129-134.
- [9] Lok, T. S., & Pei, J. S. (1998). Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 86-97.
- [10] Chandrashekar, A., Ravi Shankar, A. U., & Girish, M. G. (2010). Fatigue behaviour of steel fibre reinforced concrete (sfrc) with fly ash. *Highway Research Journal*, 3(1), 1-28.
- [11] Tang, X., An, X., & Maekawa, K. (2014). Behavioral simulation model for sfrc and application to flexural fatigue in tension. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(10), 352-362.
- [12] Zhang, X., Ruiz, G., & Elazim, A. M. A. (2015). Loading rate effect on crack velocities in steel fiberreinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 60-66.
- [13] Germano, F., Tiberti, G., & Plizzari, G. (2016). Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure. *Materials and Structures*, 49(10), 4229-4245.
- [14] Tarifa, M., Ruiz, G., Poveda, E., Zhang, X., Vicente, M. A., & González, D. C. (2018). Effect of uncertainty on load position in the fatigue life of steel-fiber reinforced concrete under compression. *Materials and Structures*, 51(1), 31.
- [15] Ríos, J. D., Cifuentes, H., Yu, R. C., & Ruiz, G. (2017). Probabilistic flexural fatigue in plain and fiber-reinforced concrete. *Materials*, 10(7), 767.
- [16] Kaur, G., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2015). Mean and design fatigue lives of SFRC containing cement-based materials. *Magazine of Concrete Research*, 68(7), 325-338.
- [17] Poveda, E., Ruiz, G., Cifuentes, H., Rena, C. Y., & Zhang, X. (2017). Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC. *International Journal of Fatigue*, 101, 9-17.
- [18] Murali, G., Celestina, J. A. S., Subhashini, N., & Vigneshwari, M. (2017, July). Analysis of Flexural Fatigue Strength of Self Compacting Fibre Reinforced Concrete Beams. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 80, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.