

APLICACIÓN DE UN MODELO PROBABILÍSTICO AL COMPORTAMIENTO EN FATIGA POR FLEXOTRACCIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO

José D. Ríos^{1*}, Héctor Cifuentes¹, Rena C. Yu^{2**}, Gonzalo Ruiz²

¹Grupo de Estructuras, ETS Ingeniería (Universidad de Sevilla)
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla

* E-mail: jdrios@us.es

²ETSI de Caminos, C. y P. (Universidad de Castilla-La Mancha)
Avenida Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real

** E-mail: rena@uclm.es

RESUMEN

En este trabajo se analiza la aplicación de un modelo probabilístico de fallo por fatiga a flexotracción de hormigones reforzados con fibras de acero. Para ello, se ha realizado un exhaustivo estudio bibliográfico de los datos disponibles para este tipo de ensayo y hormigones. El modelo está basado en la caracterización del comportamiento estático del material mediante una distribución de Weibull y ha sido desarrollado previamente para casos de fatiga por compresión. El objetivo principal del trabajo es la validación de la aplicación del modelo probabilístico para hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero, con diferente contenido en volumen y longitudes de fibras, así como estados de carga cíclica. A través de los resultados obtenidos, se estudia el efecto de esos factores en la dispersión estadística a fatiga de hormigones reforzados con fibras así como el análisis de la precisión del modelo probabilístico aplicado.

PALABRAS CLAVE: Modelo probabilístico, fatiga en hormigón, cargas de flexión.

ABSTRACT

In this work, a probabilistic fatigue model is applied to analyse the flexural fatigues tests for steel fiber-reinforced concretes collected from the literature. The model is based on characterizing the static behaviour of material by means of a Weibull distribution and was previously developed for predicting the fatigue life under compressive loading. The objective of this paper is to assess the applicability of this probabilistic model to self-compacting concrete reinforced with steel fibres by varying fiber volume fractions, fibre length and stress level. From the results obtained, it is confirmed that the aforementioned probabilistic model is able to capture the life cycles of flexural fatigue for all the experimental data considered.

KEYWORDS: Probabilistic model, fatigue in concrete, flexural loading.

1. INTRODUCCIÓN

La adición de fibras de acero al hormigón mejora notablemente sus propiedades mecánicas, especialmente frente a esfuerzos de tracción/flexo-tracción, lo que ha generado que sean utilizados en aplicaciones predominantemente reservadas hasta el momento al acero. Así, surge la necesidad de estudiar el comportamiento de estos elementos frente a situaciones habituales en estructuras de acero, como la fatiga [1]. Por otro lado, la aplicación de hormigones de altas

prestaciones conlleva a una mejora de la resistencia a tracción de los mismos y hace que en el estudio del comportamiento frente a esfuerzos de tracción y flexotracción de estos hormigones sea interesante tener en cuenta su contribución frente a sollicitaciones de tracción.

En este trabajo se analiza la aplicación de un modelo probabilístico de fallo a fatiga desarrollado por Saucedo et al [1] a hormigones reforzados con fibras de acero sometidos a cargas cíclicas de flexotracción. Dicho

modelo probabilístico ha sido de aplicación en ensayos de compresión [1] y flexotracción [2] con satisfactorios resultados. El modelo se basa en la caracterización estática del material como una distribución de Weibull y en un modelo de fatiga que tiene en cuenta el efecto de la frecuencia de carga en el comportamiento del material. Una extensa batería de ensayos han sido recopilados de la bibliografía para hormigones reforzados con fibras, con diferentes longitudes de fibras y volúmenes, así como condiciones de carga para la aplicación de dicho modelo.

Los resultados obtenidos muestran una adecuada precisión en la adaptación del modelo probabilístico a los resultados experimentales de fatiga a flexotracción, haciendo de ésta una herramienta útil para el estudio de la fatiga en hormigones reforzados con fibras de acero.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los datos recopilados en este documento pertenecen a un trabajo experimental realizado por Mohammadi y Kaushik [3] para el estudio de la distribución de la vida a fatiga de hormigones en masa y reforzados con fibras de acero con diferente contenido en volumen y tamaño. El contenido de fibras varía en 1%, 1,5% y 2% en volumen, para dos tamaños de longitud de fibras diferente de 25 mm y 50 mm. Para caracterizar el material y definir las condiciones específicas de los ensayos dinámicos se realizaron previamente una batería de ensayos estáticos de flexotracción en tres puntos de probetas de 100×100×500 mm. Los resultados de las resistencias medias estáticas se encuentran en la Tabla 1 para cada tipo de hormigón.

Tabla 1. Valores estáticos de resistencia a flexión

Tipo de Hormigón	Volumen de fibras V _f (%)	resist. media flexión estática (MPa)
sin fibras	0 (DSF)	5.35
con fibras de 50 mm, acero	1 (DF1-50)	7.50
	1.5 (DF1.5-50)	9.44
	2 (DF2-50)	10.72
con fibras de 25 mm, acero	1(DF1-25)	7.16
	1.5 (DF1.5-25)	7.73
	2 (DF2-25)	8.11

En cuanto a los ensayos de fatiga, las probetas eran de iguales dimensiones a las del caso estático, 100×100×500 mm, al igual que el tipo de ensayo, siendo éste de flexión en tres puntos. La relación de tensión, R, se mantuvo

constante en 0.1 para todos los ensayos al igual que la frecuencia de aplicación de la carga, siendo ésta de 20 Hz. Sin embargo, en aras de obtener mayor información del comportamiento a fatiga para diferentes niveles de carga y realizar un posterior ajuste del modelo, se realizaron series de ensayos de carga cíclica para niveles de tensión variables entre S=0.9-0.7.

3. APLICACIÓN DEL MODELO PROBABILÍSTICO

El modelo probabilístico fue desarrollado por Saucedo et al. [1] para el estudio del comportamiento a fatiga por compresión y aplicado por Cifuentes et al. [2] para el estudio de la fatiga por flexotracción. Este modelo tiene en cuenta el efecto del comportamiento estático del material, la frecuencia de carga y la relación de tensiones R. En este estudio se analiza la aplicabilidad de dicho modelo a hormigones reforzados con fibras de acero para una misma frecuencia de carga y relación de tensión, R.

El modelo probabilístico está basado en una ley de distribución de fallo por fatiga que contempla la posibilidad de fallo para un determinado número de ciclos en función de varios factores, principalmente la frecuencia de la carga [1].

En la ecuación (1) se muestra la forma de la función de distribución para el caso de carga estática:

$$PF(\sigma_{f0}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{f0} - \sigma_{min0}}{\lambda} \right)^k \right] \tag{1}$$

para $\sigma_{f0} \geq \sigma_{min0}$

Dicha ecuación muestra la probabilidad de fallo de una probeta para una tensión, σ_{f0} , mayor o igual que un determinado valor para el que no se produce efecto de la carga cíclica, σ_{min0} , obtenido en el ensayo estático. Los parámetros, λ y k , factor de escala y experimental respectivamente, pueden obtenerse mediante ajuste experimental.

Si se considera la aplicación de una carga cíclica a una frecuencia, f , se puede relacionar el nivel tensional del ensayo dinámico con el correspondiente al ensayo estático mediante la ecuación (2) dada en [1]:

$$\frac{f_{cd}}{f_{co}} = \left(\frac{\dot{\sigma}_d}{\dot{\sigma}_0} \right)^\alpha \tag{2}$$

Donde, $\dot{\sigma}_d$ y $\dot{\sigma}_0$, son la velocidad de aplicación de la carga en el ensayo cíclico y estático respectivamente. Sabiendo que el ensayo cíclico se realiza a frecuencia constante, f , se tiene: $\dot{\sigma}_d = 2f\Delta\sigma$, donde $\Delta\sigma$ es la variación de la tensión producida en el ensayo cíclico. El coeficiente, α , viene dado por $\alpha = 0.014 \exp[\gamma f]$ [1], siendo, γ , un parámetro a ajustar de forma experimental.

Por otro lado, se definen unas curvas de iso-probabilidad que relacionan el número de ciclos y la tensión máxima que resiste el material, la expresión de iso-probabilidad que cumple con los límites expuesto en [1] queda:

$$\sigma_f = \sigma_{min0} + (\sigma_{f0} - \sigma_{min0})N^{-a(1-R)} \quad (3)$$

siendo, R , la relación entre la tensión mínima y la tensión máxima del ensayo cíclico y $a = b + c \ln(1 + f)$, donde los parámetros b y c deben ajustarse experimentalmente.

Operando entre las expresiones anteriores, se obtiene la función de distribución que proporciona la probabilidad de fallo para un cierto nivel de carga y una serie de parámetros que deben ser ajustados de forma experimental, tal y como se deduce con más detalle en [1] y que se presenta en (4). Esta función está basada en una distribución de Weibull.

$$PF(N; \sigma_{max}, f, R) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{max0} - \sigma_{min0}}{\lambda N^{-a(1-R)}} \right)^k \right] \quad (4)$$

La función permite obtener la probabilidad de fallo a partir de unas condiciones de carga determinadas. Los datos de entrada serían, σ_{max} , la relación de cargas, R , y el número de ciclos, N . El resto, son parámetros que deben ser ajustados de forma experimental.

Tabla 2. Vida a fatiga correspondiente a cada nivel de tensión, S, hormigón sin fibra.

	Nivel de tensión, S		
DSF	0.85	0.80	0.70
	942	4664	53322
	1205	5664	56453
	1290	5963	59493
	1347	6614	63997
	1386	6773	68387
	1593	7621	81038
	1664	8903	94102
	1781	9379	114214
	1902	10986	138563
	2644	15385	189550
	4482		288054

El modelo se ha aplicado a siete baterías de ensayos: DSF Tabla 2, DF1-50 y DF1-25 Tabla 3, DF1.5-50 y DF1.5-25 Tabla 4, DF2-50 y DF2-25 Tabla 5, todas para la misma masa de hormigón, pero con distintos volúmenes y tamaño de fibras.

Tabla 3. Vida a fatiga correspondiente a cada nivel de tensión, S, para un $V_f=1\%$.

	Nivel de tensión, S		
DF1-50	0.90	0.85	0.80
	656	4570	24371
	922	5970	35879
	1057	7567	38213
	1122	7894	41810
	1407	8369	53027
	1441	9848	56423
	1469	11405	99178
	1697	17375	108242
	2862	22991	125864
		24285	156580
			378238
DF1-25	0.90	0.85	0.80
	1644	7056	43589
	1773	8211	60692
	2342	10187	82568
	2625	10964	82568
	3391	12650	109722
	4625	15029	188949
	5962	18199	220753
	8367	23927	266516
	33980	35922	282973
		48942	433925
		136312	

Tabla 4. Vida a fatiga correspondiente a cada nivel de tensión, S, para un $V_f=1.5\%$.

	Nivel de tensión, S		
DF1.5-50	0.85	0.80	0.70
	170	701	38602
	233	973	48919
	308	1127	65993
	462	1167	103459
	514	1257	107870
	691	1532	145229
	787	1875	158589
	966	2296	229416
	1258	4416	262374
	12586	4948	416038
DF1.5-25	0.85	0.80	0.70
	846	7854	9876
	1243	11358	229060
	1452	14697	351912
	1630	18956	508340
	2078	21656	857720
	2749	30883	1030394
	3812	38709	1289112
	4973	77245	1531318
	7634	81254	1619004
			3402730

Tabla 5. Vida a fatiga correspondiente a cada nivel de tensión, S, para un $V_f=2\%$.

	Nivel de tensión, S		
DF2-50	0.85	0.80	0.70
	21	94	823
	26	107	3657
	34	159	4789
	38	217	6264
	43	226	8069
	49	340	12323
	71	461	18063
	121	610	20562
	134	786	24760
		3576	29037
			42683
DF2-25	0.85	0.80	0.70
	566	1616	101812
	648	2719	144600
	796	3737	196634
	889	4457	247608
	1080	5381	316916
	1517	6701	483635
	2012	9508	528213
	2439	10193	658380
	4644	12644	888481
	11204	23810	1522045

4. RESULTADOS

Los resultados de rotura cíclica obtenidos de los ensayos de fatiga permiten ajustar los parámetros de la ecuación (4) por la que se determina la distribución de probabilidad de fallo de cada serie de hormigón, bajo un nivel de tensión máxima dado. Las curvas de probabilidad de fallo correspondientes son representadas junto con los valores experimentales de vida a fatiga en la figura 1

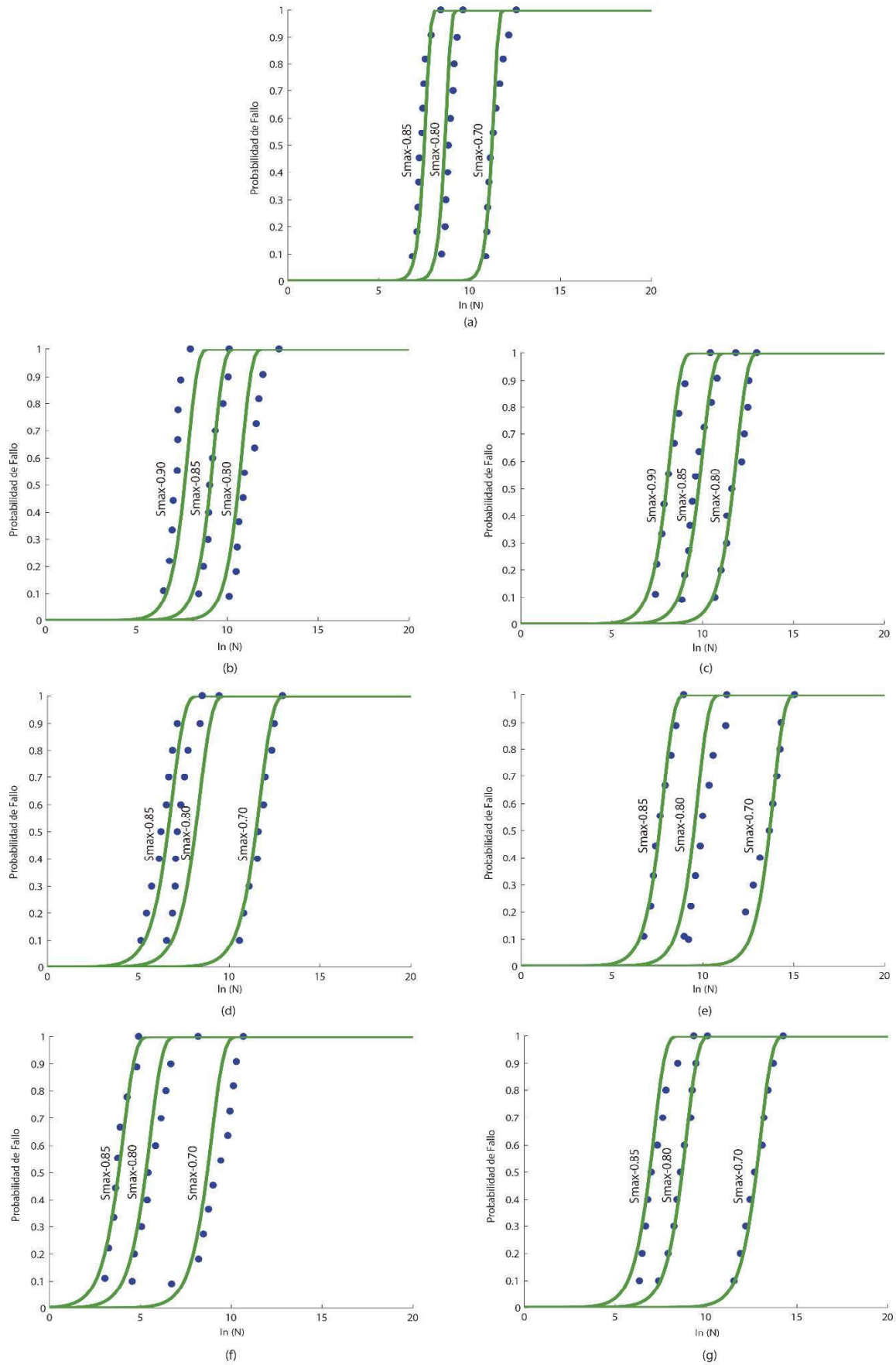


Figura 1. Curvas del modelo y datos experimentales para diferentes niveles de tensión, DSF (a), DF1-50 (b), DF1-25 (c), DF1.5-50 (d), DF1.5-25 (e), DF2-50 (f) y DF2-25 (g).

El ajuste de los parámetros se ha realizado con el programa Mathematica y dichos valores pueden verse en la Tabla 6.

Como puede deducirse de los resultados, la adición de fibras al hormigón conlleva una reducción del factor de forma, k , y con ello un aumento de la dispersión en los valores de vida a fatiga. Si el hormigón está reforzado con fibras de mayor longitud, el factor de forma, k , disminuye su valor ligeramente, haciendo que en los resultados de vida a fatiga exista algo más de dispersión cuando las fibras son de menor longitud.

El factor de escala, λ , con la adición de fibras en el hormigón ve incrementado su valor, siendo ligeramente mayor cuando la longitud de fibras es mayor.

En cuanto al parámetro, a , su valor se ve reducido cuando se añaden fibras a la matriz de hormigón, siendo más notable cuando la longitud de las fibras es menor. Respecto al parámetro, α , la adición de fibras reduce su valor, haciéndose más reseñable dicho efecto para hormigones reforzados con fibras de mayor longitud.

En cualquiera de los casos, se observa como existe una reducción de los valores de los parámetros del modelo probabilístico con la adición de fibras de acero en la matriz del hormigón. Sin embargo, para un hormigón reforzado con fibras, la variación del contenido en volumen de fibras no conlleva una variación considerable en los parámetros de ajuste.

y longitudes de fibras obteniéndose resultados satisfactorios.

En este trabajo no se ha analizado la influencia de la frecuencia de la carga, sino la influencia del tipo de sollicitación, demostrándose la validez de la función de distribución propuesta.

REFERENCIAS

[1] Saucedo L, Yu RC, Medeiros A, Zhang X, Ruiz G. A probabilistic fatigue model based on the initial distribution to consider frequency effect in plain and fiber reinforced concrete. *Int J Fatigue* 2013;48:308–18. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.013.

[2] Cifuentes H, Martínez P, Yu RC, Medina F, Ruiz G. Aplicación de un modelo probabilístico al estudio del comportamiento en fatiga por flexotracción del hormigón. *An Mecánica La Fract* 2015;32:599–604.

[3] Mohammadi Y, Kaushik SK. Flexural Fatigue-Life Distributions of Plain and Fibrous Concrete at Various Stress Levels. *J Mater Civ Eng* 2005;17:650–8. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(650).

Tabla 6. Parámetros del modelo probabilístico.

	k	λ	a	α
DSF	70	5	0.060	0.041
DF1-50	45	7.8	0.046	0.018
DF2-25	50	6.81	0.037	0.025
DF1.5-50	35	9	0.047	0.017
DF1.5-25	50	6.81	0.037	0.025
DF2-50	35	9	0.047	0.017
DF2-25	45	7.25	0.039	0.020

5. CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos se pueden establecer las siguientes conclusiones:

El modelo probabilístico desarrollado por Saucedo et al [1] para fatiga por compresión y aplicado para fatiga a flexotracción por Cifuentes et al [2], es también aplicable al caso de fatiga por flexotracción para hormigones reforzados con fibras de acero, con diferentes contenidos