

PROFUNDIDAD DE DEFECTOS SUPERFICIALES EN ACEROS DE PRETENSADO

A. Valiente* y M. A. Olivares**

* Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

** E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla-La Mancha, Avenida Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, España.

Resumen. El número y la severidad de los defectos superficiales del acero de pretensado son variables aleatorias que deben ser caracterizadas probabilísticamente para valorar su efecto sobre la resistencia del acero a la fatiga y a la corrosión bajo tensión, ya que ambos procesos de fisuración comienzan en defectos superficiales. Las medidas realizadas en esta investigación con un rugosímetro de contacto confirman el resultado obtenido por observación directa de que la profundidad de defecto dominante en áreas de tamaño fijo se ajusta a la distribución de Gumbel. Asimismo se ha comprobado que el número y la profundidad de los defectos siguen respectivamente distribuciones de tipo Poisson y de tipo exponencial, y se ha establecido la relación existente entre sus valores medios, los parámetros de escala y de localización de la distribución de Gumbel y el área de medida del defecto dominante.

Abstract. The severity and the number of the surface defects of the prestressing steel are random variables that must be statistically described in order to assess the effect of the surface state on the fatigue and stress corrosion resistance of this material, since these two cracking processes are initiated at surface defects. The measurements made in this research with a contact rugosimeter showed that the maximum defect depth in sampled areas of fixed size fits to the Gumbel distribution, as previously found with measurements made by direct observation. In addition to this the defect number and the depth number were respectively found to be Poisson and exponentially distributed, and the scale and location parameters of the Gumbel distribution were determined as a function of the sampled area, the density of the surface defects and its mean depth.

1. INTRODUCCIÓN

El acero de pretensado es un material estructural de construcción con una función muy específica como armadura activa del hormigón pretensado, pero de gran responsabilidad. Mediante la técnica del pretensado se genera un material mixto donde los excedentes de resistencia de un material de baja conformabilidad y alta resistencia a tracción son aprovechados para absorber tracciones transferidas desde otro material de alta conformabilidad y pobre resistencia a tracción (el hormigón). Debido a ello, el acero de pretensado es un material singular que se fabrica por procedimientos semiartesanales, sin que esto le libere de la desventaja común a la mayoría de los aceros de alta resistencia de contar con una tenacidad de fractura media o baja [1] y de ser vulnerable frente a procesos de daño por fisuración progresiva, que perjudican su durabilidad.

Entre tales procesos de daño se incluyen la fatiga, la corrosión bajo tensión y la corrosión-fatiga. La fase de iniciación es crítica en todos ellos y las cavidades y micropliegues presentes en la superficie del material son iniciadores potenciales, de ahí la influencia que el estado superficial ejerce en los procesos de daño por fisuración. En la fatiga de los aceros de alta resistencia las inclusiones compiten con los defectos superficiales como iniciadores del daño y se imponen en gran número de casos [2], pero no así en el caso de los alambres de acero de pretensado, cuyos defectos superficiales cabe esperar que presenten una especial severidad, en consonancia con el método de fabricación del acero. Verpoest y sus colaboradores han comprobado que la rotura por fatiga de alambres

de pequeño diámetro se iniciaba en defectos superficiales de profundidades inferiores a 20 μm originados en la fabricación del acero [3]. Con ayuda de réplicas plásticas ha sido posible incluso seguir la propagación de fisuras por fatiga iniciada en defectos superficiales de alambres de acero eutectoide trefilado[4].

El alambre de pretensado es acero eutectoide trefilado que se fabrica por estirado en frío de alambres laminados, con reducciones de sección que llegan al 80%. El estirado se efectúa en varias etapas, forzando el paso del alambre a través de una hilera en cada etapa. El contacto de las hileras con la superficie del alambre favorece la formación de defectos, a pesar de la capa de fosfato con que se recubre el alambre para facilitar su paso por las hileras. El estado de las hileras se cuida con especial atención para evitar que constituyan una fuente de formación de defectos, aunque esto no evita que lo sea el alambres de partida, toda vez que la normativa [5] admite el uso de alambres con profundidades de defecto de hasta 150 μm . Admitiendo una reducción homotética de área en las trefiladoras, para un 80% de reducción, la profundidad de defecto resultante en el alambre trefilado sería de 67 μm . En el caso de la corrosión bajo tensión el papel de los defectos superficiales es más relevante si cabe a causa de la componente de fragilización por hidrógeno que el proceso de fisuración generalmente lleva aparejado. El hidrógeno que produce el medio agresivo en contacto con el alambre penetra en su interior canalizado por los defectos y se acumula en sus proximidades debilitando localmente el acero. De este modo los defectos no sólo actúan como

daño inicial y como concentradores de tensión que sobrecargan mecánicamente el material, sino como sumideros de hidrógeno que reducen la tenacidad del acero, precisamente en las zonas de sobrecarga mecánica. Cuando el nivel de tenacidad es insuficiente para resistir las tensiones locales se produce una rotura local que incrementa la extensión del daño y reestructura la concentración de tensiones y la penetración del hidrógeno haciendo que la secuencia de acontecimientos se repite. Se encadena así la sucesión de roturas locales diferidas que constituye el proceso de fisuración progresiva.

La influencia de los defectos superficiales en el comportamiento del acero de pretensado frente a la corrosión bajo tensión adquiere especial relevancia por las condiciones de homologación que la normativa establece en relación con dicho comportamiento [6]: el acero debe superar una resistencia mínima medida de acuerdo con la metodología de ensayo FIP [7], donde la fragilización por hidrógeno procedente del tiocianato amónico que contiene el medio agresivo domina la corrosión bajo tensión.

El carácter estadístico de la forma y dimensiones de los defectos superficiales contribuye en gran medida a la naturaleza aleatoria de la resistencia del acero de pretensado contra los procesos de daño por fisuración progresiva, en particular la que manifiesta en los ensayos diseñados para medirla [8, 9]. Consecuentemente, la caracterización estadística de los defectos superficiales es un paso obligado para determinar con fines predictivos la influencia del estado superficial sobre la sensibilidad del acero de pretensado a los procesos de fisuración progresiva.

La contribución de este trabajo es un estudio experimental y analítico de la distribución probabilística a que responde la profundidad de los defectos superficiales del acero eutectoide trefilado. En un trabajo anterior sobre el mismo material dirigido a correlacionar los resultados del ensayo FIP con el estado superficial del acero [10], los autores han comprobado que la distribución de Gumbel es una estadística de extremos adecuada para describir la profundidad de defecto. Partiendo de ese resultado preliminar e introduciendo una segunda técnica de medida de la profundidad que conlleva el cambio del recinto de detección de máximos, en el presente trabajo se aportan nuevos datos en favor de la distribución de extremos de Gumbel y se establece su relación con la distribución raíz de la profundidad de defectos.

2. ESTADÍSTICA DE DEFECTOS

Las distribuciones de extremos son una herramienta probabilística ampliamente utilizada en ingeniería cuando los datos de diseño no son deterministas sino estadísticos. Entre los resultados de la teoría, cuyos fundamentos y aplicaciones han sido exhaustivamente presentados por Castillo [11], destaca el siguiente: en muestras aleatorias independientes de igual número de valores extraídas de una misma población, la distribución asintótica del valor más alto de la muestra, es decir, la distribución del má-

ximo muestral cuando el tamaño de muestra es suficientemente grande, ha de ser, si existe, de tipo Frechet, Weibull o Gumbel independientemente de la distribución raíz o de la población de procedencia de la muestra.

La distribución de Gumbel ha sido utilizada con éxito como distribución de máximos del tamaño de inclusiones en acero de resortes [12] y de la profundidad de cavidades superficiales en acero eutectoide trefilado [8] para explicar la dispersión del límite de fatiga cuando el origen de ésta son dichas singularidades. Según la distribución de Gumbel, la probabilidad $P_r[X < x]$ de que la variable aleatoria X sea inferior al valor x viene dada por la función de probabilidad:

$$P_r[X < x] = e^{-e^{-\frac{x-\lambda}{\delta}}} \quad (1)$$

donde λ y δ son los parámetros de posición y de escala. La media \bar{X} y la desviación típica $\bar{\bar{X}}$ de X son:

$$\bar{X} = \lambda + 0,57772\delta \quad \bar{\bar{X}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}\delta \quad (2)$$

La determinación de los parámetros λ y δ debe realizarse por estimación a partir de datos experimentales, siendo el número de datos a obtener y el criterio de estimación los factores más influyentes en la fiabilidad de la estimación. Beretta y Murakami [13] han comparado tres criterios de estimación (ajuste de frecuencias acumuladas relativas, máxima verosimilitud e identificación de momentos) y han analizado el efecto del tamaño de muestra generando artificialmente grandes cantidades de ellas a partir de poblaciones con distinta distribución de Gumbel. Empleando como indicadores de fiabilidad el sesgo y el error típico de las estimaciones hallan que el criterio de máxima verosimilitud es el mejor, y que para tamaños de muestra por encima de 60 el error de las estimaciones está muy próximo al mínimo teóricamente posible.

Cuando la distribución de Gumbel se aplica a máximos locales medidos en recintos de igual extensión, los parámetros de la distribución varían con la extensión del recinto de medida, aunque no independientemente. La técnica de medida condiciona dicha extensión y la relación entre parámetros debe tenerse en cuenta para comparar resultados de estimaciones realizadas con técnicas diferentes. Sean λ y δ los parámetros de la distribución para una extensión dada A del recinto de medida, y λ_n y δ_n para una extensión n veces la anterior. El máximo valor X_{nA} de la variable aleatoria X dentro de este segundo recinto de medida será menor que x si también lo es el máximo valor X_A de X dentro de cada uno de los n recintos independientes de extensión A por los cuales aquel puede considerarse formado. Las probabilidades $P_r[X_A \leq x]$ de estos n sucesos independientes son iguales, y de ahí que la probabilidad $P_r[X_{nA} \leq x]$ del primer suceso sea:

$$P_r[X_{nA} < x] = (P_r[X_A < x])^n = \left(e^{-e^{-\frac{x-\lambda}{\delta}}} \right)^n = e^{-e^{-\frac{x-\lambda+\delta \ln n}{\delta}}}$$

$$\Rightarrow \delta_n = \delta \quad \lambda_n = \lambda + \delta \ln n \quad (3)$$

De este modo se confirma que la distribución del máximo en recintos de extensión nA es también de Gumbel, con igual valor δ del parámetro de escala y con parámetro de posición incrementado proporcionalmente a δ , en $\delta \ln n$. Esta condición debe verificarse siempre que la extensión de los dos recintos sea suficiente para que la distribución de sus máximos respectivos no difiera significativamente de la asintótica y ésta sea de Gumbel,

Cuando la variable aleatoria X es la profundidad de defectos superficiales en alambres, los recintos de medida a considerar son sectores de igual área de la superficie del alambre. La terminología que se utilizará para referirse al defecto más profundo de un recinto de medida será la de defecto dominante del recinto. Como ya se ha indicado, en este tipo de medidas la extensión del recinto de medida está muy condicionada por la técnica experimental empleada. La variable aleatoria de la referencia [12] es una característica geométrica de las inclusiones no metálicas en aceros de alta resistencia, el área de la sección transversal perpendicular a la dirección de carga. Los parámetros de la distribución asintótica de Gumbel se determinan por ajuste de las frecuencias acumuladas relativas procedentes de 40 inclusiones dominantes detectadas visualmente y medidas, cada una de ellas en una micrografía que abarca $0,0309 \text{ mm}^2$ de material transversalmente seccionado y finamente pulido. Como recinto de medida se asigna a cada inclusión dominante un prisma recto de material cuya base es el corte donde la inclusión fue localizada y cuya altura se establece en función de las dimensiones medias de las 40 inclusiones medidas.

En la referencia [8] la variable aleatoria es la misma que en este trabajo, la profundidad de defectos superficiales en alambres de acero eutectoide trefilado y la detección de los defectos dominantes se realizó visualmente observando el perfil del alambre en planos axiales con ayuda de un microscopio. Para ello se seccionaron axialmente y se pulieron hasta acabado especular muestras de alambre de 20 mm de longitud. El perfil de la muestra fue examinado en el microscopio, y la máxima penetración hallada fue medida y asignada como profundidad del defecto dominante a un recinto de medida de $0,2 \text{ mm}^2$, identificado con un área rectangular de la superficie del alambre de 20 mm de lado en dirección longitudinal (la longitud de la muestra examinada) y $10 \mu\text{m}$ en dirección anular como "alcance" de los cortes. Con este procedimiento se efectuaron en torno a 50 medidas de la profundidad de defecto dominante para un alambre dado y a partir de ellas se ajustó a este variable aleatoria una distribución de Gumbel aplicando el criterio de máxima verosimilitud.

3. EXPERIMENTACION REALIZADA

Material. El material usado en la investigación es alambre recto de acero eutectoide, con 1850 MPa de resistencia a tracción y 5,2 mm de diámetro, fabricado para ar-

maduras activas en una trefilería comercial por estirado en frío. La referencia [10] recoge la composición química, las propiedades mecánicas y la microestructura longitudinal y transversal. El aspecto externo e interno de los defectos superficiales del material puede apreciarse en las macrografías de la Fig. 1, la segunda de las cuales corresponde a un corte axial del alambre, recubierto previamente con níquel para resaltar el perfil de corte.

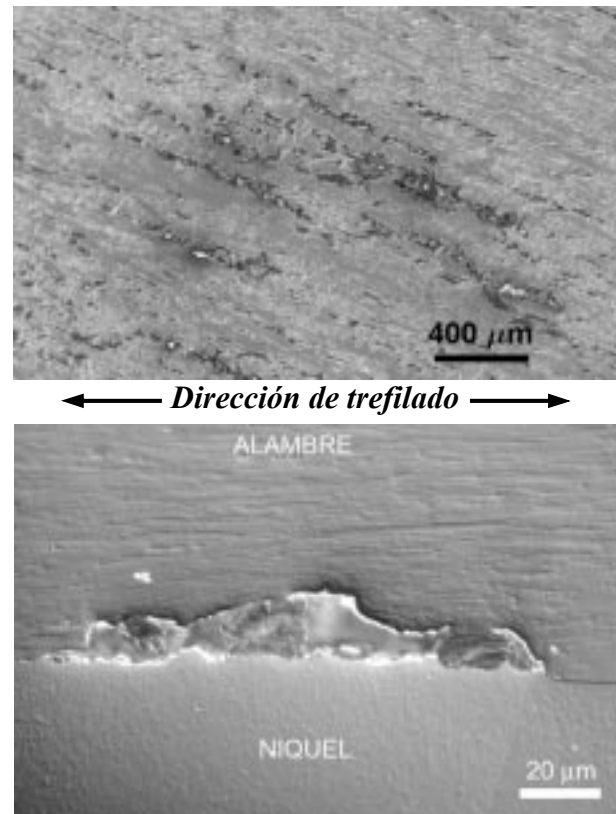


Fig. 1.— Defectos superficiales del acero estudiado.

Estado superficial. Las medidas de profundidad de defectos superficiales se llevaron a cabo tras eliminar el recubrimiento de fosfato con estropajo polimérico de bajo poder abrasivo, en los seis estados del alambre resultantes de combinar la aplicación o no del tratamiento termomecánico de relajación de tensiones (estabilizado) con la inmersión del alambre en el medio agresivo del ensayo FIP de corrosión bajo tensión o en el del ensayo alternativo DIBt [7], durante el tiempo de ensayo en ambos casos. Para el alambre sin tratamiento de estabilizado se emplearán las denominaciones alambre simplemente trefilado en estado de recepción, de postcorrosión FIP o de postcorrosión DIBt, y análogamente, para el alambre con dicho tratamiento, alambre trefilado y estabilizado en estado de recepción, de postcorrosión FIP o de postcorrosión DIBt.

Técnica de medida. La referencia [10] incluye medidas de profundidad de defecto dominante en el acero de esta investigación, correspondientes al alambre trefilado y estabilizado en estado de recepción y de postcorrosión FIP. El método de medida utilizado en [10] se basaba en exa-

minar visualmente la superficie del alambre a bajos aumentos con un microscopio de foco graduado. Los recintos de medida adoptados fueron áreas de 163,3 mm², cada una de ellas superficie lateral de un cilindro de alambre de 1 cm de longitud. Para poder inspeccionar exhaustivamente estos recintos situando todas sus partes bajo el campo de observación del microscopio se acopló a éste un dispositivo con movimiento de giro y avance, y una vez localizado el defecto más profundo, se medía su profundidad con una resolución de 1 µm, como diferencia de alturas entre las dos posiciones del foco que permitían enfocar la parte más alta y la más baja del defecto.

La técnica de medida empleada en esta investigación no ha sido óptica sino mecánica. La profundidad de los defectos superficiales dominantes se midió con un rugosímetro de contacto cuyo palpador se mueve en un plano vertical dado deslizando sobre la superficie a explorar, y recorre por tanto el perfil de la superficie contenido en dicho plano. El rugosímetro mide el desplazamiento vertical y horizontal del palpador, uno en función de otro, y registra gráficamente el perfil de la superficie. El funcionamiento es automático, una vez colocado el alambre en el rugosímetro con el eje en la horizontal del plano donde se mueve el palpador y programada la distancia horizontal a recorrer. La punta del palpador es un cono con 90° de ángulo cónico, 80 µm de recorrido vertical máximo y vértice esférico de 5 µm de radio. Sobre el gráfico del perfil quedan digitalmente registradas las posiciones verticales máxima, mínima y media, de las cuales se deduce la máxima profundidad de defecto captada por el palpador. Este valor representa la profundidad del defecto dominante en el área de la superficie del alambre explorada por el palpador en su recorrido, esto es, el área que su punta cónica habría barrido sobre la superficie del alambre si el vértice hubiera penetrado bajo ella una distancia igual a la totalidad de su recorrido vertical. En consecuencia el recinto de medida atribuible a la profundidad de defecto dominante así obtenida es un rectángulo de lados paralelos al eje y al perímetro del alambre y longitudes respectivas la distancia recorrida horizontalmente por el palpador y la anchura de la punta cónica al final de los 80 µm de recorrido vertical (160 µm, dado que la sección axial de la punta es un triángulo rectángulo isósceles). Como quiera que el rugosímetro fue programado para recorridos horizontales de 15 mm, la extensión de los recintos de medida explorados por el rugosímetro fue de 2,40 mm². De acuerdo con los resultados de Beretta y Murakami [13], el número de medidas efectuadas en cada uno de los seis estados superficiales del acero contemplados en la investigación fue de 60.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Los 60 valores de la profundidad de defecto dominante medidos han permitido determinar los parámetros de posición y de escala de la distribución de Gumbel para los seis estados superficiales considerados. El criterio de es-

timación empleado ha sido el de máxima verosimilitud, que proporciona el parámetro de escala δ resolviendo la ecuación:

$$0 = \sum_N \left[\frac{\bar{X}}{\delta} - 1 - \frac{X_i}{\delta} \right] e^{-\frac{X_i}{\delta}} \quad (4)$$

donde X_i es el i -ésimo valor de los N medidos y \bar{X} su valor medio. El parámetro de posición λ viene dado por:

$$\lambda = \delta \left(\ln N - \ln \sum_N e^{-\frac{X_i}{\delta}} \right) \quad (5)$$

La tabla 1 indica los valores de δ y λ obtenidos en cada caso, la media \bar{X}_A y la desviación típica $\bar{\sigma}_A$ de la distribución calculadas mediante las ecuaciones (2), y el área A del recinto de medida. Se han incluido también los valores de la referencia [10], que corresponden a un recinto de medida mucho mayor.

Tabla 1.— Parámetros de ajuste de la distribución de Gumbel de la profundidad de defecto dominante.

Estado del alambre		λ µm	δ µm	\bar{X}_A µm	$\bar{\sigma}_A$ µm	A mm ²
Trefilado y estabilizado	Fabricación	17,8	2,6	19,3	3,3	163,3
		5,0	2,7	6,6	3,5	2,40
	Postcorrosión FIP	18,6	3,1	20,4	4,0	163,3
		5,8	2,6	7,3	3,3	2,40
Postcorrosión DIBt	4,8	2,3	6,1	2,9	2,40	
Trefilado no estabilizado	Fabricación	8,8	2,6	10,3	3,3	2,40
	Postcorrosión FIP	9,2	3,4	11,2	4,4	2,40
	Postcorrosión DIBt	8,2	3,0	9,9	3,8	2,40

5. DISCUSION

El ajuste de la profundidad de defecto dominante a la distribución de Gumbel puede apreciarse en la Fig. 2, donde se compara la probabilidad P_r dada por la ecuación (1) para los valores estimados de los parámetros δ y λ con la que se asigna a las medidas X_i mediante la fórmula:

$$P_r = \frac{i-0,3}{60+0,4} \quad (6)$$

donde i es el lugar que ocupa X_i dentro de la serie de 60 medidas efectuadas para un mismo estado superficial del alambre y ordenadas de menor a mayor. La falta de linealidad que presenta el ajuste obtenido en la región de altas probabilidades no es significativa [12].

La comparación de los parámetros correspondientes a un mismo estado del alambre y determinados con dos recintos de medida distintos extensión también respalda la validez de la distribución de Gumbel, que debe satisfacer las ecuaciones (3). El parámetro de escala δ es independiente de la extensión del recinto, y efectivamente los dos

valores de la tabla 1 para el alambre trefilado y estabilizado son iguales en estado de recepción y difieren en un 10% en estado postcorrosión FIP. Además, la diferencia del parámetro de forma λ/δ entre los recintos de medida empleados debe ser $\ln(163,3/2,4) = 4,22$, y vale 4,99 para el alambre trefilado y estabilizado en estado de recepción y 3,77 en estado postcorrosión FIP, es decir, difiere en un 18% y en un 13% respectivamente.

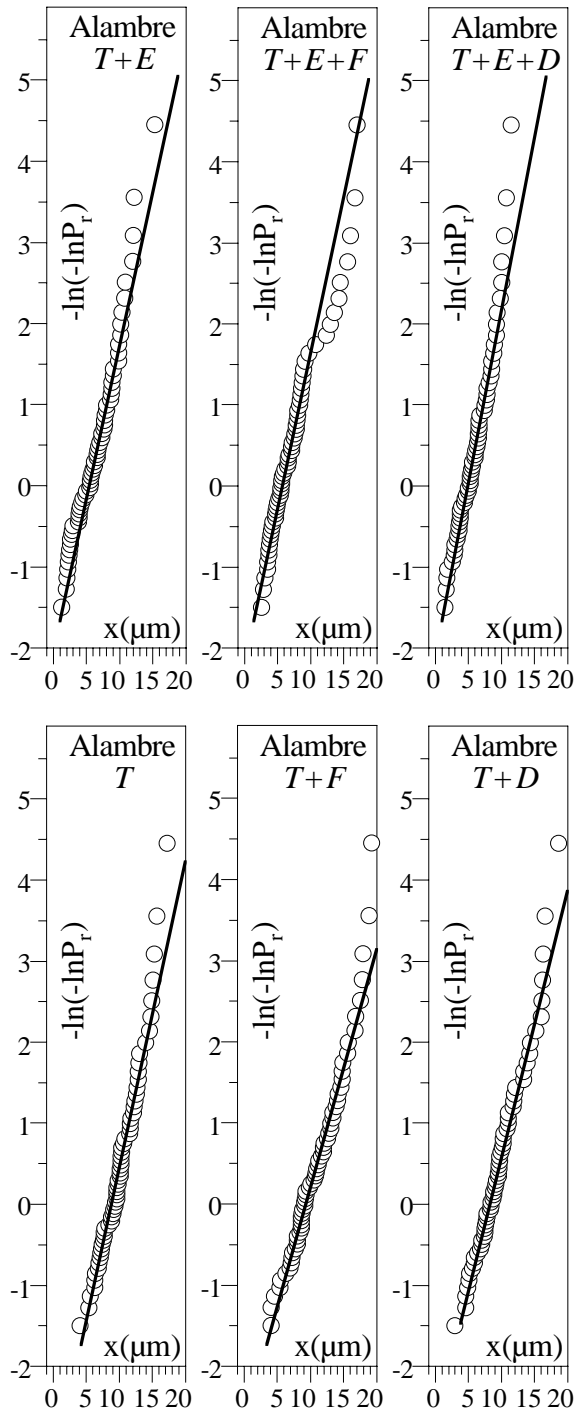


Fig. 2.- Ajuste a la distribución de Gumbel. (T: Trefilado, E: Estabilizado, F: Postcorrosión FIP, D: Postcorrosión DIBt).

El hecho de que la profundidad de defecto dominante si-

ga la distribución de Gumbel puede explicarse por ser esta distribución una de las tres distribuciones asintóticas posibles del máximo muestral, pero no es la única explicación posible, sobre todo teniendo en cuenta que para la profundidad del defecto dominante en el área adoptada como recinto de medida el tamaño de muestra es el número de defectos que el área contiene, y en consecuencia no es un dato determinista sino una variable aleatoria entera. La distribución de Gumbel de la profundidad de defecto dominante estaría determinada por la distribución de la profundidad en la totalidad de la población de defectos y por la distribución del número de defectos sobre la superficie del alambre. Se demuestra que esta última es una distribución de Poisson aplicando hipótesis muy generales [14], en cuyo caso las funciones de distribución de la profundidad X de los defectos superficiales del alambre y de la profundidad X_A del defecto dominante en los recintos de extensión A están relacionados según [11]:

$$P_r[X_A \leq x] = e^{-vA(1-P_r[X \leq x])} \tag{7}$$

donde v es el parámetro de la distribución de Poisson, que representa el número medio de defectos por unidad de superficie. La distribución de X_A será de Gumbel si:

$$e^{-e^{-\frac{x-\lambda}{\delta}}} = P_r[X_A \leq x] = e^{-vA(1-P_r[X \leq x])}$$

$$\Rightarrow P_r[X \leq x] = 1 - e^{-\frac{x-\lambda+\delta \ln(vA)}{\delta}} \tag{8}$$

Además, la condición $P_r[X \leq 0] = 0$ requiere que:

$$0 = P_r[X \leq 0] = 1 - e^{-\frac{-\lambda+\delta \ln(vA)}{\delta}} \Rightarrow \lambda = \delta \ln(vA) \tag{9}$$

y por tanto la profundidad X sigue una distribución exponencial cuyo parámetro es el parámetro de escala δ de la distribución de Gumbel correspondiente a la profundidad X_A , el cual representa por tanto la profundidad media de los defectos superficiales del alambre:

$$P_r[X \leq x] = 1 - e^{-x/\delta} \tag{10}$$

La distribución exponencial también parece ser la apropiada para describir el tamaño de las inclusiones no metálicas de los metales [12]. Las condiciones que la distribución de Gumbel satisface como distribución de la profundidad del defecto dominante en recintos de extensión dada están expresadas por las ecuaciones (3) y adquieren ahora significado físico. La independencia entre el parámetro de escala δ y el área A del recinto de medida es consecuencia de que δ sea la profundidad media de la población total de los defectos superficiales, mientras que la dependencia exponencial del parámetro de forma λ/δ con el área del recinto es debida a que dicho parámetro es el logaritmo neperiano del número medio de defectos vA en el recinto, de acuerdo con la ecuación (9).

Este significado físico amplía las posibilidades de comparación de los parámetros de la distribución de Gumbel obtenidos en la tabla 1 para distintos estados del alambre. Los ocho valores de la profundidad media de defecto pre-

sentan una desviación máxima del 20% respecto al valor medio ($2,8 \mu\text{m}$), comparable a la que se produce entre los dos valores correspondientes a un mismo estado pero obtenidos con recintos de medida distintos. No son pues diferencias suficientemente significativas para poder atribuir variaciones de la profundidad media de los defectos superficiales ni al tratamiento de estabilizado ni al contacto del alambre con los medios de los ensayos FIP y DIBt durante el tiempo de ensayo. Por tanto cabe adoptar $2,8 \mu\text{m}$ como profundidad media de defecto y calcular el número medio de defectos V por unidad de superficie mediante la ecuación (9) para los seis estados del alambre. Los resultados se han representado gráficamente en la figura 3 y sólo muestran diferencias significativas atribuibles al efecto del tratamiento de estabilizado. La desaparición de las tensiones residuales de tracción que mantienen abiertos parte de los defectos superficiales daría lugar a su cierre, y de ahí que el estabilizado reduzca a un tercio la densidad superficial de defectos.

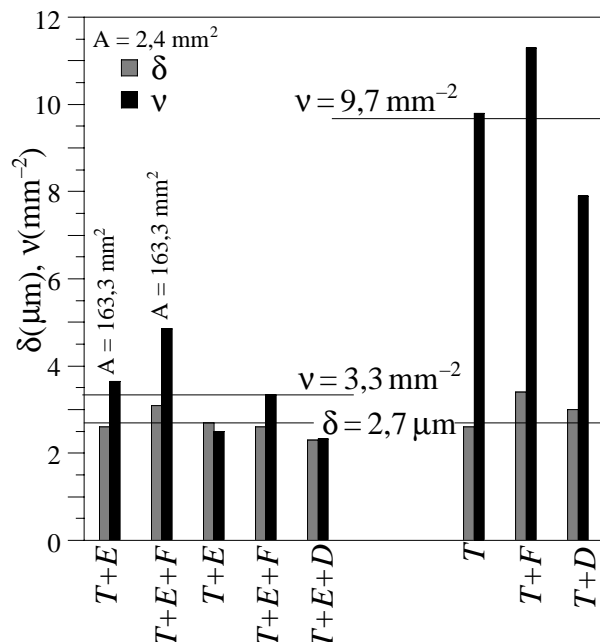


Fig. 3. – Profundidad y densidad media de defectos superficiales en el alambre (T: Trefilado, E: Estabilizado, F: Postcorrosión FIP, D: Postcorrosión DIBt).

6. CONCLUSIONES

La validez de la distribución de Gumbel para describir la profundidad de los defectos superficiales dominantes en alambres de acero de pretensado ha sido confirmada con procedimientos de medida mecánicos que permiten automatizar los de observación directa destructivos y no destructivos anteriormente empleados. Dicha validez ha sido justificada teniendo en cuenta el carácter aleatorio del número y de la profundidad de los defectos, habiéndose comprobado que las distribuciones respectivas son de tipo Poisson y de tipo exponencial, y que sus valores medios determinan los parámetros de la distribución de Gumbel.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CALIDAD SIDERURGICA la financiación de la investigación y a EMESA el material suministrado. Asimismo, expresan su gratitud a D. Luis del Pozo por su generosa colaboración.

REFERENCIAS

- [1] A. Valiente, M. Elices y M. A. Astiz, "Tenacidad de fractura del acero de pretensar" *Hormigón y Acero*, **168**, 151-158 (1988).
- [2] Y. Murakami "Metal Fatigue: Effect of Small Defects and Nonmetallic Inclusions" *Yokendo*, Tokio (1993).
- [3] I. Verpoest, E. Arnouldt y A. Deruyttere "The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wires" *International Journal of Fatigue*, **4**, 199-214 (1985).
- [4] S. Beretta y S. Matteazzi "Short cracks propagation eutectoid steel wires" *International Journal of Fatigue*, **18**, 451-456 (1993).
- [5] UNE 10016/4 "Alambrón de acero no aleado para trefilado o laminado en frío. Parte 4: Características del alambrón para aplicaciones especiales" UNE, Madrid (1995).
- [6] Comisión Permanente del Hormigón "Instrucción de Hormigón Estructural EHE" Ministerio de Fomento, Madrid (1998).
- [7] ISO 15630-3 "Steel for reinforcement and prestressing of concrete—Tests methods" *ISO*, Ginebra (2002).
- [8] S. Beretta y M. Boniardi "Fatigue strength and surface quality of eutectoid steel wires" *International Journal of Fatigue*, **21**, 329-335 (1999).
- [9] Binnekamp, D.C. y Etienne, C.F. "Statistical evaluation of a large number of stress corrosion tests according to the FIP procedure" *Third Symposium FIP on Stress Corrosion of Prestressing Steel*, M. Elices y V. Sánchez Gálvez, ed, El Escorial (Madrid) (1981).
- [10] M. A. Olivares, A. Valiente y J. C. Gálvez "Estudio estadístico de los defectos en el alambre de pretensado y su relación con el ensayo FIP" *Anales de Mecánica de la Fractura*, **20**, 213-218 (2003).
- [11] E. Castillo, "Extreme value theory in engineering" *Academic Press*, (1988).
- [12] Y. Murakami, T. Toriyama y E.M. Couder, "Instructions for a New Method of Inclusion Rating and Correlations with the Fatigue Limit" *Journal of Testing and Evaluation*, **22**, 318-326 (1994).
- [13] S. Beretta y Y. Murakami "Statistical analysis of defects for fatigue strength prediction and quality control of materials" *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, **21**, 1049-1065 (1998).
- [14] A. Valiente y F. J. Gómez "Rotura por clivaje inducida por la perlita en un acero ferrítico-perlítico: efecto del espesor" *Anales de Mecánica de la Fractura*, **21**, 252-257 (2004).