

INFERENCIA BAYESIANA EN LA DESCRIPCIÓN DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA Y SU APLICACIÓN EN LA PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL

S. Blasón^{1*}, E. Castillo^{2,3}, D. Díaz-Salamanca⁴, A. Fernández-Canteli⁴

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlín, Alemania

² Real Academia de Ingeniería, C. de Don Pedro 10, 28005 Madrid, España

³ Real Academia de Ciencias, C. de Valverde 24, 28004 Madrid, España

⁴ Universidad de Oviedo, Campus de Viesques, Gijón 33204, España

* Persona de contacto: sergio.blason-gonzalez@bam.de

RESUMEN

La caracterización de la respuesta de materiales ante cargas cíclicas mediante las curvas de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga sustenta la adopción del criterio de diseño de tolerancia al daño. La variabilidad inherente al deterioro por fatiga se evalúa en este trabajo adoptando un enfoque estadístico bayesiano sobre la ley de propagación de fisuras conforme a la formulación del modelo multivariable propuesto por Castillo-Canteli. Su aplicación, conjuntamente con el estudio de la dispersión de los tamaños iniciales de defectos en muestras representativas, propicia un análisis integral y predicción fiable de la vida útil de componentes. La validación de la novedosa propuesta se realiza aplicándola a una campaña experimental de un acero S316L fabricado aditivamente (LPBF). La deducción analítica del correspondiente campo S-N en régimen de propagación y la dispersión asociada a los defectos de la muestra estudiada permiten su cotejo con el diagrama S-N-P procedente de probetas lisas. Las observaciones del estudio desarrollado y las bondades de los hallazgos presagian su potencial, revelando la metodología presentada como una práctica eficiente y ventajosa respecto a las propuestas comúnmente contempladas en las guías de diseño de referencia.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, Propagación Grietas, Inferencia Bayesiana, Tolerancia Daño

ABSTRACT

Describing how materials react to cyclic loads using fatigue crack growth rate (FCGR) curves supports the use of damage tolerance design criteria. In this work, the inherent variability of fatigue damage is assessed by adopting a Bayesian statistical approach to the crack propagation law based on the multivariate model proposed by Castillo-Canteli. Its application, together with the study of the scatter of initial defect sizes in representative samples, enables a comprehensive analysis and reliable prediction of component lifetime. The novel proposal is validated by applying it to an experimental campaign on additively manufactured (LPBF) S316L steel. The analytical deduction of the corresponding S-N field in the propagation regime and the associated dispersion allows comparison with the S-N-P diagram from smooth test specimens. The findings reveal the methodology presented as an efficient and advantageous practice compared to the proposals in the reference design guidelines.

KEYWORDS: Fatigue, Crack Propagation, Bayesian Inference, Damage Tolerance

1. INTRODUCCIÓN

La puesta en práctica del criterio de diseño de tolerancia al daño frente a cargas cíclicas exige, además de una apropiada definición de los intervalos de inspección, empleo de técnicas de detección adecuadas y las consecuentes medidas de prevención, mantenimiento y/o actuaciones asociadas, un análisis riguroso de la respuesta de materiales en régimen de propagación de grietas. Asimismo, un enfoque determinista del problema supone habitualmente la implementación de factores de seguridad y niveles de conservadurismo que suelen resultar excesivos. En contraposición, una aproximación abierta a la consideración de la variabilidad de los factores intervinientes da lugar a estudios más fiables y optimizados [1].

Uno de los retos más relevantes al enfrentarse a la modelización del comportamiento a fatiga de materiales

es la incertidumbre asociada a la dispersión inherente a los resultados experimentales durante la caracterización. Factores como la microestructura local, gradientes tensionales o la presencia de defectos de dimensiones aleatorias introducen una falta de certeza que los modelos deterministas no pueden capturar de manera fidedigna. En este contexto, la estadística bayesiana [2] emerge como una herramienta con amplio potencial, permitiendo dotar de una base probabilística a leyes de comportamiento de distinta índole. La principal característica de la inferencia bayesiana en su aplicación en la modelización multivariable de la respuesta es la transformación de la filosofía de análisis: los parámetros dejan de estar representados por valores fijos de ajuste para, en su lugar, ser descritos mediante distribuciones de probabilidad. De esta forma, se logra proporcionar una base probabilística a leyes originalmente deterministas, dotando a los estudios de integridad estructural de mayor robustez y fiabilidad.

La metodología aquí expuesta se aplica al estudio de un acero inoxidable S316L fabricado aditivamente por medio de *fusión láser en lecho de polvo* (LPBF). En los metales producidos mediante tecnologías 3D es común la presencia de defectos intrínsecos a la naturaleza del proceso, lo que promueve el análisis de la vida a fatiga despreciando la fase de iniciación de grietas [3]. Ello conlleva la consideración de *Mecánica de Fractura* y, en particular, en este trabajo se recurre a la ley fenomenológica de crecimiento de grietas por fatiga propuesta por Castillo-Canteli [4], sustentada en la función de Gumbel, para describir las curvas de velocidad de propagación frente al valor pico del factor de intensidad de tensiones durante las cargas cíclicas, da/dN vs K_{max} (curvas FCGR).

Partiendo de una muestra limitada de resultados de ensayos FCGR en laboratorio, se aplica un novedoso procedimiento de análisis de enfoque bayesiano a través del software OpenBUGS [5], que posibilita la simulación de un cuantioso repertorio de potenciales curvas de velocidad de propagación contenidas en los márgenes de respuesta que cabría esperar del material sujeto a estudio. Las recreaciones de las posibles respuestas son metódicamente empleadas tanto en la transformación a proyecciones puntuales en el momento de rotura (o, alternativamente, criterio de tamaño de grieta límite) en la forma tensión remota frente al número de ciclos (campo S-N en propagación), así como en la descripción de las contingentes evoluciones del tamaño de grieta vs número de ciclos (curvas $a-N$) dadas distintas combinaciones de condición de carga y valor inicial de defecto.

Las evaluaciones derivadas capacitan observaciones útiles en términos de análisis de tolerancia al daño recurriendo a diferentes perspectivas. Por un lado, se deducen abanicos de progresiones $a-N$ que favorecen la toma de decisiones de acuerdo con los intervalos de fiabilidad obtenidos. De esta manera, se permite, por ejemplo, dar respuesta a la predicción de vida remanente (hasta alcanzar un tamaño límite previamente establecido) dado un tamaño de grieta detectado durante una practicable inspección. Alternativamente, establecido un periodo de supervisión, se definen márgenes de credibilidad de los tamaños de grieta esperados en función del régimen de solicitud. A su vez, las estimaciones se retroalimentan paralelamente con información medida sobre probetas lisas del mismo lote de material para la deducción de la distribución de defectos presentes en la muestra.

2. METODOLOGÍA

2.1. Formulación del modelo FCGR

El modelo de comportamiento en propagación propuesto por Castillo-Canteli se basa en una normalización del factor de intensidad de tensiones dentro del campo de validez definido por el umbral inferior, $K_{max,th}$, y límite superior de inestabilidad, $K_{max,up}$. El crecimiento monotónico de los valores de velocidad entre dichos

márgenes permite su identificación como una función de distribución que, en este caso, se representa a través una expresión de valores extremos máximos de Gumbel, dando lugar a su forma matemática definida en la expresión 1:

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \lambda - \delta \cdot \log\left[-\log\left(\frac{\log K_{max} - \log K_{max,th}}{\log K_{max,up} - \log K_{max,th}}\right)\right] \quad (1)$$

en la que λ y δ aluden a los parámetros de posición y forma, respectivamente, que junto a los dos límites asintóticos enunciados previamente permiten emular la globalidad del comportamiento del material.

2.2. Inferencia bayesiana

Una vez determinados unos valores razonables iniciales de los parámetros del modelo que caracteriza el material de interés, se definen las *distribuciones a priori* asociadas. Constituyen unidades de información basadas en la experiencia previa. En este caso se corresponden con los ajustes singulares de los registros experimentales (pares $da/dN-K_{max}$ medidos en cada probeta ensayada) recurriendo al modelo de Castillo-Canteli.

La inferencia bayesiana trata a los parámetros del modelo (esto es, $\theta = \{\lambda, \delta, K_{max,th}, K_{max,up}\}$) como variables aleatorias. El objetivo último es obtener la *distribución posterior* del conjunto, $p(\theta|datos)$, una vez conocida la información previa, $p(\theta)$, y la *función de verosimilitud*, $p(datos|\theta)$, a través de la aplicación del teorema de Bayes:

$$p(\theta|datos) = p(datos|\theta) \cdot p(\theta) \quad (2)$$

La sobredeterminación matemática e incertidumbre repercuten en la falta de existencia de una solución analítica directa (cerrada) que proporcione una única combinación de parámetros óptima, por lo que resulta necesario recurrir a aproximaciones numéricas. Para resolver este planteamiento multivariable, en este trabajo se ha recurrido a la herramienta *OpenBUGS*. Con dicho fin, el software ejecuta un proceso de *cadena de Markov por Monte Carlo* (MCMC) a través del algoritmo dado por el *muestreo de Gibbs* [6]. De manera que en cada iteración, t , cada parámetro se actualiza secuencialmente basándose únicamente en los valores inmediatamente precedentes de los demás. Así, en la t -ésima iteración cada uno de los 4 parámetros del modelo Castillo-Canteli se obtiene de acuerdo al siguiente algoritmo:

- i) $\lambda^{(t+1)} \sim p(\lambda|\delta^{(t)}, K_{max,th}^{(t)}, K_{max,up}^{(t)}, datos)$
- ii) $\delta^{(t+1)} \sim p(\delta|\lambda^{(t+1)}, K_{max,th}^{(t)}, K_{max,up}^{(t)}, datos)$
- iii) $K_{max,th}^{(t+1)} \sim p(K_{max,th}|\lambda^{(t+1)}, \delta^{(t+1)}, K_{max,up}^{(t)}, datos)$
- iv) $K_{max,up}^{(t+1)} \sim p(K_{max,up}|\lambda^{(t+1)}, \delta^{(t+1)}, K_{max,th}^{(t+1)}, datos)$

Cada iteración completada genera una simulación del conjunto de parámetros físicamente coherente (consonancia con la información previa y la ley de crecimiento establecida) y estadísticamente probable

(sobre la base de los datos existentes), que representa una respuesta del material asociada con una determinada curva FCGR. Para evitar la dependencia de los resultados finales con el punto de partida, las primeras iteraciones (conocidas como *burn-in*) se descartan para eludir oscilaciones erráticas mientras el algoritmo converge a soluciones estables. Las iteraciones adicionales constituyen las simulaciones validadas de los parámetros del modelo de ajuste. El producto del cúmulo de operaciones señalado no es, por tanto, un valor singular para cada parámetro, sino una *distribución posterior*, pudiendo así definirse rangos de valores asociados a un determinado nivel de credibilidad.

A diferencia del ajuste por mínimos cuadrados convencional, donde únicamente se desprendería una curva FCGR promedio, la inferencia bayesiana proporciona un *compendio de incertidumbre* proyectado por la agrupación completa de combinaciones de parámetros (simulaciones) que se hayan ejecutado. Asimismo, pueden generarse matrices de correlación que revelan la interacción de los parámetros, lo que permite capturar dependencias entre sí para también examinar la reciedumbre del modelo implementado.

3. EJEMPLO PRÁCTICO

3.1. Campaña experimental FCGR

Se toman como referencia de estudio los ensayos de propagación de grietas llevados a cabo con probetas extraídas de la región cónica (ángulo de 45° respecto a la dirección de fabricación) de un depósito empleado en la industria química y fabricado con acero austenítico 316L mediante LPBF [7]. Se emplearon un total de 4 probetas de flexión en 3 puntos, SEN B3, de dimensiones principales: 3 mm de espesor (B) y 10 mm de ancho (W). La monitorización del crecimiento de grieta se realizó recurriendo a la técnica de caída de potencial en corriente continua (DCPD). A fin de caracterizar la región próxima al umbral de propagación, $K_{max,th}$, se ejecutó el procedimiento de K -decreciente con el objetivo de obtener valores de propagación, da/dN , inferiores a 10^{-5} mm/ciclo, siguiendo las directrices de la norma ISO 12108 [8]. La relación de cargas se mantuvo constante durante los ensayos: $R = 0,1$.

3.2. Ajustes FCGR al modelo Castillo-Canteli

Los parámetros optimizados por mínimos cuadrados de los resultados de cada ensayo son los reflejados en la tabla 1. Debe destacarse el uso del valor pico del rango del factor de tensiones (K_{max}) como variable de referencia en la evaluación y tratamiento de resultados.

Tabla 1. Parámetros de ajuste óptimos en cada ensayo.

	1	2	3	4
λ	-11.223	-11.494	-11.377	-11.869
δ	2.4148	2.1402	2.3795	2.0333
$K_{max,th}$	4.5547	4.4762	4.3710	4.0133
$K_{max,up}$	82.6234	80.0588	80.3052	90.0799

3.3. Análisis bayesiano vía OpenBUGS

Las *distribuciones a priori* se definieron como funciones normales, $\theta_{prior} \sim N(\text{media}, \text{desviación típica})$, una vez agrupado y promediado el conjunto de ajustes singulares reflejados en la subsección 3.2. Se estableció un periodo de *burn-in* de 10000 iteraciones para estabilizar la cadena, momento a partir del cual se realizaron 50000 iteraciones adicionales.

Cada una de dichas iteraciones representa una curva FCGR (asociada a un set de parámetros θ_i). La figura 1 muestra la superposición de los resultados experimentales con el conjunto de las simulaciones obtenidas, proyectadas en la región inferior (foco de interés) del diagrama FCGR.

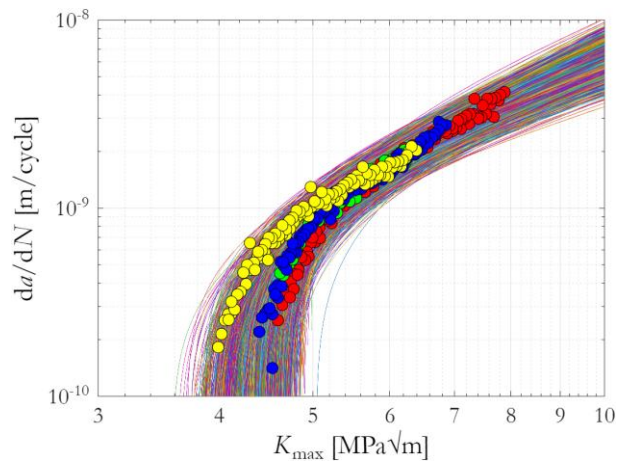


Figura 1. Datos experimentales y simulaciones.

A diferencia de los ajustes convencionales que ofrecen un valor único (“óptimo”), el análisis bayesiano permite cuantificar la incertidumbre epistémica (falta de conocimiento preciso o exacto) y la variabilidad aleatoria de la respuesta del material. Cada iteración es un conjunto de 4 parámetros (λ , δ , $K_{max,th}$, $K_{max,up}$) que es físicamente coherente y estadísticamente probable. El resultado se expresa en forma de *distribuciones posteriores* (figura 2), que muestran toda la gama de valores posibles de los parámetros.

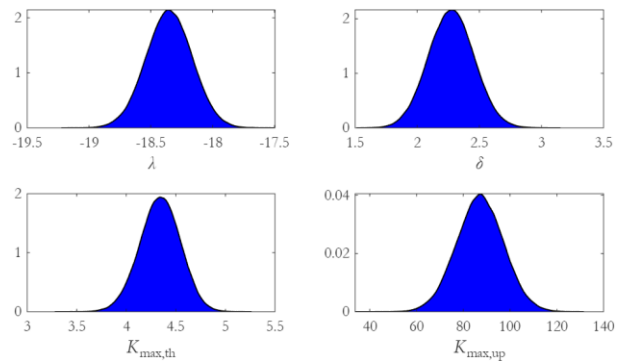


Figura 2. Distribuciones posteriores de los parámetros.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Correlación entre los parámetros

La dependencia estructural de los parámetros del modelo de Castillo-Canteli puede estudiarse sobre la base de la matriz de correlación resultante del análisis bayesiano. Fruto de la forma matemática de la ley FCGR empleada, los parámetros que la definen se encuentran *acoplados*, de tal manera que la coherencia física del modelo se preserva por su compensación entre sí (la variación de uno de ellos supone el ajuste de los restantes para que la curva de comportamiento mantenga su concordancia). La figura 3 ilustra estas reciprocidades.

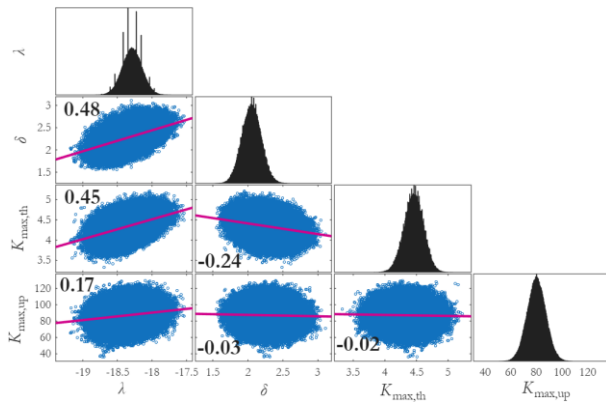


Figura 3. Matriz de correlación de los parámetros.

Como cabría esperar, la interacción más remarcable del modelo corresponde a la correlación positiva entre el parámetro de posición y el de escala, λ - δ . Resulta razonable si se atiende a la interpretación física de cada uno: λ se relaciona cuantitativamente con la velocidad de propagación en el estado de carga en torno al 36,8% del rango normalizado del factor de intensidad de tensiones; mientras δ está ligado con la pendiente de la curva (inclinaciones $\frac{\Delta da}{dN}$ más pronunciadas en el tramo intermedio corresponden con valores de δ más elevados).

Otras dependencias reseñables se advierten en la correlación débil negativa del umbral $K_{\max,th}$ - δ ; aunque predomina, con signo positivo, la atribuible a $K_{\max,th}$ - λ , lo que denota velocidades de propagación globalmente mayores en la zona intermedia ante valores crecientes del umbral. Conviene, además, hacer hincapié en la capacidad del procedimiento (conjunción del modelo Castillo-Canteli con inferencia bayesiana) para establecer un margen plausible y realista del valor umbral. Este último aspecto resulta fundamental en el tratamiento de grietas largas, pues supone la definición del punto de arranque de la propagación, rechazando que pueda producirse con valores de K por debajo del umbral.

Se aprecia también la escasa correlación del valor límite superior $K_{\max,up}$ con el resto de parámetros, indicando que la inestabilidad final es una variable estadísticamente independiente, por ejemplo, del valor umbral. Se trata de una observación físicamente coherente, en tanto el colapso último del componente estaría regido por un

mecanismo de rotura distinto al daño causado por fatiga en las etapas iniciales e intermedias de propagación de grietas. Lo anterior resulta, a su vez, ventajoso en términos prácticos: teniendo en cuenta la habitual falta de valores experimentales en la parte alta de las curvas FCGR, así como la exigua incidencia en términos de ciclos hasta el consumo total de la vida útil cuando las velocidades de propagación superan el tramo secundario (en relación a las 3 etapas típicamente señaladas en la evolución de las curvas FCGR).

Además, la ausencia de coeficientes de correlación, ya sean positivos o negativos, próximos a la unidad es indicativa de la no existencia de una *sobredeterminación física* del modelo; es decir, no hay parámetros redundantes. Por el contrario, los niveles intermedios señalados corroboran la aportación de cada parámetro a la hora de reproducir el comportamiento del material. E incluso la aparente independencia de $K_{\max,up}$ con el resto ratifica la capacidad del modelo para desacoplar el comportamiento de propagación estable de la condición de fallo final por inestabilidad elástica y pérdida de estabilidad estructural.

Con todo, además de la contribución estadística que se documentará en las siguientes secciones, el análisis bayesiano ayuda a revelar la validez y robustez de la ley de Castillo-Canteli en la modelización fenomenológica de las curvas FCGR, tanto desde el punto de vista del ajuste matemático como desde la perspectiva física del proceso de daño.

4.2. Interpretación práctica de la variabilidad FCGR

Sustentada en los fundamentos de *Mecánica de Fractura Elástica Lineal* (MFEL), la representación del comportamiento a fatiga basado en las curvas de velocidad de propagación de grietas constituye una poderosa herramienta dada su capacidad de reflejar la respuesta del material ante un amplio (infinito) rango o combinación de condiciones remotas de carga (conocidas σ_{\max} y R , ante la tesitura de solicitudes fluctuantes) y tamaño de grieta (a) a partir de la oportuna evaluación del campo tensional en la vecindad de punta de grieta una vez definido el factor geométrico apropiado (dado $K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} Y(a)$).

Sin embargo, la exégesis de los diagramas FCGR al tratar de aprovechar la información que contienen en un enfoque tolerante al daño y de análisis de vida remanente requiere su transformación en magnitudes elementales, tangibles y físicamente interpretables, ya sea recurriendo al dominio S - N o a - N , tras la pertinente integración de las curvas de propagación.

Si bien la metodología que se presenta en este trabajo es extrapolable al caso de carga variable, los ejemplos de evaluación que se muestran en las siguientes subsecciones se limitan a escenarios que contemplan rangos constantes de tensiones remotas (σ_{\max} , R).

Por otra parte, las integraciones de las curvas FCGR precisan de un valor de grieta inicial de referencia, así como de una geometría arquetipo para poder plantear la transferibilidad deseada. En este sentido, es oportuno mencionar que la campaña experimental descrita en la sección 3.1 se complementó con ensayos de fatiga de alto número de ciclos (HCF) con probetas lisas cilíndricas de 5 mm de diámetro en la sección calibrada, cuyo comportamiento fue también evaluado en condiciones de $R = 0.1$. Un análisis *post-mortem* en microscopio óptico permitió descubrir las localizaciones desde donde se extendió la grieta por fatiga en cada probeta lisa ensayada. El daño se promovió en todos los casos desde defectos situados en la superficie. Los tamaños de dichas imperfecciones fueron medidos y transformados a unidades de \sqrt{area} a partir de las proyecciones de su superficie en la dirección de sollicitación, siguiendo las recomendaciones de [9]. La distribución de los defectos analizados fue definida a través de una función de valores extremos máximos, para así procurar reproducir fielmente los tamaños más grandes característicos de la muestra de material ensayada. El tiempo de vida útil de componentes fabricados aditivamente está directamente condicionado por los defectos más perniciosos (*killer defects* [10]) presentes en las regiones más susceptibles al fallo, de ahí que su estudio resulte clave también en el diseño basado en tolerancia al daño.

4.2.1. Dispersión del campo S-N en propagación

La integración de las curvas FCGR simuladas se realizó con base en las siguientes premisas:

a) definición del factor geométrico: se adoptó la solución de Newman-Raju [11] para grietas semielípticas superficiales a fin de reproducir condiciones similares a las observadas durante los ensayos HCF. Durante las evaluaciones se mantuvo invariable la relación de aspecto entre profundidad y anchura de grieta (a/c).

b) selección del valor inicial de la profundidad de grieta, a_0 : se fijó un tamaño de referencia de 162,8 micras. Se sitúa dentro del rango de variación medida sobre probetas lisas (campaña HCF) y, por tanto, se considera representativo con vistas a ilustrar la metodología aquí expuesta.

c) determinación de los niveles de interés de tensión remota: se tomaron 100 valores discretos equiespaciados cada 2 MPa en el rango $\sigma_{max} \in [310, 508]$ MPa. La definición de los márgenes responde, respectivamente, a un valor límite inferior genérico que propicie la propagación en al menos una simulación, $\sigma_{max,lim} = \min(K_{max,th}|_{sim})[\sqrt{\pi a_0} Y(a_0)]^{-1}$, mientras la cota superior se identifica con el límite elástico del material (σ_y).

Se ejecutaron 5000 integraciones para cada nivel de carga analizado, de forma que el conjunto total de realizaciones estocásticas simuladas (500000) se reconvirtió en otros tantos puntos singulares en el diagrama S-N (figura 4). Cada par σ_{max} -N se corresponde con el número de ciclos al que se alcanzaría el valor de inestabilidad completa

($K_{max,up}$) en cada realización, partiendo de un defecto inicial de profundidad definida (a_0) y manteniendo un régimen de sollicitación constante (σ_{max} , R). En consecuencia, el número de ciclos hasta el supuesto fallo se obtiene como $N_{f,i} = f(\theta_i, a_{0,i}, \sigma_i, \text{geometría})$.

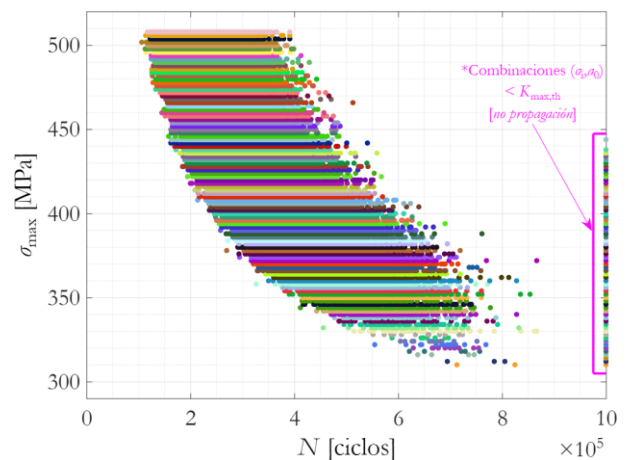


Figura 4. Campo S-N tras la integración de las simulaciones FCGR partiendo de $a_0 = 162,8 \mu m$.

En la representación de la figura 4 se aprecian puntos situados exactamente en el valor $N = 1 \cdot 10^6$ ciclos. Se trata de un artificio visual para señalar aquellos niveles de carga donde las condiciones de partida (σ_i , a_0) no superan el umbral de propagación ($K_{max,th}$) y, por tanto, no cabría esperar crecimiento alguno de grieta. Resulta lógico que, equiparable a lo que ocurriría en la práctica, los porcentajes de *supervivientes* decrezcan con el aumento de la sollicitación remota. Al alcanzar cierto valor tensional (~ 450 MPa) todas las realizaciones propician la propagación incesante de la grieta.

4.2.2. Dispersión del crecimiento a-N

El enfoque de tolerancia requiere de una aplicación pragmática del análisis y, entre otros aspectos, del establecimiento de protocolos de inspección *in situ* que permitan definir el daño por fatiga cuantitativamente. En la práctica, la forma más directa de completar evaluaciones de esta índole es a través de la medición del tamaño de grieta en regiones sensibles (susceptibles de propiciar el colapso estructural a consecuencia de daño acumulado por fatiga). La monitorización de esta magnitud durante la vida útil del componente posibilita eventualmente la toma de decisiones de mantenimiento, reparación o reemplazo llegado el caso.

Respetando las mismas premisas mencionadas en la sección 4.2.1, la figura 5 recoge un ejemplo de obtención de las potenciales progresiones a -N tras la integración de 5000 curvas FCGR bajo las mismas condiciones de carga ($\sigma_{max} = 450$ MPa, $R = 0,1$) y partiendo de un particular tamaño inicial de grieta ($a_0 = 162,8 \mu m$).

Se abren, así, varias formas de análisis potencialmente fructíferas en su aplicación con el enfoque de tolerancia al daño, siendo particularmente provechosas las dos que se describen a continuación:

- Definición de estados límite o de control, identificados con un valor concreto de tamaño de grieta, a_{lim} : las proyecciones simuladas permitirían trazar la probabilidad de alcanzar dicha dimensión transcurrido un determinado periodo de tiempo (o su equivalente en número de ciclos).
- Establecido un lapso temporal (por ejemplo, intervalo entre inspecciones), deducir la probabilidad y márgenes de certidumbre asociados a la extensión de la grieta que cabría esperar medir.

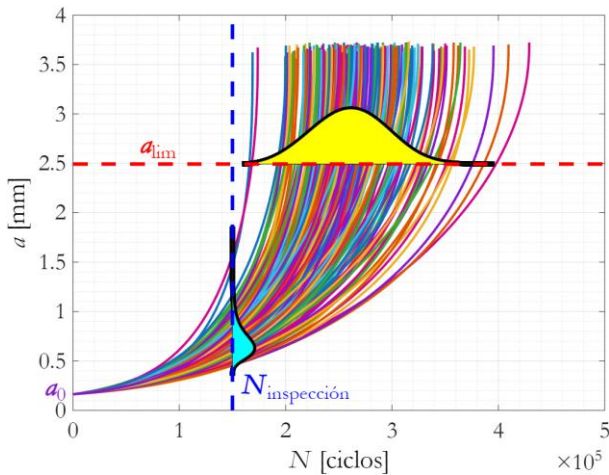


Figura 5. Evolución a - N resultante tras la integración de simulaciones FCGR (θ) partiendo de $a_0 = 162,8 \mu\text{m}$ y fijado $\sigma_{max} = 450 \text{ MPa}$.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Satisfaciendo los postulados de *Mecánica de Fractura* en el tratamiento del progreso del daño por fatiga en componentes agrietados, en este trabajo se ha presentado un procedimiento holístico de evaluación sustentado en la conjunción de la ley de velocidad de propagación de Castillo-Canteli con la integración de la estadística bayesiana. En oposición al planteamiento tradicional de la estadística frecuentista que se basa en datos observables para la estimación de parámetros fijos, el enfoque bayesiano aquí presentado deriva en una caracterización del comportamiento a fatiga a través de las curvas FCGR sustentada en la consideración de los parámetros como variables aleatorias. Así, la consecución de un ajuste óptimo de los resultados deja de ser conveniente y, en su lugar, se acepta un grado de ignorancia de la realidad que se pretende modelizar que, paradójicamente, sirve para generar resultados más fiables.

El desarrollo de la metodología se ilustra sobre un ejemplo real, tomando los resultados experimentales de propagación de grietas sobre un acero S316L producido por LPBF. Tras sendos ajustes singulares, el software OpenBugs, de libre acceso, se emplea en la simulación de un número suficiente de curvas FCGR, capaz de cubrir la presumible incertidumbre asociada al comportamiento del material.

Tras la puesta en práctica del procedimiento, se destacan las siguientes observaciones:

- La inferencia bayesiana posibilita la definición de una nube de curvas FCGR que supera en rigor y fiabilidad los análisis deterministas basados en leyes promedio, al capturar las incertidumbres propias de la respuesta del material.
- La solución viene dada por la definición de parámetros de acuerdo a funciones de densidad de probabilidad (*distribuciones posteriores*), en lugar de una optimización del ajuste con el propósito de alcanzar una regresión promediada del comportamiento del material.
- La ley fenomenológica de velocidad de propagación de grietas propuesta por Castillo-Canteli, dependiente de 4 parámetros, se tomó como modelo de evaluación. La resultante matriz de correlación de los parámetros contribuye a ratificar su robustez.
- Las simulaciones, que constituyen la solución verosímil de caracterización del material en forma de curvas FCGR, permiten realizar proyecciones en el campo S - N y a - N . Esto abre un campo de análisis útil en la aplicación del diseño bajo tolerancia al daño, ayudando al control y a la toma de decisiones durante las etapas de inspección a lo largo de la vida útil de componentes.

REFERENCIAS

- [1] BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- [2] M.S. Hamada et al. Bayesian Reliability. Springer Science & Business Media (2008).
- [3] U. Zerbst et al. Damage tolerant design of additively manufactured metallic components subjected to cyclic loading: State of the art and challenges. *Progress in Materials Science* (2021), 121, 100786.
- [4] E. Castillo et al. Obtaining S-N curves from crack growth curves: an alternative to self-similarity. *International Journal of Fracture* (2014), 187:159-72.
- [5] D. Lunn et al. The BUGS project: Evolution, critique and future directions. *Statistics in Medicine* (2009), 28 (25): 3049-3067.
- [6] S. Geman et al. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1984), 6, 721-741.
- [7] S. Blasón et al. Design of additively manufactured components based on locally representative material fatigue properties. *Revista Española de Mecánica de la Fractura* (2022), 4.
- [8] ISO 12108:2018. Metallic materials; Fatigue testing; Fatigue crack growth method.
- [9] Y. Murakami. Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Elsevier (2019), 2nd edition.
- [10] A. Du Plessis et al. Killer notches: The effect of as-built surface roughness on fatigue failure in AlSi10Mg produced by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing* (2020), 35, 101424.
- [11] J.C. Newman et al. An analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads. NASA Tech Pap 1979;1578.