

ESTRATEGIA PARA LA PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS EN PROGRAMAS EXPERIMENTALES DE FATIGA

M. López Aenlle*, A. Fernández Canteli*, M.J. Lamela Rey*, E. Castillo Ron* *.

* Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación
Universidad de Oviedo. Campus de Viesques. 33204 Gijón.

** Departamento de Matemática Aplicada.
Universidad de Cantabria, Avda de los Castros, s/n, 39005, Santander.

Resumen. La estrategia a seguir en la programación de los ensayos de fatiga adquiere una gran relevancia por su influencia sobre los costes y sobre la precisión requerida en el análisis. Una profunda comprensión del modelo sobre el que se apoya la evaluación de los resultados y el reconocimiento de la trascendencia que tienen la distribución por niveles y el número de resultados en los distintos niveles, es la clave para alcanzar sustanciales mejoras en la fiabilidad y correspondientemente en el coste de programas experimentales de fatiga. La definición de la estrategia comprende una planificación inicial, previa al comienzo de los ensayos, y unos criterios que permitan revisar la planificación inicial a fin de diagnosticar y corregir posibles anomalías, comprensibles y asumibles en todo programa experimental de fatiga, y mejorar la fiabilidad en la estimación de parámetros. En este trabajo se presenta una estrategia a seguir en la programación de ensayos basada en el modelo propuesto por Castillo et al. y en el método de ajuste de parámetros, desarrollado por los autores.

Abstract. The test strategy to be followed in fatigue test programming reaches high relevance due to its influence on costs and on the accuracy required in the analysis. A comprehensive understanding of the fatigue model upon which the evaluation of the results is based and the acceptance of the significant consequences of the stress level distribution and the number of results in the stress levels, is the key to reach substantial improvements in the reliability and in the cost of experimental fatigue programmes. The strategy definition combines an initial planning previous to the beginning of the tests, with some criteria allowing us to revise that initial planning in order to identify and correct possible anomalies, owing to any experimental fatigue programme, and to improve the reliability of the parameter estimation. In this paper, a strategy to be followed in the test programmes, based on the model proposed by Castillo et al. and on the parameter estimation method, developed by the authors, is presented.

1. INTRODUCCIÓN.

Los programas experimentales que se aplican para la caracterización de materiales de fatiga conllevan un considerable gasto de tiempo y coste económico, debido al alto número de ensayos necesarios y a su larga duración, que aumenta progresivamente a medida que el rango de tensión disminuye. A su vez, la precisión obtenida en el análisis depende de la cantidad de datos disponibles, pero sobre todo del acierto en la elección de los rangos de tensión a considerar. Como consecuencia, es necesario adoptar una solución de compromiso entre la dimensión del programa de ensayos y la fiabilidad ofrecida en el análisis de resultados, es decir, entre el rigor estadístico que requiere toda evaluación y una razonable credibilidad en la caracterización del material.

La interrupción de los ensayos una vez que se alcanza un determinado número límite de ciclos, es práctica habitual y se puede decir, obligada, para reducir la duración de los programas de ensayos. Como consecuencia, se dispone generalmente de muestras con los resultados de roturas, que por razones de coste suelen ser más bien escasos, y de algunos otros que sólo

aportan información parcial (ensayos censurados), características ambas que influyen negativamente en la evaluación de los mismos.

De este modo, parece lógico tratar de optimizar al máximo la estrategia de ensayos con el fin de que los resultados obtenidos proporcionen la máxima información posible al menor coste. Esta estrategia debe compatibilizarse con técnicas de análisis que permitan tener en cuenta la información parcial aportada por los ensayos interrumpidos de forma voluntaria o accidental [1,2].

En este trabajo se propone una posible estrategia para la planificación de ensayos, con la que se pretende alcanzar los objetivos de optimización mencionados, y que, aunque basada en el modelo Castillo et al.[1], es aplicable con generalidad en su metodología a cualquier modelo de fatiga.

De acuerdo con el modelo de Castillo et al. [1], el campo S-N (Fig. 1) para un elemento sometido a carga de amplitud constante viene definido como:

$$(\log N - B)(\log \Delta\sigma - C) = D \left[[-\log(1 - P)]^{1/A} - E \right], \quad (1)$$

donde N es la vida a fatiga medida en ciclos, $\Delta\sigma$ es el rango de tensión, P es la probabilidad de fallo; y A , B , C , D y E son los parámetros a estimar, con el siguiente significado:

A = Parámetro de forma de la distribución de Weibull.

B = Valor umbral o número de ciclos límite.

C = Límite de durancia.

D = Parámetro de escala.

E = Parámetro que fija la posición de la curva límite, o de probabilidad nula.

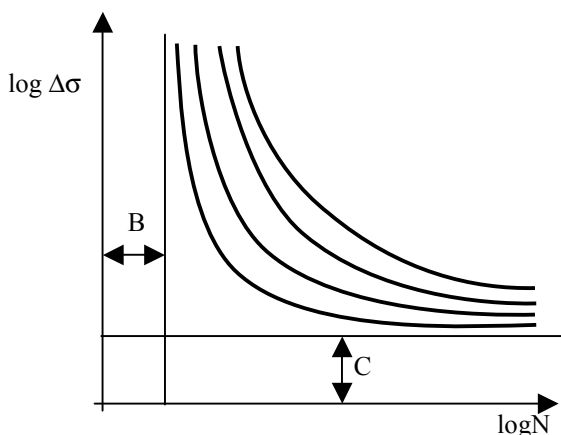


Fig. 1. Campo S-N en fatiga con las curvas de isoprobabilidad.

En programas de fatiga, se ha demostrado la conveniencia de aplicar una normalización estadística de toda la muestra de resultados, con el objeto de incrementar la fiabilidad de la evaluación. En este caso, la normalización estadística permite reducir datos pertenecientes a distribuciones de Weibull con el mismo parámetro de forma, β , si bien con diferentes parámetros de localización, λ , y de escala, δ (como es el caso de distribuciones de vida en fatiga para diferentes niveles de tensión), a una única distribución, y proceder así a la evaluación conjunta de los parámetros de la muestra normalizada y agrupada (Fig. 2).

2. PROBETAS.

Una decisión previa a cualquier programa de ensayos es la distribución óptima de las probetas entre los distintos ensayos que se van a realizar (estáticos, fatiga amplitud constante, fatiga aleatoria, ensayos destructivos, etc.). A la hora de tomar esta decisión puede ocurrir que el número de probetas esté prefijado de antemano o que haya que definir el número total a elaborar o mecanizar. No obstante, debe tenerse en cuenta que el coste de las probetas supone, en general, un porcentaje mínimo con

respecto al coste total de un programa de ensayos de fatiga.

Este es un punto de vital importancia para que la investigación pueda ser abordada con éxito y con fiabilidad, ya que en algunos casos una posterior preparación o fabricación adicionales de probetas puede no ser materialmente viable o recomendable por falta de homogeneidad en la muestra. Además ha de tenerse presente que un determinado porcentaje de resultados puede ser desechado (roturas por el tacón en materiales compuestos, interrupciones imprevistas en el ensayo por corte de suministro eléctrico y de agua, etc.).

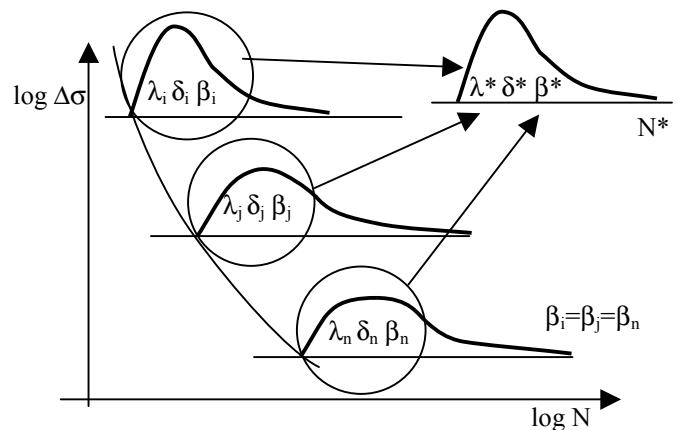


Fig. 2. Campo S-N con las funciones de distribución de $\log N$ para los diferentes rangos de tensión y la correspondiente función de distribución normalizada.

En el caso de que las probetas procedan de lotes distintos, deben mezclarse aleatoriamente a fin de que la muestra sea representativa del conjunto plural.

3. ENSAYOS ESTATICOS.

Los ensayos estáticos deben ser siempre previos a cualquier ensayo de fatiga, y se caracterizan principalmente por su corta duración. Los resultados de estos ensayos proporcionan parte de la información de partida para los posteriores ensayos de fatiga.

El valor de la resistencia estática influirá en la elección de los niveles de carga que se ensayarán en fatiga y en el valor máximo de la tensión que es conveniente aplicar. Esta característica, añadida a la rapidez de ejecución de estos ensayos, hace recomendable la ejecución de un mínimo de 10 ensayos estáticos, si se pretende obtener un orden de magnitud de la dispersión, y un mínimo de 15 para realizar un ajuste estadístico de los resultados.

Los ensayos estáticos se realizarán sobre probetas de todos los lotes. Así, analizando las hipotéticas causas de los resultados de dudosa fiabilidad se podrá determinar

si un determinado lote debe ser eliminado de la muestra por defectuoso.

El registro de la curva σ - ϵ permitirá conocer el comportamiento del material (lineal o no lineal) y el valor del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson, factores que influirán posteriormente en el comportamiento a fatiga.

En el caso de que la muestra contenga datos suficientes, se realizará un análisis estadístico de los resultados. Partiendo de la aplicabilidad general de la distribución de Weibull en fatiga, es importante deducir de los resultados del análisis, el valor del parámetro de localización λ de la tensión estática de rotura, además del valor medio y de la dispersión. Este valor de la tensión no debería ser sobrepasado en los ensayos de fatiga para evitar, en lo posible, que se produzcan roturas por fatiga de bajo número de ciclos.

4. ENSAYOS DE FATIGA DE AMPLITUD CONSTANTE.

4.1 Introducción.

La estrategia a seguir en los ensayos de fatiga con amplitud constante depende en gran medida de los objetivos finales de la experimentación. En este apartado se abordará la predicción de vida y la obtención de valores de cálculo.

Si el objetivo final es la predicción de vida, interesa conocer la expresión analítica de todo el campo S-N, es decir, la función $\Delta\sigma(N)$ en todo el rango de probabilidades. Esto presenta como principal inconveniente que los resultados correspondientes a probabilidades altas están asociados a ensayos cuya duración, larga de por sí, crece a medida que el rango de tensión disminuye. Ante esta problemática, el operador opta, en ocasiones, por la limitación de la duración de los ensayos (datos censurados) o por la realización de ensayos acelerados.

Por el contrario, los valores de cálculo en ingeniería, y en concreto en el caso de fatiga, están asociados a probabilidades de fallo bajas (generalmente del 5%), lo que significa que para la obtención de valores de cálculo solamente interesa el ajuste de la zona de probabilidades bajas. Por lo tanto, el esfuerzo debe centrarse en un ajuste fiable de esta zona.

Antes de abordar un programa de ensayos de fatiga de amplitud constante es necesario definir los parámetros a utilizar en los ensayos, como son:

- La variable principal que define la vida a fatiga del material. En materiales dúctiles $\Delta\sigma$ suele ser la variable determinante, mientras que, en materiales frágiles, como es el caso del hormigón o del vidrio, la variable que define la vida a fatiga suele ser σ_{\max} .

- El nivel de referencia de la tensión. Se puede optar por mantener constante el valor máximo σ_{\max} , el valor medio $\bar{\sigma}$, la relación $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, etc.
- La frecuencia de ensayo, teniendo en cuenta las limitaciones que imponen la probeta y la propia máquina de ensayos.

Al mismo tiempo se procederá a:

- Recopilar bibliografía del comportamiento a fatiga de un material similar, con el objeto de tener una información previa de la distribución del campo S-N. Esto ayudará a una definición previa de los rangos de tensión que deben ser ensayados.
- Elegir un modelo de fatiga que pueda ser aplicado al material.
- Seleccionar qué rangos de tensión y qué número de ellos se van a considerar en el ensayo. Los resultados de los ensayos estáticos y la información bibliográfica ayudarán en esta tarea. Inicialmente se recomienda ensayar en tres niveles con el objetivo de obtener una estimación orientativa del campo S-N.

Dado que lo que se pretende obtener es un ajuste de resultados de fatiga de media y larga duración, deben evitarse niveles muy altos de tensión que conduzcan a resultados de fatiga de bajos ciclos, que bajo ningún caso deberían fundirse con los de alto número de ciclos para el ajuste de los parámetros. Por ello, se recomienda para este ajuste inicial no realizar ensayos por encima del 95% del nivel de tensión que corresponde al parámetro de localización de los resultados estáticos.

Interesa que, en lo posible, todos los resultados provengan de roturas, por lo que es importante una elección idónea de los tres niveles iniciales. Sin embargo, una elección adecuada del nivel más bajo a ensayar no es sencilla, sobre todo si no se tiene información previa sobre el orden de magnitud del límite de endurancia. Los ensayos a niveles bajos tienen, por lo general, una larga duración y, en principio, no parecen deseables, pero por otro lado, los resultados de estos niveles ejercen una mayor influencia en la estimación del límite de endurancia (parámetro C del modelo), por lo que se debe adoptar una solución de compromiso entre la fiabilidad de la evaluación y el tiempo de ensayo. No es aconsejable, inicialmente, realizar ensayos a niveles muy bajos, sino que se recomienda proceder con tiento en la elección de los tres niveles iniciales, para obtener la rotura con un número asequible de ciclos, de modo que tras una primera estimación de los parámetros se pueda aproximar adecuadamente, si fuera necesario, el nivel más

bajo al límite de endurencia (Fig. 3), o por el contrario definir algún otro nivel intermedio.

- A partir de la estimación inicial del campo S-N se dispondrá de mejores criterios para definir la nueva estrategia a seguir.

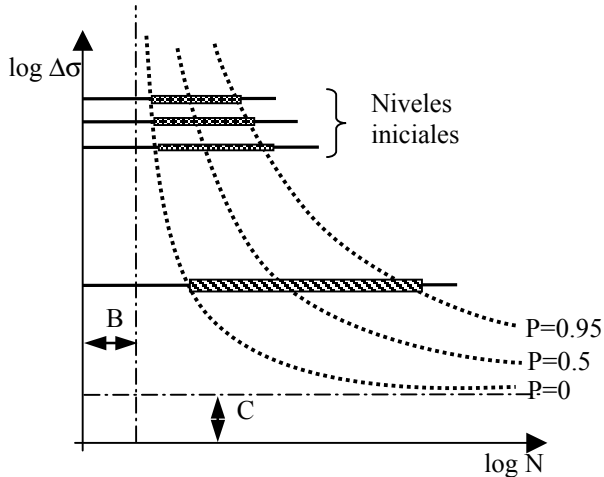


Fig. 3. Ajuste inicial del modelo y propuesta de nuevos ensayos en un nivel inferior.

Tanto si el objetivo que se persigue es la predicción de vida como si se pretende obtener valores de cálculo, se recomienda seguir la siguiente estrategia para llevar a cabo los ensayos, una vez abordados los pasos comentados anteriormente:

1. Realizar al menos 5 ensayos en cada uno de los tres niveles elegidos en el apartado anterior. Esta cantidad de resultados permite un primer ajuste del modelo de fatiga para obtener una aproximación inicial del campo S-N, con un coste relativamente bajo.
2. Registrar, si es posible, la evolución de la rigidez y de la curva de histéresis (si existe) en cada uno de los niveles, al objeto de determinar si se producen los mismos mecanismos de daño en todos los niveles. En el caso de que los mecanismos de daño de dos niveles no fuesen los mismos, teóricamente los resultados de éstos no deberían formar parte de la misma muestra. Otros métodos de ensayo no destructivos (inspección visual, fractografía, radiografía, etc.) pueden ayudar en esta tarea.
3. Normalizar los resultados y agruparlos en una única muestra.
4. Ajustar del modelo de fatiga para el campo S-N determinando los parámetros del mismo.

Al llegar a este punto, se tiene ya una estimación inicial del campo S-N, que permite definir claramente la estrategia a seguir en los ensayos posteriores, a saber:

5. Determinar en qué niveles (existentes y/o adicionales) se van a realizar nuevos ensayos y el número de ensayos por nivel.
6. Decidir si en los niveles más bajos de carga los ensayos se llevan hasta la rotura o si se establece un límite de ciclos para el cual se interrumpe el ensayo, aunque frente a esta opción, un ensayo acelerado siempre resulta ventajoso.

A partir de la primera estimación del campo S-N se obtiene también información sobre el orden de magnitud para la duración de los ensayos que se realicen posteriormente y sobre la probabilidad de ocurrencia de rotura, cuestión importante en la gestión de los laboratorios.

La estrategia a seguir después de la estimación inicial del campo S-N depende de los objetivos de la experimentación, por lo que en lo que sigue se abordan por separado la predicción de vida y la obtención de valores de cálculo.

4.2 Predicción de vida.

Si el objetivo es la predicción de vida a fatiga, interesa reforzar la información probabilística sobre todo el campo de Wöhler, para lo cual se recomienda:

7. Realizar un ensayo en los niveles anteriormente seleccionados a partir de la estimación inicial del campo S-N.
8. Ajustar el modelo de fatiga, añadiendo a la muestra cada resultado nuevo. De este modo, se realimenta continuamente el modelo de fatiga, pudiendo incluso cambiar la estrategia sobre la marcha del programa.
9. Repetir los apartados 7 y 8 hasta el final del programa de ensayos.

Además, habrá que tener en cuenta otros aspectos tales como:

- El número total de ensayos a realizar es difícil de determinar al inicio del programa de ensayos. Sin embargo, una vez que se obtiene la estimación inicial del campo S-N, se puede determinar el efecto de cada nuevo dato sobre el ajuste global y en consecuencia, decidir el final del programa de ensayos a partir de los cambios que se producen en los parámetros cada vez que se añade un resultado nuevo a la muestra.

4.3 Valores de cálculo.

En el caso de que el objetivo del programa experimental se restrinja a la obtención de valores de cálculo para el dimensionamiento a fatiga, todo el esfuerzo debe

centrarse en el ajuste de la zona de probabilidades bajas (Fig. 4), consecuentemente con la filosofía de los métodos convencionales de dimensionamiento basados en valores característicos, a partir de los cuales se deducen los valores de cálculo. En consecuencia, la estrategia de ensayos a seguir será diferente a la de predicción de vida.

En este caso, realizada la primera estimación para el campo S-N, los pasos a seguir serán:

7. Calcular, a partir de la primera estimación del modelo de fatiga, el número de ciclos a rotura correspondientes a probabilidades bajas (valores cercanos a $P=0.05$) para cada nivel a ensayar. Debe tenerse en cuenta que hay un cierto margen de error al tratarse de la primera estimación.
8. Realizar ensayos suplementarios en los niveles previstos. Todos aquellos ensayos en los que el número de ciclos sobrepasen la zona de probabilidades de interés (probabilidades bajas) serán interrumpidos, y sus resultados se considerarán censurados.
9. Ajustar el modelo de fatiga añadiendo a la muestra el resultado de cada nuevo ensayo. Aquí debe tenerse en cuenta que todos los resultados (incluidos los censurados) serán considerados en el ajuste, ya que afectan al valor de la probabilidad asociada a cada ensayo.
10. Repetir los apartados 8 y 9 hasta finalizar el programa de ensayos.

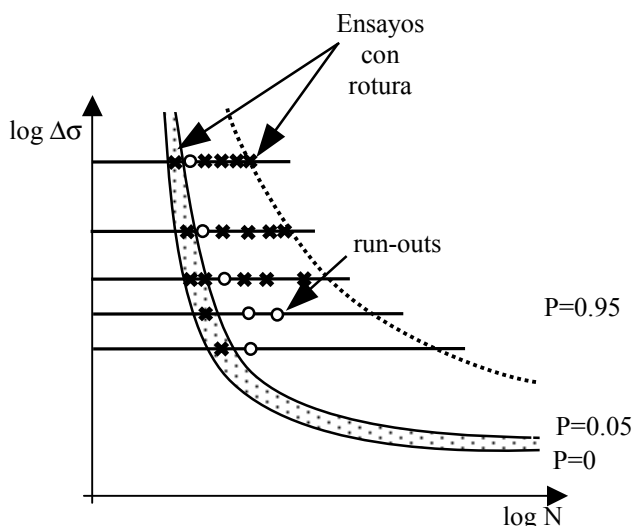


Fig. 4. Obtención de valores de diseño para fatiga.

En el ajuste final se incluirá la muestra completa. En el caso de que el ajuste no resultara satisfactorio, se limitará únicamente a la cola de mínimos, siempre que el número de resultados en la

zona de probabilidades bajas sean suficientes para permitir un ajuste óptimo.

4.4 Casos particulares: Influencia del tamaño de la probeta.

En diferentes ocasiones, el ingeniero se encuentra con la necesidad de extrapolar la resistencia a fatiga, deducidas de ensayos de laboratorio sobre probetas de longitud muy corta, hasta las grandes longitudes de las estructuras reales. Se sabe que el tamaño de las probetas juega un papel trascendental, tanto en la fiabilidad del ajuste del modelo, como en el dimensionamiento a fatiga.

El caso de los cables de puentes atirantados o de puentes colgantes es paradigmático. La aplicación del modelo del eslabón más débil presupone independencia estadística en la distribución de los defectos de los elementos vecinos, o independencia asintótica, que puede ser aceptada en el caso de independencia no excesivamente fuerte y que está sustentada por la teoría de valores extremos. Su aplicación sólo requiere que la longitud de ensayo supere una longitud umbral a determinar experimentalmente.

Por ello, sin un estudio previo que permita conocer esa longitud umbral, el riesgo de una inadecuada extrapolación basada en la hipótesis de independencia, es lógicamente menor cuando se emplean grandes longitudes de ensayo.

Como se deduce, el problema de dependencia en los resultados de fatiga correspondiente a piezas adyacentes, es crucial y representa un factor crítico a considerar en la aplicación del dimensionamiento a fatiga de elementos estructurales.

Frecuentemente se ignoran todos estos aspectos, dando como absolutos, es decir, como independientes de la longitud, resultados de fatiga que están materialmente ligados a la longitud del ensayo, en general pequeña. Este proceder es incorrecto y puede inducir a un dimensionamiento básicamente erróneo y del lado de la inseguridad en la predicción de vida, al extrapolar resultados a longitudes reales mucho mayores que la longitud de ensayo, como es el caso de los cables de puentes atirantados.

Las razones para esta alarmante situación se debe, en primer lugar, a una deficiente formación estadística en los calculistas, unida a la falta de reconocimiento de la trascendencia del efecto de la longitud en la seguridad de la estructura, y en segundo lugar, a la limitada longitud de ensayo que permiten las máquinas dinámicas comerciales (basta solamente comprobar los escasos estudios de fatiga realizados con longitudes superiores a 2 m) [1,3].

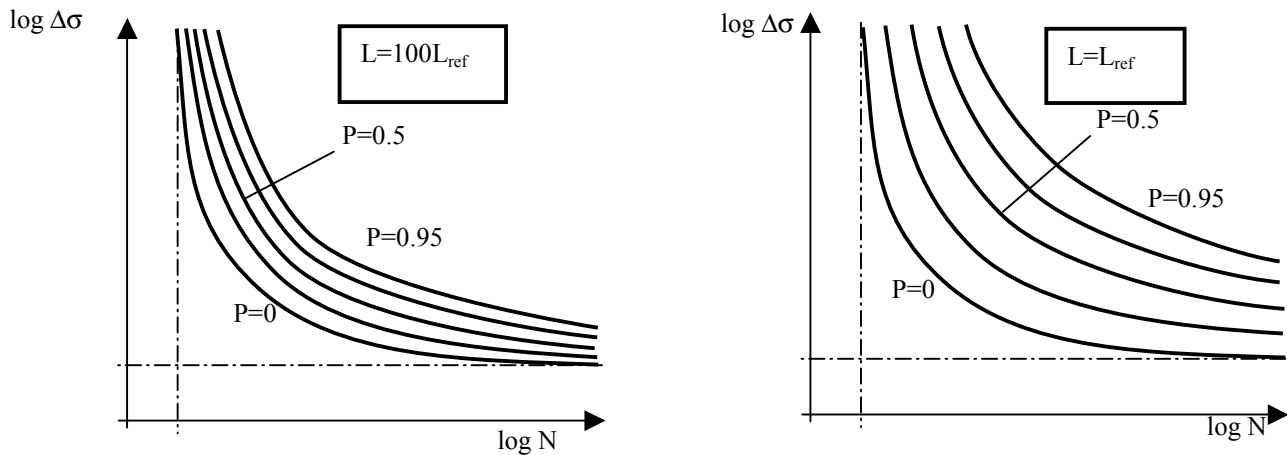


Fig. 5. Campos de Wöhler para dos longitudes diferentes, L_{ref} y $100L_{ref}$.

Es interesante destacar que el empleo de probetas largas conlleva menor duración de los ensayos, con menor valor medio y menor dispersión en los resultados (Fig. 5), lo que representa ventajas obvias en coste y fiabilidad. Ello se debe a que, admitida la validez de la hipótesis de independencia, el resultado del número de ciclos hasta la rotura de una probeta de longitud $n \cdot L_0$ es equivalente al resultado más desfavorable, seleccionado entre n ensayos realizados con una longitud L_0 (principio del eslabón más débil).

Con ello queda claro que el ahorro en ensayos y fiabilidad está del lado de los ensayos con probetas largas (Fig. 6).

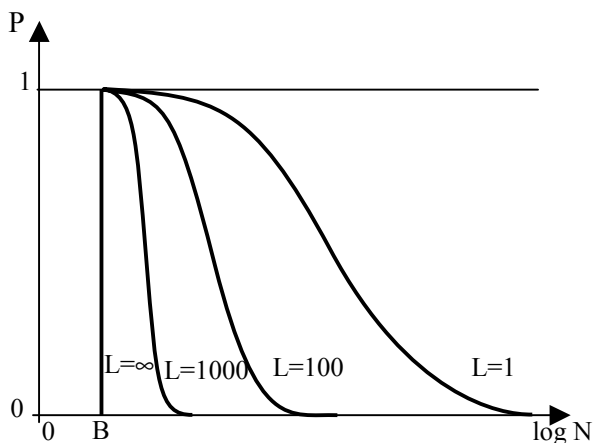


Fig. 6. Función de supervivencia para diferentes longitudes 1, 100, 1000, ∞ .

En cualquier caso, siendo correcta la hipótesis de independencia o de independencia asintótica, la extrapolación a otra longitud será siempre más fiable desde longitudes mayores, como fácilmente se deduce de la Fig. 7 en la que se observa cómo el rango de

probabilidades implicadas en la extrapolación es considerablemente más reducido para las longitudes menores.

En definitiva la elección de longitudes de ensayo lo mayor posible, comporta una serie de ventajas muy dignas de considerar, y en el supuesto de la existencia de una máquina que permita el ensayo de grandes longitudes, únicamente comporta dos inconvenientes como son, la necesidad de reducir la frecuencia de ensayo, debido a la capacidad de deformación más limitada de la máquina de ensayos, y el mayor coste de las probetas.

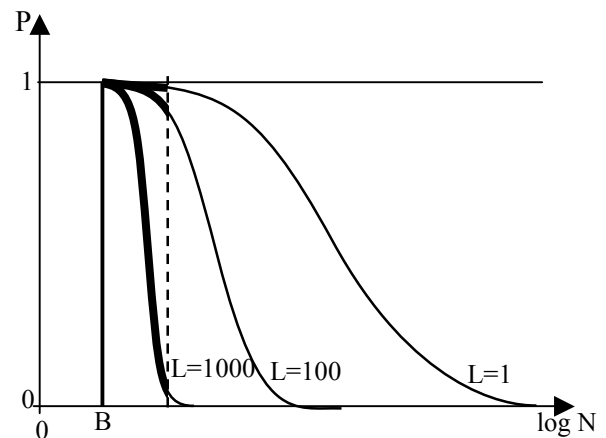


Fig. 7. Rango de probabilidades implicados en la extrapolación para longitudes diferentes 1, 100, 1000.

4.5 Casos particulares: Interrupciones.

La larga duración de los ensayos de fatiga, creciente a medida que el nivel de tensión disminuye, hace costosa, o incluso prohibitiva, la realización de ensayos a rotura en niveles relativamente bajos de carga. Como

consecuencia, el analista trata de buscar opciones que permitan obtener el mayor rendimiento posible a su programa de ensayos. Una de las opciones que se pueden adoptar, es la interrupción voluntaria de los ensayos considerando un número límite de ciclos, tal y como se muestra en la Fig. 8.

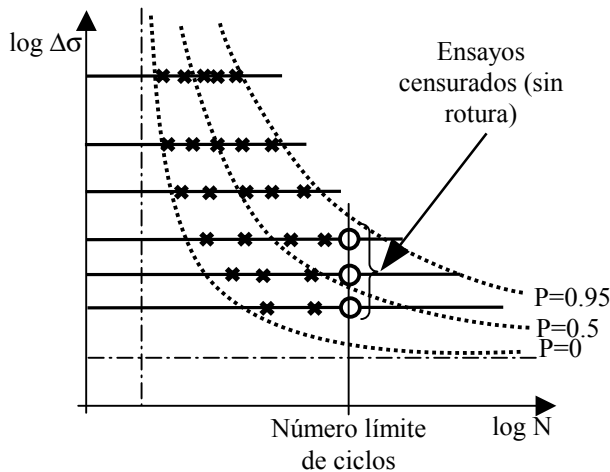


Fig. 8. Ensayos censurados (run-outs).

Como generalmente se dispone de muestras de datos de reducido tamaño, los resultados correspondientes a ensayos interrumpidos (datos censurados) deben incorporarse al análisis con el objeto de mejorar la fiabilidad de la estimación. En el análisis estadístico de resultados de fatiga que incluyen datos censurados, debe tenerse en cuenta:

- Los ensayos censurados nunca deben ser eliminados de la muestra, ya que tendrán que ocupar la posición que les corresponde en el cuadro final de resultados, al tener asignado un determinado valor de probabilidad. Se han desarrollado técnicas estadísticas para incluir este tipo de resultados en el análisis[1,2].
- Si por debajo de un determinado nivel de tensión existen solamente datos censurados, éstos no se tendrán en cuenta inicialmente en el análisis, ya que no es posible saber, con la información disponible, si en ese nivel se producirían roturas (Fig. 9). La consideración de estos datos en el análisis puede conducir a una estimación errónea del límite de endurancia. Esto es debido a que el dato censurado influye en los valores de los parámetros del modelo, y éstos, a su vez, van asignando ese dato al valor de probabilidad que le corresponde, manteniéndose en este proceso de iteración una influencia recíproca entre ambos efectos, sin que se llegue a corregir la hipótesis falsa de partida. En consecuencia, en estos casos se realizará un ajuste inicial sin tener en cuenta estos datos en el análisis. Si una vez realizado el primer ajuste se comprueba que estos datos quedan dentro de la zona $0 < P < 1$, se podría

proceder a un nuevo ajuste añadiendo estos datos censurados a la muestra. Basta imaginar el caso de que uno de estos resultados esté por debajo del límite de endurancia, para comprender la necesidad de eliminar este tipo de resultados.

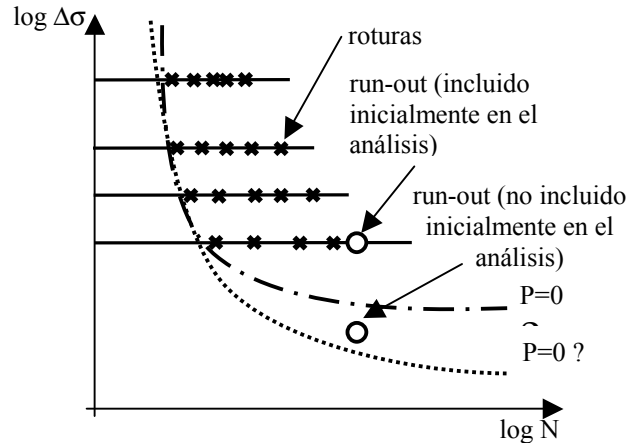


Fig. 9. Influencia de los datos censurados en niveles bajos.

4.6 Casos particulares: Ensayos acelerados.

Un ensayo censurado supone una información parcial al no alcanzarse la rotura. Algunos analistas deciden la rotura estática de estas probetas con el objetivo de obtener una información adicional. No obstante, siempre que sea posible, debe buscarse la rotura por fatiga. Así, surgen los ensayos acelerados (Fig. 10).

Aunque existen diversos tipos de ensayos acelerados, aquí se describirá el que presenta una mayor sencillez en el análisis utilizando el modelo de Castillo et al. [1]. Es una técnica a considerar cuando, al tratar de cubrir la zona inferior de la curva S-N, una probeta alcanza el número límite de ciclos sin rotura, presumiblemente porque el nivel de tensión aplicado, se sitúa en una zona cercana al límite de endurancia (nivel II en la Fig. 10), aunque también se podría considerar la interrupción del ensayo voluntariamente una vez rebasadas las probabilidades bajas, si se persiguen solamente los valores de cálculo en fatiga. A continuación se eleva el nivel de tensión hasta un valor que permita, previsiblemente, alcanzar la rotura de la probeta en un tiempo de ensayo razonable. Para la realización de ensayos acelerados, se deberá tener en cuenta que:

- Los ensayos que se realicen para la primera estimación del campo S-N no deben ser excesivamente largos, por lo que se realizarán en niveles razonablemente altos de carga.
- Una vez obtenida la primera estimación del campo S-N, se pueden realizar los ensayos acelerados. Para ello, cada ensayo se iniciará en niveles bajos

de carga, hasta un número de ciclos razonable que se encuentre dentro del rango de probabilidades bajas o medias, incrementando posteriormente el nivel de tensión para acelerar la rotura de la probeta. De esta manera, la información que aporta el ensayo es total al alcanzarse la rotura, por lo que puede tenerse en cuenta como un resultado más.

- Para incorporar los datos de ensayos acelerados al análisis, hay que realizar un proceso de conversión de los ciclos transcurridos al nivel II en un número de ciclos equivalente en el nivel I (Fig. 10), que se sumarán a los transcurridos en el nivel I.
- No es recomendable la realización de ensayos acelerados antes de la primera estimación del campo S-N, ya que se corre el riesgo de que la conversión se realice fuera de la zona $0 < P < 1$, aunque esto no suponga un inconveniente para el modelo empleado. Por otro lado, añade más dificultad a la estimación de los parámetros, al tener que realizarse por métodos iterativos (el proceso de conversión requiere conocer previamente B y C, que lógicamente son desconocidos antes de la estimación inicial de los parámetros). Además, la realización de ensayos acelerados antes de conocer los parámetros del modelo puede conducir a resultados no válidos o a suponer un gasto inútil sin compensación de información, tal como se deduce de la Fig. 11 en la que se muestra cómo al estar el nivel II por debajo del límite de endurancia, no contribuye teóricamente a la rotura, por lo que se habría podido comenzar directamente en el nivel I, en el que sí se produce la rotura.

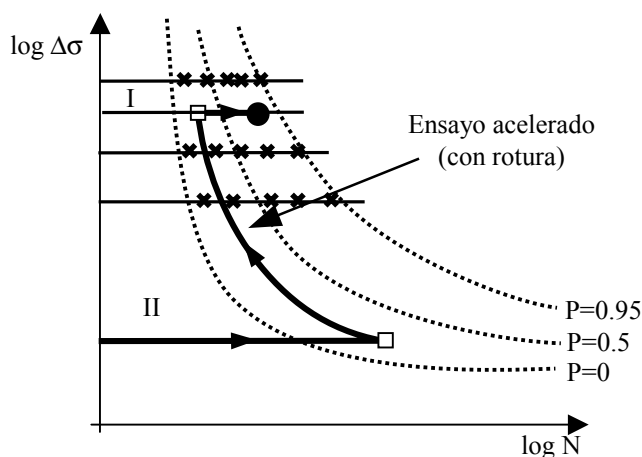


Fig. 10 Representación de un ensayo acelerado.

5. CONCLUSIONES

El modelo de Castillo, junto con el procedimiento de normalización de resultados, permite elaborar una estrategia de ensayos para la optimización en la planificación de programas experimentales.

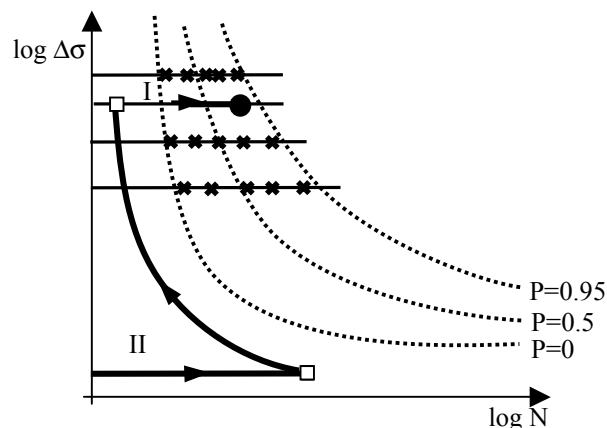


Fig. 11. Ensayo acelerado no válido.

6. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen la financiación económica recibida de la CICYT a través del proyecto de investigación MAT95-0613-C02-01.

7. REFERENCIAS.

- [1] E. Castillo, A. Fernández Canteli, V. Esslinger, B. Thürlimann. "Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables". IABSE Proceedings P-82/85, 1985.
- [2] M. López Aenlle. "Caracterización a fatiga de compuestos bajo carga aleatoria y carga por bloques". Tesis doctoral, U. Oviedo, 2000.
- [3] A. Fernández Canteli, V. Esslinger, B. Thürlimann. "Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen". Bericht Nr. 8002-1, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1984