



**INSTITUTO
SABATO**

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA

MAESTRIA
en CIENCIA Y TECNOLOGIA
de MATERIALES

FATIGA DE MATERIALES METÁLICOS: CONTAJE DE CICLOS

Leandro José Clemente

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
"Prof. Jorge A. Sabato"

Fatiga de materiales metálicos: Contaje de ciclos (*)

Por Ing. Leandro José Clemente

Directores:

Ing. A. F. Iorio

Ing. E. Chomik

(*) Tesis para optar al título de *Magíster en Ciencias y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2015

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION CAC

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un software, que detalle cuantos ciclos de carga o deformación (teniendo en cuenta su amplitud y carga media), fueron aplicados a un componente en servicio, con el fin último de poder estimar su daño acumulado.

Para esto, se diseñó un software con interfaz gráfica utilizando el lenguaje de programación Matlab 2014. El programa lee un archivo de datos que contiene los valores de las deformaciones y/o tensiones registradas (en una probeta o componente en servicio que fue adquirido en campo o en laboratorio), clasifica los ciclos según la amplitud (de tensión o deformación) y la carga media. A partir de esto hace un recuento de ciclos y los presenta en un histograma. Posteriormente, si se conocen las propiedades de fatiga del material con el que está hecho el componente, se calcula la cantidad de ciclos para que se produzca la rotura en cada amplitud registrada. Luego, mediante la regla de Miner-Palmgren se puede estimar el daño acumulado en el componente.

Para probar el funcionamiento del algoritmo con respecto al conteo de ciclos se realizaron diferentes pruebas mediante funciones matemáticas y ensayos de laboratorio. En el programa existe un error en la clasificación de los ciclos debido a que se contabiliza el valor medio (o centro) de los máximos y mínimos (de la amplitud de tensión o deformación y en carga media) en cada intervalo. Este error es menor al 5%, y se reduce aumentando la cantidad de intervalos en que se divide el histograma. Los resultados obtenidos con respecto al conteo de ciclos, en ambos casos, fueron satisfactorios.

Como primera aproximación a la estimación del daño acumulado, se realizaron dos pruebas ensayando probetas, del mismo material, en el laboratorio hasta la rotura. Se utilizó el algoritmo para discriminar los ciclos del ensayo y corroborarlos con los programados al inicio del mismo. Con estos valores y las propiedades de fatiga del material, se estimó el daño acumulado con la regla de Miner-Palmgren. Se obtuvieron estimaciones diferentes para cada una de las probetas (para la primera probeta, el daño es de 0,8 y para la segunda 1,39). Según bibliografía consultada, la estimación del daño acumulado por medio de la regla de Miner-Palmgren, puede variar entre 0,5 y 2. La idea es que el método de estimación del daño indique una alerta temprana para poder analizar el componente con métodos más exhaustivos.

Abstract

The main aim of this work was to develop a software, capable of counting how many cycles of load or deformation (taking into account its amplitude and mean load) were applied to a service component, with the final goal of estimating the its accumulated damage.

In order to do achieve this goal software with a graphic interface was designed using Matlab 2013 language. The algorithm reads a data file containing the deformations and/or loads values registered (in a sample or service component, acquired in field or laboratory), classifies the cycles according to the load or deformation amplitude and mean load. From this a number of cycles recount is made and presented as a histograms. Furthermore, if we know the fatigue properties of the material, from which the component is manufactured, we can calculate the number of cycles in order to obtain the material failure for each registered amplitude. Finally, using the Miner-Palmgren Rule the damage in the component can be estimated.

In order to probe the algorithm in relation to the cycle counting, different tests were made using both mathematical functions and laboratory experiments. The software presents an error in the classification of the cycles because of the fact that the mean value (or centre) over each interval is registered. This deviation is lower than 5%, and it is improved increasing the number of intervals of the histogram. The results obtained in relation to the cycles counting, in both cases, were satisfactory.

As a first approach to the estimation of the accumulated damage, two tests were performed by testing samples of the same material, in the laboratory to failure. Algorithm is used to discriminate the test cycles and corroborate with the scheduled experiment. With these values and the fatigue properties of the material, the accumulated damage with the Miner-Palmgren rule was estimated. Different estimates were obtained for each of the specimen (for the first specimen, damage is 0.8 and for the second 1.39). According to the bibliography, estimating the damage accumulated through the Palmgren-Miner rule can vary between 0.5 and 2. The idea is that the method of estimating the damage indicates an early warning to analyse the component with more comprehensive methods.

Agradecimientos

Deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a todas las personas, que de una forma u otra, han contribuido a desarrollar este trabajo, en particular a mis Directores, el Ing. A. F. Iorio y E. Chomik, por su inestimable ayuda, dedicación y apoyo prestados durante la realización de esta Tesis.

A todos mis amigos y compañeros agradezco el darme ánimos y continuo aliento.

Por último agradecer a mis padres, hermanos y a Coty el indudable esfuerzo que han realizado para que todo esto fuera posible.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 - Fatiga y Daño acumulado	
1.1 - Fatiga en los materiales.	2
1.1.1 - Etapas en el proceso de falla por fatiga.	3
1.1.2 - Regímenes de fatiga	5
1.1.3 - Modelos de fallas por fatiga	6
1.1.3.1 – Modelo de Vida-Esfuerzo (Stress-Life, S-N)	7
1.1.3.2 – Modelo de Vida-Deformación (Strain-Life, ϵ -N)	11
1.1.3.3 – Mecánica de fractura elástica lineal (LEFM)	16
1.1.4 – Influencia de la tensión media y de la deformación media	17
1.2 – Daño acumulado	19
1.2.1 – Teoría del daño lineal – Palmgren y Miner	20
1.2.2 - Teoría de Marco-Starkey – Teoría no lineal	21
1.3 – Factores modificadores del límite de resistencia a la fatiga	22
1.3.1 – Factor de superficie (K_a)	23
1.3.2 – Factor de tamaño (K_b)	24
1.3.3 – Factor de carga (K_q)	25
1.3.4 – Factor de temperatura (K_d)	25
1.3.5 – Factor de efectos diversos (K_g)	26
1.3.6 - Factor de fiabilidad (K_c)	26
1.3.7 - Factor de concentración de tensiones (K_f , K_t)	28
1.3.7.1 - Método de la tensión local	28

1.3.7.2 - Método de la deformación local	29
1.3.8 – Consideraciones a tener en cuenta en el uso de las curvas de fatiga	32
1.4 – Cargas variables	33
1.4.1 – Métodos de dominio de la frecuencia	35
1.4.1.1 – Métodos de dominio del tiempo – Cruce de nivel (Level-crossing Counting)	38
1.4.1.2 – Métodos de dominio del tiempo – Conteo de picos (Peak counting)	39
1.4.1.3 – Métodos de dominio del tiempo – Rango simple (Simple-range counting)	39
1.4.1.4 – Métodos de dominio del tiempo – Rainflow counting	40
Bibliografía del capítulo 1	42
Capítulo 2 – Presentación del software	
2.1 – Pilares necesarios para el correcto uso del software	44
2.2 – Diagrama de Flujo del programa	48
2.3 – Expansión de los objetivos propuestos en la tesis	48
2.3.1 – CNEA – Rainflow Counting - Version 1.0	49
2.3.2 – CNEA – Rainflow Counting - Version 2.0	50
2.3.3 – CNEA – Rainflow Counting - Versión 2.1	52
2.4 –Posibilidades de expansión	53
Bibliografía del capítulo 2	55
Capítulo 3 – Funcionamiento del software	
3.1 – Ventana Principal	56
3.2 – Subprograma “Adaptar datos”	57
3.3 – Subprograma “Selección del material”	59

3.4 – Botón "Carga de datos"	60
3.5 – Subprograma "Conteo de ciclos"	61
3.6 – Subprograma "Curvas y daño acumulado"	63
Capítulo 4 – Validación experimental del funcionamiento del software	
4.1 –Validación del algoritmo de conteo de ciclos	65
4.1.1 – Set de pruebas con funciones sinusoidales	66
4.1.1.1 - Prueba 1: $\text{sen}(3x)$	66
4.1.1.2 - Prueba 2: $2\text{sen}(3x)$	68
4.1.1.3 - Prueba 3: $2\text{sen}(6x)$	69
4.1.1.4 - Prueba 4: $1 + \text{sen}(3x)$	70
4.1.1.5 - Prueba 5: $\text{sen}(3x) + \text{sen}(x)$	71
4.1.1.6 - Prueba 6: $\text{sen}(3x) + 5\text{sen}(x)$	72
4.1.1.7 - Prueba 7: $\text{sen}(3x) + \text{sen}(5x)$	72
4.1.1.8 - Prueba 8: $\text{sen}(3x) + \text{sen}(5x) + 5\text{sen}(x)$	73
4.1.2 – Set de experiencias con "datos aleatorios" con cotas preestablecidas	74
4.1.2.1 – Prueba datos aleatorios 1	74
4.1.2.2 – Prueba datos aleatorios 2	75
4.1.2.3 – Prueba datos aleatorios 3	76
4.1.3 – Set de pruebas experimentales	78
4.1.3.1 – Prueba experimental uno	80
4.1.3.2 – Prueba experimental dos	82
4.1.3.3 – Discusión de resultados obtenidos en las pruebas 1 y 2	86
4.2 – Primeras aproximaciones con el algoritmo de estimación de daño acumulado	88
4.2.1 – Primera experiencia en la estimación del daño acumulado	90

4.2.2 – Segunda experiencia en la estimación del daño acumulado	91
4.2.3 – Discusión de resultados obtenidos en las dos experiencias	92
Bibliografía del capítulo 4	94
5 – Conclusiones y recomendaciones	95
Anexo 1 – Ejemplo de conteo de ciclos por el método Rainflow Counting.	97
Anexo 2 – Tabla de los ciclos del segundo ensayo	101

Introducción

La fatiga en los materiales es un fenómeno que afecta a la mayoría de los componentes en servicio es producida bajo condiciones de esfuerzos dinámicos que causan, con el tiempo, la fractura de la pieza.

En la operación de las centrales nucleares se requiere que se preparen y ejecuten programas de mantenimiento, ensayos y vigilancia de los sistemas, estructuras y componentes críticos para una operación segura de la central. Además se debe verificar que estos sistemas, estructuras y componentes se mantengan dentro de los parámetros y aplicación de diseño a lo largo de su vida útil, incluyendo una probable extensión de vida de la misma. Estos programas deben tomar en consideración las condiciones normales y accidentales, las características de degradación de los sistemas, estructuras y componentes, como así también los requerimientos impuestos por el ente regulador y re-evaluar esta información en base a la experiencia operativa.

La fatiga es uno de los mecanismos posibles de degradación de los componentes y sistemas críticos (tuberías) del circuito primario y moderador, que es causada por las diversas condiciones de servicio como por ejemplo el estado de tensiones, la temperatura de operación, las vibraciones y composición química del agua de enfriamiento. Por lo tanto, para determinar si los componentes y sistemas son aceptables para continuar en servicio o qué medidas correctivas deberán tomarse para asegurar la operación normal de la central nuclear, se propuso desarrollar un software que cuente los ciclos de las diferentes amplitudes, con vistas de estimar el daño acumulado del componente en servicio.

Capítulo 1 – Fatiga y Daño acumulado

1.1 – Fatiga en los materiales.

El término “fatiga” fue usado por primera vez por **Poncelet** en 1839, para describir la situación de falla de los materiales sometidos a cargas variables. Debido a que la falla por fatiga tiene apariencia frágil, se pensaba que el material se había “cansado” y hecho frágil después de soportar un cierto número de fluctuaciones de esfuerzo (1). Similarmente, en 1843, **Rankine** publicó un estudio sobre las causas de la ruptura inesperada de los muñones de los ejes de ferrocarril, en el cual decía que el material dúctil se había cristalizado y hecho frágil debido a la fluctuación de los esfuerzos (2).

Luego, en 1870, después de 12 años de investigación sobre las fallas por fatiga, el ingeniero alemán **August Wöhler** publicó los resultados de su estudio, en el cual se mostraba como responsable de la falla al número de ciclos de esfuerzo. Al realizar pruebas sobre las mitades rotas de los ejes que habían fallado por fatiga, observó que el material tenía la misma resistencia y ductilidad bajo carga de tensión que el material original; es decir, el material no se había “cansado” ni fragilizado como se creía (3). Sin embargo, el término fatiga se sigue utilizando para referirse a las fallas de elementos sometidos a cargas variables. Entonces por definición podemos decir que:

“La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones VARIABLES en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones (ASTM)” (4).

En la definición anterior podemos encontrar 4 palabras que suscitan una especial atención:

- **Progresivo:** implica que el proceso de fatiga ocurre en un período de tiempo o de uso.
- **Localizado:** el proceso opera en un área local en lugar de a lo largo de todo el componente.
- **Grietas:** Se producen grietas en el material que van creciendo conforme se sigue sometiendo al mismo a un historial de tensiones o deformaciones variables en el tiempo.

- **Fractura:** la última causa de todo tipo de fatiga es que la falla se da porque la grieta creció hasta el punto en el cual el material no puede tolerar más tensión.

Generalmente, un gran porcentaje de piezas que fallan en servicio (80-90%) lo hacen por causas relacionadas a este fenómeno (5; 6), por lo tanto, mencionaré algunos accidentes relacionados con fatiga:

- **1842 (Mayo 8)** - Accidente de tren Versalles-Paris: 53 muertos y 40 seriamente heridos (eje de locomotora roto) (7).
- **1953-54 – Havilland Comet (Comet británico: 1ª aeronave a reacción comercial para pasajeros):** 3 aeronaves se partieron en el aire. Estos accidentes fueron causados por ciclos de presurización y despresurización de la cabina (concentración de esfuerzos en las esquinas, relativamente agudas, de los agujeros para las ventanas y en los agujeros de los pasadores) (8).
- **1988 - Boeing 737 (Aloha Airlines):** perdió un tercio de la parte superior de la cabina en pleno vuelo (atterizó con pérdidas mínimas de vida) (9).

En el estudio de los materiales en servicio, como componentes de máquinas o estructuras, debe tenerse en cuenta que las sollicitaciones predominantes a las que generalmente están sometidos no resultan estáticas ni cuasi-estáticas, muy por el contrario, en la mayoría de los casos se encuentran afectados por cambios de tensiones, ya sean de tracción, compresión, flexión o torsión, que se repiten sistemáticamente y que producen la rotura del material para valores de esfuerzos mucho menores que los calculados en ensayos estáticos. En la experiencia cotidiana se observa que repetidos ciclos de carga y descarga debilitan las piezas a lo largo del tiempo incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo de la tensión de rotura estática e incluso del límite elástico del material. Cada ciclo de fluctuación de la tensión deteriora o daña la pieza un poco. Tras un número de ciclos determinado, la pieza está tan debilitada que comienza a generar fisuras, las cuales después de un cierto crecimiento, fracturan el material (10).

1.1.1 – Etapas en el proceso de falla por fatiga.

La grieta o grietas que se desarrollan en un componente sometido a fatiga transcurren en 3 etapas:

- Etapa I: Nucleación de la fisura.
- Etapa II: Crecimiento y propagación de la fisura.
- Etapa III: Fractura del componente.

Etapa I: Es la de iniciación de la fisura y su propagación a lo largo de planos de deslizamiento, extendiéndose desde la superficie hacia el interior del material formando un ángulo de aproximadamente 45° respecto del esfuerzo axial. En esta etapa, la grieta no se extiende normalmente a través de más de 2 o 5 granos alrededor del origen.

Etapa II: Se produce un cambio de dirección en el crecimiento de la grieta, que va desde los 45° hasta los 90° con respecto al eje de los esfuerzos principales aplicados al sistema. La superficie de fractura durante el crecimiento de la etapa II está caracterizada por la presencia de estriaciones y marcas de playa que pueden ser relacionadas, en su densidad y ancho, con el nivel del esfuerzo aplicado. La superficie de fractura producida durante el crecimiento en la etapa II es relativamente lisa.

Etapa III: Ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no puede soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es el resultado de una sobrecarga, puede ser frágil, dúctil, o una combinación de ambas, dependiendo básicamente de la naturaleza del material.

La duración de cada una de las etapas descriptas anteriormente puede variar considerablemente en función del tipo de material, carga aplicada, geometría, temperatura e irregularidades. Generalmente resulta difícil distinguir las etapas antes mencionadas (11).

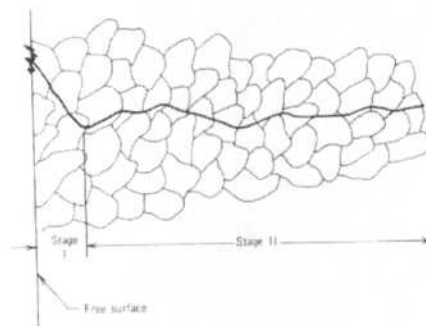


Fig. 1.1 - Etapa I y II de cómo crece la fisura (11).

La característica más resaltante que generalmente se halla en las superficies de fractura por fatiga son las marcas de playa (fig. 1.2), las cuales están centradas alrededor de un punto en común que corresponde al origen de la grieta de fatiga. Estas marcas resultan de cambios en la magnitud de la carga o la frecuencia (12).

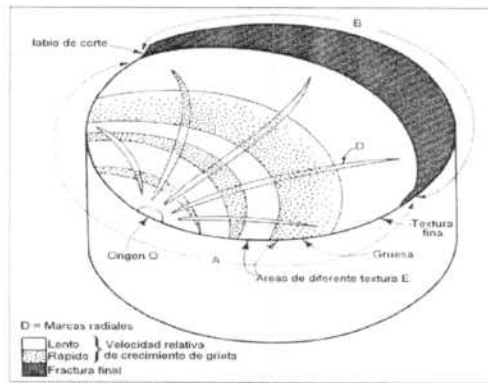


Fig. 1.2 - Características de la superficie de falla típica de un metal dúctil sometido a cargas cíclicas (13).

La zona final de una superficie de fractura por fatiga es frecuentemente fibrosa, pareciéndose a la superficie de fractura de probetas de un ensayo de impacto o de tenacidad de fractura del mismo material. El tamaño y la forma de la zona de fractura final dependen de la magnitud, dirección y modo de carga.

1.1.2 - Regímenes de fatiga (14).

Uno de los mayores obstáculos para el desarrollo de los modelos de predicción de vida es definir la transición entre iniciación y propagación de fisura. Desde el punto de vista de los micromecanismos que originan el proceso tiende a adoptarse la nucleación de defectos de tamaño micrométrico, en bandas de deslizamiento o límites de grano, como la grieta del estado inicial de fallo por fatiga. Por otra parte, desde el punto de vista práctico en ingeniería tiende a relacionarse la nucleación, y el tamaño inicial de grieta usado para diseño, con el límite de resolución del equipo de detección de las mismas (generalmente del orden de fracciones de milímetro).

La vida total a fatiga de un componente se define como la suma del número de ciclos necesarios para iniciar la grieta y el necesario para propagarla de forma estable hasta un tamaño final. Para amplitudes de tensión bajas, el 90 % de la vida del componente se

debe a la etapa de iniciación, mientras que para amplitudes altas la mayor parte de la vida es agotada en la propagación de la grieta.

Por eso cuando se tienen elementos sometidos a esfuerzos cíclicos se habla de los regímenes de fatiga:

- **Fatiga de bajo ciclaje (Low Cycle Fatigue, “LCF”)**
- **Fatiga de alto ciclaje (High Cycle Fatigue, “HCF”)**

Estos regímenes tienen relación con el número de veces que se repiten los esfuerzos en un elemento. Un régimen de bajo ciclaje es aquel en el cual se somete un elemento a un número de ciclos de esfuerzo que varía aproximadamente entre 10^4 a 10^5 ciclos, según el material. Aunque es lógico pensar en que no existe una línea divisoria exacta entre los dos regímenes, es usual hablar de 10^5 ciclos como línea divisoria; es decir, si una pieza soporta menos de 10^5 ciclos, está en régimen de bajo ciclaje, mientras que si soporta más de 10^5 ciclos, está en régimen de alto ciclaje. Esta clasificación es conveniente desde el punto de vista de la aplicación de los modelos de falla por fatiga.

1.1.3 – Modelos de fallas por fatiga (11).

Los métodos clásicos de diseño a fatiga caracterizan la vida total en base al rango de tensiones o deformaciones (plásticas o totales) cíclicas

Actualmente existen tres modelos de falla por fatiga, cada uno de estos modelos tiene sus ventajas y desventajas y tiene cabida en cierta aplicación:

- **Modelo de vida-esfuerzo (Stress-Life; “S-N” Stress-N° cycles):** El modelo de vida-esfuerzo es el más antiguo. Este modelo es adecuado para el diseño de piezas en el régimen de alto ciclaje (**HCF**). Estos dan resultados aceptables para el cálculo a vida infinita o alto número de ciclos, situaciones donde los niveles de tensión son bajos y la deformación del material es principalmente elástica. En este caso la mayor parte de la vida corresponde al periodo de iniciación de la grieta. Los ensayos para la obtención de las curvas se realizan con probetas pequeñas sin entallar (y pulidas a espejo) donde la mayor parte de la vida se consume en la etapa de iniciación de una grieta dominante. Debido a esto, los resultados

obtenidos pueden conducir a predicciones de vida mucho mayores que las obtenidas en el caso de una estructura real (por eso no son conservativas), donde la etapa de iniciación de la grieta es a menudo muy corta debido a la existencia previa de defectos.

- **Modelo de vida-deformación (Strain-Life, “ ϵ -N” Strain-N° cycles):** se basa en las deformaciones del elemento. Es más aplicable a situaciones de bajo ciclaje (**LCF**) para predecir la iniciación de fisuras y es bastante complejo. Se establece una formulación de vida a partir la amplitud de deformaciones y se modelizan así situaciones en las que la fluencia ocurre en posiciones críticas del componente. Se trata de zonas con concentración de tensiones o entallas, en las que tensión local se sitúa por encima del límite de fluencia del material, a pesar de que el material de su entorno permanece en régimen elástico. Debido a dicho entorno elástico, la deformación de la zona situada a un nivel de carga superior al de fluencia se ve restringida, lo que da lugar una deformación elastoplástica controlada en la zona de entalla. A su vez, estas entallas, debido a la elevada tensión que experimentan, sirven como puntos críticos para el crecimiento de grietas, con lo que el comportamiento frente al fenómeno de fatiga puede relacionarse con ensayos de deformación controlada sobre diferentes probetas.
- **Mecánica de fractura elástica lineal (LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics):** es el más utilizado para el estudio de la etapa de propagación de grietas; por lo tanto, es útil para predecir la vida de bajo ciclaje (**LCF**) de piezas ya fisuradas. Para que dichos principios sean aplicables se requiere un tamaño inicial de grieta conocido, de ahí que en componentes libres de defectos sólo sean aplicables para el cálculo de la etapa de propagación. Sin embargo, en componentes reales en los que existen imperfecciones o defectos previos (como la presencia de poros en las soldaduras, defectos de fundición, inclusiones, etc...), puede ser asumido un tamaño inicial de grieta y utilizarse este método.

1.1.3.1 – Modelo de Vida-Esfuerzo (Stress-Life, S-N)

Los métodos para caracterizar la resistencia a la fatiga en términos de amplitudes de tensión utilizando datos experimentales obtenidos a partir de probetas lisas surgieron de

los trabajos de Wöhler (1860), como se ha dicho anteriormente, en su trabajo sobre como la fatiga afecta los ejes de los vagones de los ferrocarriles. En este enfoque, probetas cilíndricas lisas son ensayadas a la fatiga por flexión, flexión rotativa, tracción-compresión, o tracción-tracción uniaxial. Los métodos de ensayo para determinar la vida a la fatiga están detallados en las normas ASTM E 466-E 468.

Vale la pena remarcar que:

- σ = Tensión verdadera, carga axial dividida por el área actual.
- S = Tensión ingenieril, carga axial dividida por el área original.

Cómo se muestra en la fig. 1.3, estas tensiones sólo son iguales cuando estamos dentro del rango elástico.

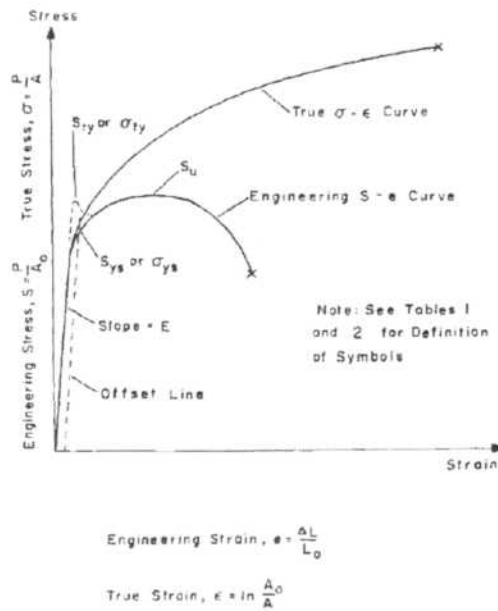


Fig. 1.3 – Diferencia entre σ y S (15).

Sin embargo, debido a que este método se utiliza generalmente en el rango elástico, se puede utilizar indistintamente σ o S para hablar de la tensión que sufre el componente

Retomando, en los ensayos mencionados en la norma ASTM E 466-E 468, la amplitud de tensión (σ_a o S_a) o el rango de tensión ($\Delta\sigma$ o ΔS), se grafican en función del número de ciclos a la falla (16).

Pero antes de proseguir, es necesario definir los tipos de esfuerzo a la fatiga (10):

- **Ciclo de inversión completa (Fig. 4 a):** donde el esfuerzo de tracción se considera positivo y el de compresión negativo. El esfuerzo máximo ($\sigma_{\max}$ ó $S_{\max}$) se considera igual al esfuerzo mínimo ($\sigma_{\min}$ ó $S_{\min}$) pero de signos contrario y el esfuerzo medio es igual a cero (σ_m o $S_m = 0$).
- **Ciclos de esfuerzos de tensión alternante (Fig. 4 b):** Donde $S_{\max}$ y $S_{\min}$. Son diferentes, ambas pueden estar en la región de tracción o compresión.
- **Ciclo complejo de esfuerzos irregulares o aleatorios (Fig. 4 c):** Donde los esfuerzos no siguen ningún patrón de aplicación.

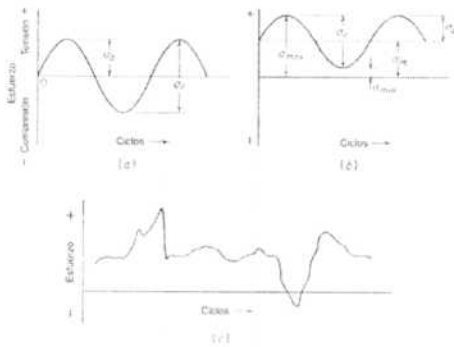


Fig. 1.4 – Tipos de esfuerzos a la fatiga (10). a) Inversión completa. b) Tensión alternante. c) Esfuerzo aleatorio.

Estos ciclos de esfuerzos están constituidos por dos componentes: un esfuerzo medio o estacionario, y otro alterno o variable; también se debe considerar el intervalo de esfuerzos

- Esfuerzo alterno: $S_a = S_r / 2$ (Ec. 1.1)
- Esfuerzo medio: $S_m = (S_{\max} + S_{\min}) / 2$ (Ec. 1.2)
- Esfuerzo máximo: $S_{\max} = (S_m + S_a)$ (Ec. 1.3)
- Esfuerzo mínimo: $S_{\min} = (S_m - S_a)$ (Ec. 1.4)
- Rango de esfuerzos: $S_r = (S_{\max} - S_{\min})$ (Ec. 1.5)
- Relación de Esfuerzos: $R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ y $A = \frac{S_a}{S_m}$ (Ec. 1.6 y 1.7)

En las ecuaciones anteriores, los esfuerzos pueden ser reemplazados por las deformaciones.

La relación R puede variar desde -1 hasta $+1$. Por ejemplo, si el esfuerzo se invierte por completo, es decir, si $S_{\min} = S_{\max}$, entonces $R = -1$. A medida que el valor de R se aproxima a $+1$, el intervalo de esfuerzos S_r tiende a cero y la carga se convierte en monótona (constante).

En el estudio de la fatiga de alto ciclo, se utiliza la curva **S-N** del material, o curva de Wöhler como también es conocida, que correlaciona la amplitud de la tensión con número de ciclos asociado a la falla como se muestra en la fig. 1.5.

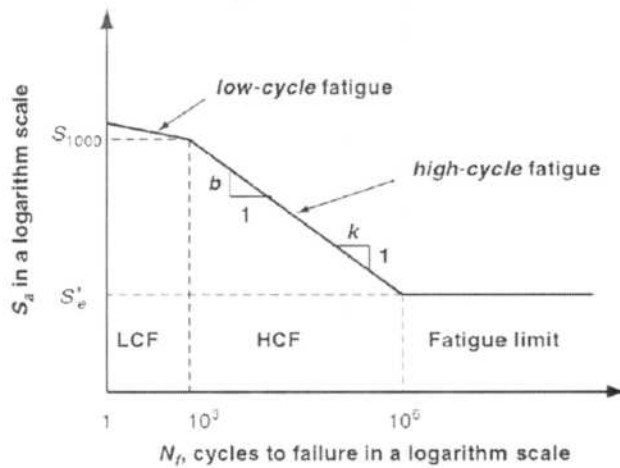


Fig. 1.5 - Curva S-N esquemática para aceros

En la fig. 1.5 y 1.6 se puede observar que el acero posee límite de fatiga mientras que el aluminio no. Esta se puede representar (en escala log-log), con la amplitud de tensión (verdadera) en función del número de ciclos a la falla. Con esto se obtiene una relación lineal (en escala Log-Log), que puede expresarse en la forma:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde σ'_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga (para la mayoría de los metales aproximadamente igual a la tensión verdadera de fractura, corregida por estricción), y b es el exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin que para la mayoría de los metales se encuentra en el rango -0.05 a -0.12 (11).

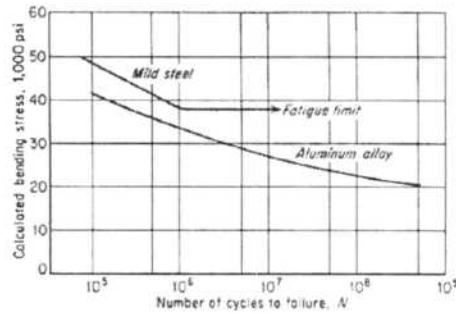


Fig. 1.6 – Curva S-N o de Wöhler

También puede existir un Límite de fatiga para ciertos materiales, estos es, que poseen un nivel de esfuerzo al cual la vida a la fatiga tiende a infinito. Este nivel de esfuerzo es llamado límite de fatiga, S'_e , y se define como el esfuerzo límite abajo del cual el material resistirá una cantidad infinitamente grande de ciclos de esfuerzos sin fracturarse. Por lo impráctico de realizar pruebas infinitas de vida a fatiga, frecuentemente se toma como límite de fatiga de muchos materiales el esfuerzo que no produzca una falla por fatiga en 10^8 ciclos (17).

1.1.3.2 – Modelo de Vida-Deformación (Strain-Life, ϵ -N)

La fatiga controlada por deformación, al contrario de fatiga controlada por tensión, tiene lugar cuando la amplitud de deformación es mantenida constante durante el ciclado de cargas.

Muchas fallas por fatiga ocurren a tensiones mayores para un número de ciclos de carga mucho menor, lo que dio origen a la expresión "fatiga de bajo ciclo". La fatiga de bajo ciclo está relacionada en muchos casos con la existencia de tensiones de origen térmico. En estos casos el fenómeno se encuentra controlado por deformación más que por tensión. En muchas aplicaciones prácticas los componentes experimentan un cierto grado de constricción estructural, especialmente en la región de los concentradores de tensión, resultando más apropiado considerar la vida a la fatiga de un componente bajo condiciones de deformación controlada (16). Coffin y Manson trabajando independientemente en problemas de fatiga térmica, propusieron la caracterización de la

vida a la fatiga basada en la amplitud de la deformación plástica, a través de la siguiente relación

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Dónde:

- $\Delta \varepsilon_p/2$ = Amplitud de la deformación plástica
- ϵ'_f = Deformación en fatiga.
- c = Exponente de deformación en fatiga.

ϵ'_f y c son también propiedades del material a la fatiga. El coeficiente de deformación por fatiga, ϵ'_f , es experimentalmente aproximadamente igual a la deformación verdadera a la fractura. El exponente de ductilidad a la fatiga, (c), varía entre -0.5 y -0.7 (11).

Dado que es posible escribir:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Y dado que:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} = \frac{\sigma_a}{E} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Teniendo en cuenta la Ec. 1.8:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (\text{Ec. 1.12})$$

Combinando las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.9

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (\text{Ec. 1.13})$$

En la fig.1.7, se puede apreciar la representación gráfica de la Ec. 1.13 en escala logarítmica, donde un eje corresponde a la amplitud de deformación y otro eje representa el número de ciclos a la falla del material, se observa que tanto la amplitud de deformación elástica como la plástica presentan un comportamiento lineal. En este caso, para grandes amplitudes de deformación, la deformación plástica es predominante,

mientras que para pequeñas amplitudes de deformación, la componente elástica es predominante (11).

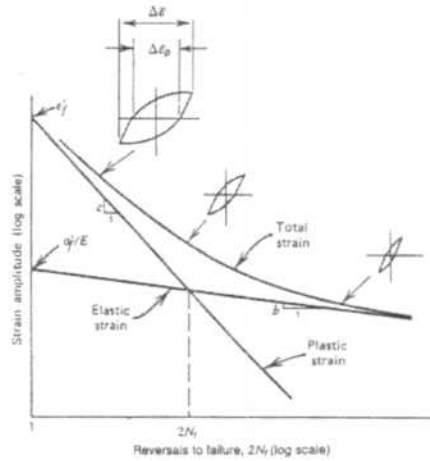


Fig. 1.7 – Curva ϵ - N (11).

La fatiga controlada por deformación, al contrario de lo que ocurre en el caso de fatiga controlada por tensión, tiene lugar cuando la amplitud de deformación es mantenida constante durante el ciclado de cargas. Sin embargo es necesario tener en cuenta que en general, debido al efecto de constricción que produce la existencia de un volumen grande de material deformado elásticamente alrededor del pequeño volumen de material en el entorno del vértice de una entalla o concentrador las condiciones prevalecientes en este pequeño volumen son de deformación impuesta más que de tensión impuesta, aun en el caso en que las cargas nominales actuantes se encuentren controladas por tensión. Por tal motivo, es importante conocer de qué manera evoluciona el material cuando es solicitado cíclicamente en deformación.

El comportamiento de metales y aleaciones sujetas a deformación cíclica uniaxial está representado por alguna de las dos variantes básicas que se muestran en la fig. 1.8. La situación representada por (a) corresponde a un material que exhibe "ablandamiento cíclico", mientras que la ilustrada por (b) corresponde a un material que presenta "endurecimiento cíclico". En ambos casos, el material alcanza un estado de saturación a partir del cual la amplitud de deformación se estabiliza. Esto ocurre normalmente en los primeros 100 ciclos de carga. Extinguido este transitorio inicial, llamado también período de "shakedown", el lazo de histéresis permanece constante como lo muestra la fig. 1.9.

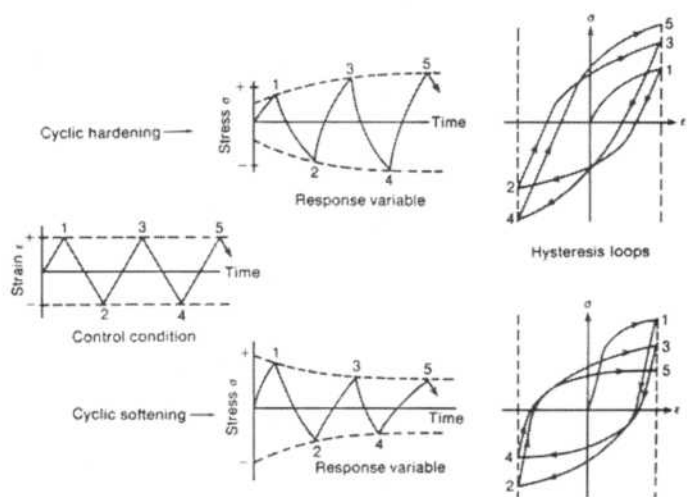


Fig. 1.8 - Endurecimiento y ablandamiento cíclico (16)

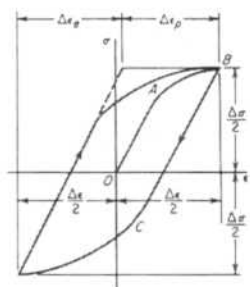


Fig. 1.9 – Lazo de histéresis plástica (16)

La curva tensión–deformación cíclica (Fig. 1.10) puede diferir significativamente de la curva tensión–deformación monótona. No obstante, la misma puede en general ser aproximada por una expresión del tipo

$$\Delta\sigma = K'(\Delta\varepsilon_p)^{n_f} \tag{Ec. 1.14}$$

Donde K' es el coeficiente de resistencia cíclica y n_f es el exponente de endurecimiento cíclico. Para la mayoría de los metales n_f varía entre 0.1 y 0.2 (11).

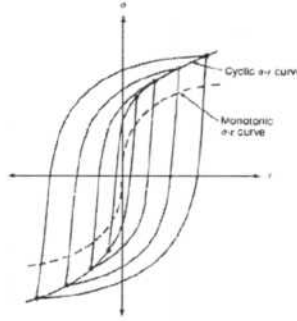


Fig. 1.10 - Curva tensión-deformación cíclica (16).

Teniendo en cuenta la ley de Hooke y la Ec.1.15 podemos reescribir la Ec. 1.11 de la siguiente manera

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \sigma}{K'} \right)^{\frac{1}{n_f}} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

En general, metales con alto exponente de endurecimiento por deformación monótona ($n > 0,15$) experimentan endurecimiento cíclico, mientras que los que poseen un exponente menor ($n < 0,15$) presentan ablandamiento cíclico. Además, puede esperarse endurecimiento cíclico si el cociente entre la resistencia a la tracción monótona σ_{UTS} y la tensión de fluencia $\sigma_{0,2}$ es mayor que 1,4. En cambio, si este cociente es menor que 1,2, puede preverse ablandamiento cíclico. Cuando el cociente se encuentra entre 1,2 y 1,4, el material tiende a ser estable, es decir ni a endurecerse ni a ablandarse cíclicamente de manera significativa. Se ha propuesto una relación entre el exponente c de ductilidad a la fatiga que aparece en (Ec. 1.9), y n_f . Esta relación es

$$c = - \frac{1}{1+5n_f} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

De modo que según esta expresión, los materiales con mayores valores de n_f tienen mayor vida a la fatiga. Puede además demostrarse que $n_f = b/c$, donde b es el exponente de Basquin que aparece en la (Ec. 1.8), y que

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\varepsilon'_f)^{n_f}} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

Donde ϵ_f es la deformación verdadera de fractura en tracción. Esta expresión está basada en valores promedios para una gran variedad de metales y puede ser empleada como una primera aproximación a la curva deformación-vida a la fatiga para ciclos de carga alternativos (totalmente reversibles) de una probeta sin entalla (16).

1.1.3.3 – Mecánica de fractura elástica lineal (LEFM)

Este modelo no fue considerado para predecir la vida residual de los componentes en estudio, por el hecho de acotar el trabajo de la tesis de maestría, pero se detallará muy brevemente el mismo. Por el contrario a los modelos explicados en los apartados 1.2.2.1 y 1.2.2.2, la mecánica de fractura considera sólo las etapas de crecimiento de grietas largas y la fractura final del componente.

Esta es una disciplina que considera el efecto de defectos semejantes a fisuras (en micro y macro escala) sobre la integridad estructural. Se basa en la suposición de que fisuras o defectos semejantes están inicialmente o podrían desarrollarse durante el servicio. Una forma fácil de describir las principales áreas comprendidas en la tecnología de la mecánica de fractura se muestra en la Fig. 1.11, cada vértice del triángulo representa el área esencial en la metodología de este modelo; los lados que conectan dichos vértices representan las fórmulas que relacionan la información pertinente a cada área.



Fig. 1.11 – Áreas comprendidas en Mecánica de la Fractura

El concepto básico empleado es la relación entre las condiciones de carga aplicada al cuerpo (estructura) fisurado y la resistencia del material al crecimiento de la fisura y fractura. La falla estructural ocurrirá si la resistencia del material a la fractura, con la presencia de una fisura aguda, es menor que las condiciones tensión-deformación impuestas por las condiciones de carga y geometría. Por lo tanto, para evitar la falla, la

resistencia del material debe exceder las condiciones aplicadas en el extremo de la fisura (denominada fuerza impulsora de fisura).

Resistencia del Material (MR) > Fuerza impulsora de la fisura (Crack Driving Force, CDF)

En el cálculo de la vida a fatiga durante la etapa de propagación de la grieta, suele hacerse uso de los principios de la mecánica de fractura. Para que dichos principios sean aplicables se requiere un tamaño inicial de grieta conocido, de ahí que en componentes libres de defectos sólo sean aplicables para el cálculo de la etapa de propagación. Sin embargo, en componentes reales en los que existen imperfecciones o defectos previos (como la presencia de poros en las soldaduras, defectos de fundición, inclusiones, etc...) sí puede ser asumido un tamaño inicial de grieta.

Los métodos de diseño que hacen uso de la mecánica de fractura se basan en una filosofía de tolerancia al daño. La premisa básica es que en todos los componentes ingenieriles se supone inherente la presencia de defectos, la vida útil a fatiga se define entonces como el número de ciclos necesarios para la propagación de una grieta dominante desde un tamaño inicial hasta una dimensión crítica. El diseño se basa, no en evitar la aparición de la grieta, sino en definir hasta cuando el defecto puede ser tolerado o por el contrario es necesario reemplazar el componente antes de la fractura del componente (14).

1.1.4 – Influencia de la tensión media y de la deformación media (16)

Todas las consideraciones realizadas hasta aquí, en los modelos **S-N** y **ϵ -N**, corresponden a situaciones en las que las tensiones o las deformaciones impuestas se invierten totalmente. En otras palabras, para las cuales la tensión media σ_m y la deformación media ϵ_m son cero. Sin embargo, en muchas situaciones prácticas estos valores medios no son nulos y resulta importante conocer el efecto de los mismos sobre la vida a la fatiga de un material.

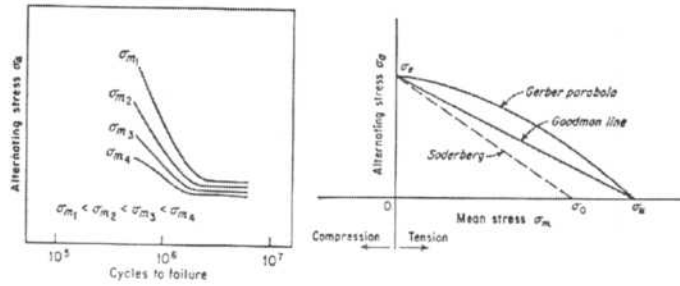


Fig. 1.12 - Influencia de la tensión media sobre la resistencia a la fatiga (16)

Cuando la amplitud de tensión en un ensayo de fatiga uniaxial es representada en función del número de ciclos a la falla, la curva **S-N** resultante es una función fuertemente dependiente de la tensión media como se muestra en la Fig. 1.12 (a).

Para el modelo Stress-Life (**S-N**), los efectos de la tensión media pueden también representarse en diagramas de vida constante como se muestra en la Fig. 1.12 (b). En este tipo de diagramas las diferentes combinaciones de tensión media y amplitud de tensiones se representan para una vida constante dada. Las curvas de la Fig. 1.12 (b) corresponden a las siguientes expresiones.

- Relación de Soderberg:
$$\sigma_a = \sigma'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ys}}\right) \quad (\text{Ec. 1.18})$$
- Relación de Goodman:
$$\sigma_a = \sigma'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right) \quad (\text{Ec. 1.29})$$
- Relación de Gerber:
$$\sigma_a = \sigma'_f \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right)^2\right) \quad (\text{Ec. 1.20})$$

Donde σ_a es la amplitud de tensión para una tensión media σ_m distinta de cero, y σ'_f es la resistencia a la fatiga para una vida dada bajo tensiones totalmente reversibles (alternativas), es decir para $\sigma_m = 0$. En general, la relación de Soderberg dada brinda estimaciones demasiado conservativas para la mayoría de los metales y aleaciones, mientras que la de Goodman se ajusta a los resultados experimentales para materiales frágiles, siendo la más utilizada en el campo ingenieril, y la relación de Gerber es en general adecuada para aleaciones dúctiles. En nuestro caso, para conocer la tensión equivalente para el modelo **S-N**, utilizaremos la relación de Goodman (Ec. 1.29).

Igualando las expresiones (Ec 1.10) y (Ec 1.13), obtenemos el número de inversiones de carga $(2N_f)_t$ que corresponde a la condición de falla por fatiga para la cual las componentes elástica y plástica de la amplitud de deformación son iguales. Resulta entonces que

$$(2N_f)_t = \left(\frac{\epsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{(b-c)}} \quad (\text{Ec. 1.21})$$

En el caso del modelo Strain-Life (ϵ - N) se considera que para vidas a la fatiga cortas, es decir para $2N_f \ll (2N_f)_t$, la componente plástica de la amplitud de deformación es más dominante que la correspondiente componente elástica y la vida a la fatiga del material está esencialmente controlada por la ductilidad. En cambio, cuando $2N_f \gg (2N_f)_t$, la componente elástica de la deformación es más relevante que la plástica y la vida a la fatiga se encuentra controlada fundamentalmente por la resistencia a la rotura. La tensión media σ_m puede también ser incorporada en este análisis de la vida a la fatiga basado en deformación, asumiendo que dicha tensión media reduce la resistencia a la fatiga σ'_f de manera tal que

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m)(2N_f)^b \quad (\text{Ec. 1.22})$$

De esta manera, la Ec. 1.14 queda

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_p}{2} + \frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (\text{Ec. 1.23})$$

Sin embargo, cuando el fenómeno de fatiga está controlado por deformación, la tensión media se relaja a cero en un número relativamente pequeño de ciclos.

1.2 – Daño acumulado

Como se dejó entrever en los apartados anteriores el estudio convencional de fatiga se realiza sometiendo a los componentes o muestras a ensayos con una amplitud de esfuerzo o deformación constante. Sin embargo, la gran mayoría de los componentes o piezas están sometidos a historiales de una gran variedad de esfuerzos y deformaciones en donde las cargas no poseen una amplitud constante, es decir el daño progresivo del material es provocado por diferentes niveles de esfuerzos o deformaciones cíclicas cada

una de los cuales produce un daño sobre el material. El deterioro de los materiales bajo estas condiciones de aplicación de cargas es conocido como “Daño acumulado por fatiga” o simplemente “Daño acumulado”. Para conocer el “Daño acumulado” en un determinado componente existen distintas teorías que se clasifican en 2 grupos, teorías del daño lineal y teorías del daño no lineal. Sólo se e mencionarán muy brevemente una de cada categoría.

1.2.1 – Teoría del daño lineal – Palmgren y Miner (18)

Miner (1945) fue el primero en representar, el concepto de daño lineal sugerido previamente por Palmgren, de forma matemática como la teoría de daño lineal, representada por la siguiente ecuación:

$$D = \sum r_i = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{Ec. 1.24})$$

Dónde:

- r_i = relación por ciclo, correspondiente a cada nivel i de carga.
- n_i = número de ciclos aplicados correspondientes al esfuerzo S_i o σ_i .
- N_{fi} = ciclos a falla correspondientes al esfuerzo S_i o σ_i .

La Teoría de Daño Lineal, así como toda teoría de daño, se basa en asumir que el material acumula cierto daño por cada ciclo de carga el que a su vez produce una acumulación de energía en el material. La teoría asume que el daño producido en cada ciclo de carga es independiente de la historia previa por lo que conduce a una relación lineal, donde la falla o fractura se producirá cuando la $\sum r_i = 1$. El gráfico Daño vs. Relación de ciclo (curva de daño o curva D-r) para esta teoría es simplemente una línea recta diagonal, independientemente del nivel de esfuerzo. En un diagrama **S-N**, las curvas de vida remanente correspondientes a diferentes fracciones de vida son “esencialmente” paralelas a la curva **S-N** original a la falla.

El tratamiento del daño acumulado ha recibido cada vez más atención y numerosas teorías y modelos han sido presentadas luego de la de Miner, en la búsqueda de predecir el comportamiento de los materiales al daño acumulado.

A pesar de la gran cantidad de teorías y modelos desarrollados en los últimos años para tratar el problema del daño acumulado, ningún modelo ha logrado dar una respuesta de mayor simplicidad y aplicabilidad en condiciones de servicio que el modelo de Miner, razón por la cual a pesar de su conocida falta de exactitud bajo diversas condiciones de servicio, sigue siendo aún el más utilizado a nivel industrial para el tratamiento del problema de componentes cuya solicitud de esfuerzos en servicio implique daño acumulado por fatiga

La principal deficiencia de esta teoría es la independencia de la secuencia de aplicación de los niveles de esfuerzo. Sin embargo, su gran virtud es la facilidad de aplicación y que es particularmente útil cuando existen cargas aleatorias.

1.2.2 - Teoría de Marco-Starkey (18) – Teoría No lineal.

Para remediar las deficiencias de la teoría lineal de daño acumulado, Richart y Newmark introdujeron en 1948 el concepto de las curvas de daño o curvas $D - r$, especulando que estas curvas eran diferentes para cada nivel de esfuerzo aplicado. Basados en este concepto y en resultados experimentales Marco y Starkey propusieron el primer modelo no lineal de daño acumulado que tomaba en cuenta la dependencia de los esfuerzos aplicados, representada por la siguiente ecuación potencial:

$$D = \sum r_i^{x_i} \quad (\text{Ec. 1.25})$$

Donde x_i es la variable de cantidad relacionada con el nivel de carga " i " y " r_i " es la relación de ciclos. Las curvas de daño que representan esta relación se pueden apreciar en la fig. 1.13, donde una línea diagonal $X = Y$ representaría la teoría lineal de daño acumulado de Miner, la cual sería un caso especial de la ecuación anterior con $x_i = 1$. Como se puede observar en la gráfica, la vida del material calculada mediante esta teoría resulta en $r_i > 1$ para una secuencia de esfuerzos ascendente y en $r_i < 1$ para una secuencia de esfuerzos descendente.

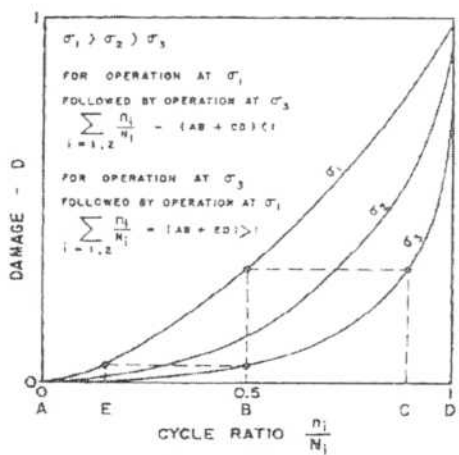


Fig. 1.13 - Teoría de Marco-Starkey

1.3 – Factores modificadores del límite de resistencia a la fatiga

Hasta el momento solo fue considerado el comportamiento a la fatiga en probetas de materiales pulidas a espejo con dimensiones específicas para el ensayo de laboratorio. En general, las características de los componentes o elementos de máquinas y de su entorno difieren de aquellas de las probetas de ensayo. Las piezas suelen tener mayores rugosidades, ya que obtener una superficie pulida a espejo es un procedimiento costoso. Las temperaturas de trabajo pueden ser "bajas", tendiendo a fragilizar los materiales, o "muy altas", reduciendo la resistencia del material o produciendo el fenómeno de termofluencia ("creep"). Los elementos pueden tener concentradores de esfuerzos o pueden estar en presencia de agentes corrosivos. Por este motivo se presentarán los factores y las variables que involucran sus efectos sobre la falla de los materiales, dejando al lector interesado la bibliografía para iniciarse en el tema.

El criterio utilizado para conocer cómo se modifica la resistencia es el de Marín (19):

$$Se = K_a K_b K_q K_d K_g K_c S_e / K_f \tag{Ec 1.26}$$

Donde los Ki son:

- Ka = Factor de superficie
- Kb = Factor de tamaño

- K_q = Factor de carga
- K_d = Factor de temperatura
- K_g = Factor de efectos diversos
- K_c = Factor de fiabilidad
- K_f y K_t = Factor de concentración de tensiones (entallas)

1.3.1 – Factor de superficie (K_a) (20; 21)

El estado superficial tiene efecto sobre la resistencia a la fatiga de los elementos; a mayor rugosidad de la superficie, menor será la resistencia, ya que las irregularidades de la superficie actúan como pequeñísimos concentradores de tensiones que pueden iniciar una grieta de manera más temprana.

El factor de superficie, K_a , es el coeficiente que tiene en cuenta el efecto del acabado superficial sobre la resistencia del material a las cargas variables y está en el intervalo $[0,1]$. Para el caso de elementos pulidos a espejo $K_a = 1$, ya que este tipo de superficie es el que tienen las probetas para determinar el límite de fatiga; por lo tanto, no habría necesidad de hacer corrección por estado superficial. Un valor menor que uno implica que el estado superficial reduce en cierto grado la resistencia. Si, por ejemplo, $K_a = 0.35$, la resistencia a la fatiga corregida para vida infinita sería el 35% del límite de fatiga, si se considerara sólo el efecto de la rugosidad.

La fig. 1.14 presenta los resultados de ensayos experimentales efectuados sobre probetas de acero con diferentes acabados superficiales. Puede aplicarse a otros metales dúctiles pero con valores aproximados (20).

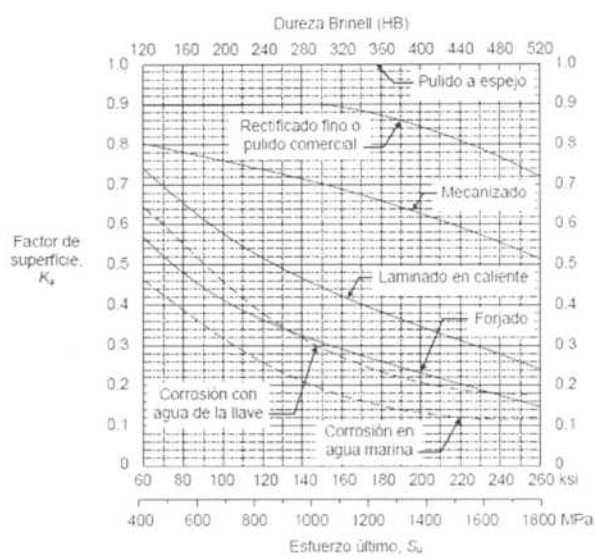


Fig. 1.14 - Factores de superficie para el acero

1.3.2 – Factor de tamaño (Kb) (20; 22)

La pérdida de resistencia al aumentar los tamaños de las piezas se debe a que hay una mayor probabilidad de que exista un defecto en el volumen que soporta los mayores esfuerzos.

La curva de la fig. 1.15 muestra la tendencia de datos experimentales, al someter probetas de diferentes tamaños (8 mm a 250 mm) a flexión giratoria

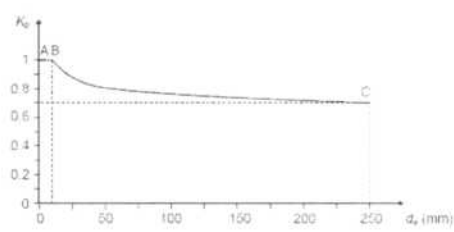


Fig. 1.15 - Variación del factor de tamaño con respecto al diámetro equivalente (22).

Para diámetros menores que 8 mm (que es aproximadamente el tamaño usual de las probetas de ensayo para fatiga), la resistencia a la fatiga de la pieza se toma igual al límite de fatiga, es decir, se toma $K_b = 1$ (línea AB). Los datos experimentales para

diámetros mayores de 250 mm son muy escasos (por su elevado costo); se sugiere tomar $K_b = 0.6$ para diámetros mayores a 250 mm (20).

Los datos experimentales sugieren que no existe efecto de tamaño para carga axial; por lo tanto, para piezas sometidas a carga axial $K_b=1$ (20).

1.3.3 – Factor de carga (K_q)

El comportamiento a la fatiga de un elemento depende también del tipo de carga al cual se somete. Las resistencias a la rotura y a la fluencia de un material son diferentes para esfuerzos cortantes y normales. Sucede lo mismo con la resistencia a la fatiga. Además, también hay diferencia entre carga axial y flexión, a pesar de que ambos tipos de carga generan esfuerzos normales.

Según la bibliografía consultada, los autores Norton (20), Faires (23), Shigley y Mischke (24) sugieren:

- Para flexión, $K_q = 1$;
- Para carga axial:
 - Según Norton, $K_q = 0,7$
 - Según Faires, $K_q = 0,8$
 - Según Shigley y Mischke, $K_q = 0,923$
- Para torsión (y cortante) $= 0,577$

Mientras que en flexión y torsión los máximos esfuerzos ocurren en un pequeño volumen del elemento, todo el volumen de una pieza a carga axial está sometido al máximo esfuerzo. Se cree que la menor resistencia a la fatiga para carga axial se debe a la mayor probabilidad de que se presente una microgrieta en el mayor volumen esforzado.

1.3.4 – Factor de temperatura (K_d)

Las propiedades de un material dependen de su temperatura, T_{emp} . Por ejemplo, un acero puede fragilizarse al ser sometido a “bajas” temperaturas, y la resistencia a la fatiga puede reducirse notoriamente por encima de unos 500 °C. Para tener en cuenta el efecto de

reducción de resistencia a la fatiga, se utiliza el factor de temperatura, K_d , que varía entre 0 y 1, dependiendo de la temperatura: cero cuando la resistencia es nula y uno cuando la resistencia para vida infinita es igual al límite de fatiga, es decir, cuando la temperatura no modifica la resistencia.

De acuerdo con datos experimentales en los aceros (24), el límite de fatiga permanece más o menos constante entre la temperatura “ambiente” y 450°C , y comienza a reducirse rápidamente por encima de este valor. La siguiente ecuación empírica puede utilizarse para determinar el factor de temperatura de un acero:

- $K_d = 1$, si $T_{\text{emp}} \leq 450^{\circ}\text{C}$
- $K_d = 1 - \left(\frac{0,0058}{^{\circ}\text{C}}\right)(T_{\text{emp}} - 450^{\circ}\text{C})$, Si $450^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{emp}} \leq 550^{\circ}\text{C}$ (Ec. 1.27)

Se debe consultar a la bibliografía citada por valores de K_d para otros materiales.

1.3.5 – Factor de efectos diversos (K_g)

Existen otros factores que modifican la resistencia a la fatiga de los materiales; todos los efectos no considerados por los otros factores son cuantificados por el factor K_g . Sin embargo, sólo serán mencionados los más importantes debido a que, cada uno de ellos, pueden deberán ser consultados en el material disponible de cada disciplina en particular. En general, $0 \leq K_g \leq 1$; en ausencia de corrosión, esfuerzos residuales, etc., se puede tomar $K_g = 1$. Algunos de los fenómenos a tener en cuenta son:

- Corrosión
- Proceso de manufactura
- Esfuerzos residuales
- Recubrimientos

1.3.6 - Factor de fiabilidad (K_c)

Éste es el único factor que se aplica sobre la tensión aplicada para vida de mil ciclos, los demás corrigen el límite de fatiga.

La teoría de fatiga se basa, en gran medida, en datos experimentales. Como la mayoría de las curvas y datos obtenidos corresponden a la tendencia “media” que siguen los puntos de ensayo, la confiabilidad de estos datos es del 50%, como se esquematiza en la fig.1.16 .Este factor tiene en consideración el carácter estadístico de la curva de manera que presenta unos valores que pueden ser empleados en caso de no tener datos suficientes sobre los ensayos como para poder realizar un estudio estadístico riguroso.

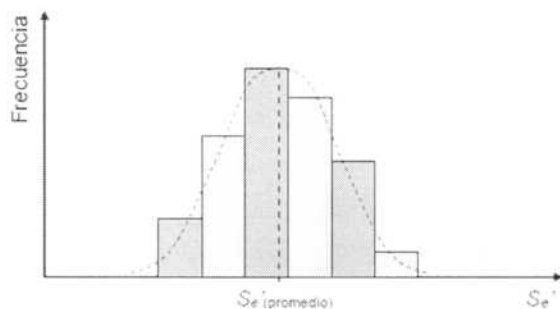


Fig. 1.16 - Dispersión de los valores experimentales del límite de fatiga de un material

A continuación se presentan unos valores recomendados (23) para S1000 así como para Kc para realizar una estimación:

Tipo de material	Tipo de carga	S1000
Todos	Flexión	0,9xSu
Todos	Axial	0,75xSu
Acero	Torsión	0,72xSu
No ferrosos	Torsión	0,63xSu
Fundición	Torsión	0,17xSu

Tabla 1.1 - Factor de fiabilidad en función del tipo de carga.

Fiabilidad	Kc
0,5	1
0,9	0,897
0,95	0,868
0,99	0,814
0,999	0,753
0,9999	0,702
0,99999	0,659
0,999999	0,62

Tabla 1.2 - Factor de fiabilidad en función del tipo de datos.

1.3.7 - Factor de concentración de tensiones (Kf, Kt)

Hasta aquí se ha considerado esencialmente el comportamiento a la fatiga en materiales sin entalla. Sin embargo, como ya se ha mencionado, las estructuras y componentes poseen entallas y discontinuidades geométricas que actúan como concentradores de tensión y/o deformación. Estos campos de tensión y de deformación en la adyacencia del concentrador juegan un papel esencial en la nucleación de fisuras por fatiga y eventualmente en su propagación. Existen básicamente dos metodologías locales para encarar la predicción de la resistencia a la fatiga de materiales que poseen tales concentradores de tensión/deformación. Estos son: el método de la tensión local y el método de la deformación local. La idea central que sustenta los métodos locales de análisis es que el comportamiento a la fatiga del material en la adyacencia del vértice del concentrador puede ser adecuadamente representado por el comportamiento de una probeta sin entalla sometida al mismo campo de tensiones/deformaciones cíclicas que el existente en el vértice del concentrador.

1.3.7.1 - Método de la tensión local (16)

El factor teórico elástico de concentración de tensiones Kt, relaciona la tensión local en el concentrador con la tensión nominal o remota, y es definido como el cociente entre la tensión máxima local $\sigma_{\text{Máx}}$ y la tensión nominal σ^{∞} . Sin embargo, la experiencia demuestra que el factor Kt no representa adecuadamente la reducción de la vida a la fatiga debida a la presencia de una entalla, siendo este efecto generalmente menor al que se podría predecir en base al valor de Kt. Por este motivo se introduce un factor efectivo de entalla a la fatiga Kf, definido como

$$K_f = \frac{\text{Resistencia a la fatiga del material sin entalla}}{\text{Resistencia a la fatiga del material con entalla}} \quad (\text{Ec. 1.28})$$

En general es $K_f < K_t$ y $K_f \rightarrow K_t$ cuando la entalla no es severa o cuando el material es de alta resistencia. La correlación entre las predicciones teóricas a partir del factor Kt y el comportamiento real a fatiga, está frecuentemente expresado a través del factor de sensibilidad a la entalla

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1}; \quad 0 \leq q \leq 1 \quad (\text{Ec. 1.29})$$

Donde q varía entre 0 (para total insensibilidad a la entalla), y 1 (para máxima sensibilidad). Mientras que K_t es sólo función de la geometría y del modo de aplicación de las cargas, K_f debe ser determinado partir de mediciones experimentales o reglas empíricas. En este sentido, **Neuber** (25) expresa el factor efectivo de entalla como

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{A_n}{r}}} \quad (\text{Ec. 1.30})$$

Donde A_n es una constante que depende de la resistencia y ductilidad del material y r es el radio local en el vértice del concentrador.

El método de la tensión local es sólo apropiado para situaciones de fatiga de alto ciclo en la vecindad de concentradores de tensión. No es en cambio aplicable para situaciones en las cuales se tiene una deformación plástica considerable delante del concentrador. En tales casos, es necesario recurrir al método de deformación local.

1.3.7.2 - Método de la deformación local (16)

El método de la deformación local relaciona la deformación que tiene lugar en la vecindad inmediata de un concentrador de tensión, con las tensiones y deformaciones remotas utilizando para ello las ecuaciones constitutivas obtenidas de ensayos de fatiga en probetas sin entalla. El análisis se puede dividir en dos partes:

- I. Del conocimiento de las cargas impuestas en un componente con entalla, se debe obtener la historia de las tensiones y deformaciones locales en el vértice del concentrador. Para conocer la historia de cargas se pueden emplearse métodos experimentales, tales como strain gauges u otra forma de medición.
- II. La vida a la fatiga que puede esperarse para tales tensiones y deformaciones locales debe ser determinada. Para esto, se debe estimar el daño acumulado producido por la evolución de las tensiones y deformaciones locales de manera que permita predecir la vida a la fatiga del componente en función de la

información disponible basada en el comportamiento en fatiga de bajo ciclo de probetas sin entalla del mismo material, utilizando relaciones del tipo dado por la Ec. 1.13.

Los modelos predictivos de vida a la fatiga relacionan los campos en el vértice del concentrador con las cargas remotas aplicadas a través de aproximaciones simples ingenieriles. Una relación muy empleada es la de **Neuber** (25), que emplea el concepto de deformación local para el caso de comportamiento cíclico introduciendo el factor efectivo de entalla a la fatiga K_f , de la siguiente manera:

$$K_f = \sqrt{K_\sigma K_\epsilon} \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Donde K_σ es el factor de concentración de tensiones y K_ϵ es el factor de concentración de deformaciones.

Debe tenerse en cuenta que K_σ y K_ϵ son iguales a K_t sólo en el rango elástico, pero dejan de coincidir en cuanto el material entra en fluencia.

La situación considerada está representada en la fig. 1.17, donde $\Delta\sigma^\infty$ y $\Delta\epsilon^\infty$ son respectivamente las amplitudes de tensión y deformación remotas.

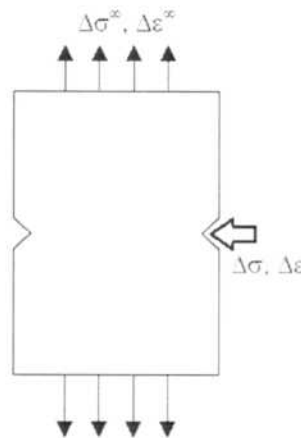


Fig. 1.17 - Amplitudes de tensión y deformación locales y remotas

Resulta entonces:

$$K_\sigma = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma^\infty} \quad (\text{Ec. 1.32})$$

$$K\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\varepsilon^\infty} \quad (\text{Ec. 1.33})$$

Y de acuerdo con la regla de **Neuber** (Ec. 1.34), es

$$Kf = \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma^\infty} \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\varepsilon^\infty}} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma^\infty} \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\varepsilon^\infty} \frac{E}{E}} \quad (\text{Ec. 1.34})$$

De modo que

$$Kf(\Delta\sigma^\infty \Delta\varepsilon^\infty E)^{1/2} = (\Delta\sigma \Delta\varepsilon E)^{1/2} \quad (\text{Ec. 1.35})$$

Por lo que para campos remotos elásticos, en los que se cumple:

$$\Delta\sigma^\infty = \Delta\varepsilon^\infty E \quad (\text{Ec. 1.36})$$

Es

$$Kf\Delta\sigma^\infty = (\Delta\sigma \Delta\varepsilon E)^{1/2} \quad (\text{Ec. 1.37})$$

Por lo que resulta

$$\Delta\sigma \Delta\varepsilon = \frac{(Kf\Delta\sigma^\infty)^2}{E} \quad (\text{Ec. 1.38})$$

La Ec. 1.38 es la ecuación de una hipérbola rectangular representada en la fig. 1.18. La intersección de esta curva con la de tensión-deformación cíclica determina la tensión y deformación local en el vértice del concentrador. Esta deformación puede ahora utilizarse con la Ec. 1.13 para estimar la vida a la fatiga.

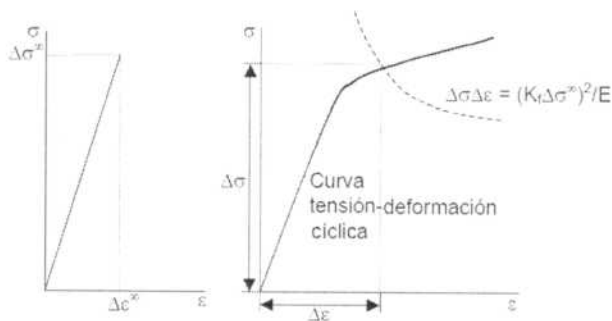


Fig. 1.18 - Método de la deformación local

1.3.8 – Consideraciones a tener en cuenta en el uso de las curvas de fatiga

Debido a la naturaleza estadística del fenómeno de fatiga, tanto para S-N como para ϵ -N, poseen una gran dispersión entre los valores que constituyen sus curvas. Esto se debe a condiciones inherentes al material. Entonces, se debe aclarar que de los ensayos de fatiga se obtiene una serie de valores dispersos, que hacen imposible predecir la vida de una pieza o estructura con una seguridad completa. Al existir esta indeterminación vemos que el método estadístico es la única forma de tratar este problema. Por eso, para poder ajustar la curva de un material en particular, se deben realizar múltiples ensayos a una dada tensión (o deformación) con el fin de conocer la dispersión entre los resultados obtenidos. La distribución estadística de estos resultados se considera generalmente como una distribución normal, como se puede observar en la fig. 1.19.

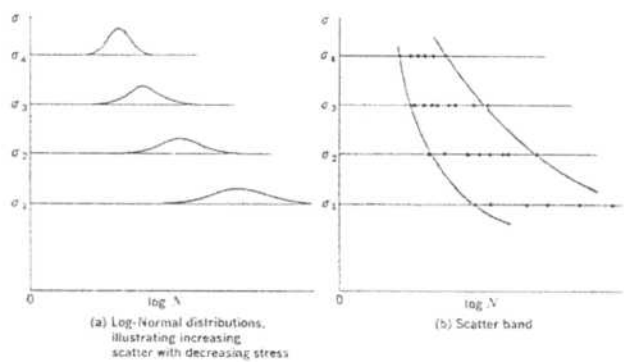


Fig. 1.19 - Distribución normal entre resultados obtenidos en ensayos

Entonces, al ajustar una curva a la mayoría de los valores obtenidos encontramos la curva correspondiente al 50% de probabilidad de supervivencia. Luego se agregan las bandas de dispersión correspondientes cómo muestra la fig. 1.20.

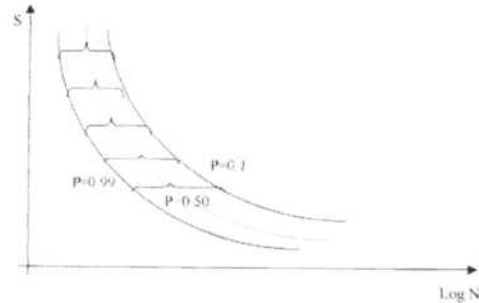


Fig. 1.20 - Banda de dispersión entre resultados

1.4 – Cargas variables

El estudio bajo cargas o deformaciones de amplitud constante es la principal fuente de información sobre el proceso de crecimiento de grietas por fatiga. Sin embargo, las condiciones a que está sometida una estructura real rara vez pueden ser consideradas de amplitud constante. Normalmente son de amplitud variable y la mayoría de las veces aleatorias.

Generalmente si las cargas o deformaciones a la que es sometido un componente en servicio son aleatorias o semialeatorias, no se podrá conocer exactamente las sollicitaciones que van a producirse en el futuro, y se deberá definir estadísticamente las mismas. Además, durante el crecimiento de una grieta con cargas o deformación de amplitud variable se produce lo que se denomina efecto de secuencia o de interacción debido a que la carga no es regular. En este caso, el incremento de longitud en cada ciclo no tiene que ser igual al que se produce para las mismas cargas con amplitud constante, no sólo de los valores máximo y mínimo del ciclo y de la longitud de la grieta, sino también de la historia previa de carga.

Por este motivo una de las tareas más importantes a desarrollar en el diseño a fatiga de componentes sometidos a cargas variables es establecer el espectro de cargas representativo de las tensiones y deformaciones realmente experimentadas por el componente en servicio. Estos espectros son estimados bajo condiciones típicas de

servicio, por ejemplo midiendo con strain gauges las deformaciones sufridas en diferentes puntos críticos del componente, previamente localizados por elementos finitos.

En nuestro caso, que queremos conocer las tensiones en puntos críticos del componente para conocer el daño acumulado en el mismo, se procede de forma similar. Se analizan los puntos del mismo donde mayor es la concentración de tensiones (pudiendo ser determinadas por ejemplo por elementos finitos, por los planos de diseño, por la experiencia del experto a cargo, etc.) y se les coloca adecuadamente strain gauges en estos puntos para conocer cuál es el espectro de cargas y deformaciones en los mismos.

Para el análisis del crecimiento de grieta en estas estructuras, es necesario estimar la evolución de las cargas que van a producirse durante la vida de las mismas, es decir, los distintos estados de carga, frecuencia, proporción y secuencia en la que se van a producir. Todo ello hace que la obtención del registro de cargas representativo sea un problema complejo. Por tal motivo, es de vital importancia tener a disposición algún tipo de herramienta que permita conocer el espectro de las cargas y deformaciones a las que es sometido el componente.

Un espectro de carga describe la distribución estadística de la carga de servicio experimentada por el componente durante su vida operativa, representado por un histograma rango de tensiones o por una función densidad.

Hay dos metodologías para calcular el espectro de carga y deformación de un componente:

- Los métodos que utilizan el dominio de la frecuencia analizan el historial registrado y lo descomponen, con el fin de encontrar los coeficientes de Fourier y luego obtener la función densidad del mismo. Sólo serán mencionados en este trabajo, ya que los mismos no fueron utilizados debido a la complejidad y la gran cantidad de datos necesarios para su análisis.
- Los métodos que utilizan el dominio del tiempo, estos convierten un historial de cargas irregulares en un histograma de rangos de tensiones. Existen varios métodos recogidos por la norma ASTM E1049-85.

1.4.1 – Métodos de dominio de la frecuencia (14).

Existen varias formas alternativas de especificar un mismo proceso aleatorio, una de ellas es obviamente la representación en un registro de los valores alcanzados por la variable aleatoria que define el proceso en el dominio del tiempo. Cada uno de los registros será una muestra de dicho proceso y los valores obtenidos serán distintos de los que se producen en el resto de ellos. Evidentemente el número de registros que se podrían obtener es infinito, si bien en la realidad sólo se dispone de un número finito de ellos. Si el conjunto de registros del que se dispone es suficientemente grande, de forma que permite definir todos los posibles mediante propiedades estadísticas, dicho conjunto representa (de forma determinista) el proceso aleatorio.

El desarrollo en serie de Fourier nos permite representar cualquier historia periódica de una variable usando un conjunto de funciones senoidales, tomando cada una un conjunto de valores de amplitud, frecuencia y fase. Como una extensión del desarrollo de Fourier, la transformada de Fourier permite representar historias finitas en tiempo, usando una formulación espectral mediante la función de densidad espectral permite representar algunos parámetros importantes de cualquier proceso aleatorio estacionario. El proceso es descrito como una función de la frecuencia y se dice entonces definido en el dominio de la frecuencia, la conversión de una representación en tiempo a frecuencias o viceversa, es posible haciendo uso de la transformada de Fourier y su transformada inversa.

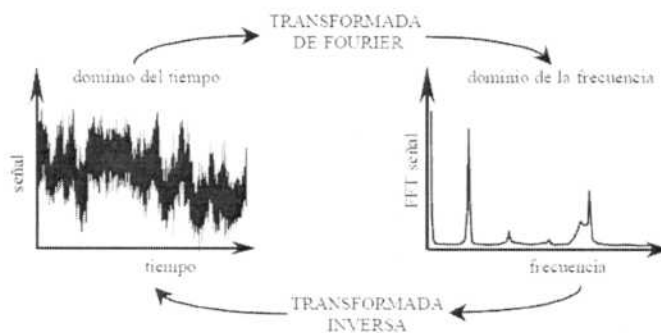


Fig. 1.21 - La transformación de Fourier

Básicamente el dominio de la frecuencia es otra forma de representar una historia temporal. Cierta información difícil de apreciar en una representación en el dominio del tiempo resulta evidente en una representación en frecuencias. La función de densidad espectral contiene la información únicamente de la amplitud de las ondas senoidales de distinta frecuencias en las que puede ser expresada cualquier función periódica. Su característica más importante es que si la variable en estudio, $x(t)$ es real, la función de densidad espectral es una función par, positiva y finita para todos los valores de frecuencia que si se integra en el rango $(-\infty, +\infty)$, da como resultado la media cuadrática de $x(t)$, que es normalmente el parámetro de más interés en el análisis de procesos aleatorios estacionarios.

Obtener un registro temporal a partir de la función de densidad espectral no sería posible en principio pues ésta no contiene información sobre la fase de las funciones senoidales individuales para cada frecuencia. Sin embargo para procesos gaussianos estacionarios los ángulos de fase están aleatoriamente distribuidos. Esto permite regenerar historias temporales que no serán exactamente iguales a la original pero si estadísticamente equivalentes.

Para algunos procesos aleatorios que se producen en ingeniería existen fórmula empíricas aproximadas para la estimación de la densidad espectral en función de los parámetros que intervienen en el fenómeno objeto de estudio. Si no se conoce la fórmula empírica, conocido un registro puede medirse la densidad espectral por métodos analógicos o determinarse por métodos numéricos, mediante el uso de la transformada rápida de Fourier.

La función de densidad espectral de un proceso estacionario da normalmente una información incompleta del proceso, sin embargo de ella pueden obtenerse algunas características importantes. Dependiendo de la forma de la función de densidad espectral se distinguen dos tipos de procesos aleatorios: de banda ancha y de banda estrecha. La distinción entre uno y otro no es exacta sino cualitativa.

Se dice que un proceso es de banda ancha, cuando la densidad espectral tiene valores significativos en una banda de frecuencias que es del mismo orden que la frecuencia central de la banda. Un registro de un proceso de este tipo tiene una gama amplia de frecuencias (fig. 1.22). El caso extremo de este tipo de procesos es aquel cuya densidad espectral está representada por una recta horizontal sin límites en frecuencia. Estos

procesos se denominan ruido blanco, por analogía con la luz blanca que tiene un espectro horizontal sobre toda la gama visible de frecuencias.

Un proceso se dice que es de banda estrecha cuando la densidad espectral tiene valores significativos en una gama de frecuencias cuyo ancho es pequeño, comparado con el valor de la frecuencia central de la gama. En la fig. 1.22 se puede comprobar que estos registros poseen una forma similar a una onda senoidal de frecuencia dicha frecuencia central, pero cuya amplitud varían lentamente de forma aleatoria. El caso extremo de procesos de banda estrecha es una función senoidal cuyo ángulo de desfase tenga un valor aleatorio.

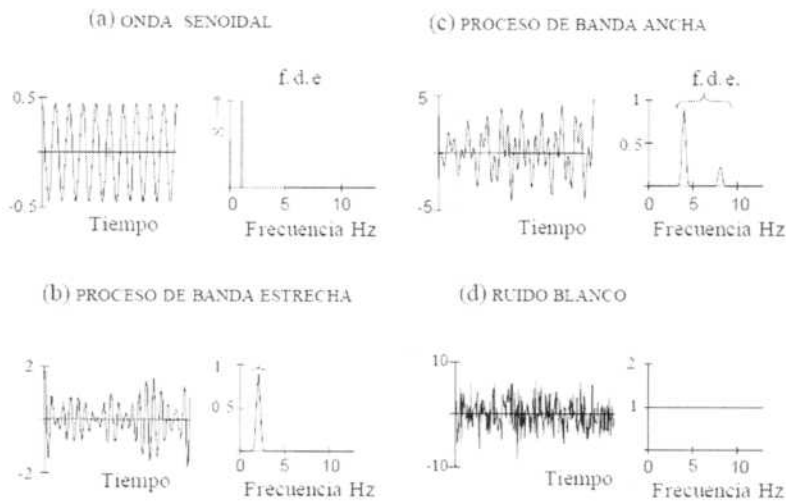


Fig. 1.22 - Procesos de distintos anchos de banda

Como se ha comentado previamente la variable que caracteriza un proceso aleatorio sólo puede ser definida mediante parámetros estadísticos. Cada registro temporal es sólo uno de los infinitos que podrían ocurrir en el proceso y cada uno será diferente. Sin embargo, si el tamaño de la muestra o registro es suficientemente grande los parámetros estadísticos de cada uno se mantendrán aproximadamente constantes. En este sentido, los dos parámetros estadísticos más importantes son el número de picos y el llamado número de cruces con el cero, o valor medio de la señal en aquellos procesos de media distinta de cero. La fig. 1.23 ilustra ambos conceptos, así como el factor de irregularidad, definido como la relación entre el número de cruces y el número de picos.

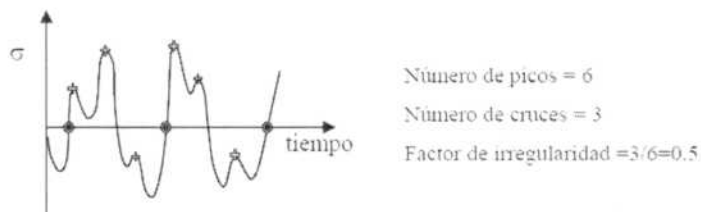


Fig. 1.23 - Factor de irregularidad de un proceso

1.4.1.1 – Métodos de dominio del tiempo – Cruce de nivel (Level-crossing Counting) (4).

En este procedimiento, el eje de la carga de la gráfica carga-tiempo se divide en niveles de carga. Este método sólo funciona si se sitúa el cero de la serie en su valor medio. Se cuenta cada vez que una porción de la historia de cargas con pendiente positiva cruza un nivel positivo de carga. Así mismo, se cuenta también cada vez que una porción de la historia de cargas con pendiente negativa cruza un nivel negativo de carga. No hay distinción entre conteos realizados en una porción de la historia de cargas con pendiente positiva o negativa.

Una vez determinados los conteos, estos se combinan para formar ciclos completos. Existe una amplia variedad de métodos de combinación de conteos para obtener ciclos completos. La combinación de conteo más perjudicial, desde un punto de vista de la fatiga, es la que busca ciclos con la mayor amplitud posible permitida por los cruces de nivel todavía disponibles. La fig. 1.24 (b) muestra los resultados del uso de este procedimiento en el conteo de cruce de nivel obtenido de la historia de carga (Fig. 1.24 (a)).

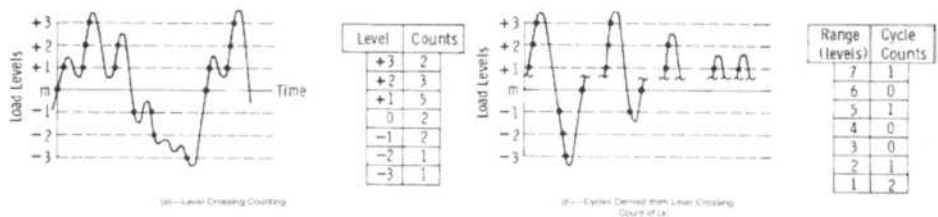


Fig. 1.24 - Ejemplo de conteo con el método de cruce de nivel, donde m es el nivel de referencia medio (4).

1.4.1.2 – Métodos de dominio del tiempo – Conteo de picos (Peak counting) (4).

El método de conteo de picos se basa en identificar los máximos relativos (picos) y mínimos relativos (valles) de carga. Este método sólo funciona si se sitúa el cero de la serie en su valor medio. Se cuentan los picos o máximos relativos de la secuencia que aparezcan para cada nivel (intervalo) de carga positiva. Así mismo, se cuentan todos los valles o mínimos relativos que haya en el mismo nivel (intervalo) de carga negativa. El conteo de picos y valles se hace por separado. La historia equivalente de cargas se obtiene formando, sucesivamente, los ciclos de mayor amplitud posible entre los máximos y mínimos contabilizados, retirando tales extremos y repitiendo el proceso. La figura 1.25 (b) muestra los resultados del conteo de ciclos completos obtenidos usando el procedimiento de conteo de picos a partir de la historia de cargas de la figura 1.25 (a).

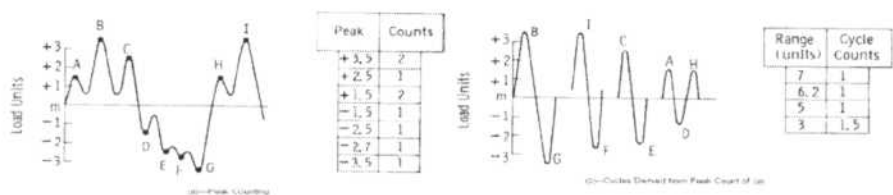


Fig. 1.25 - Ejemplo de conteo con el método de conteo de picos, donde m es el nivel de referencia medio (4).

1.4.1.3 – Métodos de dominio del tiempo – Rango simple (Simple-range counting) (4).

Con este método se registra el rango (amplitud de carga) entre puntos de cambio de signo de la pendiente de la historia de carga. En el método de conteo, un ciclo está compuesto por dos rangos del mismo valor, y cada rango es considerado medio ciclo. Se muestra un ejemplo del conteo en la figura 1.26. Se cuentan los rangos positivos y negativos y se muestra el resultado.

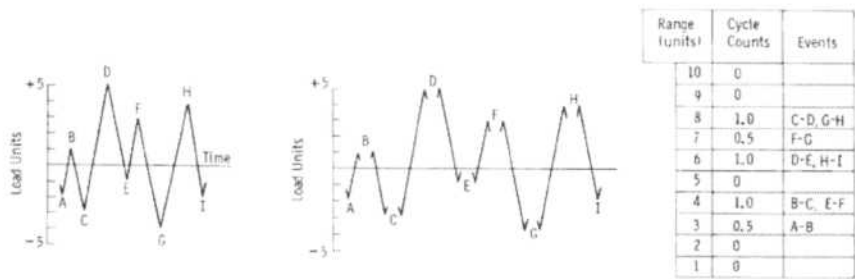


Fig. 1.26 - Ejemplo de conteo con el método del rango simple (4).

1.4.1.4 – Métodos de dominio del tiempo – Rainflow counting (4).

Ninguno de los tres métodos descritos anteriormente tiene en consideración el orden en el que se aplican los ciclos. Dado que la relación entre tensiones y deformaciones no es lineal, debido al comportamiento plástico del material, el orden en el que se apliquen los ciclos tiene un efecto significativo en la respuesta tensión-deformación del material. En la figura 1.27 se representan dos historias distintas, en el caso de la historia (a), el hecho de aplicar una deformación de compresión precediendo inmediatamente la aplicación de ciclos de deformación de menor amplitud produce tensiones medias de tracción. En el caso de la historia (b), la aplicación de una deformación de tracción precediendo inmediatamente la aplicación de ciclos de deformación de menor amplitud produce tensiones medias de compresión. Puesto que las tensiones medias influyen en la vida a fatiga del material, estas dos historias producirían vidas distintas en un componente.

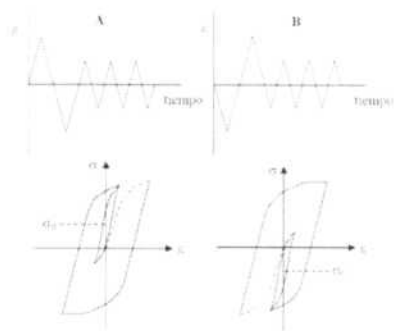


Fig. 1.27 - Relación tensión deformación en dos historias de carga distintas (14).

Los métodos que intentan tener en cuenta la influencia de la secuencia de ciclos identificando los lazos de histéresis cerrados en la respuesta tensión-deformación del material reciben hoy en día el término genérico de Rainflow.

La fig. 1.28 ilustra el proceso de reconocimiento de ciclos completos. Para ello, siguiendo la secuencia de picos y valles, en grupos de cuatro puntos, se identifican los casos en que existen dos puntos intermedios con valores incluidos en el rango definido por los dos extremos. El ciclo definido por los puntos intermedios se contabiliza y elimina de la secuencia, iniciándose nuevamente el proceso. Para mayor detalle y ejemplificando el método con un caso simple, se puede consultar el anexo I.

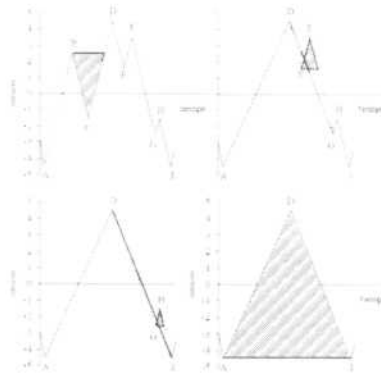


Fig. 1.28 – Rainflow counting (14).

De todos los métodos presentados en este apartado, sólo se desarrollará el algoritmo para el método Rainflow counting debido a que es más completo y por lo tanto es el más utilizado en el área ingenieril.

Bibliografía del capítulo 1

1. **Poncelet, J. V.** *Introduction à la mécanique industrielle physique ou expérimentale - Tercera Edicion.* 1870.
2. **Bud, R. and Warner, D J.** *Fatigue testing instruments Robert C. McWilliam in Instruments of Science: an historical encyclopedia.* New York : s.n., 1998.
3. **Timoshenko, Stephen.** *History of the Strength of Materials.* Dover : s.n., 1983.
4. *Rainflow Counting Method.* **ASTM.** 2005, E 1049-85.
5. **HandBook, ASM Metals.** *Fatigue And Fracture.* 1996.
6. **Chen, Wai-Fah and Duan, Lian.** *Handbook of Structural Engineering.* 2004.
7. **M. Fuentes, J.-M. Martínez-Esnaola, A. Martín-Meizoso.** *Fracture Mechanics: Applications and Challenges: Applications and Challenges.* 2000.
8. **Atkinson, R. J., W. J. Winkworth and G. M. Norris.** *"Behaviour of Skin Fatigue Cracks at the Corners of Windows in a Comet I Fuselage.* 1962.
9. **Russell, Alan and Lee, Kok Loong.** *Structure-Property Relations in Nonferrous Metals.* Wiley-Interscience. 2005.
10. **Dieter, George.** *Mechanical Metallurgy.* Japan : McGraw-Hill Second, 1976.
11. **Fuchs, H. O. and Stephens, R. I.** *Metal fatigue in engineering.* Canada : s.n., 1980.
12. **Honeycombe, R.** *The Plastic Deformation of Metals.* Londres : s.n., 1975.
13. **Acero A. y Fernández, D.** *Eestudio del daño acumulado en el comportamiento a la fatiga de la aleacion de Al 6063 condicion T6, recubierto con un depósito autocatalítico de Ni-P.* Caracas : s.n., 2005.
14. **Moreno Morales, Maria Belén.** *Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias.* Málaga : s.n., 2002.
15. **ASTM.** *Manual on Low Cycle Fatigue Testing.* 1969.
16. **De Vedia, L. A y Svoboda, H.** *Fatiga - ENSAYOS INDUSTRIALES.* Buenos Aires : UBA, 2002.
17. **Forest, P. G.** *Fatiga de los Metales.* 1972.
18. **Fatemi, A. y Yang, L.** *Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: a Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials.* Gran Bretaña : s.n., 1998.
19. **Marin, Joseph.** *Mechanical Behavior of Engineering Materials.* 1962.
20. **Norton, R. L.** *Diseño de Máquinas.* Mexico : Prentice-Hall, 1999.

21. Juvinall, R. C. *Stress, Strain and Strength*. Nueva York : McGraw-HILL, 1967.
22. Shigley, J. E. y Mitchell, L. D. *Mechanical Engineering Design*. Nueva York : McGraw-Hill, 1983.
23. Faires, V. M. *Diseño de Elementos de Máquinas*. Mexico : Limusa, 1995.
24. Shigley, J y Mischke, C. *Diseño en Ingeniería Mecánica*. McGRAW-HILL : s.n., 1991.
25. Neuber, H. *Theory of Notch Stresses*. Berlin : s.n., 1961.

Capítulo 2 – Presentación del software

En este capítulo se presentan los componentes necesarios para que el software sea usado de forma correcta, así como también, un breve resumen de cómo funciona el mismo y las modificaciones necesarias que sufrió el software a través del año para poder concretar de manera satisfactoria los objetivos planteados al inicio del proyecto.

2.1 – Pilares necesarios para el correcto uso del software

Como se comentó anteriormente el objetivo principal del desarrollo de este programa fue automatizar la tarea del conteo y clasificación de los ciclos, de tensión o deformación, registrados en un componente, para luego conocer o estimar cual es el daño acumulado en el mismo. Pero para lograr que esas estimaciones sean válidas y se correspondan lo mejor posible con la realidad se deben tener en cuenta todos los procesos complementarios que son necesarios para una correcta utilización del software.

La fig. 2.1 muestra como es el proceso necesario para conocer cuál es el daño acumulado en el componente. La realización de forma correcta de las distintas etapas del proceso, asegurarán una estimación razonable sobre la vida residual (o en su defecto, el daño acumulado) de la pieza en cuestión.

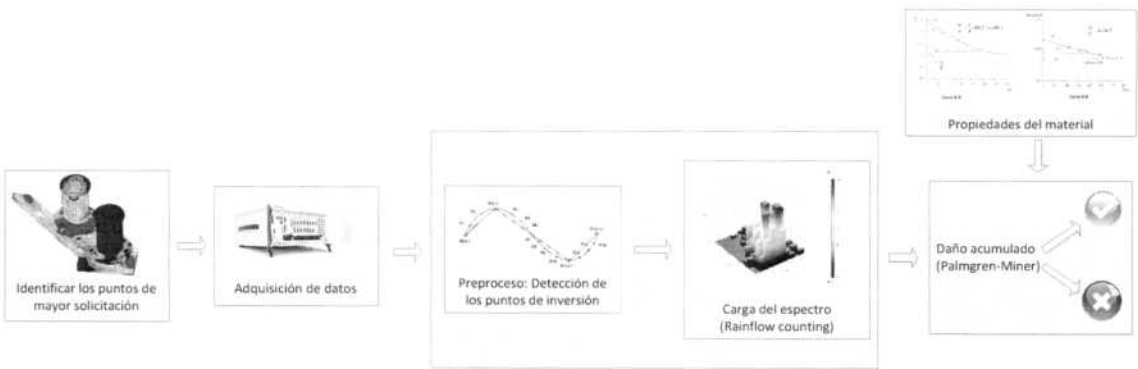


Fig. 2.1 – Etapas del proceso

Identificar los puntos de mayor sollicitación: Para poder conocer el daño en la pieza, es necesario conocer la tensión o deformación en los puntos donde el esfuerzo es máximo. Para esto, se utiliza la experiencia en campo de profesionales que identifican de

antemano cuales son los lugares con mayor sollicitación. Generalmente, los puntos de interés suelen ser los cambios de sección, esquinas agudas producidas por radios de curvatura pequeños, agujeros en el material, etc. Estos actúan como concentradores de tensión que generan áreas propensas a producir fallas en la pieza o componente.

Para los componentes complejos, en los cuales no es fácil distinguir cuales son los “puntos calientes” (puntos con mayor sollicitación), se puede recurrir a la modelización por elementos finitos para conocer cuáles son las regiones más sollicitadas y utilizarlas para planificar en qué lugar se colocarán los sensores.

Adquisición de datos (1): en este proceso se mide algún fenómeno físico que ocurre en el material mediante sensores. En nuestro caso se trata de registrar todas las tensiones o deformaciones que tienen lugar en los puntos más sollicitados del componente, y las mismas se guardan en la memoria interna del aparato o en una PC. Las distintas partes de un sistema de adquisición de datos se muestran a continuación en la fig. 2.2.



Fig. 2.2 – Sistema de adquisición de datos

- **Sensor:** es un transductor que convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica medible. Dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. En nuestro caso, generalmente, se utilizan strain gauges o extensómetros.
- **Convertidor analógico-digital:** funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. En nuestro caso, generalmente se utilizan placas de adquisición.

- **Almacenamiento:** Las señales adquiridas y convertidas a digital, son registradas en un archivo para su posterior utilización. Estas pueden ser almacenadas en la memoria interna de la placa de adquisición (que generalmente no posee gran capacidad) o directamente en el disco duro de una PC.

Contaje de ciclos: el software diseñado utiliza como dato de entrada el archivo con las señales ya digitalizadas. Los pasos básicos para realizar el contaje de ciclos son los siguientes:

- **Puntos de inversión:** El primer paso que realiza el programa es la identificación de todos los puntos de inversión de los datos del archivo, reconociendo los máximos y mínimos del espectro y genera una variable que almacena estos valores dentro del programa. Como se muestra en la fig. 2.3, solo se guardan en la variable los datos de los máximos y mínimos debido a que el método de Rainflow counting sólo utiliza los puntos de inversión, pero para obtener una buena representación del ciclo de carga, es necesario que el mismo este definido con una cantidad mínima de puntos en el ciclo. Los valores intermedios del ciclo no serán tenidos en cuenta, pero permitirán obtener una representación fiel de la historia de cargas o deformaciones aplicadas en la pieza.

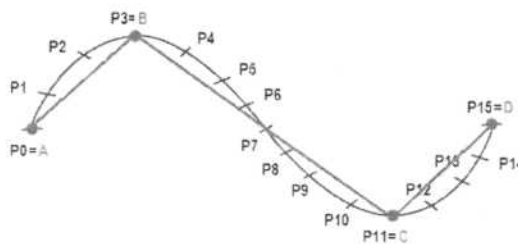


Fig. 2.3 – Identificación de los puntos de inversión

- **Conteo de ciclos:** este método (como fue explicado en el capítulo 1.5.3) extrae la composición de historial de carga de amplitud variable y los clasifica según su amplitud y carga media, para que luego puedan ser utilizados con la regla de Miner-Palmgren o una similar.

Obtención de las propiedades del material: esta etapa es crítica si se desea conocer el daño acumulado en el componente. Ya sea que se utilice el método Strain-Life (ϵ -N) o Stress-Life (S-N), es necesario conocer las propiedades a la fatiga del material del que está hecha la pieza estudiada. Este punto es tan importante que no se recomienda usar valores suministrados por fuentes no confiables, sin antes no hacer ensayos que permitan verificar que estos datos se ajustan a los valores obtenidos experimentalmente. Las probetas deben ser del mismo material con que está hecho el componente. El error por no utilizar las propiedades específicas del material, puede llegar a ser importante. Se deben especificar las bandas de dispersión de los valores de la curva. Estos permiten cuantificar el tipo de error que se puede cometer.

Calculo del daño acumulado: Una vez obtenida la clasificación de las tensiones o deformaciones que sufre el componente, y sus propiedades a la fatiga, se procede a calcular, por medio de la regla de Miner-Palmgren (Ec. 1.25), el daño acumulado en el mismo. Esta regla permite estimar la vida residual de la pieza en cuestión, de la siguiente manera:

$$D = \sum r_i = \sum \frac{n_i}{N_{fi}}$$

Y

$$\text{Vida residual} = 1 - D \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Dónde:

- r_i = relación por ciclo, correspondiente a cada nivel i de carga.
- n_i = número de ciclos aplicados correspondientes al esfuerzo S_i o σ_i .
- N_{fi} = ciclos a falla correspondientes al esfuerzo S_i o σ_i .

El valor teórico de D , varía entre 0 y 1, pero experimentalmente el rango puede variar entre 0,5 y valores cercanos a 2 (2). Esta diferencia es producida por la secuencia de aplicación de las cargas en la pieza, ya que no es lo mismo aplicar una deformación de compresión precediendo inmediatamente la aplicación de ciclos de deformación de menor amplitud que aplicar una deformación de tracción precediendo inmediatamente la aplicación de ciclos de deformación de menor amplitud (3). Ingenierilmente se

utiliza como valor máximo de daño acumulado en el componente un valor igual o menor a 1, por el hecho de ser conservativos.

2.2 – Diagrama de Flujo del programa

En la fig. 2.4, se expone el diagrama de flujo simplificado del algoritmo utilizado en el programa. Los diagramas de flujo de cada subprograma se detallarán en el capítulo 3.



Fig. 2.4 – Diagrama de flujo del software

2.3 – Expansión de los objetivos propuestos en la tesis

El objetivo original de la tesis era desarrollar un algoritmo que permita distinguir y clasificar los diferentes ciclos de tensión o deformación que son registrados en un componente en servicio. Este algoritmo será utilizado como una herramienta que dispondrá el Dpto. de Caracterización y Fractomecánica de CNEA, para evaluar la

integridad de los componentes tanto de una central nuclear como de aquella industria u organización que solicite los servicios de asesoría de este departamento.

Al poco tiempo, re-evaluamos los objetivos en forma conjunta con los directores de mi tesis y estuvimos de acuerdo en modificar algunos aspectos. En vez de hacer un algoritmo que solo haga el conteo de ciclos, sería más productivo desarrollar un software con interfaz gráfica, de simple uso, que permita el conteo de ciclos y también calcule el daño acumulado en el material. Llegado el caso, que se pueda modificar o que permita agregar más funciones con el fin de optimizarlo. De todas maneras, el objetivo principal a cumplir seguía siendo el mismo, pero el alcance era más ambicioso.

De esta forma, y con los nuevos objetivos planteados, empecé el desarrollo del software en cuestión, que me llevo la codificación de 2 versiones totalmente distintas. Con sus posteriores modificaciones y ampliaciones, llegó la versión 2.1, que para el momento en que es presentado este trabajo, es la final. Todas las versiones fueron programadas íntegramente en Matlab.

Para ir introduciendo el trabajo realizado en programación, se comentará el desarrollo desde una perspectiva superficial, sin detallar codificación del software. De esta manera, comenzaré por comentar la cronología de las versiones claves en el desarrollo del programa, y alguna de sus modificaciones más importantes.

2.3.1 – CNEA – Rainflow Counting - Versión 1.0

Esta versión, como su nombre lo indica, fue la inicial. La que me ayudo a introducirme de lleno en la técnica de Rainflow y a entender el proceso de cómo afectaba el espectro de cargas aleatorias en la fatiga de un material.

Su interfaz gráfica era simple, como lo muestra la fig. 2.5.

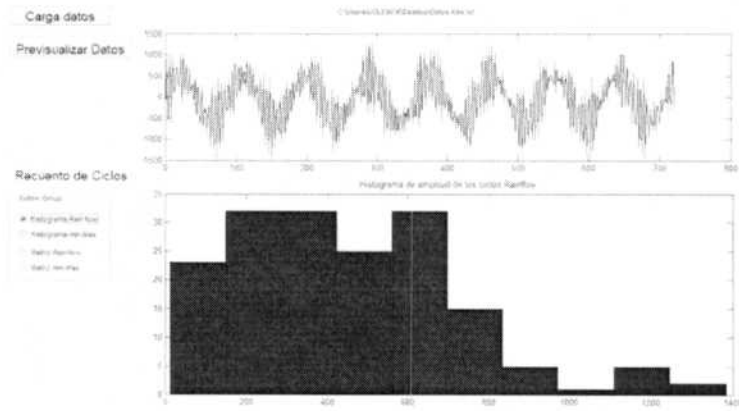


Fig. 2.5 - CNEA – Rainflow Counting - Version 1.0

Las funciones básicas de este software era simplemente, leer un archivo, encontrar los puntos de inversión de los datos del archivo, hacer el conteo de ciclos y clasificarlos en un histograma de acuerdo a la cantidad de veces que se repetían en un rango definido por el usuario.

La estimación del daño acumulado (en la fig. 2.5 no se muestra codificada) iba a ser calculada llamando a otra interfaz gráfica por medio de un botón, y que esta utilice los datos del histograma. Los valores de las propiedades de resistencia a la fatiga del material, iban a ser agregados manualmente por el usuario.

La idea era sencilla, el código básico y eficiente, pero no se había tenido en cuenta la influencia de la carga media en la reducción de la vida a la fatiga de un dado material. La carga media, como fue mencionado en el capítulo 1.2.2.4, afecta notablemente la vida a la fatiga de piezas sometidas a alto número de ciclos.

Entonces, frente a estas dificultades, se pensó en modificar el programa y agregarle el código y la representación del histograma agrupando la cantidad de ciclos por amplitud de carga y carga media iguales, creando así la versión 1.1. Pero la solución no fue del todo satisfactoria debido a que dejaba una interfaz poco amigable e incómoda, así que se decidió crear la versión 2.0.

2.3.2 – CNEA – Rainflow Counting - Versión 2.0

La versión 2.0 fue concebida como una interfaz sencilla, que permite al usuario usarla instintivamente y que posee gran funcionalidad.

Sus funciones principales, además de las que ya tenía la versión 1.0 y 1.1, fueron la de utilizar una base de datos con los distintos materiales, pudiéndolos cargar y usar, crear uno nuevo, modificar uno anterior o borrarlo. También, se programó la gráfica de las curvas S-N y ϵ -N, para visualizar las propiedades del material.

La interfaz, es muy distinta a la de la versión 1.0, pero en este caso el programa aportaba más funciones al usuario. La fig. 2.6 muestra cómo era la ventana principal del programa.



Fig. 2.6 - CNEA – Rainflow Counting - Version 2.0

Como se puede observar en la fig. 2.6, esta versión ya incorpora la estimación de vida residual y los mostraba como una ventana desplegable que le indicaba al usuario cuanto era el daño acumulado.

El programa se puso a prueba, analizando datos anteriores y quedó en manifiesto que había que hacer algunos cambios en la forma de presentar la información. Además existía la necesidad de agregar algunas opciones al software (que serán comentadas en el próximo capítulo) como por ejemplo:

- Filtros para los datos de entrada
- Adaptar los datos del archivo de la placa de adquisición.
- Presentar los datos gráficamente pero por separado, para ser utilizado en informes.
- Presentar una tabla con los valores del conteo Rainflow.
- Poder analizar desde un mismo archivo, el daño acumulado, tanto por el método de S-N como por ϵ -N, independientemente y en simultáneo para comparar los resultados.

De esta manera fue como nació la versión 2.1, que incorpora estos cambios y algunos más.

2.3.3 – CNEA – Rainflow Counting - Versión 2.1

La versión 2.1, es por el momento, la definitiva. La interfaz principal es muy parecida a la anterior pero incluye el botón de “adaptar datos”, como se puede ver en la fig. 2.7. La funcionalidad del programa es superior a su antecesora.



Fig. 2.7 - CNEA – Rainflow Counting - Version 2.1

La necesidad de adaptar esta versión a los cambios antes mencionados, brindó la posibilidad de adecuar las funciones del programa y permitió realizar otras ventanas, en la interfaz gráfica del software, que permiten una mejor interacción con el usuario.

La diferencia más importante con la versión anterior fue que se gestó una concepción distinta del programa. El mismo pasó de ser una ventana principal que centralizaba todas funciones, y que las mismas eran llamadas cuando se presionaban los botones correspondientes. Los datos, eran ingresados por un cuadro de diálogo. En cambio en esta versión, la ventana principal es solo un enlace a distintos formularios (los mismos serán expuestos en el capítulo posterior) que descentralizan las funciones, pudiendo acceder a ellos de una forma sencilla, con mayores opciones para el uso del software y con un diseño simple de interfaz. En el futuro, permitirá la opción de poder ampliar el programa sin la necesidad de realizar grandes cambios.

2.4 –Posibilidades de expansión

Como fue comentado anteriormente, el objetivo principal del software, era realizar un algoritmo que contara los ciclos por el método de Rainflow. Este objetivo fue cumplido, por eso se decidió ampliar los objetivos a programar el cálculo de la vida residual en un componente. Debido a que el tiempo para cumplir con este objetivo era acotado, se decidió que la mejor forma de realizarlo, era dejando de lado opciones adicionales (o se podrían llamar accesorios) que fueran de utilidad, pero que no sean de carácter fundamental para su utilización. Este apartado tiene por propósito mencionar alguna de estas opciones con el fin de que en algún momento se amplié el presente software.

Teniendo en cuenta que existen muchas posibilidades de expansión para el software, estas pueden ser resumidas y clasificadas según su objetivo:

- **Estimar los parámetros con datos experimentales:** una muy buena posibilidad es diseñar una interfaz gráfica que permita, a través de datos experimentales, ajustar las curvas tanto de S-N como las de ϵ -N, y de ahí estimar los parámetros para el material en cuestión. Esta interfaz estaría integrada a la venta principal.
- **Utilizar los enfoques del dominio de la frecuencia:** se podría generar un algoritmo que permita usar esta metodología, complementando este enfoque. Algunos de los métodos citados en la biografía (3) recomiendan el uso del método de banda angosta (*Bendat*) y/o el método de banda ancha (*Dirlik*).
- **Contaje de ciclos con otros métodos:** además de utilizar otros enfoques para conocer el espectro de carga, también se pueden utilizar los otros métodos descritos en el capítulo 1.5.2 (que utilizan el enfoque de dominio tiempo) para permitirle al usuario que pueda elegir libremente entre una u otra metodología, y comparar los resultados obtenidos.
- **Calculo de daño acumulado por otros métodos:** cómo se expuso en el capítulo 1.3.1, la metodología usada para conocer el daño acumulado en el componente es la regla de Miner-Palmgren. Este enfoque es el más simple y el más usado en el ambiente ingenieril, pero se podrían codificar los otros métodos comentados con el fin de comparar resultados o tener mejores aproximaciones sobre la vida residual del componente.

- **Calcular los factores K:** existen diversos factores que modifican la resistencia del límite de fatiga. Por su complejidad y la gran diversidad de opciones disponibles, los cálculos de estos factores no fueron tenidos en cuenta en la programación. Pero una buena opción sería incorporarlos, para ahorrar trabajo al especialista que utiliza el programa.
- **Incorporar el enfoque fracto-mecánica con sus diferentes teorías:** Esta enfoque tampoco fue incluido en el software, pero llegado el caso, sería muy provechoso agregarla al software, teniendo así, en un mismo paquete, las diversas metodologías utilizadas para conocer el daño acumulado en un componente.

Al Incorporar algunos de los puntos mencionados, se enriquecería el presente trabajo y se lograría perfeccionar una herramienta muy útil para los profesionales, debidamente capacitados en esta área de trabajo. Pero vale la pena aclarar, que por ninguna razón, el uso de este software reemplazará la capacidad y el buen juicio y criterio de un experto en el tema.

Bibliografía del capítulo 2

1. **Instruments, National.** *<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>*. 2014.
2. **Barrois, W.** *Use of General Fatigue Data In The Interpretation Of Full-Scale Fatigue Test*. Londres : Agard, 1977.
3. **Moreno Morales, Maria Belén.** *Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias*. Málaga : s.n., 2002.

Capítulo 3 – Funcionamiento del software

En este apartado, se explica cuál es rol de cada botón y cuáles son los parámetros necesarios que se deben especificar en los subprogramas para el correcto funcionamiento del software. Para esto se hará mención sobre la función de cada ventana del software, indicando cuales son los ingresos de datos importantes (también los que pueden ser omitidos) y que rol juega cada uno para el correcto funcionamiento del algoritmo.

3.1 – Ventana Principal

La función de la ventana principal, que se muestra en la fig. 3.1, es la de vincular los diferentes algoritmos del programa y coordinar los resultados de los mismos. Una característica importante en el diseño de esta ventana es que es intuitiva y amigable para el usuario, aunque sea la primera vez que se utilice.



Fig. 3.1 – Ventana principal

Las características de la ventana se nombrarán brevemente a continuación:

1. **Ruta de acceso:** Una vez elegido, tanto el archivo con los datos como el material, sus rutas de acceso son presentadas en dicho campo con el fin de que el usuario corrobore si lo que eligió se corresponde con lo que realmente deseaba elegir, y así evitar errores en el funcionamiento o en el cálculo.
2. **Adaptar Datos:** Este botón es el enlace con el subprograma que lleva su nombre. El mismo se encarga de adaptar los datos a un formato que no cause inconvenientes en el uso del programa principal. Su uso no es fundamental para el

funcionamiento del software, pero es un buen complemento para estructurar los datos en la forma adecuada para el uso del algoritmo de conteo.

3. **Selección del material:** Como su nombre lo indica, es la puerta para cargar el material deseado. El mismo es almacenado en la memoria de la PC, pero si no llegara a existir, se puede agregar uno nuevo o modificar uno ya existente. El material puede ser seleccionado antes de utilizar el conteo de ciclos.
4. **Carga de datos:** al igual que el botón anterior, permite cargar y seleccionar el archivo de datos deseado. Cabe aclarar que para que no haya errores en el procesamiento de los datos, el mismo debe tener un formato de columnas que solo posean los valores registrados. El separador decimal tiene que ser el "punto". Este ítem debe ser seleccionado antes de utilizar el conteo de ciclos.
5. **Conteo de ciclos:** inicia el algoritmo que tiene como finalidad encontrar la cantidad de ciclos aplicados a distintas cargas o deformaciones en el componente.
6. **Curvas y daño acumulado:** al presionar este botón (previamente se debe haber realizado el conteo de ciclos) se puede consultar las curvas del material y además estimar el daño acumulado en el componente, tanto para el método de **S-N** o **ϵ -N**.

3.2 – Subprograma "Adaptar datos"

Anteriormente se comentó en forma breve de que el software tiene la función de importar un archivo (que puede tener extensión ".dat", ".mat", ".xlsx", ".xls", ".txt"). Este archivo debe contener los datos adquiridos del ensayo. Los mismos tienen que ser adaptados al formato que utiliza el programa. Las líneas de texto o columnas que son ingresadas por la placa de adquisición con fines informativos deben ser eliminadas. Los datos deben estar en KN (si son de fuerza) o MPa (si son de tensión). Si están en KN podrán ser convertidos a MPa con el algoritmo del botón "Conteo de ciclos", especificando el área de la probeta ensayada.

En la fig.3.2 se puede apreciar el diagrama de flujo de este algoritmo. En el mismo podemos ver que una vez que adaptamos el archivo con los datos adquiridos del ensayo, este es transformado a un formato válido y queda listo para ser usado.



Fig. 3.2 – Diagrama de flujo de “Adaptar datos”

En la fig. 3.3, se muestra las ventana principal del subprograma. Debajo de la misma se detallan los campos importantes para su correcto uso.



Fig. 3.3 – Ventana Adaptar datos

Al presionar el botón "Carga del archivo externo" se abre una ventana para elegir el tipo de archivo a importar. Una vez apretado el botón de abrir, se despliega otra ventana para

seleccionar las columnas de datos que se desean importar, como lo muestra la figura 3.4 y 3.5.



Fig. 3.4 y 3.5 – Importar los datos del archivo elegido.

Una vez seleccionados las columnas que se desean importar, se especifican los nombres de las columnas manualmente para organizar el archivo de una manera óptima. El archivo se guarda por defecto en la carpeta “01 - DATOS PROCESADOS”, incluida en la ubicación de instalación del programa principal.

3.3 – Subprograma “Selección del material”

Este formulario fue creado por la necesidad de agrupar las propiedades del material en un archivo específico, de modo de crear una base de datos de materiales.

Al igual que el archivo que contiene los datos registrados del experimento, las propiedades del material son de carácter principal en el programa, por lo tanto, para poder utilizar este software y calcular el daño acumulado, ambos archivos deben estar cargados. Si no se seleccionara un material, aunque sea de modelo, el software mostraría una ventana de error en el procesamiento.

Tal como lo muestra su diagrama de flujo en la fig. 3.6, su interfaz es simple, permitiendo al usuario elegir un material desde la base de datos o cargar uno nuevo.



Fig. 3.6 – Diagrama de flujo de “Selección del material”

La figura 3.7 muestra el formulario para ingresar un material nuevo, con todos los campos necesarios para poder utilizar tanto el método **S-N** como **ε-N**. No se muestra la imagen del formulario para abrir un material almacenado en la maquina porque es similar a la de todos los programas.

El formulario, titulado "IngresoDeMateriales", contiene los siguientes campos de entrada:

- Tipo de Material
- Especificación
- Aleación
- Procesos Aplicados
- Modulo de Young (E) [MPa]
- Esfuerzo Máximo (Su) [MPa]
- Coefficiente de Resistencia a la Fatiga (sf') [MPa]
- Exponente de Resistencia a la Fatiga (b)
- Coefficiente de Ductilidad a la Fatiga (ef')
- Exponente de Ductilidad a la Fatiga (c)
- Coefficiente de Resistencia Cíclica (K') [MPa]
- Exponente de Endurecimiento Cíclico (nf)
- Material de Referencia

En la parte inferior del formulario hay tres botones: "Grabar Material", "Abrir Material" y "Borrar Celdas". A la derecha del formulario se muestra una imagen de un engranaje.

Fig. 3.7 – Formulario para el ingreso de materiales

3.4 – Botón “Carga de datos”

Este botón, solo despliega la ventana para abrir el archivo de datos. Al igual que fue mencionado anteriormente, los datos deben estar organizados por columnas, sin texto en el archivo salvo los nombres de las columnas, y el separador decimal debe ser el “punto”. Si llegaran a estar separados por “comas”, el programa los tomará como datos diferentes (dos columnas distintas) ya que las mismas funcionan como delimitador de datos legibles.

3.5 – Subprograma “Conteo de ciclos”

El diagrama de flujo de este subprograma se muestra en la fig. 3.8. Como se puede apreciar, puede utilizarse simultáneamente, tanto los métodos de tensión como de deformación. Los filtros son utilizados para descartar valores, que conocidos por el usuario, representan ruidos o son considerados errores en el experimento. El área de la probeta se utiliza para pasar de KN (fuerza) a MPa (tensión) y con ella poder calcular la carga equivalente a la que está sometida la probeta. Si no es especificada el área de la probeta, el programa cuenta de la misma manera los ciclos de fuerza (en KN), pero no calcula la carga equivalente (MPa) a la que es sometida la probeta si se aplican tensiones con carga media mayor a 0.

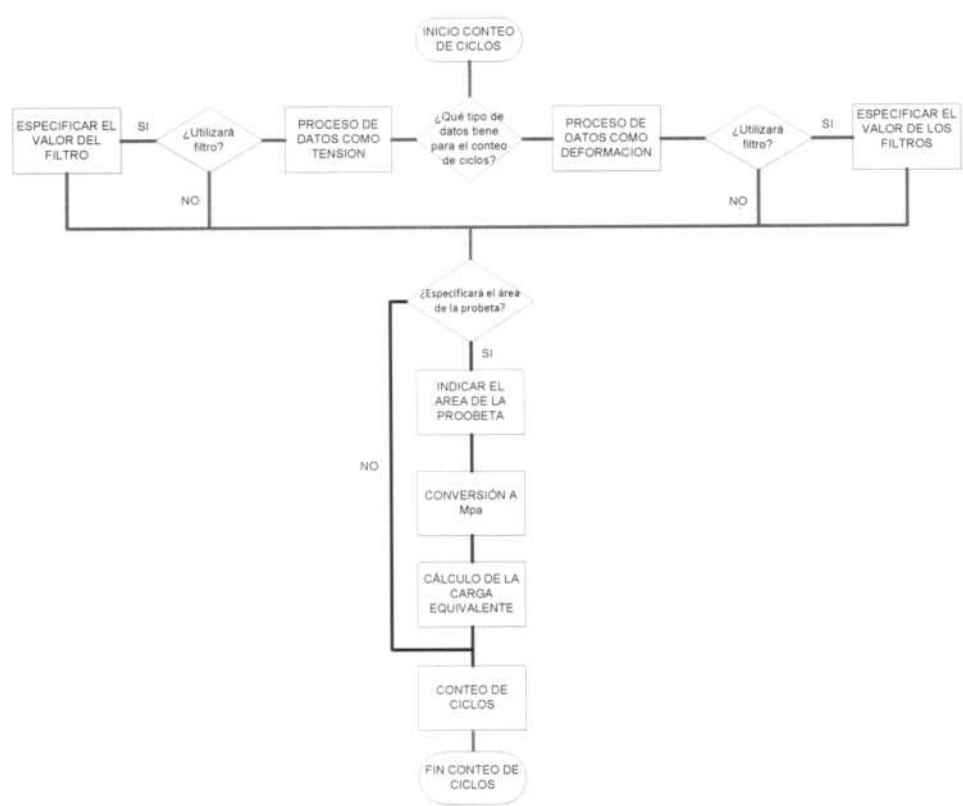


Fig. 3.8 – Diagrama de flujo de “Conteo de ciclos”

Cuando apretamos el botón “Conteo de ciclos” en la ventana principal, se despliega un formulario cómo el que se muestra en la fig. 3.9. Para usarlo correctamente es necesario

especificar en cual columna se encuentra los datos de “fuerza” y/o “Deformación”, sino el subprograma utilizará, por defecto, los datos de la primer columna del archivo.



Fig. 3.9 - Subprograma “Conteo de ciclos”

Los campos señalados en la casilla de verificación, tanto en “Tensión” como en “Deformación”, habilitan al programa a exponer los siguientes gráficos:

- Datos de entrada
- Histograma de deformación y de carga media (en deformación)
- Histograma de Amplitud de carga y de carga media (en tensión)
- Tablas con los valores de los histogramas (la cantidad de particiones lo especifica el usuario).

De esta manera, el usuario puede consultar los resultados obtenidos por el programa si así lo deseara.

Una vez presionado el botón “empezar el conteo”, aparece una ventana que consulta si el usuario desea ver la gráfica de los datos del archivo antes de ser procesados. Si se marcó la opción para mostrar algún histograma, aparecerá una ventana en la que se debe ingresar la cantidad de intervalos en los que se dividirá el mismo.

Los valores registrados en el histograma son agrupados en un rango, que puede ser grande o pequeño, según la cantidad de intervalos especificados por el usuario (esta cantidad varía entre 2 y 100). La cantidad de intervalos, define el error en el conteo. Cada intervalo está definido por un mínimo y un máximo. Los valores obtenidos en el conteo son clasificados, según pertenezcan, en un intervalo o en otro. Esto introduce un error que

está relacionado directamente con el número de intervalos utilizados. Se aconseja al usuario que si desea mayor precisión en la clasificación de los ciclos obtenidos utilice la máxima cantidad de intervalos posibles. Esto se verá reflejado en la estimación de vida residual.

Los resultados de este algoritmo deben ser guardados en formato “.txt”, para luego poder ser usado en el próximo subprograma.

3.6 – Subprograma “Curvas y daño acumulado”

Esta es la etapa final del programa principal. En el mismo se utilizan los datos que fueron procesados anteriormente y se calcula el daño acumulado por la regla de Miner-Palmgren. El diagrama de flujo se muestra en la fig. 3.10.



Fig. 3.10 – Diagrama de flujo de “Curvas y daño acumulado”

El algoritmo utiliza las propiedades del material seleccionado para graficar las curvas correspondientes al método **S-N** o **ε-N** según corresponda. Con respecto a los datos obtenidos por el conteo de ciclos, el programa discrimina la cantidad de ciclos para cada una de las deformaciones o tensiones dadas, y busca en la curva del material cuál es la cantidad máxima de ciclos que resiste en esas condiciones, y calcula el daño acumulado en el material.

En la fig. 3.11 se muestra la imagen del subprograma. En el mismo se observa, que se pueden utilizar los factores modificadores “K”, que afectan al valor de resistencia al límite por fatiga. Estos valores utilizan la ecuación de Marín para factores modificadores del

límite de fatiga (Ec. 1.29) cómo método de extrapolación de estos datos a componentes reales. Estos valores deberían ser confirmados por ensayos en laboratorio.

$$S_e = \prod_i K_i S'_e$$



Fig. 3.11 - Subprograma "Curvas y vida residual"

Los métodos para calcular cada uno de los factores modificadores "K" fueron explicados muy brevemente en el apartado 1.4. Debido a que superan el alcance de este trabajo, para su uso se puede consultar la bibliografía del capítulo mencionado.

Por defecto, en el método **S-N**, la relación de la resistencia a la tracción del material a 1000 ciclos es 0.75 (considerando un ensayo en carga axial). Si no se especifica el límite de fatiga del material, se utiliza el valor obtenido mediante la Ec. 1.8.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$$

Considerando $2N_f$ cómo 10^8 ciclos.

Capítulo 4 – Validación experimental del funcionamiento del software

En este capítulo se presentarán los test y ensayos realizados para verificar el funcionamiento del software. La experimentación se ejecutará en dos etapas principales que se desarrollarán a continuación:

1. **Conteo de Ciclos:** Esta etapa corresponde a la parte más importante de la validación del trabajo, debido a que fue inicialmente el objetivo principal del mismo. Específicamente, se desarrolló un algoritmo adecuado para el conteo de ciclos. A partir de esto se exhibirán las distintas etapas en que se realizaron los test y ensayos, mostrando los resultados obtenidos y las dificultades encontradas. Para esto, es conveniente dividirla en tres secciones:
 - I. Test con funciones conocidas que permiten establecer el número de ciclos y conocer el error en el conteo. Se utilizaron funciones sinusoidales.
 - II. Test con datos aleatorios generados en Microsoft Excel con cotas preestablecidas.
 - III. Test con la adquisición de datos experimentales de laboratorio.
2. **Estimación del daño acumulado:** En esta etapa se utilizaron las experiencias realizadas en el laboratorio, con el fin de conocer la estimación del daño en una probeta ensayada a rotura. El resultado obtenido se compara con la regla de Miner-Palmgren.

4.1 –Validación del algoritmo de conteo de ciclos

Esta validación se realizó con el motivo de conocer la capacidad del algoritmo en discriminar los ciclos aplicados y su posible error en el conteo. Por esto, el primer set de pruebas se realizó con funciones sinusoidales en un intervalo preestablecida. De esta manera se conoce, para cada caso, el número de ciclos aplicados y su amplitud. Las distintas funciones seleccionadas presentan un incremento paulatino en su complejidad con el fin de que la transición entre los diferentes tipos de pruebas no sea abrupta, y a su vez, que permitan evaluar si en algún punto del proceso se presenta un error que obstaculice el conteo de los ciclos. De esta manera, se buscó evitar que en pruebas de mayor complejidad dicho error quede enmascarado en los resultados.

El segundo set de pruebas corresponde a los datos aleatorios con cotas preestablecidas. Este conjunto consta de 3 pruebas cuyo conteo de ciclos fue corroborado a mano. El motivo que da lugar a este apartado, es hacer la transición del conteo de ciclos sobre los datos generados con algún tipo de control, al conteo de los ciclos en los datos registrados en los ensayos por medio de equipos de adquisición especializados.

El tercer grupo de pruebas pertenece a las realizadas en el laboratorio. El motivo de las mismas fue conocer las dificultades que se pueden presentar en una adquisición de datos en un componente en servicio.

4.1.1 – Set de pruebas con funciones sinusoidales

4.1.1.1 - Prueba 1: sen (3x)

Se comenzó con los valores generados por la función $y = \sin(3x)$ en excel. Los valores de x van desde 1 hasta 10000 (radianes) con el paso un radian. Esto permitió definir una onda senoidal de 83 ciclos de amplitud igual a uno y un ciclo con amplitud 0.45 . Se procedió a correr el algoritmo para evaluar el reconocimiento de las amplitudes y la cantidad de ciclos diferenciados.

Como se puede observar en la fig. 4.1, el histograma generado por el algoritmo muestra mas de 80 ciclos de igual amplitud y carga media cercana a cero, y un solo ciclo de menor amplitud que los demas y carga media 0.5.

A modo de recordatorio, la carga alterna (la amplitud) se calcula por medio de la ecuacion 1.1:

$$S_a = (S_{\text{máx}} - S_{\text{mín}})/2$$

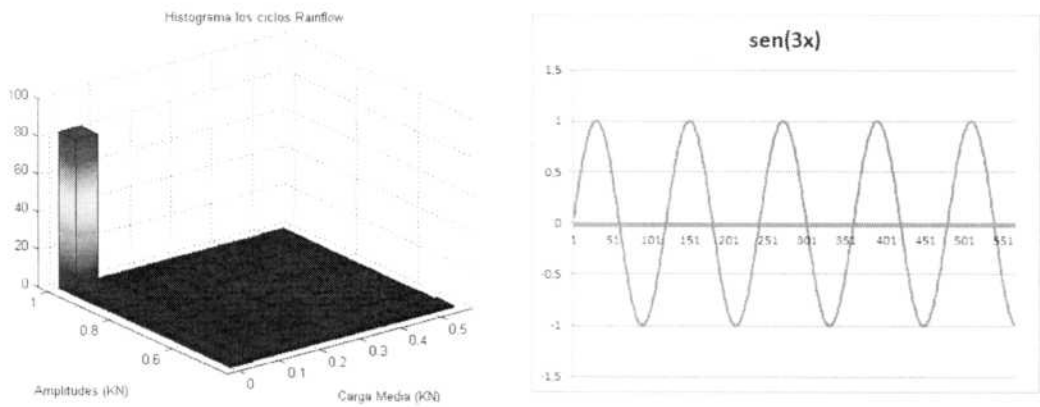


Fig. 4.1 – Histograma de la función $y= \text{sen}(3x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (kN)	Amplitudes (kN)
1	83	0.0276	0.9724
2	1	0.5247	0.4753

a)

	Número de Ciclos	Carga Media (kN)	Amplitudes (kN)
1	83	0.0028	0.9972
2	1	0.5495	0.4505

b)

Tabla 4.1 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y= \text{sen}(3x)$. a) Utilizando 10 divisiones. b) Utilizando 100 divisiones.

Cómo fue expuesto en la sección 3.5 la cantidad de divisiones del histograma se realiza por intervalos introducidos por el usuario. La cantidad de intervalos va desde 2 hasta 100, dependiendo de la capacidad de procesamiento de la computadora. Estos intervalos agrupan los ciclos adquiridos que poseen igual amplitud, de carga o deformación, y de carga media. El valor utilizado para estimar el daño acumulado es el promedio de los extremos de cada intervalo. En las tablas. 4.1, se comparan los resultados obtenidos utilizando 10 divisiones en el histograma (tabla 4.1 a)) y 100 divisiones (tabla 4.1 b)). En ambas el recuento muestra 83 ciclos con carga media cercana a cero y de amplitud próxima a 1, y un ciclo con carga media 0.5 y amplitud cercana a cero. Este último ciclo se debe a que los últimos valores de la función generan un ciclo pequeño formado por el máximo o mínimo (-1 o 1) con un valor intermedio.

En esta serie de pruebas, se hizo hincapié en el recuento de ciclos aplicados. Al utilizar 10 divisiones en el histograma existe un error aproximado de 5 % en la determinación exacta de la amplitud del ciclo, mientras que si se utiliza 100 divisiones el error es de 0,5%. Sin embargo, para una mejor visualización del histograma se eligió trabajar con 10 divisiones en los 2 primeros sets de pruebas, donde se trabajan con funciones matemáticas y no con datos experimentales.

4.1.1.2 - Prueba 2: $2\text{sen}(3x)$

En esta prueba, se evaluó cómo se comporta el algoritmo al aumento de la amplitud de los ciclos aplicados y de la carga media en la función. Se utilizó la misma metodología que en la prueba anterior.

En la fig. 4.2 y la tabla 4.2 se muestra la salida del algoritmo. Se extrajo correctamente la amplitud y carga media de los ciclos aplicados, con el error aclarado anteriormente.

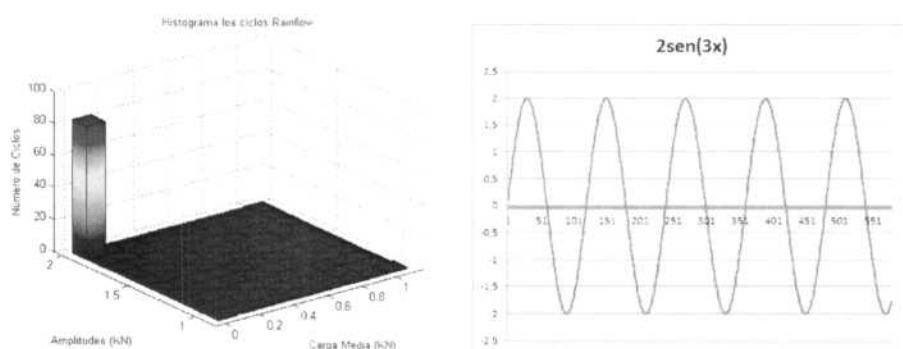


Fig. 4.2 – Histograma de la función $y=2\text{sen}(3x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
1	83	0.0552	1.9448
2	1	1.0493	0.9507

Tabla 4.2 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y=2\text{sen}(3x)$

4.1.1.3 - Prueba 3: $2\text{sen}(6x)$

Se analizó la capacidad de captar los ciclos aplicados cuando se aumenta la frecuencia de los mismos. Se utiliza la misma metodología que con los ensayos anteriores.

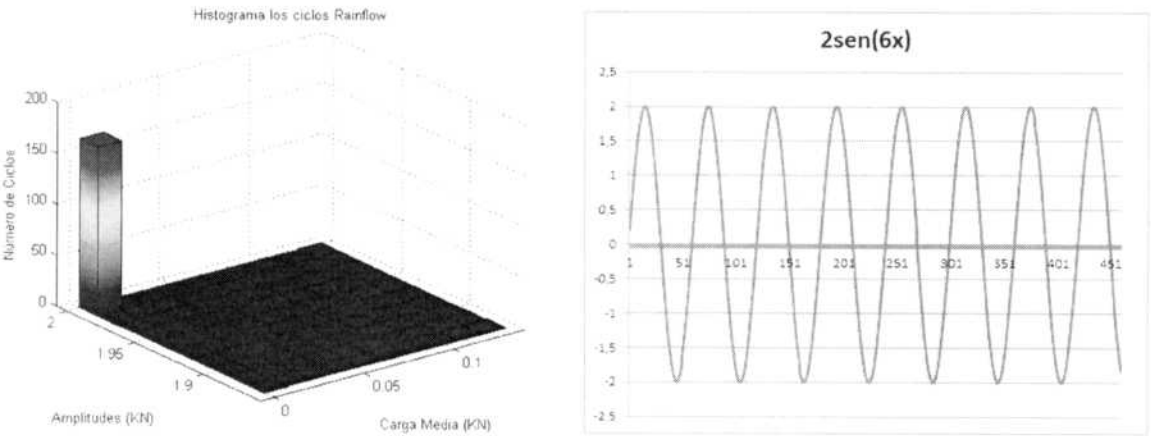


Fig. 4.3 – Histograma de la función $y= 2\text{sen}(6x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
1	166	0.0067	1.9933
2	1	0.1273	1.8727

Tabla 4.3 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y= 2\text{sen}(6x)$

Como se muestra en la fig. 4.3 y su correspondiente tabla (tabla 4.3), el algoritmo reconoce que hubo un aumento en la frecuencia de 83 a 166 ciclos y 1 sólo ciclo de amplitud menor. El crecimiento de este último se debe al aumento de la frecuencia y de amplitud en la función que incrementa el máximo y el mínimo del ciclo, pero al ser una función que oscila entre -2 y 2, no alcanza a formar otro ciclo.

4.1.1.4 - Prueba 4: $1 + \text{sen}(3x)$

En esta prueba, se volvió a utilizar la misma metodología. El objetivo de la misma fue conocer el comportamiento del algoritmo al aumento de la carga media.

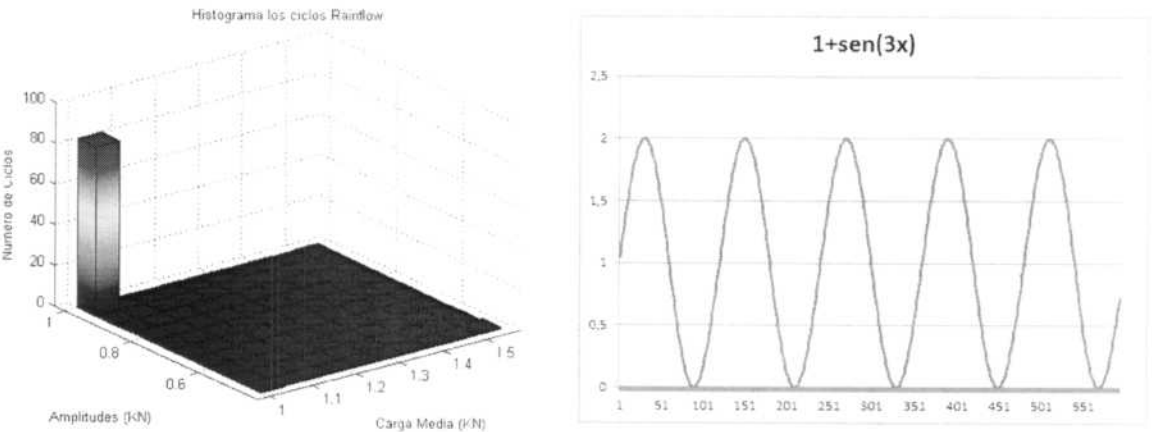


Fig. 4.4 – Histograma de la función $y = 1 + \text{sen}(3x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (kN)	Amplitudes (kN)
1	83	1.0276	0.9724
2	1	1.5247	0.4753

Tabla 4.4 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y = 1 + \text{sen}(3x)$

Como se puede observar en la tabla 4.4, el número de ciclos registrados es igual al de las dos primeras pruebas, con aumento en la carga media (carga media de tracción). A modo de recordatorio, la carga media se calcula por medio de la ecuación 1.2:

$$S_m = (S_{\text{máx}} + S_{\text{mín}}) / 2$$

La diferencia que presenta el valor de la misma en la tabla y con el cálculo a “mano” se debe al rango de valores que entran en cada subdivisión del histograma. Este error disminuye cuando aumentamos la cantidad de intervalos del mismo.

4.1.1.5 - Prueba 5: $\text{sen}(3x) + \text{sen}(x)$

En este ensayo, se evaluó la capacidad del algoritmo de contar los ciclos de amplitudes diferentes y la variación de la carga media.

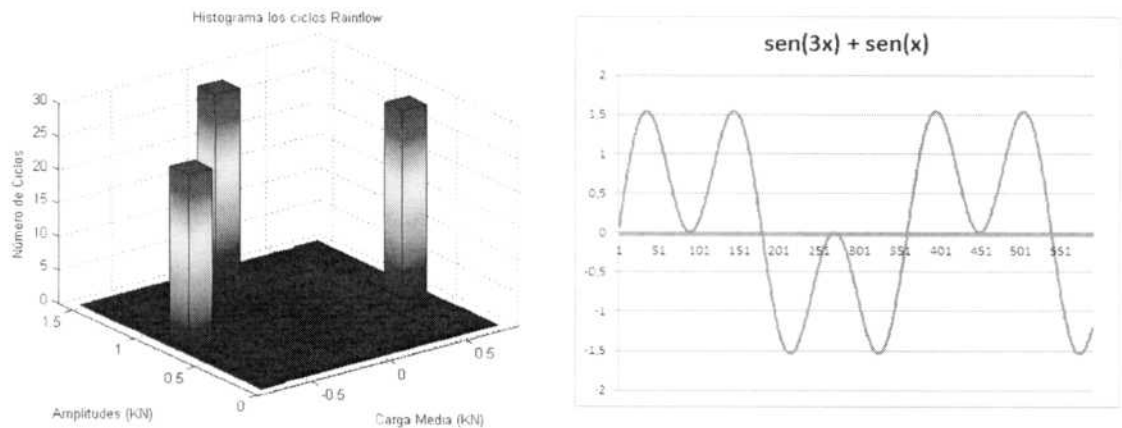


Fig. 4.5 – Histograma de la función $y = \text{sen}(3x) + \text{sen}(x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
1	27	-0.6928	0.7254
2	1	-0.0770	0.1334
3	28	0.0770	1.4655
4	28	0.6928	0.7254

Tabla 4.5 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y = \text{sen}(3x) + \text{sen}(x)$

Como se puede observar en la fig. 4.5 y la tabla 4.5, el algoritmo encuentra ciclos con carga media menor a 0. Estos valores indican que, si estuviéramos ensayando un componente, este está siendo sometido a una carga media de tracción y de compresión. Esta última, según varios autores (1; 2; 3; 4; 5), aporta una carga residual que influiría beneficiosamente en la vida del componente, siempre y cuando esta sea menor que la tensión de fluencia del material. Para el cálculo de la carga equivalente, que veremos en ensayos posteriores, con motivo de ser conservativos se programó que las cargas medias de compresión no sean tenidas en cuenta como beneficiosas sino como si la misma fuera igual a 0 (pero que se muestre su valor real en la tabla).

4.1.1.6 - Prueba 6: $\text{sen}(3x)+5\text{sen}(x)$

En ésta experiencia, se analizó el efecto de modificar la amplitud de los ciclos y la carga media. Se utilizó, al igual que en las pruebas anteriores, un incremento de uno en el intervalo que parte desde 1 hasta 1000 radianes para generar estos valores. En la fig. 4.6 se pueden observar las gráficas de los resultados obtenidos.

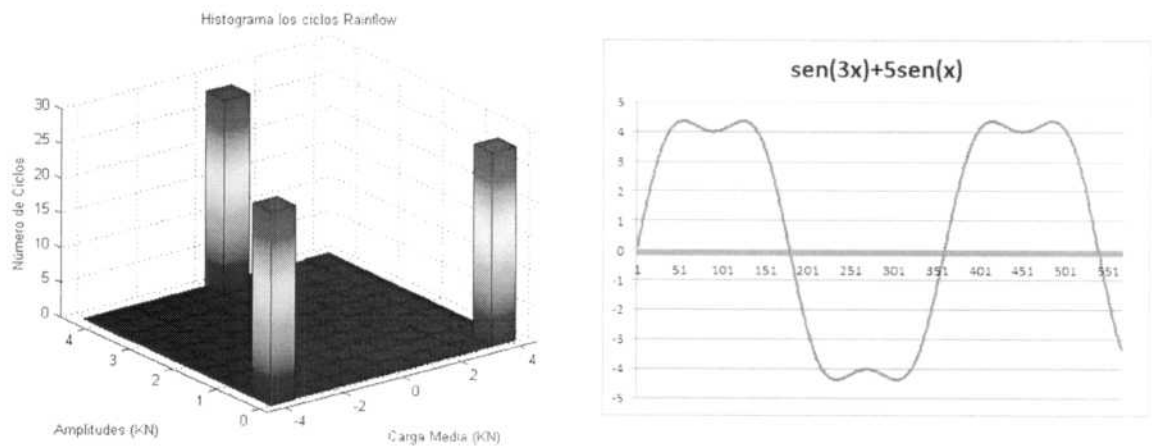


Fig. 4.6 – Histograma de la función $y= \text{sen}(3x)+5\text{sen}(x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
1	28	-3.7596	0.2453
2	28	0.4177	4.1383
3	28	3.7596	0.2453

Tabla 4.6 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y= \text{sen}(3x)+5\text{sen}(x)$

4.1.1.7 - Prueba 7: $\text{sen}(3x)+ \text{sen}(5x)$

En esta prueba, se simuló tener una probeta de área 44.16 mm² (igual al área de las probetas utilizadas en el ensayo a fatiga que se muestran al final del capítulo), con el objeto de pasar de unidades de fuerza a unidades de tensión. El motivo de la simulación fue corroborar el cálculo de la carga equivalente. Esta última se calcula utilizando el criterio de Goodman dado por la ecuación 1.20:

$$\sigma_a = \sigma'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right)$$

El σ_{UTS} utilizado fue de 610 MPa, igual que el de la probeta ensayada a fatiga. En la figura 4.7 y en la tabla 4.7 podemos observar los resultados obtenidos.

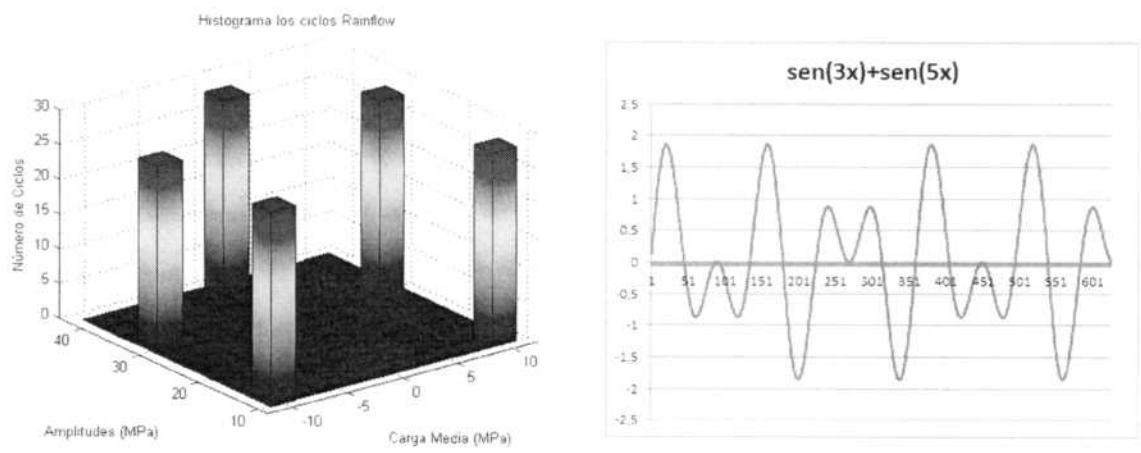


Fig. 4.7– Histograma de la función $y = \text{sen}(3x) + \text{sen}(5x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (MPa)	Amplitudes (MPa)	Carga Equivalente (M...
1	28	-10.0419	11.4765	11.4765
2	27	-10.0419	30.7862	30.7862
3	28	1.1158	40.4410	40.5151
4	28	10.0419	11.4765	11.6686
5	28	10.0419	30.7862	31.3014

Tabla 4.7 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y = \text{sen}(3x) + \text{sen}(5x)$

4.1.1.8 - Prueba 8: $\text{sen}(3x) + \text{sen}(5x) + 5\text{sen}(x)$

Esta es la última experiencia del set de funciones sinusoidales. En la misma se puede apreciar el aumento en la carga equivalente cuando crece la carga media. En las fig. 4.8 y la tabla 4.8, podemos ver los resultados de esta prueba.

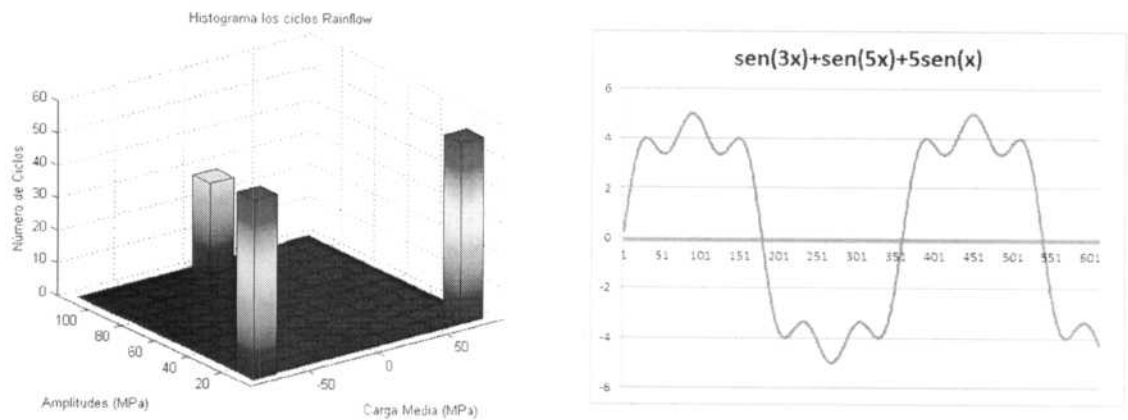


Fig. 4.8 – Histograma de la función $y = \text{sen}(3x) + \text{sen}(5x) + 5\text{sen}(x)$

	Número de Ciclos	Carga Media (MPa)	Amplitudes (MPa)	Carga Equivalente (M...
1	55	-74.9399	12.6087	12.6087
2	28	8.3267	107.9291	109.4227
3	56	74.9399	12.6087	14.3747

Tabla 4.8 – Tabla de recuento de ciclos de la función $y = \text{sen}(3x) + \text{sen}(5x) + 5\text{sen}(x)$

4.1.2 – Set de experiencias con “datos aleatorios” con cotas preestablecidas

Estas 3 pruebas vuelven a evaluar el desempeño del programa, pero con espectros aleatorios y diferente cantidad de datos para cada uno de los casos. Con las mismas se realizó una transición suave y controlada hacia las experiencias con los datos adquiridos en el laboratorio.

4.1.2.1 – Prueba datos aleatorios 1

Con esta experiencia, usando 10 divisiones en el histograma, se evaluó el funcionamiento del algoritmo ante su primera prueba con datos aleatorios. Los resultados obtenidos en la fig. 4.9 y la tabla 4.9 en cuanto al conteo de los ciclos son correctos, pero la amplitud registrada sigue condicionada a la cantidad de divisiones del histograma.

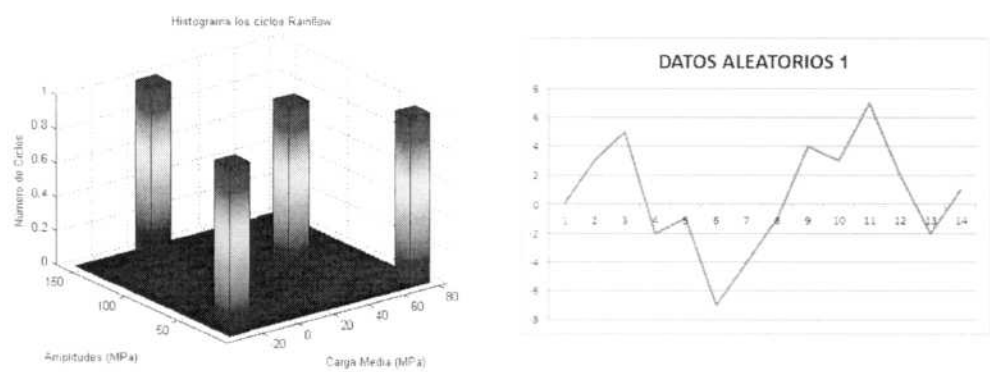


Fig. 4.9 – Histograma del archivo “datos aleatorios 1”

	Número de Ciclos	Carga Media (MPa)	Amplitudes (MPa)	Carga Equivalente (M...
1	1	-28.3062	18.6821	18.6821
2	1	5.6612	151.1549	152.5709
3	1	39.6286	77.5589	82.9476
4	1	73.5960	18.6821	21.2453

Tabla 4.9 – Tabla de recuento de ciclos del archivo “datos aleatorios 1”

4.1.2.2 – Prueba datos aleatorios 2

Esta prueba se realizó con más de 700 datos, que dieron una suma de 171 ciclos de diferentes amplitudes y cargas medias, como se puede ver en la fig. 4.10.

En este caso, no fueron corroborados a mano la cantidad de ciclos contados por el programa, el fin de este ejercicio fue observar la salida (el recuento de ciclos) del programa, para analizar, a grandes rasgos, si se podría observar alguna anomalía en el programa.

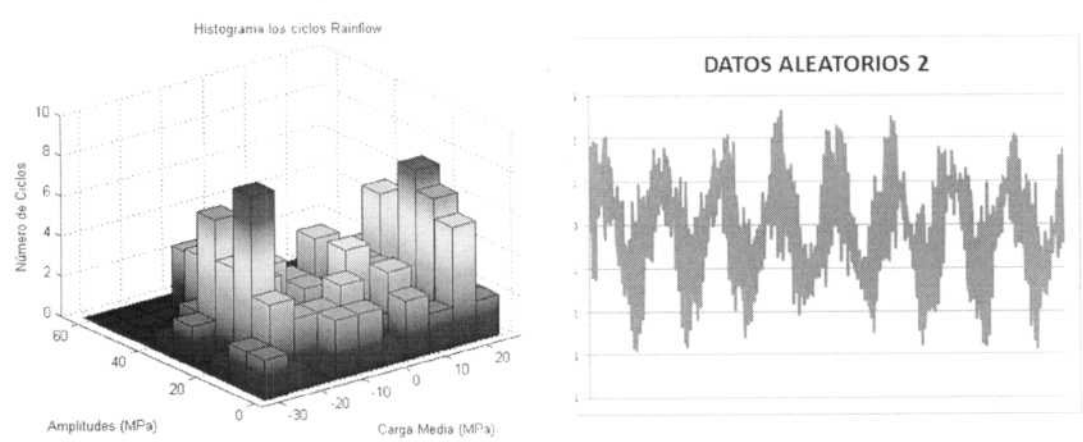


Fig. 4.10 – Histograma del archivo “datos aleatorios 2”

	Número de Ciclos	Carga Media (MPa)	Amplitudes (MPa)	Carga Equivalente (M...
1	2	-28.6979	3.6477	3.6477
2	2	-28.6979	9.8602	9.8602
3	1	-28.6979	16.0727	16.0727
4	2	-28.6979	28.4977	28.4977
5	1	-28.6979	34.7102	34.7102
6	1	-23.0190	3.6477	3.6477
7	4	-23.0190	9.8602	9.8602
8	9	-23.0190	16.0727	16.0727
9	5	-23.0190	22.2852	22.2852
10	7	-23.0190	28.4977	28.4977
11	2	-23.0190	34.7102	34.7102
12	3	-17.3401	9.8602	9.8602
13	1	-17.3401	16.0727	16.0727
14	4	-17.3401	22.2852	22.2852
15	3	-17.3401	28.4977	28.4977
16	4	-17.3401	40.9227	40.9227
17	3	-11.6612	3.6477	3.6477
18	3	-11.6612	9.8602	9.8602
19	1	-11.6612	16.0727	16.0727
20	4	-11.6612	28.4977	28.4977
21	1	-11.6612	34.7102	34.7102
22	3	-11.6612	53.3477	53.3477
23	3	-5.9822	3.6477	3.6477
24	4	-5.9822	9.8602	9.8602
25	1	-5.9822	16.0727	16.0727
26	3	-5.9822	22.2852	22.2852
27	3	-5.9822	28.4977	28.4977
28	1	-5.9822	34.7102	34.7102
29	2	-5.9822	53.3477	53.3477
30	1	-0.3033	3.6477	3.6477
31	2	-0.3033	9.8602	9.8602
32	5	-0.3033	16.0727	16.0727
33	2	-0.3033	22.2852	22.2852
34	2	-0.3033	28.4977	28.4977
35	1	-0.3033	34.7102	34.7102

Tabla 4.10 – Tabla de recuento de ciclos del archivo “datos aleatorios 2”

En la tabla 4.10, se puede observar parte de la tabla de salida del programa. Esta incluye el valor del intervalo con mayor cantidad de ciclos (9 ciclos) con una amplitud de aproximadamente $8,03 \times 10^3$ MPa y carga media negativa, por lo tanto no es considerada para calcular la carga equivalente. A grandes rasgos, parece no haber ninguna anomalía en el algoritmo de conteo de ciclos.

4.1.2.3 – Prueba datos aleatorios 3

En esta prueba, se analizaron 1000 datos aleatorios, generados por la función Random de Microsoft Excel, con cotas que preestablecen los mismos entre 1 y 19. El objetivo fue corroborar el funcionamiento del algoritmo. Por este motivo, se corroboró la cantidad de ciclos generados con la función de Excel. El resultado fue coincidente. Hubo diferencias en el valor de las amplitudes y de las cargas medias registradas con un error de 1,8% en los valores más grandes, pero este inconveniente queda minimizado si se maximizan la cantidad de divisiones del histograma.

Las salidas del programa para esta prueba se puede observar en la fig. 4.11 y la tabla 4.11. Se contaron 500 ciclos en total, con amplitudes y cargas medias de diferentes valores, que coinciden con los ciclos contados a mano, agrupados en los 10 intervalos que corresponderían a las divisiones del histograma.

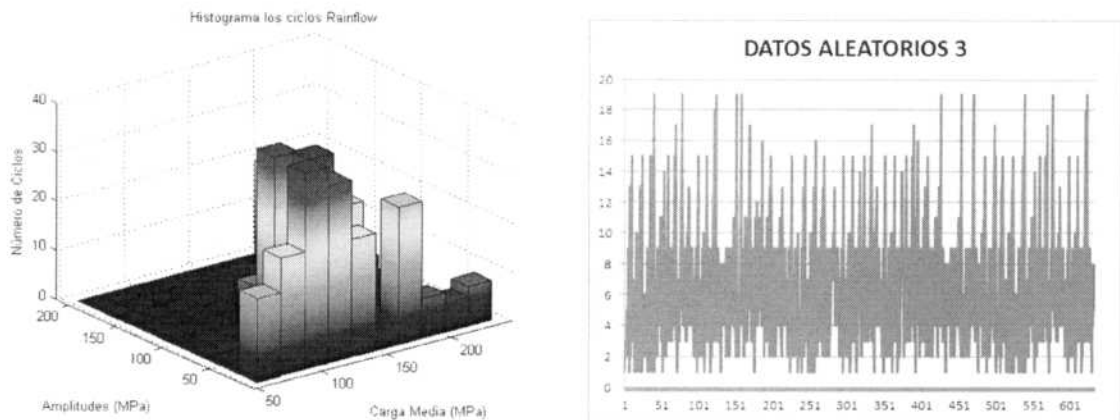


Fig. 4.11 – Histograma del archivo “datos aleatorios 3”

	Número de Ciclos	Carga Media (MPa)	Amplitudes (MPa)	Carga Equivalente (M...
1	17	65.6703	20.9466	23.4736
2	24	83.7862	20.9466	24.2818
3	8	83.7862	40.1947	46.5947
4	40	101.9022	20.9466	25.1475
5	2	101.9022	59.4429	71.3646
6	36	120.0181	20.9466	26.0773
7	40	120.0181	40.1947	50.0402
8	37	120.0181	78.6911	97.9680
9	9	120.0181	97.9393	121.9290
10	24	138.1341	20.9466	27.0765
11	10	138.1341	40.1947	51.9614
12	28	138.1341	59.4429	76.8443
13	10	138.1341	97.9393	126.6101
14	2	138.1341	117.1875	151.4930
15	2	156.2500	20.9466	28.1596
16	6	156.2500	40.1947	54.0359
17	26	156.2500	59.4429	79.9123
18	10	156.2500	97.9393	131.6650
19	6	156.2500	136.4357	183.4177
20	28	174.3659	20.9466	29.3306
21	4	174.3659	59.4429	83.2354
22	4	174.3659	78.6911	110.1879
23	2	174.3659	97.9393	137.1403
24	16	174.3659	117.1875	164.0927
25	6	174.3659	136.4357	191.0451
26	24	174.3659	155.6839	217.9976
27	8	192.4819	20.9466	30.6032
28	2	192.4819	97.9393	143.0907
29	6	192.4819	155.6839	227.4564
30	4	192.4819	174.9321	255.5783
31	6	210.5978	20.9466	31.9913
32	6	210.5978	117.1875	178.9784
33	8	210.5978	136.4357	208.3759
34	2	210.5978	155.6839	237.7733
35	10	210.5978	174.9321	267.1707

Tabla 4.11 – Tabla de recuento de ciclos del archivo “datos aleatorios 3”

Como las pruebas anteriores tuvieron resultados satisfactorios, se procedió a realizar una etapa experimental con el fin de recrear como sería el proceso de adquisición de datos en campo o laboratorio para luego usarlos como datos de entrada en el programa.

4.1.3 – Set de pruebas experimentales

Con estas pruebas se testeó el software con los datos adquiridos con un equipo externo, similar al que se utilizará en campo con el objetivo de conocer los problemas que pueden surgir en el durante la adquisición para preparar y tomar las precauciones

correspondientes o, llegado el caso, para tener soluciones rápidas y de fácil aplicación en el caso de algún inconveniente conocido.

El ensayo fue realizado con la maquina servo-hidráulica *MTS* que está a disposición de la división de fractura del departamento de Materiales. En la misma se colocó una probeta de acero, en la cual estaban adheridos strain gauges como muestra la fig.4.12, con el fin de que al aplicarle ciclos repetidos de tracción y compresión, estos sean adquiridos por la placa de adquisición del equipo *VISHAY MODELO P3*, similar al de la fig. 4.13.



Fig. 4.12 – Foto de la probeta que se utilizó en el ensayo.



Fig. 4.13 - Vishay Model p3

Se llevaron a cabo 2 pruebas experimentales. Cada una presentó alguna dificultad diferente, pero ambas sirvieron para enriquecer el programa y el procedimiento para realizar la adquisición de datos.

4.1.3.1 – Prueba experimental uno

Para el primer ensayo en el laboratorio se decidió adquirir un espectro de datos formado por una totalidad de 1000 ciclos en bloques de longitud de 20 ciclos (aplicados con la MTS). El fin era analizar utilizar la salida de datos registradas por la placa de adquisición, introducirlos al algoritmo como datos de entrada y construir un histograma que refleje la cantidad de ciclos aplicados en la probeta. Esta salida sería comparada con los ciclos aplicados cargado en la MTS para ser aplicados a la probeta.

Pero el ensayo no resultó como se pensaba. Se necesitaba más de 20 Hz en la adquisición de los datos para representar una onda aceptable que pueda reflejar las cargas aplicadas a la probeta. El equipo sólo permitía adquirir datos en forma digital con una frecuencia de muestreo de 2 Hz. Al no cumplirse las condiciones de adquisición, se conectó el equipo en forma analógica, no utilizando el circuito de grabación en la memoria interna del mismo. Otro de los inconvenientes de la salida analógica del equipo fue que la ganancia (factor de amplificación de la señal) era pobre. Entonces para aumentar la ganancia del primer equipo y grabar los datos en algún tipo de soporte físico se debió utilizar otra placa de adquisición conectada en serie.

Al adquirir los datos con la placa de adquisición externa, se introdujo ruido que enmascaró los datos registrados. La fig. 4.14 muestra la representación de los más de 10^6 datos registrados en el archivo. Se pueden distinguir 50 bloques de ciclos de cargas aplicados a la probeta, pero el ruido hizo imposible distinguir la cantidad exacta de ciclos aplicados en las distintas amplitudes y cargas medias.

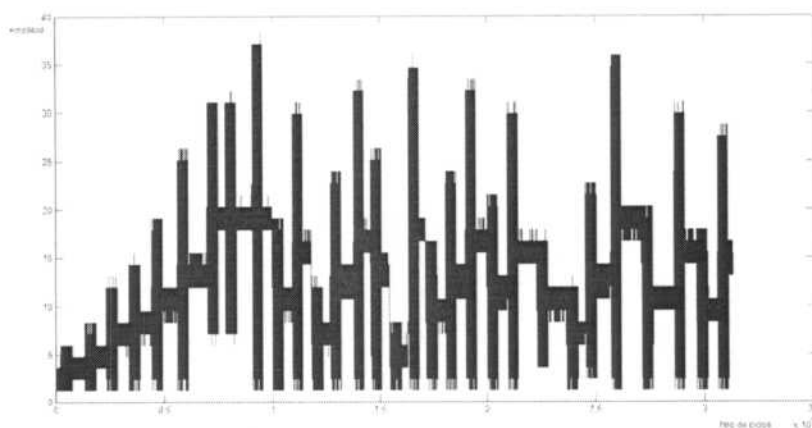


Fig. 4.14 – Datos registrados en el primer ensayo

Este espectro de datos, fue usado como dato de entrada para el software. No se especificó el área de la probeta en el programa, para que el recuento de ciclos salga en unidades de carga (KN) (de esta manera era más fácil la comparación con los ciclos programados en la MTS). El resultado fue el que se muestra en la fig. 4.15.

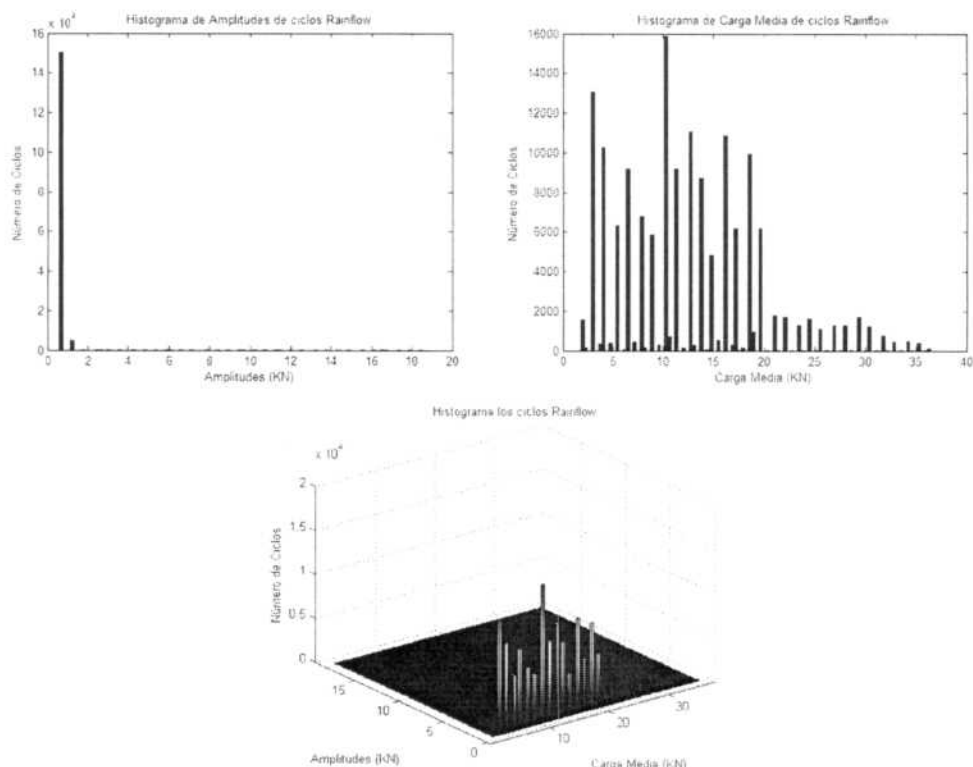


Fig. 4.15 – Resultados del primer ensayo

Cómo se puede observar en la fig. 4.15 (en el gráfico Numero de ciclos – Amplitudes), la mayor cantidad de los ciclos registrados (aproximadamente 13×10^4 ciclos), tiene una amplitud menor 1 KN. Al haber tal cantidad de ciclos con valores pequeños, los ciclos que realmente se aplicaron en el ensayo quedan ocultos debido a su poca cantidad.

Por este motivo se decidió repetir el ensayo (dando lugar a la prueba experimental 2), empleando un amplificador/acondicionador Ectron 778 con posibilidad de filtrado de la señal, conectado en serie a la salida del equipo Vishay, utilizando los filtros necesarios para mitigar los ruidos a la entrada de la placa de adquisición. Simultáneamente, se modificó el software para introducir un filtro en el recuento de ciclos, para que elimine los que tienen una amplitud menor a la especificada por el usuario.

4.1.3.2 – Prueba experimental dos

Tomadas las precauciones pertinentes con los equipos utilizados en la prueba uno se realizó el ensayo número 2, que consistía en realizar el ensayo con la misma metodología que la experiencia anterior: “aplicar 1000 ciclos, divididos en bloques de diferente amplitud para que sean registrados por la placa de adquisición y, una vez hecho esto, utilizar el software para armar la historia de ciclos aplicados”.

La fig. 4.16 y 4.17 muestran los datos obtenidos por la placa de adquisición. En ella podemos ver que sigue apareciendo una gran cantidad de ciclos (más de $5,5 \times 10^4$ aproximadamente), de amplitud menor a 0,3 KN, provenientes del ruido del equipo por más que se haya aplicado los filtros en la entrada de la placa.

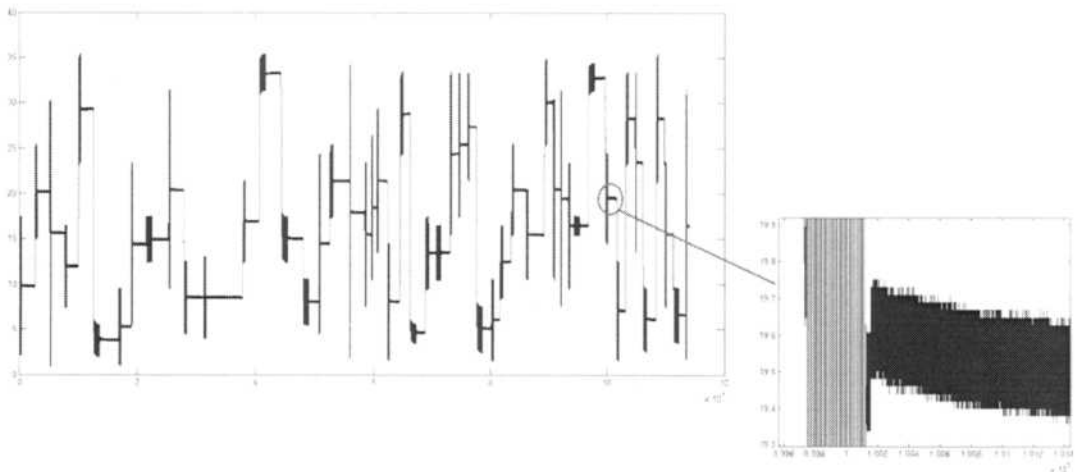


Fig. 4.16 – Datos registrados en el segundo ensayo sin aplicar el filtro del software

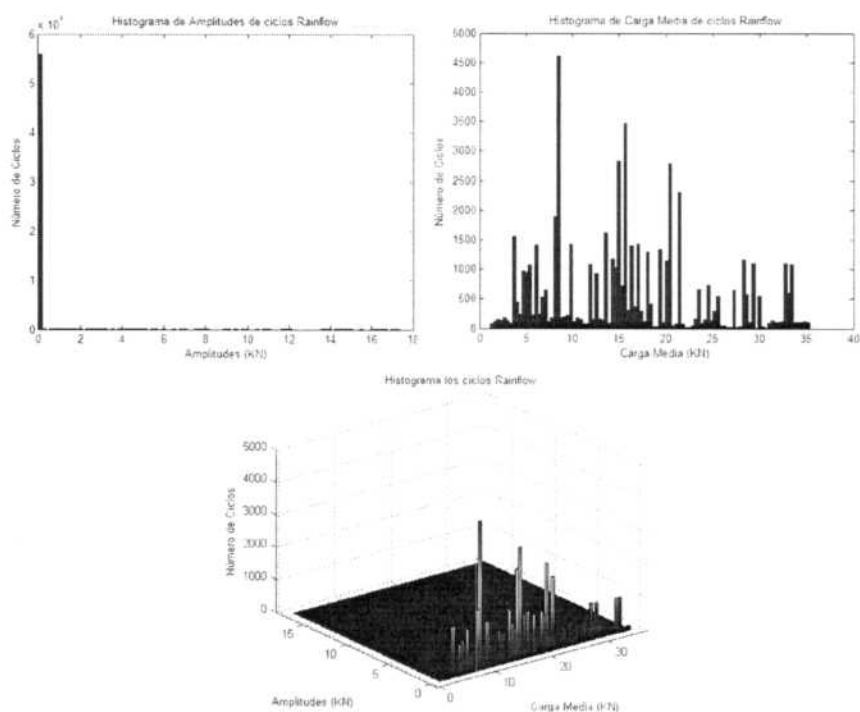


Fig. 4.17 – Resultados del segundo ensayo sin haber aplicado el filtro del software.

Como se puede ver en la fig. 4.17, la cantidad de ciclos generados por el ruido disminuyó en más de la mitad, comparándolo con la primer prueba, pero estos son generados al amplificar la señal de salida del equipo de adquisición, y por ende, es casi imposible eliminarla de la señal adquirida en el momento del ensayo. Para eliminar este ruido fue necesario utilizar un filtro en el software en el momento del procesamiento.

Este ruido fue eliminado casi en su totalidad por medio del filtro. Este eliminaba los ciclos con una amplitud menor a 0,5 de los datos.

La diferencia en la identificación de los ciclos, después de haber aplicado el filtro se puede observar en la fig. 4.18 y 4.19.

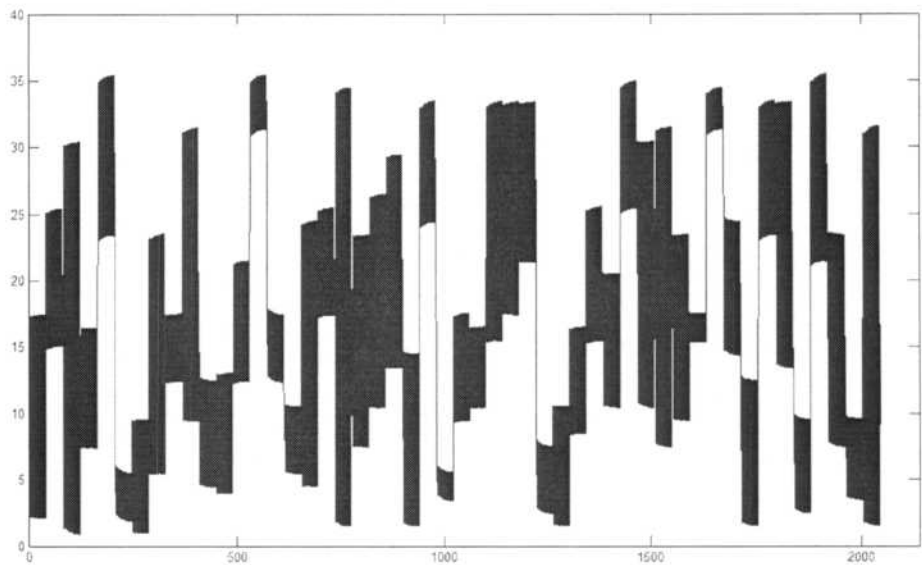


Fig. 4.18 – Datos registrados en el segundo ensayo aplicando el filtro del software

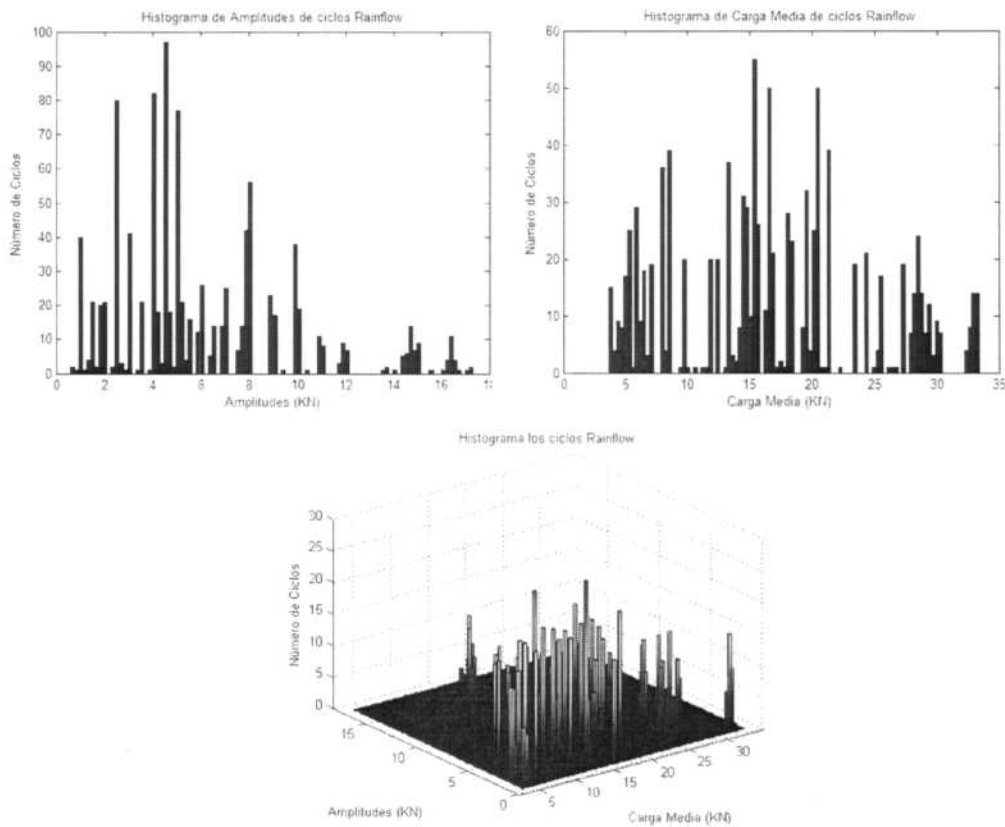


Fig. 4.19 – Resultados del segundo ensayo aplicando el filtro

En esta prueba, los ciclos aplicados por el usuario en la maquina MTS y los datos registrados por el software fueron los que se pueden observar en la tabla. 4.12. En la columna 2 se especifica la cantidad de ciclos programados en la MTS, en la columna 6 y 7 se especifica la carga media y amplitud calculada de acuerdo a los ciclos programados.

Block	Ciclos	Ciclos totales	Pmin (KN)	Pmax (KN)	Carga Media (KN)	Amplitud (KN)	Ciclos registrados	Rango de Carga Media (KN)	Rango Amplitud (KN)
1	20	20	1,65	17,00	9,33	7,68	20	9,792	7,5384 - 7,7053
2	20	40	14,70	25,00	19,85	5,15	22	19,2963 - 19,8903	5,0337 - 5,2007
3	20	60	0,50	30,00	15,25	14,75	22	15,4352 - 17,8113	13,7164 - 14,7183
4	20	80	7,00	16,00	11,50	4,50	20	11,8711	4,5328
5	20	100	23,00	35,00	29,00	6,00	19	29,0975 - 29,3946	5,8686 - 6,0356
6	20	120	1,50	5,00	3,25	1,75	15	3,8519	1,8612
7	20	140	0,50	9,00	4,75	4,25	19	5,3369	4,1989 - 4,3658
8	20	160	5,00	23,00	14,00	9,00	22	14,2472 - 14,5442	8,8742 - 9,876
9	20	180	12,00	17,00	14,50	2,50	22	13,9501 - 15,4352	1,5273 - 2,5291
10	20	200	9,00	31,00	20,00	11,00	20	20,1873 - 20,7813	10,3769 - 11,0448
11	20	220	4,00	12,00	8,00	4,00	39	8,604	4,0319 - 4,5328
12	20	240	23,00	32,00	27,50	4,50	27	24,9394 - 27,9095	2,5291 - 6,0356
13	20	260	12,00	21,00	16,50	4,50	21	16,6232 - 17,5142	4,0319 - 4,5328
14	20	280	31,00	35,00	33,00	2,00	19	32,9586 - 33,2557	2,0282
15	20	300	12,00	17,00	14,50	2,50	19	13,9501 - 15,1382	2,0282 - 2,5291
16	20	320	5,00	10,00	7,50	2,50	25	6,525 - 10,6831	1,3603 - 2,8631
17	20	340	4,00	24,00	14,00	10,00	18	14,5442 - 14,8412	9,3751 - 10,043
18	20	360	17,00	25,00	21,00	4,00	22	21,3753 - 24,3454	2,5291 - 4,0319
19	20	380	1,00	34,00	17,50	16,50	27	17,5142 - 19,2963	15,0522 - 17,2229
20	20	400	7,00	23,00	15,00	8,00	22	15,4352	8,0393
21	20	420	10,00	26,00	18,00	8,00	21	18,1083 - 18,4053	7,5384 - 8,0393
22	20	440	13,00	29,00	21,00	8,00	19	21,3753	7,8723 - 8,0393
23	20	460	1,00	14,00	7,50	6,50	34	7,119 - 8,307	5,5347 - 6,5365
24	20	480	24,00	33,00	28,50	4,50	19	28,5035 - 28,8005	4,5328
25	20	500	3,00	5,00	4,00	1,00	25	4,1489 - 5,3369	0,6924 - 1,8612
26	20	520	9,00	17,00	13,00	4,00	20	13,3561 - 13,6531	4,0319
27	20	540	10,00	16,00	13,00	3,00	21	13,0591 - 13,6531	3,03 - 3,531
28	20	560	15,00	33,00	24,00	9,00	20	24,3454	8,8742 - 9,0411
29	20	580	17,00	33,00	25,00	8,00	20	25,2364 - 25,5335	7,8723 - 8,0393
30	20	600	21,00	33,00	27,00	6,00	26	27,9095 - 28,5035	5,0337 - 6,8705
31	20	620	2,00	7,00	4,50	2,50	19	5,0399 - 5,3369	2,5291
32	20	640	1,00	10,00	5,50	4,50	20	5,6339 - 5,9309	3,8649 - 4,5328
33	20	660	8,00	16,00	12,00	4,00	22	11,2771 - 12,4651	3,364 - 4,1989
34	20	680	15,00	25,00	20,00	5,00	21	20,1873	5,0337 - 5,2007
35	20	700	10,00	20,00	15,00	5,00	20	15,1382 - 15,4352	4,8668 - 5,5347
36	20	720	25,00	34,50	29,75	4,75	19	29,6916 - 30,2856	4,6998 - 4,8668
37	20	740	10,00	30,00	20,00	10,00	19	20,4843	9,876 - 10,043
38	20	760	7,00	31,00	19,00	12,00	20	19,5933 - 21,0783	11,7127 - 13,5495
39	20	780	9,00	23,00	16,00	7,00	20	16,3262	6,8705 - 7,0374
40	20	800	15,00	17,00	16,00	1,00	29	16,3262 - 20,1873	0,6924 - 2,6961
41	20	820	31,00	34,00	32,50	1,50	21	32,3646 - 32,9586	0,8594 - 1,5273
42	20	840	14,00	24,00	19,00	5,00	17	18,4053 - 20,4843	4,0319 - 5,0337
43	20	860	1,00	12,00	6,50	5,50	30	6,2279 - 7,119	3,03 - 5,3677
44	20	880	23,00	33,00	28,00	5,00	10	28,5035	7,0374
45	20	900	13,00	33,00	23,00	10,00	19	23,4544	9,876 - 10,043
46	20	920	2,00	9,00	5,50	3,50	10	5,9309	3,531
47	20	940	21,00	35,00	28,00	7,00	1	25,5335	5,0337
48	20	960	7,00	23,00	15,00	8,00	17	15,4352 - 15,7322	7,8723
49	20	980	3,00	9,00	6,00	3,00	3	6,822	3,03
50	20	1000	1,00	31,00	16,00	15,00	20	16,3262 - 17,2172	13,7164 - 15,0522

Tabla 4.12 – Ciclos aplicados en el ensayo

En contraposición, los datos adquiridos por el software se observan en las tres últimas columnas de la tabla 4.12, los cuales fueron extraídos del espectro de datos tomando 100 particiones en el histograma. Los mismos fueron agrupados manualmente para realizar la comparación de la salida del software con los ciclos programados inicialmente.

Vale la pena mencionar que el criterio de agrupación fue de acuerdo a la cercanía con la carga media y la amplitud programada de antemano. Los datos de la salida del software se exponen en el anexo II, en él puede utilizarse un criterio de agrupación diferente al utilizado para corroborar los resultados de la tabla.

4.1.3.3 – Discusión de resultados obtenidos en las pruebas 1 y 2

Como se comentó anteriormente, las experiencias en el laboratorio fueron realizadas para conocer los detalles importantes en el momento de realizar mediciones en el campo. Conocerlos ayudará a disminuir el tiempo de puesta a punto que necesitará el operador para realizar la configuración de la placa de adquisición y la toma de datos.

La primera prueba, sirvió para conocer la necesidad de utilizar un filtro que descarte los valores muy pequeños que sean introducidos en la adquisición, en forma de ruido, y produzcan interferencia con los datos registrados.

En la segunda prueba, se utilizaron los filtros adecuados en la placa de adquisición. Se realizó la adquisición con los mismos equipos utilizados en la primera experiencia. Fue necesario programar un filtro en el software, que elimine de los datos obtenidos el ruido que no fue descartado en la adquisición.

Cómo se observa en la tabla 4.12, la cantidad de ciclos clasificados por el software supera la cantidad programada en la experiencia (1000 ciclos aplicados – 1022 ciclos discriminados). Esto muestra que, si bien los filtros aplicados disminuyen enormemente el ruido, todavía persiste ruido difícil de eliminar (de amplitud considerable) o que aparecieron ciclos generados por causas que se desconocen.

Otra dificultad aparece en la frecuencia de adquisición con que se toman los datos. A menos que se aumente la velocidad de adquisición a valores por encima de 40 Hz, resulta muy difícil que el valor máximo obtenido en el proceso coincida con el valor máximo real

de la carga (fig. 4.20 a)), porque la probabilidad de que la placa capte en el instante justo el punto máximo de la onda real es muy baja, como se muestra en la fig. 4.20 b).

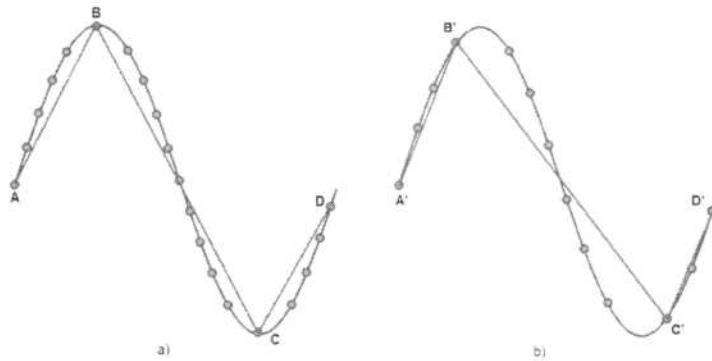


Fig. 4.20 – Diferencias en velocidades de adquisición (Imagen ilustrativa)

Este problema, de posible pérdida de pico máximo o mínimo, se puede minimizar aumentando la velocidad de adquisición, para que al existir mayor cantidad de datos para discriminar la forma de onda, alguno de los valores registrados se acercará al máximo real. Esta solución tiene como contraparte la obtención de archivos de datos muy extensos, lo que lo haría inmanejable para el programa. Por eso se debe considerar una solución de compromiso entre la capacidad de almacenamiento y el posible error en las amplitudes y cargas medias registradas en los ciclos.

Una posible solución a esta problemática, sería generar un programa propio de adquisición de datos (utilizando los drivers que suelen acompañar a las placas de adquisición, los cuales nos permiten emplear instrucciones que configuran dicha adquisición de datos de forma más "personalizada"), de esta manera, se configuraría la placa para que tome datos a su máxima velocidad. Al mismo tiempo, el algoritmo analice los datos registrados y extraiga sólo los máximos y mínimos del archivo, y vaya eliminando los datos intermedios que no resulta interés. De esta manera, se dispondría de los picos máximos y mínimos, y se disminuiría drásticamente el tamaño de los archivos generados.

4.2 – Primeras aproximaciones con el algoritmo de estimación de daño acumulado

El motivo de esta experiencia fue conocer que tan bien se ajusta la regla de Miner-Palmgren con los ensayos realizados en el laboratorio de dos probetas sometidas a diferentes ciclos hasta su rotura.

Para ambas pruebas se utilizó la maquina servo-hidráulica universal MTS que tiene a disponibilidad la División Fractura. Esta vez el archivo con las cargas y la deformación aplicada fueron medidas directamente por los sensores de la máquina, para minimizar el error en el experimento. La frecuencia de sampleo que se utilizó en la adquisición fue de 20 Hz, lo que nos permite discriminar cada ciclo de la onda sinusoidal mediante 10 puntos.

Las pruebas se realizaron aplicando distintos bloques de deformación a una probeta de fatiga para bajo número de ciclos realizada según la norma ASTM E-606 cómo se muestra en la fig. 4.21.

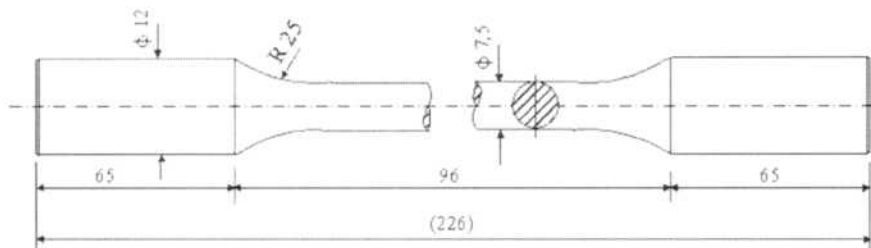


Fig. 4.21 - Geometría de la probeta de fatiga utilizada

El material de la probeta era de acero 1038 recocido, utilizado del mismo lote que cuando se caracterizó el mismo a la fatiga por M. Schwartz y J. C Crespi (6), cuyos resultados se muestran en la fig. 4.22.

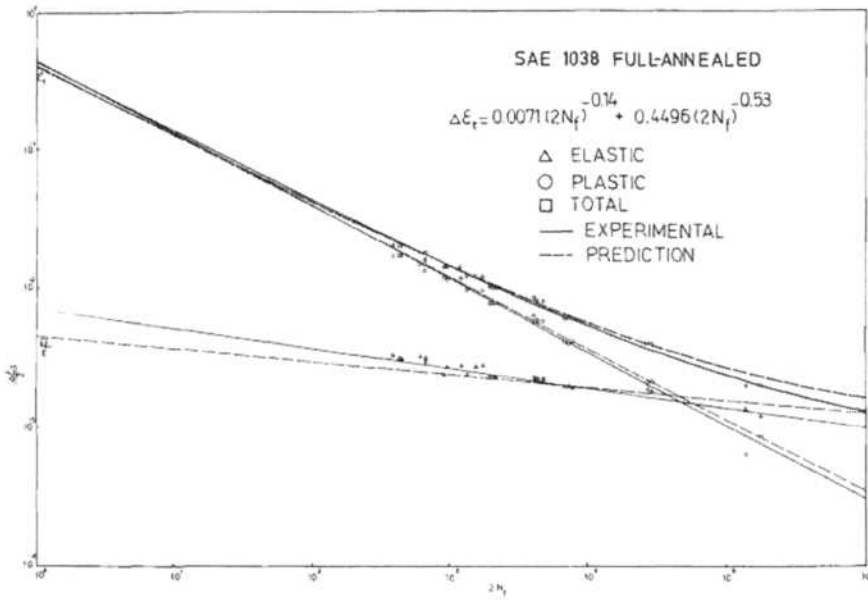


FIG. 7—Experimental and predicted s - N curves of fully annealed SAE 1038 steel.

Fig. 4.22 - Curva E-N del acero 1038 Recocido utilizado (6)

Las especificaciones del material que se usó en el ensayo de fatiga son las siguientes (6):

Especificación: Acero AISI 1038

Procesos Aplicados: RECOCIDO

Módulo de Young (E): 207000 MPa

Esfuerzo Máximo (S_u): 610 MPa

Coefficiente de Resistencia a la Fatiga (sf'): 1094 MPa

Exponente de Resistencia a la Fatiga (b): -0.14

Coefficiente de Ductilidad a la Fatiga (ef'): 0.449

Exponente de Ductilidad a la Fatiga (c): -0.53

Coefficiente de Resistencia Cíclica (K'): 998 MPa

Exponente de Endurecimiento Cíclico (n_f): 0.19

4.2.1 – Primera experiencia en la estimación del daño acumulado

En esta experiencia, se cicló la probeta seis bloques de ciclos con diferentes amplitudes de deformación. Cada bloque, iniciaba con ciclos de poca deformación y se incrementaba con el correr de los mismos hasta llegar a la amplitud de deformación deseada. Luego se pasaba al bloque siguiente, empezando con ciclos de pequeña deformación. La fig. 4.23, muestra la representación gráfica de los ciclos aplicados a la probeta.

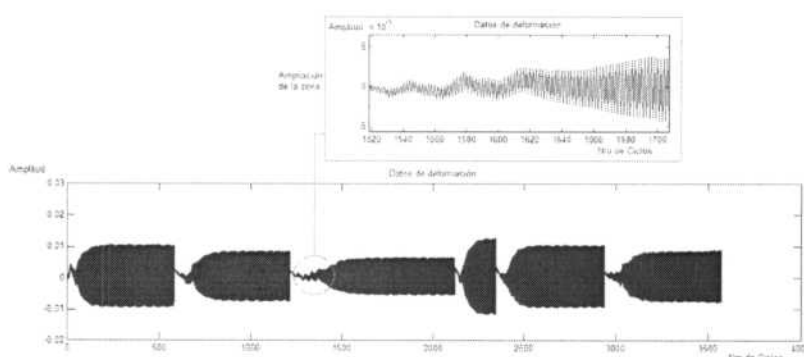


Fig. 4.23 - Ciclos aplicados en la experiencia 1

Los datos fueron registrados por el sistema interno de adquisición de la MTS. Se exportaron en un archivo ".txt", y fue adaptado en el software. El mismo se usó como entrada en el software de conteo de ciclos.

Para el cálculo por medio del método de ϵ -N se especificó el área de la probeta ($\text{Área} = 44,16 \text{ mm}^2$) en la ventana "Conteo de ciclos" con el motivo de convertir los valores a MPa. Los ciclos reconocidos se muestran en la fig. 4.24.

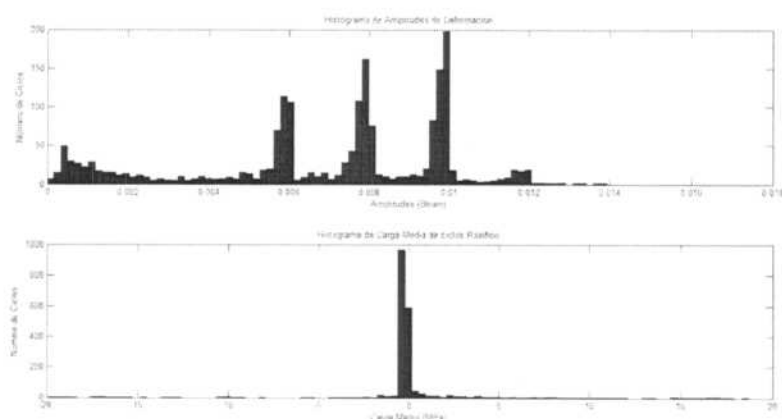


Fig. 4.24 - Ensayo 1 - Histogramas de deformación y carga media

Luego de clasificar la cantidad de ciclos del experimento, en amplitud de deformación y carga media tanto en tensión como en deformación, se procedió a estimar el daño de la primera probeta utilizando la ventana de “Curvas y Daño acumulado”.

Los resultados obtenidos fueron verificados en Excel, con el fin de corroborar el cómputo. Los resultados de los mismos fueron iguales tanto en Excel como en Matlab. Se muestran a continuación:

- ***Daño acumulado ε -N:*** *80,7 % (0,80737)*

4.2.2 – Segunda experiencia en la estimación del daño acumulado

Para esta segunda prueba se utilizó una metodología diferente a la anterior. Se especificaron 4 bloques de ciclos con diferentes amplitudes de deformación. Estos se repitieron hasta que la probeta rompió. La fig. 4.25, muestra la representación gráfica de los ciclos aplicados a la probeta.

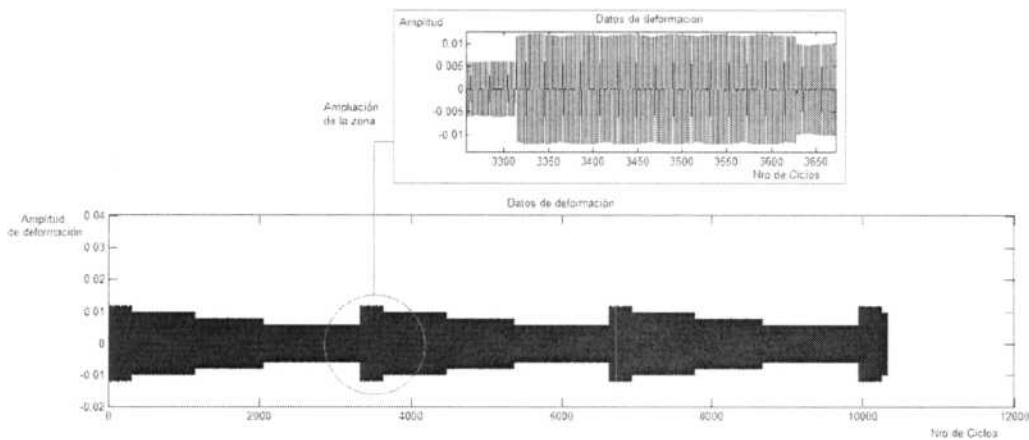


Fig. 4.25 - Ciclos aplicados en la experiencia 2

Los bloques aplicados tuvieron la siguiente amplitud:

- ***Bloques de $\Delta\varepsilon_1$ (mm/mm)=*** *157 ciclos a 1,2 %*
- ***Bloques de $\Delta\varepsilon_2$ (mm/mm)=*** *418 ciclos a 1 %*
- ***Bloques de $\Delta\varepsilon_3$ (mm/mm)=*** *445 ciclos a 0,8 %*
- ***Bloques de $\Delta\varepsilon_4$ (mm/mm)=*** *634 ciclos a 0,6 %*

Para que la probeta rompa, cada uno de los bloques de ciclos especificados anteriormente fueron repetidos tres veces. Además se necesitó repetir una vez más $\Delta\epsilon_1$ y unos 35 ciclos más de $\Delta\epsilon_2$. La fig. 4.26 muestra el histograma de los ciclos de deformación aplicados.

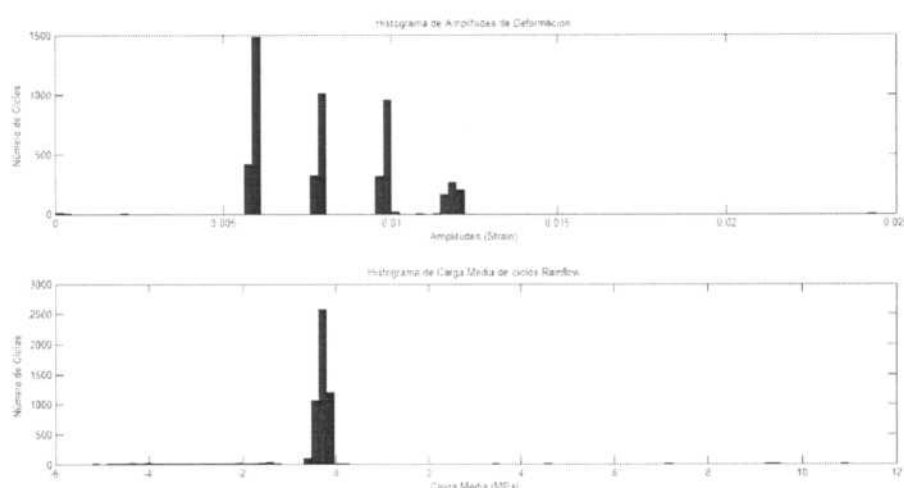


Fig. 4.26 - Ensayo 2 - Histogramas de deformación y carga media

Con la salida del algoritmo de recuento de ciclos, se estimó el daño acumulado por la repetición de los ciclos de deformación:

Daño acumulado E-N: 138,43 % (1,3843)

4.2.3 – Discusión de resultados obtenidos en las dos experiencias

El orden de aplicación de las cargas pudo ser un factor determinante para que el factor de daño acumulado ϵ -N sea mayor que 1, dado que la relación entre tensiones y deformaciones no es lineal, debido al comportamiento plástico del material. Por este motivo, el orden en el que se aplicaron los ciclos puede haber tenido un efecto significativo en la respuesta tensión-deformación del material (3). Como podemos observar, en la primera experiencia se aplicaron ciclos en forma creciente, esto pudo haber inducido una rotura prematura del material. Mientras que en la segunda experiencia, al aplicar los ciclos de forma decreciente, la plasticidad formada en el interior del material debido a la mayor deformación, crea un efecto que hace que el material se

vea afectado en menor escala por un ciclo de amplitud menor (este mecanismo se conoce como retardo (3)).

Para predecir las propiedades a la fatiga de bajo número de ciclos (**E-N**) de un determinado material, se utilizan ensayos de tracción (para determinar **E**, **n**, **$\sigma f'$** corregido o **sf'** , **ef'**) y ensayos de paso incremental o múltiple (para determinar **n'** , **b**, **c**, **ef'**) (7). En la fig. 4.21, se muestra la curva **E-N** del material realizada a partir de las estimaciones de los parámetros antes mencionados. Pero cómo se puede observar, las curvas graficadas representan generalmente al 50% de las mediciones obtenidas. Esto indica que es necesario conocer la banda de dispersión de la misma, para poder acotar el daño acumulado con los valores estimados.

El método utilizado (Miner-Palmgren) para calcular el daño acumulado en las probetas no es exacto debido a que el daño no es un parámetro físico, por lo que no tiene que estar necesariamente relacionado con la resistencia del material. Además no hay consenso sobre la definición de fallo. Esta es una de sus deficiencias. Si fuera exacto, cuando el Daño (D) es igual a 1, la probeta debería romper. Pero, en la mayoría de los casos el rango de D está comprendido entre 0,5 y 2 para este tipo de probetas (8).

Bibliografía del capítulo 4

1. **Faires, V. M.** *Diseño de Elementos de Máquinas*. Mexico : Limusa, 1995.
2. **Honeycombe, R.** *The Plastic Deformation of Metals*. Londres : s.n., 1975.
3. **Moreno Morales, Maria Belén.** *Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias*. Málaga : s.n., 2002.
4. **Norton, R. L.** *Diseño de Máquinas*. Mexico : Prentice-Hall, 1999.
5. **Shigley, J y Mischke, C.** *Diseño en Ingeniería Mecánica*. McGRAW-HILL : s.n., 1991.
6. **Crespi, J. C. y Schwartz, M.** *Fracture of pearlite under conditions of high deformation fatigue*. 1988.
7. **Sanchez Sarmiento, Gustavo, Iorio A. F y Crespi J. C.** *Códigos para el Procesamiento de Datos de Ensayos de Tracción y Fatiga*. Buenos Aires : s.n., 1981.
8. **Barrois, W.** *Use of General Fatigue Data In The Interpretation Of Full-Scale Fatigue Test*. Londres : Agard, 1977.

5 –Conclusiones y recomendaciones

El objetivo principal de este trabajo fue obtener una herramienta práctica para la evaluación del fenómeno de fatiga en componentes estructurales. Para esto, el primer paso es cuantificar la cantidad y amplitud de los ciclos al que está sujeto el componente. Luego serán aplicadas en la estimación del daño acumulado para conocer la vida residual del componente. Por esto vale la pena poner en manifiesto los puntos importantes, recomendaciones a tener en cuenta antes de utilizar este software y las conclusiones que se pueden extraer del mismo.

Los trabajos que se realizarán en el campo dependerán en gran medida de las características del equipo y/o de la placa de adquisición con que cuenta el profesional. Para que los datos adquiridos reflejen los picos máximos y mínimos reales a los que está sometido el componente, se debe utilizar una velocidad de adquisición mayor a 40 HZ. El archivo que almacena los datos adquiridos no debe tener un tamaño inmanejable por el software (menores a 1 GB). Se propuso, a los efectos de no perder los valores de los picos máximos y mínimos, la construcción de un programa de adquisición de datos específico para este caso, que adquiera datos a la velocidad de adquisición más alta permitida por la placa, y con un algoritmo que descarte aquellos valores que no sean máximos y mínimos locales. Los filtros utilizados son de vital importancia para realizar una medición con un nivel de ruido irrelevante o posteriormente tratable. Se debe conocer de antemano el lugar con mayor sollicitación en el componente y planificar la toma de datos.

El algoritmo de conteo de los ciclos clasifica las amplitudes en un histograma de frecuencias. Los valores utilizados en el histograma, son el valor medio entre las tensiones máximas y mínimas de cada intervalo. Por lo que esto introduce un error en la amplitud real aplicada al componente. La forma de disminuir este error es especificar la cantidad máxima de intervalos (100) del histograma. Además, de acuerdo a la cantidad de ruido registrado por la placa de adquisición, se puede utilizar el filtro para eliminar los ciclos que tengan una amplitud menor a la determinada por el usuario.

Para utilizar la curva de fatiga del material, esta debe proceder de alguna fuente confiable. Lo mejor es realizar ensayos en el material del componente a estudiar. Se necesita una gran cantidad de ensayos para tener una muestra representativa para determinar la curva. Cómo generalmente existe una dispersión muy grande en los resultados de los ensayos, se establece la curva que ajusta mejor a la mayoría de los

puntos experimentales. A su vez se debe analizar la dispersión de los resultados, y establecer las bandas de dispersión en las curvas.

La utilización de la regla de Miner, no debe tomarse como una igualdad (la rotura se produce para un valor igual a 1), debido a que este es un valor teórico. Este error (el alejamiento respecto a un valor de daño acumulado de 1 para la rotura), es común y según la bibliografía consultada, la estimación del daño acumulado puede variar entre 0,5 y 2 para la rotura. En nuestro caso no fue tan grande la diferencia, pero los valores obtenidos son orientativos de la gravedad del daño acumulado en el componente. Esta regla indica una alerta temprana que establece que, si los valores superan un cierto rango conservativo propuesto por el profesional a cargo de la inspección, se deberán tomar acciones sobre el componente de la instalación, ya sea focalizando un análisis más exhaustivo, reparando o cambiando el mismo.

Los ensayos que se realizan en el laboratorio a probetas pulidas a espejo poco tienen que ver con el ambiente, la geometría y el acabado superficial de un componente real. Por eso, es muy importante conocer que estos valores obtenidos no son directamente extrapolables a un componente en servicio. Existen diferentes métodos de extrapolación de los resultados obtenidos a piezas reales, pero para mayor seguridad serían necesarios realizar ensayos que permitan comprobar la confiabilidad de estos métodos.

En resumen, para realizar un análisis exhaustivo de la vida residual de los componentes sometidos a fatiga, se debe contar con distintas herramientas que permitan evaluar la integridad del mismo. Para esto, el profesional debe optar en una primera instancia por determinar el nivel de profundidad de la investigación. El programa de contaje de ciclos Rainflow es una de las herramientas que le permitirá al profesional saber inicialmente dónde se encuentra parado, y desde ahí definir cuáles son pasos a seguir en el estudio del componente.

Anexo 1 – Ejemplo de conteaje de ciclos por el método Rainflow Counting.

1. Comienzo a contar desde el pico más alto o el valle más profundo.
2. Marcar cada pico y valle con una letra.
3. Girar los datos 90° (grados) hacia la derecha.
 - a. Ahora los picos y valles pueden pensarse como techos.
4. Imaginar una gota cayendo desde el fin del lado derecho del primer techo. Siga la gota.
5. Ahora, permita que la gota caiga desde la pendiente del techo de la izquierda hasta el final. Siga la gota.
6. Si la gota no golpea otro techo inmediato inferior, marque con un círculo el nodo de donde partió la gota.
7. Si la gota golpea otro techo inmediato inferior, siga la gota hasta que pare. Marque el nodo donde se detiene.
8. Identificar las cargas más largas y las más cortas del intervalo identificados anteriormente.
9. Registrar el máximo, el mínimo, la media y la carga alterna de los pares de nodos que **NO ESTÁN MARCADOS CON UN CÍRCULO** en el intervalo. El par de nodos constituye un círculo.
10. Eliminar los **NODOS QUE NO ESTÁN MARCADOS CON EL CÍRCULO** del espectro de carga, y vuelva a dibujar el espectro sin esos valores
11. Repita el proceso

En este breve ejemplo, se podrá entender cómo realizar la clasificación de los ciclos usando el método de conteo Rainflow.

Considere el siguiente espectro de carga:

NODO	VALOR DE CARGA
A	28
B	-18
C	8
D	2
E	22
F	-6
G	20
H	8
I	20
J	-18
K	22
L	-4
M	26
N	12
O	28

Tabla 1 - Espectro de carga

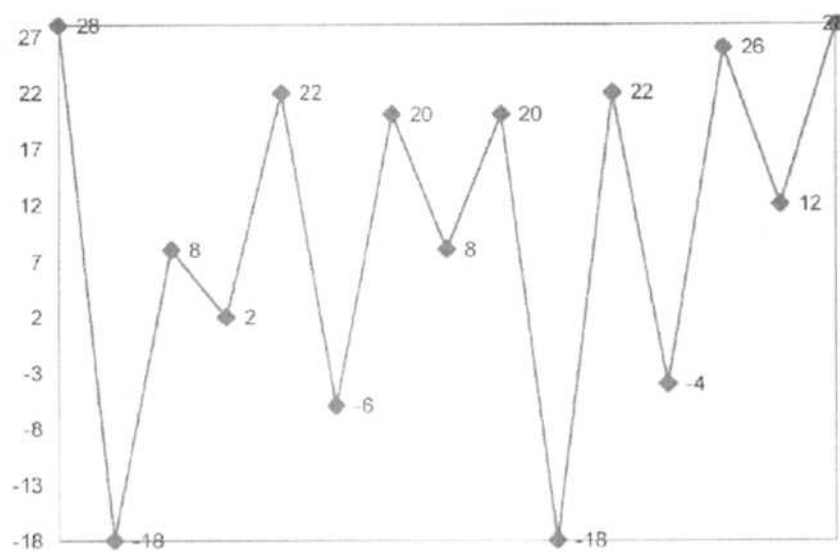


Fig. 1 – Representación gráfica del espectro de carga

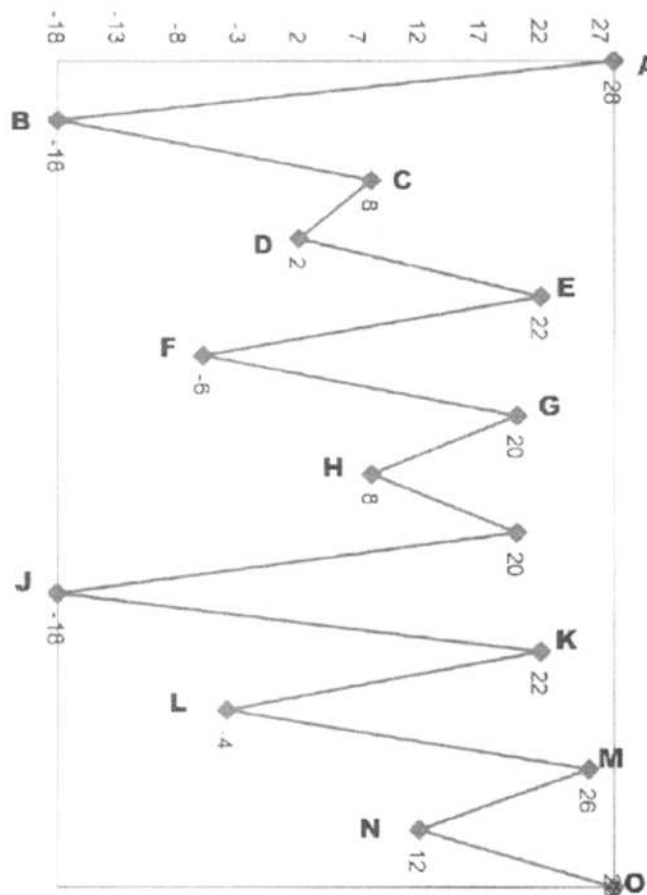


Fig. 2 – Espectro girado

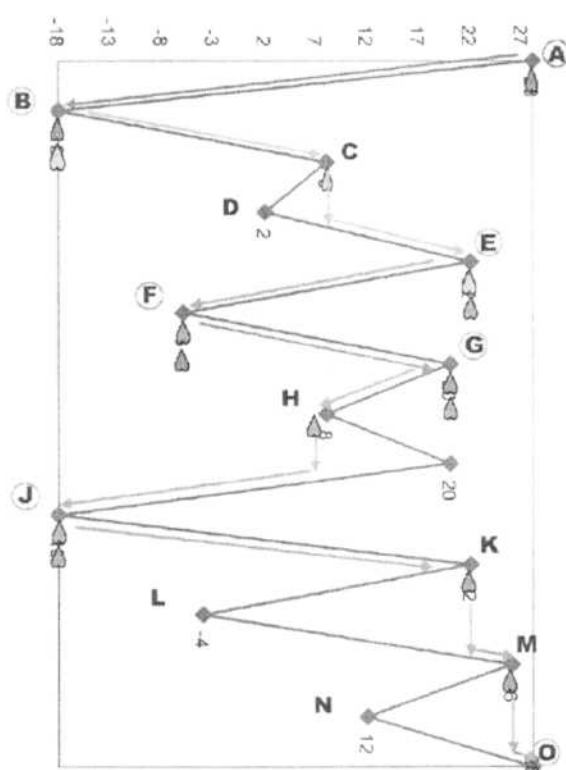


Fig. 3 – Rainflow Counting

- La gota de lluvia azul cae por techo AB y gotea fuera de Nodo B sin inmediatamente golpear un techo debajo – Marco con un círculo B.
- La gota de agua naranja empieza en B y rueda por el techo antes de BC, cae de C en DE y cae al vacío en E – Marco con un círculo E
- La gota verde empieza en E y cae hasta F — Marco con un círculo F
- La gota violeta empieza a caer en F y cae en G al vacío – Marco con un círculo G
- La gota roja empieza en G, cae por H, cae desde H hasta el techo IJ, y desde J cae al vacío – Marco con un círculo J
- La gota rosa empieza en J, cae hasta K, cae desde K hasta el techo LM, desliza por ese techo hasta caer en NO y cae al vacío en O – Marco con un círculo O
- Los nodos no marcados con un círculo son CD, HI, KL, MN

Se remueven esos nodos del espectro de datos y se vuelven a graficar los nodos.

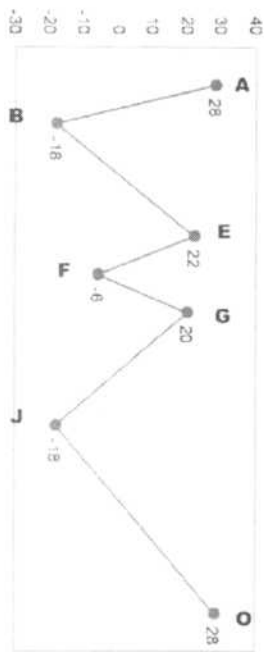


Fig. 4 – Gráfico del espectro modificado

De la misma manera que la comentada anteriormente se procede con el espectro de la fig. 4.

El procedimiento debe repetirse hasta que los últimos nodos que quedan son los del pico más alto y el valle más bajo.

Después de que todos los "ciclos" se identifiquen (pares de nodos), se debe registrar el máximo, el mínimo, las cargas alternantes, y valores medios para cada ciclo. En la tabla 2, se muestra el recuento final.

Ciclo	MAX	MIN	MEDIA	CARGAS ALTERNANTES
CD	8	2	5	3
HI	20	8	14	6
KL	22	-4	9	13
MN	26	12	19	7
FG	20	-6	7	13
EJ	22	-18	2	20
AB	28	-18	5	23

Tabla 2 - Recuento de ciclos final

Anexo 2 – Tabla de los ciclos del segundo ensayo

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
1	15	3.8519	1.8612
2	1	4.1489	1.6942
3	3	4.1489	1.8612
4	9	4.4459	1.0263
5	8	4.7429	1.0263
6	3	5.0399	1.0263
7	14	5.0399	2.5291
8	1	5.3369	0.6924
9	5	5.3369	2.5291
10	17	5.3369	4.1989
11	2	5.3369	4.3658
12	1	5.6339	3.8649
13	10	5.9309	3.5310
14	19	5.9309	4.5328
15	9	6.2279	3.5310
16	1	6.5250	1.3603
17	16	6.5250	3.0300
18	1	6.5250	4.0319
19	3	6.8220	3.0300
20	4	7.1190	5.3677
21	15	7.1190	5.5347
22	1	8.0100	1.8612
23	19	8.0100	2.5291
24	2	8.0100	6.3695
25	14	8.0100	6.5365
26	1	8.3070	1.5273
27	3	8.3070	6.3695
28	19	8.6040	4.0319
29	1	8.6040	4.3658
30	19	8.6040	4.5328
31	1	9.4950	1.3603
32	6	9.7920	7.5384
33	14	9.7920	7.7053
34	1	10.0890	2.8631
35	1	10.6831	2.0282

Imagen 1 de la tabla

Anexo 2 – Tabla de los ciclos del segundo ensayo

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
35	1	10.6831	2.0282
36	1	11.2771	3.3640
37	1	11.5741	4.1989
38	20	11.8711	4.5328
39	20	12.4651	4.0319
40	1	13.0591	3.5310
41	19	13.3561	3.0300
42	18	13.3561	4.0319
43	1	13.6531	3.0300
44	2	13.6531	4.0319
45	1	13.9501	1.5273
46	1	13.9501	2.0282
47	6	14.2472	8.8742
48	2	14.2472	9.8760
49	3	14.5442	8.8742
50	11	14.5442	9.0411
51	8	14.5442	9.8760
52	9	14.5442	10.0430
53	28	14.8412	2.5291
54	1	14.8412	9.3751
55	9	15.1382	2.5291
56	1	15.1382	5.5347
57	2	15.4352	2.5291
58	1	15.4352	4.8668
59	18	15.4352	5.0337
60	11	15.4352	7.8723
61	22	15.4352	8.0393
62	1	15.4352	14.0504
63	6	15.7322	7.8723
64	5	15.7322	14.3843
65	4	15.7322	14.5513
66	11	15.7322	14.7183
67	3	16.3262	1.0263
68	3	16.3262	7.0374

Imagen 2 de la tabla

Anexo 2 – Tabla de los ciclos del segundo ensayo

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
69	2	16.3262	14.5513
70	3	16.3262	14.7183
71	16	16.6232	1.0263
72	1	16.6232	1.1933
73	1	16.6232	1.3603
74	1	16.6232	4.5328
75	5	16.6232	6.8705
76	12	16.6232	7.0374
77	6	16.6232	14.8853
78	8	16.6232	15.0522
79	1	16.9202	1.3603
80	1	16.9202	2.6961
81	19	16.9202	4.5328
82	1	17.2172	13.7164
83	1	17.5142	4.0319
84	1	17.5142	16.0541
85	1	17.8113	13.7164
86	1	18.1083	1.6942
87	1	18.1083	2.3621
88	1	18.1083	2.5291
89	1	18.1083	2.6961
90	1	18.1083	7.5384
91	1	18.1083	15.5532
92	4	18.1083	16.2211
93	11	18.1083	16.3880
94	4	18.1083	16.5550
95	1	18.1083	16.7220
96	2	18.1083	17.2229
97	1	18.4053	5.2007
98	7	18.4053	7.8723
99	13	18.4053	8.0393
100	1	18.4053	15.0522
101	1	18.4053	17.0559
102	7	19.2963	5.0337
103	1	19.2963	14.8853

Imagen 3 de la tabla

Anexo 2 – Tabla de los ciclos del segundo ensayo

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
103	1	19.2963	14.8853
104	1	19.5933	4.0319
105	12	19.5933	5.0337
106	3	19.5933	11.7127
107	9	19.5933	11.8797
108	7	19.5933	12.0467
109	1	19.8903	1.8612
110	3	19.8903	5.2007
111	1	20.1873	0.6924
112	4	20.1873	5.0337
113	17	20.1873	5.2007
114	3	20.1873	10.8779
115	15	20.4843	5.0337
116	12	20.4843	9.8760
117	7	20.4843	10.0430
118	8	20.4843	10.8779
119	8	20.4843	11.0448
120	1	20.7813	10.3769
121	1	21.0783	13.5495
122	20	21.3753	4.0319
123	7	21.3753	7.8723
124	12	21.3753	8.0393
125	1	22.2664	2.5291
126	16	23.4544	9.8760
127	3	23.4544	10.0430
128	1	24.3454	3.0300
129	14	24.3454	8.8742
130	6	24.3454	9.0411
131	1	24.9394	3.5310
132	4	25.2364	7.8723
133	1	25.5335	5.0337
134	7	25.5335	7.8723
135	9	25.5335	8.0393
136	1	26.1275	2.6961
137	1	26.4245	3.0300

Imagen 4 de la tabla

Anexo 2 – Tabla de los ciclos del segundo ensayo

	Número de Ciclos	Carga Media (KN)	Amplitudes (KN)
129	14	24.3454	8.8742
130	6	24.3454	9.0411
131	1	24.9394	3.5310
132	4	25.2364	7.8723
133	1	25.5335	5.0337
134	7	25.5335	7.8723
135	9	25.5335	8.0393
136	1	26.1275	2.6961
137	1	26.4245	3.0300
138	1	26.7215	2.3621
139	7	27.3155	5.8686
140	12	27.3155	6.0356
141	1	27.9095	2.5291
142	3	27.9095	5.0337
143	3	27.9095	6.8705
144	8	28.2065	5.0337
145	6	28.2065	6.8705
146	5	28.5035	4.5328
147	9	28.5035	5.0337
148	10	28.5035	7.0374
149	14	28.8005	4.5328
150	5	29.0975	5.8686
151	2	29.0975	6.0356
152	12	29.3946	6.0356
153	3	29.6916	4.6998
154	9	29.9886	4.6998
155	6	30.2856	4.6998
156	1	30.2856	4.8668
157	1	32.3646	0.8594
158	1	32.3646	1.0263
159	2	32.3646	1.5273
160	8	32.6616	1.5273
161	9	32.9586	1.5273
162	5	32.9586	2.0282
163	14	33.2557	2.0282

Imagen 5 de la tabla