



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una aplicación de estimación de propiedades a
fatiga para materiales metálicos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Pablo Fernández de Simón Vidal

DIRECTOR: Marco Antonio Campo Cabana

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una aplicación de estimación de propiedades a
fatiga para materiales metálicos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en la creación de una aplicación para estimar las propiedades a fatiga de diferentes tipos de materiales metálicos a partir de una serie de métodos. Las propiedades fundamentales de fatiga son obtenidas mediante series de ensayos específicos, los cuales son muy costosos y precisan de una gran cantidad de tiempo, pero se pueden realizar buenas estimaciones a partir de ensayos más económicos y utilizando los distintos métodos que aquí se exponen. Se realiza una comparación cuantitativa entre las curvas S-N y ϵ -N reales y las obtenidas por medio de la estimación por cada método utilizando un nuevo criterio propuesto en este trabajo. El pilar fundamental de este Trabajo de Fin de Grado consiste en la creación de una interfaz gráfica intuitiva en la cual el usuario pueda realizar las pertinentes estimaciones para calcular las propiedades a fatiga de los materiales metálicos sin tener que interactuar con el código del programa.

PALABRAS CLAVE

Propiedades a fatiga, métodos de estimación, Matlab, interfaz gráfica, materiales metálicos.

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas han influido en mi formación académica y de forma inevitable en mi formación como persona. Me gustaría darle las gracias a todos ellos y en especial a mi tutor D. Marco Campo Cabana por su generosidad en las explicaciones combinando rigurosidad con un lenguaje claro.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Justificación y objetivos	5
2 Introducción a la fatiga.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 Breve historia de la fatiga	6
2.3 Etapas de evolución del fenómeno de fatiga.....	7
2.4 Cargas por fatiga	8
2.5 Ensayos	10
2.5.1 Ensayo de fatiga.....	10
2.5.2 Ensayo de tracción.....	11
2.5.3 Ensayo de dureza	12
2.6 Influencia de la tensión y deformación media	12
2.7 Regímenes de fatiga	13
2.8 Métodos de estimación de vida a fatiga en materiales metálicos	14
2.8.1 Método de la Curva S-N	14
2.8.2 Método de la Curva ϵ -N	15
3 Estado del arte	19
3.1 Introducción	19
3.1.1 Método de correlación por cuatro puntos	20
3.1.2 Método de las pendientes universales.....	21
3.1.3 Método de Mitchell.....	22
3.1.4 Método de Ong	22
3.1.5 Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	23
3.1.6 Método de Muralidharan y Manson	24
3.1.7 Método de Roessle y Fatemi.....	25
3.1.8 Método de Mitchell modificado	26
3.1.9 Método de las medianas.....	26
3.1.10 Método de Mitchell modificado con dureza	27
4 Desarrollo de la aplicación	29
4.1 Introducción	29
4.2 Elaboración de la aplicación	29

4.2.1 Cálculo de los métodos	29
4.2.2 Desarrollo de la interfaz gráfica	29
5 Comparación de los distintos métodos para estimar las propiedades a fatiga.....	35
5.1 Comparación bibliográfica.....	35
5.2 Propuesta de criterio para la evaluación de métodos	37
5.3 Materiales.....	40
5.4 Comparación de métodos.....	40
5.5 Cuantificación del error	43
6 Conclusiones y líneas futuras	47
6.1 Conclusión	47
6.2 Líneas futuras	48
7 Bibliografía.....	49
Anexo I: Materiales evaluados	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Diagrama de Wöhler [1].	7
Figura 2-2 Formación de extrusiones e intrusiones [1].	8
Figura 2-3 Valores alternativo, medio y del intervalo del ciclo de esfuerzos invertido, repetido y fluctuante [1].	9
Figura 2-4 Carga semialeatoria en un caso general [1].	10
Figura 2-5 Máquina rotatoria de Moore para ensayo a fatiga [1].	10
Figura 2-6 Diagrama S-N para aceros forjados representativos [1].	11
Figura 2-7 Curva Esfuerzo-Deformación unitaria real para acero bajo al carbono [1].	11
Figura 2-8 Efecto del esfuerzo medio sobre la vida a fatiga [1].	13
Figura 2-9 Líneas de falla para esfuerzos fluctuantes [1].	13
Figura 2-10 Curva S-N de un Material sometido a cargas fluctuantes.	14
Figura 2-11 Curva de histéresis para un ablandamiento cíclico [6].	15
Figura 2-12 Curva de histéresis para un endurecimiento cíclico [6].	16
Figura 2-13 Ciclo de histéresis plástico estabilizado [6].	16
Figura 2-14 Gráfica log-log en el caso del acero SAE 1020 [8].	17
Figura 3-1 Método de correlación por cuatro puntos de Manson [14].	20
Figura 3-2 Método de Ong [14].	22
Figura 4-1 Aplicación vista desde el editor GUI.	30
Figura 4-2 Apariencia final de la aplicación.	31
Figura 4-3 Mensaje del programa por falta de selección del material.	32
Figura 4-4 Mensaje del programa por inconveniente al aplicar un método.	32
Figura 4-5 Mensaje del programa avisando de la estimación de un valor.	33
Figura 4-6 Introducción de campo de datos.	33
Figura 4-7 Mensaje del programa por falta de valores para llevar a cabo la estimación.	34
Figura 4-8 Mensaje del programa informando del método empleado en la estimación.	34
Figura 5-1 Curva total de deformación para el acero 1020 [20].	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Parámetros y constantes necesarias para emplear los métodos de estimación	20
Tabla 4-1 Métodos aplicables a cada material	32
Tabla 5-1-Comparación de métodos de estimación [19].....	35
Tabla 5-2 Ranking de los métodos de estimación para cada material [19].....	36
Tabla 5-3 Comparación de los métodos de estimación para aleaciones de aluminio y titanio [19]	37
Tabla 5-4 Comparación de métodos para aceros de baja aleación conocido %RA.....	40
Tabla 5-5 Comparación de métodos para aceros de baja aleación conociendo HB.....	41
Tabla 5-6 Comparación de métodos para aleaciones de aluminio conocido %RA.....	42
Tabla 5-7 Media de los errores para aceros de baja aleación conocido %RA	43
Tabla 5-8 Mediana del error para aceros de baja aleación conocido %RA	43
Tabla 5-9 Medias de los errores para aceros de baja aleación conocido HB.	44
Tabla 5-10 Medianas de los errores para aceros de baja aleación conocido HB	44
Tabla 5-11 Media de los errores para aleaciones de aluminio.	45
Tabla 5-12 Mediana de los errores para aleaciones de aluminio.	45
Tabla 0-1 Materiales empleados.....	52

1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Muchos de los materiales empleados en la construcción de máquinas o estructuras, como pueden ser ejes, árboles de transmisión, cojinetes, se encuentran sometidos a cargas variables en el tiempo que se repiten con cierta frecuencia. Por ello, el análisis y la estimación de vida a fatiga son esenciales en el diseño de componentes y estructuras mecánicas que van a estar sujetas a cargas cíclicas repetitivas. El fenómeno de fatiga se considera un fenómeno muy importante, ya que es la principal causa de rotura de los materiales metálicos. Es necesario disminuir el número de ocasiones en las que se produce este tipo de falla conociendo la resistencia de los materiales y las cargas máximas que estos permiten. Entre los principales causantes de las fallas por fatiga se encuentran la selección incorrecta del material, errores en el diseño de las estructuras o componentes mecánicos y la sobrecarga de los mismos.

El conocimiento de las propiedades a fatiga de los materiales es imprescindible para llevar a cabo un correcto análisis de resistencia a fatiga. Las propiedades a fatiga son obtenidas mediante una serie de ensayos variables que se repiten con cierta frecuencia. Dichos ensayos requieren una gran dedicación de tiempo y un coste económico muy elevado, por lo que existen distintos métodos para estimar las propiedades a fatiga de algunos materiales metálicos a partir de otro tipo de datos menos costosos de obtener, como las propiedades monotónicas de tensión o la dureza Brinell entre otros. Se presentan a lo largo del trabajo los métodos más importantes según la bibliografía, y, para una colección de datos reales, se realiza una comparación de los mismos.

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el diseño de una aplicación informática que realice dichas estimaciones. El desarrollo de la aplicación se llevará a cabo a través del entorno de desarrollo de interfaces gráficas GUIDE de Matlab®.

De forma paralela al objetivo principal se enuncian a continuación los siguientes objetivos secundarios:

- Introducción al comportamiento de materiales.
- Valoración cuantitativa de los distintos métodos.
- Búsqueda de información en fuentes ajenas al centro.

2 INTRODUCCIÓN A LA FATIGA

2.1 Introducción

Se dice que un material trabaja a fatiga cuando éste soporta cargas que varían cíclicamente en el tiempo, ya sean cargas que aparecen y desaparecen, o cargas de magnitud variable. Dichas cargas provocan la rotura de los materiales para unos valores de tensión inferiores a los valores que provocarían la rotura cuando se aplica una carga de amplitud constante. Por ello, para calcular la resistencia de un material no debemos comprobar únicamente los límites elásticos o de fractura.

Las fallas por fatiga comienzan como una grieta debida, seguramente, a imperfecciones en la fabricación o defectos propios de los materiales. Dichas grietas dan lugar a un concentrador de esfuerzos, de modo que el estudio de dichos concentradores es de vital importancia para el diseño de piezas que van a estar sometidas a esfuerzos fluctuantes.

Existen diferentes factores añadidos que pueden originar otros tipos diferentes de fatiga, por ejemplo, si además de someter el material a cargas repetitivas, existe corrosión, entonces se conoce como fatiga por corrosión o agrietamiento asistido ambientalmente. Otra clase diferente de fatiga se produce cuando los esfuerzos repetitivos son originados por dilataciones o contracciones térmicas del material, lo que se conoce como fatiga térmica.

2.2 Breve historia de la fatiga

El fenómeno de rotura por fatiga fue observado por primera vez durante el siglo XIX, debido a que los ejes de los ferrocarriles comenzaban a fallar pasado un corto tiempo de servicio.

El término de fatiga fue utilizado por primera vez en 1839 por Poncelet para referirse a la falla del material sometido a cargas fluctuantes. No se comprendía ese mecanismo de falla, se pensaba que el material, después de soportar un cierto número de fluctuaciones, se había hecho frágil por cansancio. En 1843, fue Rankine quien publicó un estudio sobre las causas de falla inesperada en los ejes de los ferrocarriles. En dicho estudio comentaba que el material dúctil con el que estaban fabricados se había cristalizado, convirtiéndose en un material frágil debido a la fluctuación de cargas [1].

En 1870, tras numerosas investigaciones, August Wöhler [2] publicó los resultados de su estudio en el que culpaba al número de ciclos de ser el causante de la falla. Realizó numerosas pruebas sobre los ejes que habían fallado por fatiga, comprobando que bajo esfuerzos de tensión, la ductilidad no había variado con respecto al material original. Demostró así que el material no se había fragilizado como creían sus predecesores, sin embargo, el término de falla por fatiga se mantuvo y es utilizado para describir cualquier falla causada por una sucesión de esfuerzos cíclicos. Wöhler además, encontró

la existencia de un límite de resistencia a fatiga sometiendo a flexión giratoria¹ una serie de probetas de acero. Relacionó así los niveles de esfuerzo con el número de ciclos que se repetían dichos esfuerzos hasta la falla. Obtuvo un diagrama, conocido hoy en día como el Diagrama de Wöhler o Curva S-N. Figura 2-1.

En 1954 tuvo lugar uno de los casos más conocidos de falla por fatiga. El primer avión a reacción para transporte de pasajeros, el Havilland Comet, tuvo un accidente fatal a causa de los esfuerzos de presurización/despresurización de la cabina. Se produjeron fisuras en los bordes de las ventanas, que se fueron expandiendo y terminaron fracturando las mismas, causando la muerte de 68 personas.

No solo han ocurrido problemas de este tipo en aviación; otro caso, conocido en nuestro país, es el descarrilamiento de un tren en 1960 cerca de la provincia de Ávila, que fue originado por la rotura por fatiga de unos de los ejes del automotor.

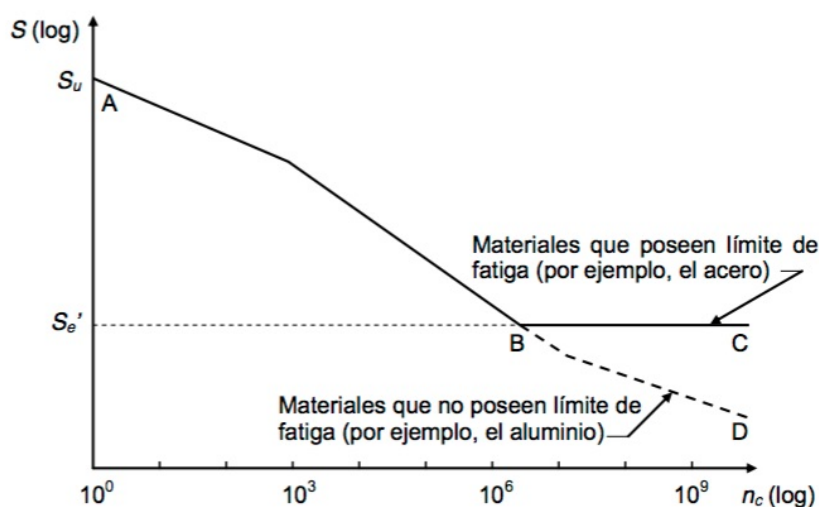


Figura 2-1 Diagrama de Wöhler [1].

2.3 Etapas de evolución del fenómeno de fatiga

El fenómeno de fatiga presenta tres etapas de evolución: una etapa de iniciación, una propagación estable de la grieta y una propagación acelerada que origina el fallo.

- Estado I: Corresponde con la iniciación de la grieta. En la superficie se suelen encontrar zonas de altas tensiones que producen deformaciones plásticas en los granos próximos. Cuando un grano sufre una deformación se forma un escalón en la superficie que sufre una oxidación. Una vez se oxida, resulta imposible provocar la deformación en sentido contrario en el mismo plano. Por eso, se realiza en un plano distinto, formando un nuevo escalón. La repetición de este proceso, genera deformaciones superficiales del material original y se produce una concentración de tensiones en dichas protuberancias. En esta etapa, es posible la aparición de una microgrieta con una dirección de propagación que forma 45° con la dirección de tracción. Dicha microgrieta, encuentra muchas dificultades para atravesar los granos en esa dirección, por eso se detiene al atravesar un único grano.

¹ Entendiéndose flexión giratoria como el paso de tracción a compresión y viceversa en cada revolución del elemento.

- Estado II: El inicio de la propagación de la grieta ocurre en dos fases diferentes:
 - Primera fase: La grieta se va propagando en la misma dirección atravesando unos pocos granos del material.
 - Segunda fase: Conforme la grieta se va propagando, descubre que la dirección en la que se está produciendo dicha propagación no es la óptima, y que requiere menos esfuerzo si se orienta perpendicular a la dirección de tracción.

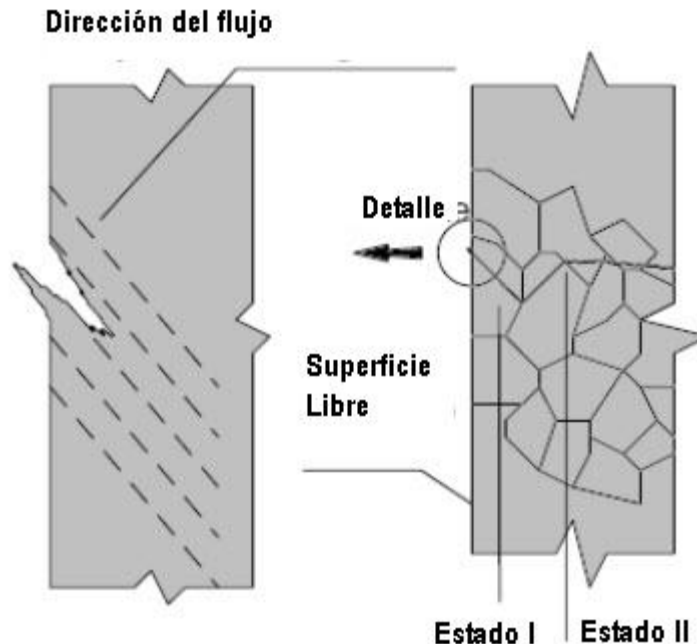


Figura 2-2 Formación de extrusiones e intrusiones [1].

- Estado III: La grieta continuará creciendo en presencia de un esfuerzo cíclico o un factor de corrosión de suficiente magnitud. Una vez alcanzado el tamaño crítico de la grieta el material continúa deteriorándose debido a la propagación de la grieta, originando una fractura súbita de tipo frágil.

2.4 Cargas por fatiga

Una carga con variación temporal puede ser la causante de una rotura por fatiga. La naturaleza de la carga varía en función de la aplicación de la misma. Al aplicar una carga en una máquina rotatoria, se puede controlar la amplitud de la misma durante un periodo de tiempo y se suele repetir con cierta frecuencia. Por el contrario, al aplicarse la carga en una estructura mecánica, ésta es variable en amplitud y frecuencia durante todo el servicio activo y en numerosas ocasiones suele ser de naturaleza aleatoria.

Se diferencian tres tipos de esfuerzos experimentados en máquinas rotatorias:

- Ciclo invertido, donde el valor medio del esfuerzo aplicado en un periodo de tiempo es igual a cero.
- Esfuerzo repetido, donde la curva de esfuerzo va desde cero hasta un valor máximo de esfuerzo, resultando un valor medio igual a la componente alternante.
- Esfuerzo fluctuante, donde todos los valores de los esfuerzos son diferentes de cero. Este es el caso más general.

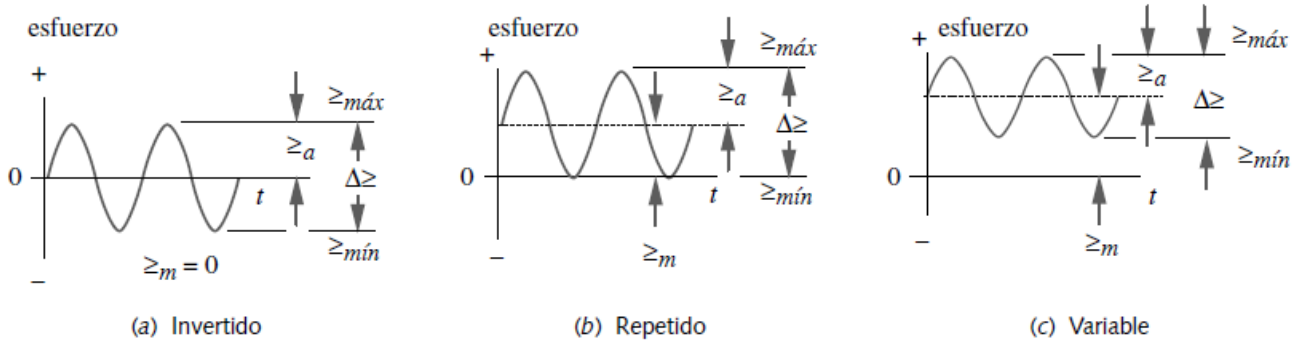


Figura 2-3 Valores alternativo, medio y del intervalo del ciclo de esfuerzos invertido, repetido y fluctuante [1]

Todos estos esfuerzos se caracterizan por dos parámetros principales, la componente media y la alternante, los valores máximos y mínimos del esfuerzo, o bien, las razones de los mismos.

El intervalo de esfuerzo, se define como:

$$\Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{mín}. \quad (1)$$

La componente alternante se obtiene mediante:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2}, \quad (2)$$

Y la componente media del esfuerzo es

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2}. \quad (3)$$

Por lo tanto se pueden formar dos relaciones:

- Relación de esfuerzos R:

$$R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}}. \quad (4)$$

- Relación de amplitud A:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}. \quad (5)$$

Las cargas aplicadas a las estructuras mecánicas sin embargo son bien diferentes a las que se aplican en las máquinas rotatorias. Se extraen los datos más significativos mediante la simulación de las condiciones de servicio a través de la creación de prototipos. En el ámbito de la automoción se realizan numerosas pruebas de los vehículos para comprobar si satisfacen cierta calidad de servicio. Ocurre algo parecido en la industria de la aviación, que también somete a las aeronaves a unas pruebas para comprobar su rendimiento. Las cargas que se aplican en estas situaciones son de diferente naturaleza, ya que los acontecimientos no son controlados como en una máquina rotatoria y no ocurren siempre los mismos eventos.

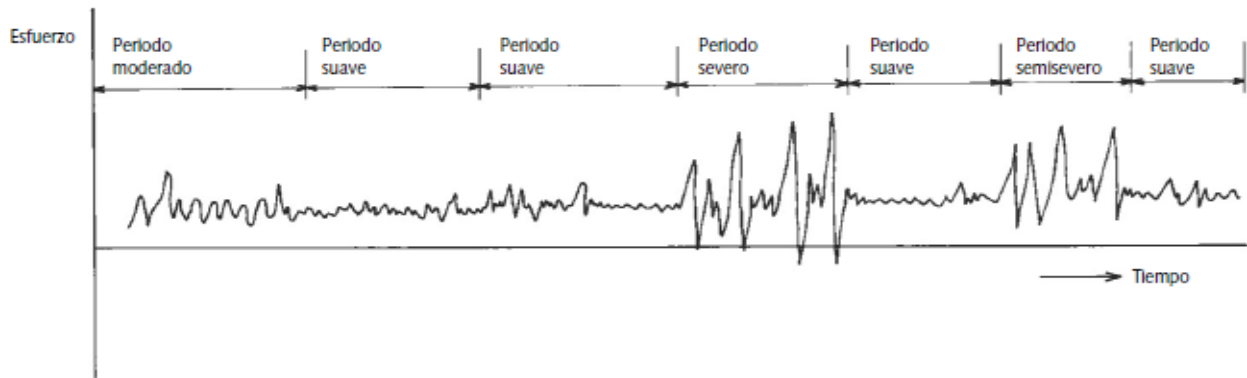


Figura 2-4 Carga semialeatoria en un caso general [1]

2.5 Ensayos

2.5.1 Ensayo de fatiga

Un ensayo de fatiga es aquel en el que se somete una pieza a una serie de esfuerzos variables en magnitud y sentido que se repiten en el tiempo. Se deduce que, cuando un material trabaja bajo condiciones de cargas variables, los datos que suministran los ensayos de tracción, compresión y dureza, son insuficientes para deducir su comportamiento en servicio. Por lo tanto, el procedimiento más lógico para conocer el comportamiento de las piezas en servicio, es someterlas a un ensayo de duración, en condiciones similares a aquellas en las que va a trabajar o tan próximos como sea posible. Con el fin de realizar una aproximación a la realidad del comportamiento del material este tipo de ensayo se realiza a través de máquinas que aplican a la pieza a una serie de esfuerzos cíclicos hasta que se produce la rotura de la pieza.

El número de veces a las que se somete la pieza a dichas cargas variables es lo que se conoce como el número de ciclos requeridos para que tenga lugar la rotura por fatiga y depende del material y de la flexión giratoria a la que esté sometido [3]. El método fundamental para representar los datos de fatiga es la curva de Wöhler.

El enfoque más antiguo de este tipo de ensayo es el de Wöhler, quien sometió a una viga giratoria en voladizo un esfuerzo de flexión. Posteriormente, R.R. Moore, sometió a la viga giratoria a un esfuerzo de flexión pura invertida. Este dispositivo se ha convertido en el dispositivo más empleado para llevar a cabo los ensayos a fatiga. Durante los últimos 40 años, se han diseñado otras máquinas que permiten aplicar esfuerzos axiales, torsionales o combinados.

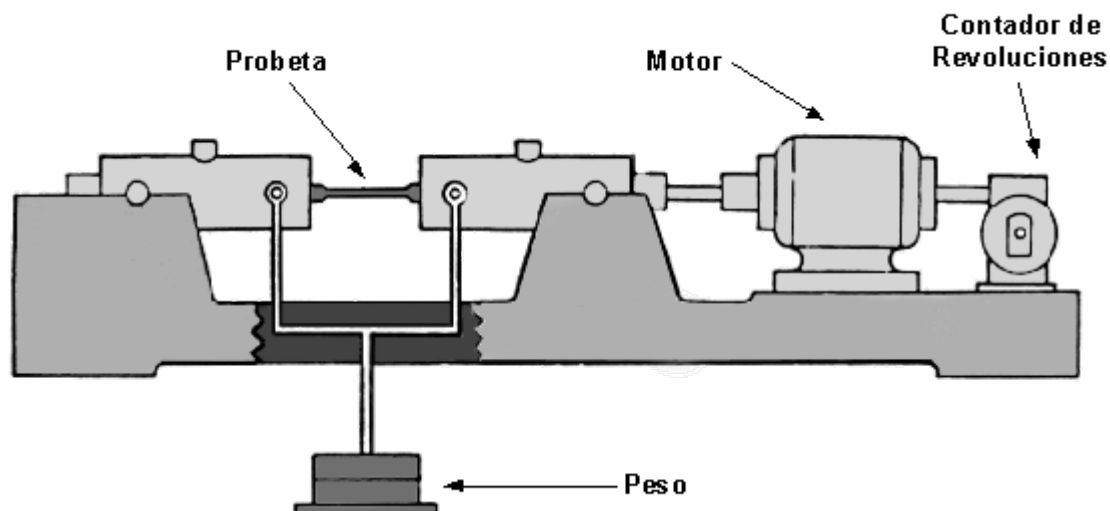


Figura 2-5 Máquina rotatoria de Moore para ensayo a fatiga [1]

La prueba de viga giratoria de R.R. Moore consiste en montar una probeta en un dispositivo que permite la aplicación de un momento de flexión puro mientras la viga gira a velocidad constante. De esta manera se consigue crear un ciclo de esfuerzo de flexión invertido en la probeta y se consigue que la probeta rompa al llegar a un nivel de esfuerzo determinado. Se registra el número de ciclos y el nivel de esfuerzo último que ha soportado la probeta antes de que se produjese la rotura. Dicha prueba se realiza con diferentes probetas y se representa la resistencia a la falla frente al número de ciclos en coordenadas semi-logarítmicas para de esta manera obtener una curva S-N.

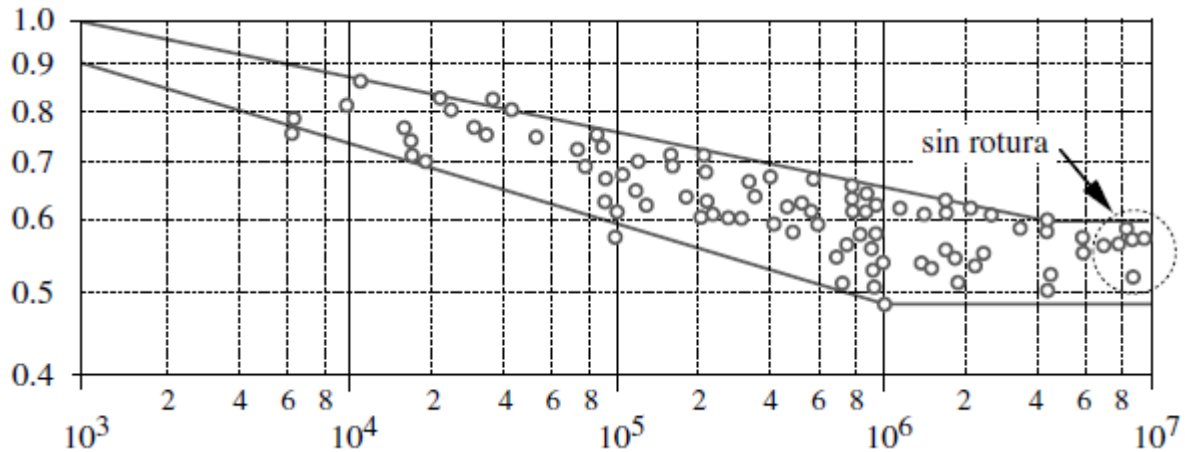


Figura 2-6 Diagrama S-N para aceros forjados representativos [1]

2.5.2 Ensayo de tracción

Mediante el ensayo de tracción se determinan algunas de las propiedades mecánicas de los materiales. Este ensayo consiste en someter una probeta normalizada a una carga progresiva en sentido axial para provocar su deformación hasta llegar a la rotura. Los datos de carga aplicada se convierten a tensión aplicada ya que,

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

siendo F la fuerza aplicada y A el área de la sección transversal a la carga.

Se construye así la gráfica esfuerzo-deformación, que se representa en la Figura 2-7.

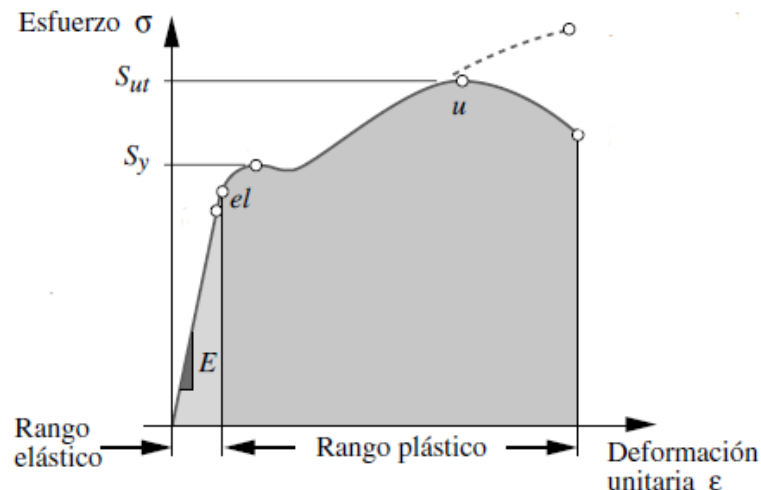


Figura 2-7 Curva Esfuerzo-Deformación unitaria real para acero bajo al carbono [1]

Un material presenta dos zonas principales en función de su comportamiento ante un esfuerzo de tracción: la zona elástica, caracterizada porque el material recupera su longitud inicial al cesar la fuerza aplicada y la zona plástica, que se alcanza cuando se rebasa el límite elástico del material y, aunque cese la aplicación de la fuerza, el material no recupera su longitud inicial.

Para llevar a cabo la estimación de las propiedades a fatiga a través de ciertos métodos, es necesario obtener una serie de datos de un ensayo a tracción. Se presentan a continuación los datos extraídos de los ensayos de tracción que resultan útiles para calcular las propiedades a fatiga.

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young (E), que es una constante que representa la relación entre la tensión y la deformación en la zona elástica.
- Resistencia última a tracción, σ_u , que indica la carga máxima resistida por la probeta.
- Reducción de área, %RA, que se considera la diferencia entre el valor del área transversal inicial y el área de su sección transversal mínima en el instante de rotura.

Este último es equivalente a la obtención de la elongación a la fractura, ε_f , que es un parámetro fundamental para la aplicación de la mayoría de los métodos de estimación de las propiedades a fatiga. La ecuación que los relaciona es la siguiente,

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{100}{100 - \%RA}\right). \quad (7)$$

2.5.3 Ensayo de dureza

La dureza es una condición superficial del material y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del mismo, por lo que se puede establecer una correlación entre la dureza y la resistencia última a la tracción. Se han establecido numerosos métodos para estimar la resistencia última a tracción y las propiedades a fatiga a partir de datos de dureza [4].

Existen dos grandes grupos de ensayos de dureza según la forma de aplicación de la carga:

- Ensayos estáticos, cuando la carga se aplica de forma estática o cuasiestática. En general en este tipo de ensayo el valor de dureza resulta del cociente de la carga aplicada y el área de la huella que deja en la superficie, como en el caso del método Brinell.
- Ensayos dinámicos, cuando la carga se realiza en forma de impacto y se obtiene el dato de dureza a partir de la energía del rebote.

Para estimar las propiedades a fatiga de los materiales metálicos, al ser materiales blandos, es decir, de poca dureza, se suele emplear el dato de la dureza Brinell. Para obtener este dato de dureza HB, se fuerza una bola endurecida contra la superficie del material y se mide el diámetro de la huella resultante al quitar la carga. No obstante, existen diferentes ensayos de dureza, como el método de Rockwell o el método de Vickers, mediante los cuales es posible realizar una correlación entre los datos de dureza que éstos proporcionan y el dato de la dureza Brinell [4].

2.6 Influencia de la tensión y deformación media

No todos los esfuerzos que soportan los materiales metálicos se pueden invertir, es decir, la tensión media y la deformación media no son siempre cero. Existen numerosas situaciones en las que resulta imposible medir ese valor medio distinto de cero, por lo que es muy difícil conocer el efecto que dicha sollicitación va a causar sobre la vida a fatiga de un material.

Cuando se representa la amplitud de la tensión de un ensayo a fatiga frente al número de ciclos a la falla, la curva S-N resultante es una función con una enorme dependencia de la tensión media.

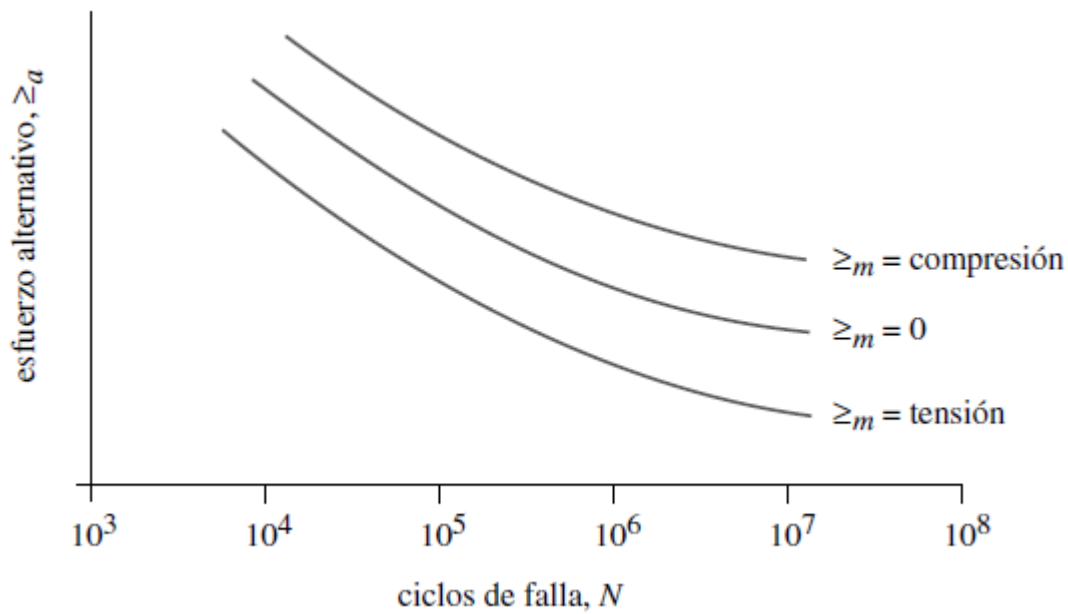


Figura 2-8 Efecto del esfuerzo medio sobre la vida a fatiga [1]

Los efectos de la tensión media pueden ser representados también en diagramas de vida constante. En estos casos, se representan las diferentes combinaciones de tensión media y deformación media para una vida constante.

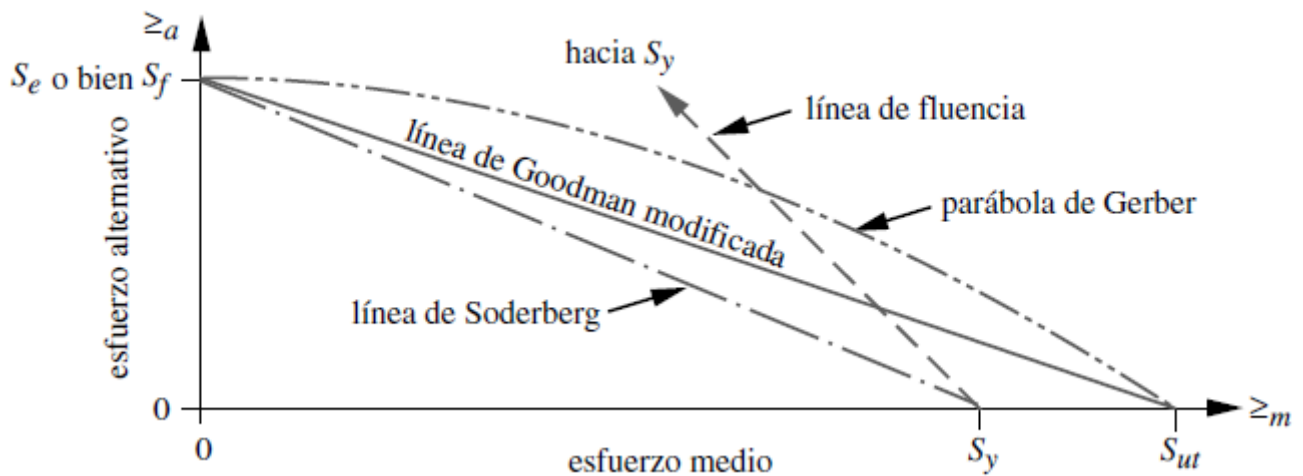


Figura 2-9 Líneas de falla para esfuerzos fluctuantes [1]

2.7 Regímenes de fatiga

Al tener un elemento sometido a esfuerzos cíclicos se habla de regímenes de fatiga en relación con el número de veces que dichos esfuerzos se repiten, y se clasifican como régimen de fatiga a ciclos bajos (Low Cycle Fatigue) o régimen de fatiga a ciclos altos (High Cycle Fatigue). No existe una línea divisoria clara entre ambos regímenes, pero se considera un régimen de bajo ciclaje a aquel en el que el elemento se somete a un número de esfuerzos menor que, aproximadamente, 10^3 , dependiendo del material. Por el contrario, se habla de que un elemento está sometido a un régimen de alto ciclaje cuando soporta esfuerzos mayores a 10^3 ciclos.

Para un determinado número de ciclos se produce la transición entre la curva de deformación elástica y la de deformación plástica. A ese punto en el que se igualan ambas curvas se le denomina punto de transición.

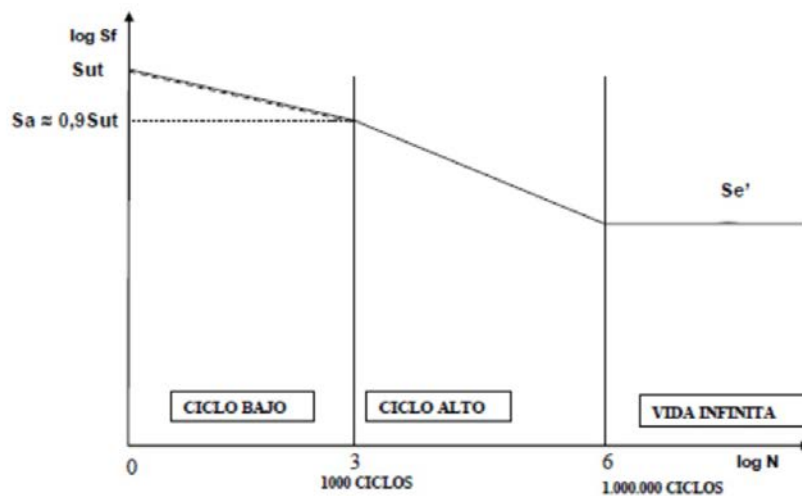


Figura 2-10 Curva S-N de un Material sometido a cargas fluctuantes

2.8 Métodos de estimación de vida a fatiga en materiales metálicos

Actualmente existen tres métodos de análisis para estudiar el comportamiento a fatiga de los materiales metálicos. Con estos métodos se pretende predecir la vida del material hasta que se produce la rotura para un cierto número de ciclos, considerando un ciclo como la inversión completa de la carga. La utilización de cada uno de ellos depende de la concentración de tensiones en la superficie. Estos métodos son:

- Curva S-N: es utilizado para un número alto de ciclos y se emplean las tensiones nominales aplicadas al elemento.
- Curva ϵ -N: se utiliza para un bajo número de ciclos y emplea las deformaciones para predecir la fatiga.

2.8.1 Método de la Curva S-N

La Curva de Wöhler, es obtenida mediante una serie de ensayos en los cuales una probeta se somete a cargas fluctuantes y se cuentan las repeticiones que se producen hasta que llega a la rotura. Este proceso se repite de nuevo variando las amplitudes máximas y se representan los resultados en un diagrama de tensión, que representa la tensión alternante, σ_a , frente a la escala logarítmica del número de ciclos, $2N_f$, que se producen hasta la rotura. Siendo la tensión alternante

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2}. \quad (8)$$

Basquin [5] observó que los datos de la Curva de Wöhler se podían representar en una escala logarítmica-logarítmica usando la amplitud de la tensión frente al número de ciclos, y puede ser linealizada, expresándose de la forma,

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b . \quad (9)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de Basquin, dónde σ'_f es el coeficiente de resistencia a fatiga y b es el exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin.

Para determinados materiales la curva de Wöhler posee una asíntota horizontal llamada límite de fatiga, que se corresponde con el esfuerzo por debajo del cual no ocurre fallo por fatiga y se dice que el material tiene vida infinita. Para los aceros dicho límite de fatiga está claramente definido, sin embargo, para otros materiales, como por ejemplo aluminios o titanios, normalmente no se da este comportamiento.

2.8.2 Método de la Curva ϵ - N

Aunque generalmente el fallo por fatiga se suele producir para un elevado número de ciclos, se ha demostrado que muchos fallos por fatiga tienen lugar cuando las tensiones son muy elevadas para un número reducido de ciclos. El fenómeno de fatiga para un bajo número de ciclos se encuentra estrechamente relacionado con la existencia de dislocaciones en la estructura del material que surgen a consecuencia de las deformaciones plásticas, por lo que el fenómeno de fatiga a ciclos bajos se encuentra controlado por deformación más que por tensión. Coffin y Manson trabajando independientemente, hicieron una propuesta para llevar a cabo la caracterización de la vida a fatiga basada en la amplitud de la deformación plástica,

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c , \quad (10)$$

donde ϵ'_f es el coeficiente de ductilidad a fatiga y c es el exponente de ductilidad a fatiga.

La fatiga controlada por deformación tiene lugar cuando se mantiene la amplitud de la deformación durante todos los ciclos. El comportamiento de los metales y sus aleaciones cuando están sujetas a una deformación cíclica se pueden ver condicionados por dos variantes: un ablandamiento cíclico y un endurecimiento cíclico.

El ablandamiento cíclico tendría una curva de histéresis con la forma:

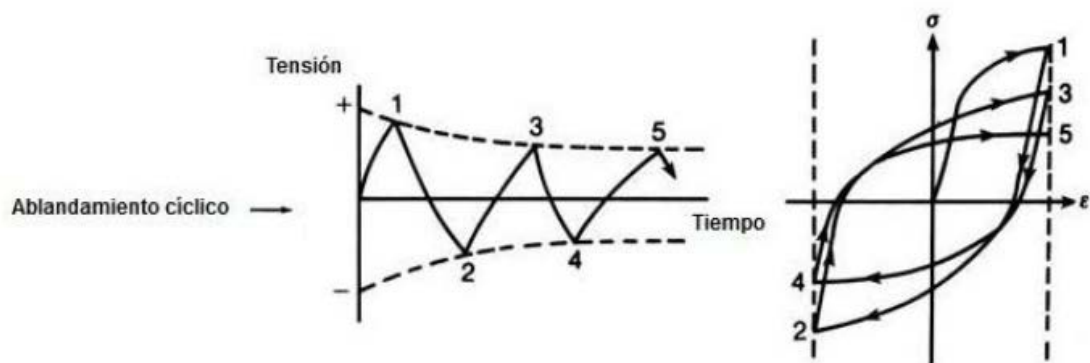


Figura 2-11 Curva de histéresis para un ablandamiento cíclico [6]

Mientras que el endurecimiento cíclico:

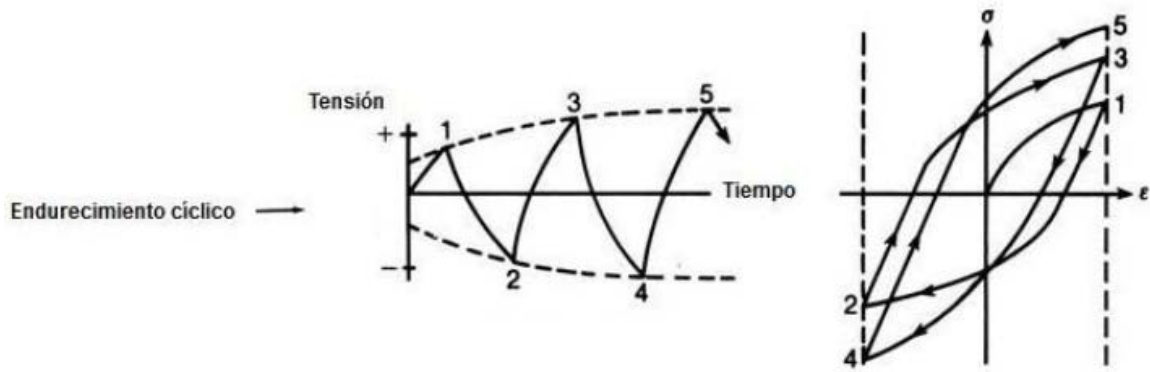


Figura 2-12 Curva de histéresis para un endurecimiento cíclico [6].

En ambos casos, se alcanza una amplitud en la que se estabiliza la amplitud de deformación.

Una vez superada esa primera fase en la que la amplitud varía constantemente, el ciclo de histéresis permanece constante, como se puede observar en la Figura 2-13.

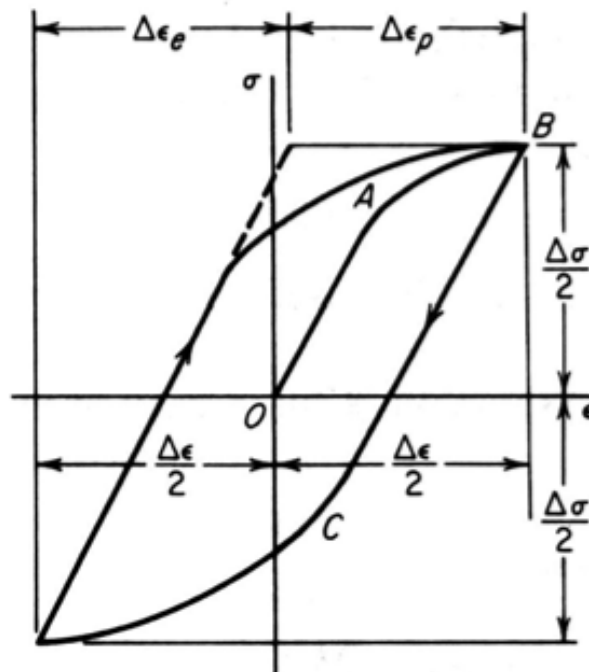


Figura 2-13 Ciclo de histéresis plástico estabilizado [6].

La curva tensión-deformación cíclica puede ser aproximada por la expresión de Rambert-Osgood [7]:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (11)$$

donde K' es el coeficiente de resistencia cíclica y n' es el exponente de endurecimiento cíclico.

En la Figura 2-13 se observa que la pendiente de la recta BC se corresponde con el Módulo de Elasticidad E . La amplitud del esfuerzo se corresponde con $\Delta \sigma$, la amplitud de la deformación elástica con $\Delta \epsilon_e$ y la de la deformación plástica con $\Delta \epsilon_p$.

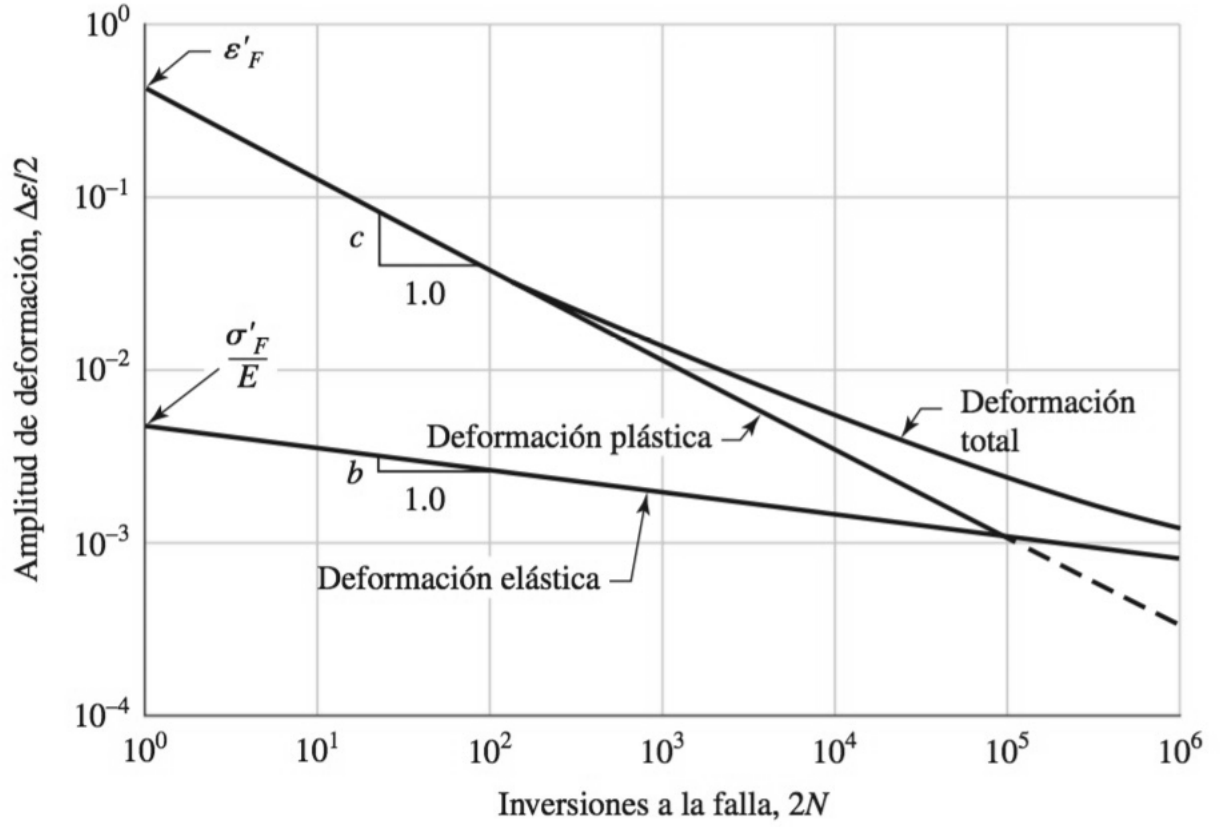


Figura 2-14 Gráfica log-log en el caso del acero SAE 1020 [8]

Para explicar la Figura 2-14, es necesario definir los siguientes términos:

- Coeficiente de resistencia a la fatiga, σ'_f , se refiere al esfuerzo real correspondiente a la fractura que se realiza cuando el número de inversiones es igual a uno, es decir, cuando la recta de deformación elástica corta con el eje de ordenadas.
- Exponente de resistencia a la fatiga, b , es la pendiente de la recta de deformación elástica y a su vez, la potencia a la que se debe elevar el número de ciclos $2N_f$ para ser proporcional a la amplitud del esfuerzo real.
- Coeficiente de ductilidad a la fatiga, ϵ'_f , se refiere a la deformación real correspondiente a la fractura que se realiza cuando el número de inversiones es igual a uno, es decir, cuando la recta de deformación plástica corta con el eje de ordenadas.
- Exponente de ductilidad a la fatiga, c , es la pendiente de la recta de deformación plástica y a su vez, la potencia a la que se debe elevar el número de ciclos $2N_f$ para ser proporcional a la amplitud real de la deformación plástica.

En la Figura 2-13 se observa que la amplitud de la deformación total es la suma de las componentes elástica y plástica, y se corresponde con,

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2}. \quad (12)$$

En la Figura 2-14, la ecuación de la deformación elástica se corresponde con

$$\frac{\Delta\sigma}{2E} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b, \quad (13)$$

mientras que la ecuación de la curva ϵ -N sería,

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c. \quad (14)$$

Por lo tanto, se tiene que la amplitud de la deformación total se corresponde con

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c, \quad (15)$$

denominada ecuación de Coffin y Manson de la caracterización de la vida a fatiga en función de la deformación total.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción

Tal y como reflejan muchos artículos de actualidad, a lo largo de la historia se han estudiado numerosos métodos para estimar la vida a fatiga de los materiales a partir de distintos ensayos. Manson [9] en un principio, propuso dos métodos; el método de correlación por cuatro puntos y el método de las pendientes universales, para estimar la curva de elongación-vida a partir de las propiedades monotónicas de tensión. Mitchell [10] propuso otro método aplicable a aceros. Bäümel y Seeger [11] propusieron la ley uniforme de material para metales. Muralidharan y Manson [12] propusieron una modificación al método de las pendientes universales, y Ong [13] propuso otra modificación al método de la correlación por cuatro puntos. Park y Song [14] en su evaluación de los diferentes métodos propusieron una modificación al Método de Mitchell aplicable a aleaciones de aluminio. Roessle y Fatemi [15] propusieron un método en el que a partir de los datos de dureza y conociendo el módulo elástico del material, se pueden estimar las propiedades a fatiga para aceros.

La relación entre la amplitud de deformación y la vida a fatiga para cargas uniaxiales, puede ser expresada según la Ecuación de Basquin-Coffin-Manson:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (16)$$

donde:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \varepsilon}{2} &= \text{Amplitud de deformación} \\ 2N_f &= \text{Reversiones de falla} \\ \sigma'_f &= \text{Coeficiente de esfuerzo a la fatiga} \\ b &= \text{Exponente de esfuerzo a la fatiga} \\ \varepsilon'_f &= \text{Coeficiente de ductilidad a la fatiga} \\ c &= \text{Exponente de ductilidad a la fatiga} \end{aligned}$$

Todos los métodos a continuación expuestos, se basan en la Ecuación 16.

A continuación se muestra una tabla resumen de los parámetros necesarios para obtener cada una de las propiedades a fatiga para cada uno de los métodos.

Método de estimación	σ'_f	b	ε'_f	c
Método de correlación por cuatro puntos	$b, E, \sigma_u, \varepsilon_f$	ε_f	c, ε_f	$b, E, \sigma_u, \varepsilon_f$
Método de las pendientes universales	σ_u	-0,12	ε_f	-0,6
Método de Mitchell	σ_u	σ_u	ε_f	-0,6
Método de Muralidharan y Manson	E, σ_u	-0,09	$E, \sigma_u, \varepsilon_f$	-0,56
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger - Aceros	σ_u	-0,087	E, σ_u	-0,58
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger - Aluminios	σ_u	-0,095	0,35	-0,69
Método de Ong	σ_u, ε_f	E, σ_u	ε_f	$E, \sigma_u, \varepsilon_f, \sigma_f$
Método de Roessle y Fatemi	HB	-0,09	E, HB	-0,56
Método de Mitchell modificado	σ_u	σ_u	ε_f	-0,664
Método de las Medianas - Aceros	σ_u	-0,09	0,45	-0,59
Método de las Medianas - Aluminios	σ_u	-0,11	0,28	-0,66
Método de Mitchell modificado con dureza	HB	HB	0,281	-0,664

Tabla 3-1 Parámetros y constantes necesarias para emplear los métodos de estimación

3.1.1 Método de correlación por cuatro puntos

Manson [9] propuso el método de correlación por cuatro puntos con el objetivo de estimar la curva vida-deformación (ε - N) a partir de las propiedades monotónicas de tensión, como la deformación verdadera a fractura o la resistencia última a tracción. Dichos cuatro puntos, incluyen dos puntos en la recta elástica de la curva y los otros dos en la plástica.

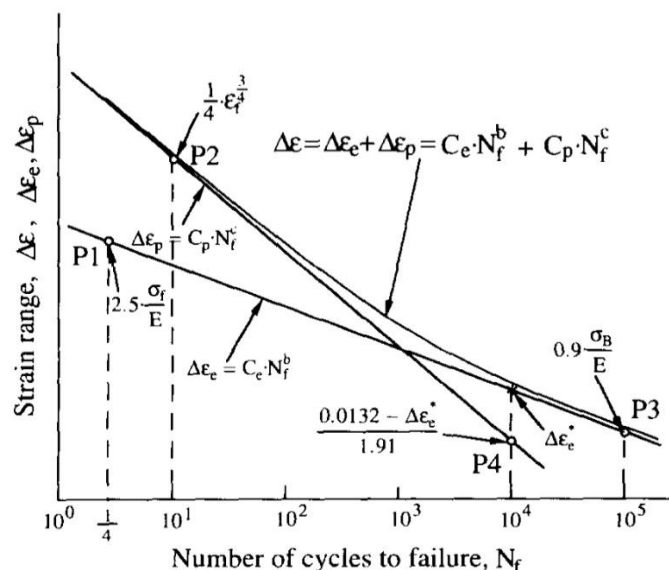


Figura 3-1 Método de correlación por cuatro puntos de Manson [14]

En relación a esos cuatro puntos, se obtienen los parámetros:

$$\sigma'_f = \frac{E}{2} \times 10^{b \log 2 + \log \left[\frac{2,5\sigma_u(1+\varepsilon_f)}{E} \right]}, \quad (17)$$

$$b = \frac{\log \left[\frac{2,5(1 + \varepsilon_f)}{0,9} \right]}{\log[1/(4 \times 10^5)]}, \quad (18)$$

$$\varepsilon'_f = \frac{1}{2} \times 10^{c \log(4 \times 10^4) + \log \left[\frac{2,5\sigma_u(1+\varepsilon_f)}{E} \right]}, \quad (19)$$

$$c = \frac{1}{3} \log \left[\frac{0,0132 - \Delta\varepsilon^*}{1,91} \right] - \frac{1}{3} \log \left(\frac{1}{4} \varepsilon_f^{3/4} \right). \quad (20)$$

Siendo $\Delta\varepsilon^*$ el rango de deformación elástica a 10^4 ciclos y estimado de forma:

$$\Delta\varepsilon^* = 10^{b \log(4 \times 10^4) + \log \left[\frac{2,5\sigma_u(1+\varepsilon_f)}{E} \right]}. \quad (21)$$

3.1.2 Método de las pendientes universales

Manson [9] propuso una alternativa a su método de correlación por cuatro puntos para la aproximación de los parámetros de vida a fatiga. En esta propuesta asumió que las pendientes tanto de la curva de deformación elástica como la de deformación plástica no variaban en función del material. Fijó esas pendientes con dos valores fijos de tal forma que:

$$\sigma'_f = 1,9018 \cdot \sigma_u, \quad (22)$$

$$b = -0,12, \quad (23)$$

$$\varepsilon'_f = 0,7579 \cdot \varepsilon_f^{0,6}, \quad (24)$$

$$c = -0,6. \quad (25)$$

3.1.3 Método de Mitchell

Mitchell [10] sugirió las siguientes aproximaciones aplicables a aceros con un nivel de dureza inferior a 500 HB.

$$\sigma'_f = \sigma_u + 345(\text{MPa}), \quad (26)$$

$$b = -\frac{1}{6} \times \log \left[\frac{2(\sigma_u + 345)}{\sigma_u} \right], \quad (27)$$

$$\varepsilon'_f = \varepsilon_f, \quad (28)$$

$$c = -0,6. \quad (29)$$

3.1.4 Método de Ong

Con el fin de mejorar el método de correlación por cuatro puntos de Manson, Ong [13] propuso una alternativa utilizando con mayor exactitud los cuatro puntos P1'-P4' de la Figura 3-2.

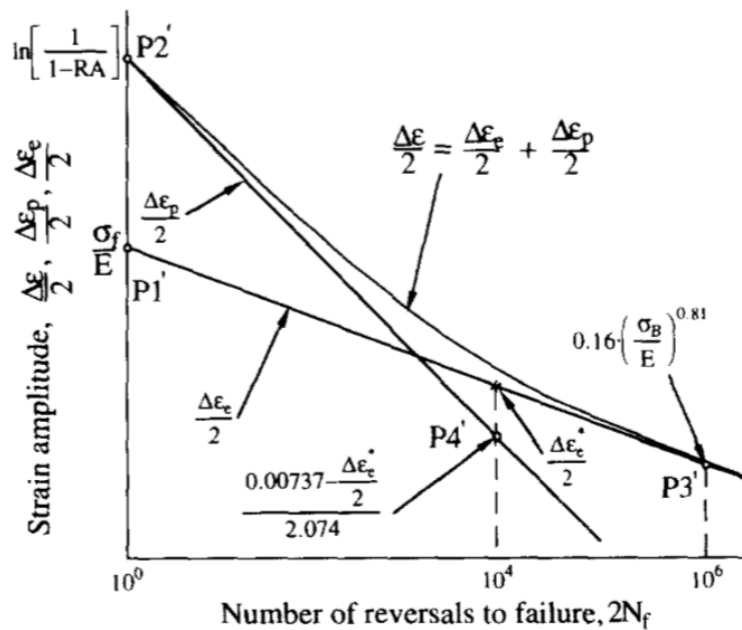


Figura 3-2 Método de Ong [14]

De la definición se obtienen los parámetros:

$$\sigma'_f = \sigma_f, \quad (30)$$

$$b = -\frac{1}{6} \left\{ \log \left[0,16 \left(\frac{\sigma_u}{E} \right)^{0,81} \right] - \log \left(\frac{\sigma_f}{E} \right) \right\}, \quad (31)$$

$$\varepsilon'_f = \varepsilon_f, \quad (32)$$

$$c = \frac{1}{4} \left[\log \left(\frac{0,00737 - \frac{\Delta \varepsilon_e^*}{2}}{2,074} \right) - \log \varepsilon_f \right]. \quad (33)$$

Siendo

$$\Delta \varepsilon_e^* = \frac{\sigma_f}{E} \left[10^{\frac{2}{3} \left\{ \log \left[0,16 \left(\frac{\sigma_u}{E} \right)^{0,81} \right] - \log \frac{\sigma_f}{E} \right\}} \right]. \quad (34)$$

Como el valor de la tensión de fractura, σ_f , no siempre es conocido, Manson [9] en su día recomendó la siguiente aproximación sugerida por J.O'Brien:

$$\sigma_f = \sigma_u (1 + \varepsilon_f). \quad (35)$$

3.1.5 Ley Uniforme de Bäuml y Seeger

En este método propuesto por Bäuml y Seeger [11] se asignan diferentes pendientes a la curva según el tipo de material. Únicamente es necesario conocer el módulo de elasticidad, E , y la resistencia última a tensión, σ_u , para estimar las distintas propiedades de vida a fatiga.

Para aceros sin aleación y baja aleación se proporcionan los siguientes valores:

$$\sigma'_f = 1,5\sigma_u, \quad (36)$$

$$b = -0,087, \quad (37)$$

$$\varepsilon'_f = 0,59\psi, \quad (38)$$

$$c = -0,58. \quad (39)$$

Siendo:

$$\psi = 1 \text{ para } \frac{\sigma_u}{E} \leq 0,003, \quad (40)$$

$$\psi = 1,375 - 125,0 \frac{\sigma_u}{E} \text{ para } \frac{\sigma_u}{E} > 0,003, \quad (41)$$

En el caso de aleaciones de aluminio y titanio:

$$\sigma'_f = 1,67\sigma_u, \quad (42)$$

$$b = -0,095, \quad (43)$$

$$\varepsilon'_f = 0,35, \quad (44)$$

$$c = -0,69. \quad (45)$$

3.1.6 Método de Muralidharan y Manson

El método de las pendientes universales fue modificado por Muralidharan y Manson [12] y supone una mejora del anterior. Este método estima unas pendientes menos universalizadas, tanto para la curva elástica como para la plástica, que el método original. La relación entre la resistencia última a tensión y el módulo de elasticidad es ahora introducida en el coeficiente de la curva de deformación

plástica, indicando así que la tensión a fatiga del material también juega un papel importante para la vida a bajo número de ciclos.

Se estiman los siguientes parámetros:

$$\sigma'_f = E \cdot 0,623 \left(\frac{\sigma_u}{E} \right)^{0,832}, \quad (46)$$

$$b = -0,09, \quad (47)$$

$$\varepsilon'_f = 0,0196 \cdot \varepsilon_f^{0,155} \left(\frac{\sigma_u}{E} \right)^{-0,53}, \quad (48)$$

$$c = -0,56. \quad (49)$$

3.1.7 Método de Roessle y Fatemi

Roessle y Fatemi [15] propusieron un método simple para estimar las propiedades a fatiga a partir del valor de la dureza Brinell, válido para aceros con valores de dureza Brinell comprendidos entre 150HB y 700HB. Este método supone una ventaja ya que sólo es necesario conocer los valores de la dureza Brinell, HB, y del módulo de elasticidad, E. El valor de la dureza se puede conseguir con ensayos no destructivos y el módulo de elasticidad es una constante esencial para cada material. Por esto, el Método de Roessle y Fatemi es bastante útil para los casos en los que no se dispone de los datos de tensión o no se pueda realizar un ensayo destructivo. Los exponentes b y c son los mismos que los utilizados en el Método de Muralidharan y Manson.

$$\sigma'_f = 4,25 \cdot (HB) + 225, \quad (50)$$

$$b = -0,09, \quad (51)$$

$$\varepsilon'_f = \frac{1}{E} [0,32(HB)^2 - 487(HB) + 191000], \quad (52)$$

$$c = -0,56. \quad (53)$$

3.1.8 Método de Mitchell modificado

La siguiente propuesta fue realizada por Park y Song [16] para aleaciones de aluminio y titanio:

$$\sigma'_f = \sigma_u + 335, \quad (54)$$

$$b = -\frac{1}{6} \log \left(\frac{\sigma_u + 335}{0,46\sigma_u} \right), \quad (55)$$

$$\varepsilon'_f = \varepsilon_f, \quad (56)$$

$$c = -0,664. \quad (57)$$

3.1.9 Método de las medianas

Propuesto por Maggiolaro y Castro [17], es considerado de gran utilidad por sus facilidades, ya que solo es necesario tener el valor de la resistencia última a tensión, σ_u .

Para aceros:

$$\sigma'_f = 1,5 \cdot \sigma_u, \quad (58)$$

$$b = -0,09, \quad (59)$$

$$\varepsilon'_f = 0,45, \quad (60)$$

$$c = -0,59. \quad (61)$$

Para aleaciones de aluminio:

$$\sigma'_f = 1,9 \cdot \sigma_u, \quad (62)$$

$$b = -0,11, \quad (63)$$

$$\varepsilon'_f = 0,28, \quad (64)$$

$$c = -0,66. \quad (65)$$

3.1.10 Método de Mitchell modificado con dureza

Cuando se trata de una aleación de aluminio existe una estrecha relación entre la resistencia última a tensión, σ_u , y la dureza. A partir de la modificación al Método de Mitchell que realizaron Park y Song [16] se propone reescribir el método [18] de tal forma que únicamente sea necesario el dato de dureza Brinell, HB , para calcular las variables, de forma que:

$$\sigma'_f = 3,66HB + 370,8, \quad (66)$$

$$b = -\frac{1}{6} \log[(3,66HB + 370,8)/(1,632HB + 7,047)], \quad (67)$$

$$\varepsilon'_f = 0,281, \quad (68)$$

$$c = -0,664. \quad (69)$$

4 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

4.1 Introducción

La aplicación desarrollada en el presente Trabajo de Fin de Grado se fundamenta en los distintos métodos enunciados en el capítulo anterior. Por medio de la aplicación, es posible estimar las propiedades a fatiga de aceros y aleaciones de aluminio o titanio usando para ello los diez métodos de estimación más aceptados por la bibliografía.

En cuanto a la herramienta de software que se ha empleado para el cálculo de los diferentes métodos, ha sido MATLAB (MATrix LABoratory, “laboratorio de matrices”) que utiliza un lenguaje de programación propio “lenguaje M” y que permite el manejo de matrices, el desarrollo de interfaces de usuario (GUI, Graphical User Interface) y la comunicación con otros lenguajes de programación.

La aplicación se ha desarrollado utilizando el entorno de trabajo que ofrece Matlab mediante el desarrollador de interfaces gráficos GUIDE (GUI Development Environment).

4.2 Elaboración de la aplicación

4.2.1 Cálculo de los métodos

El primer paso que se ha llevado a cabo para la elaboración de la aplicación ha sido la creación de diferentes scripts en Matlab que permitieran el cálculo de los parámetros a fatiga para cada método de estimación. Se ha creado una base de datos de materiales en formato de texto con el fin de estimar las propiedades a fatiga de manera automática y no tener que hacerlo material por material. Para ello, se ha creado un código en Matlab que lee los datos del fichero fila por fila y los procesa para operar con ellos posteriormente. Se ha creado un script en Matlab para calcular cada método de estimación incluyendo sus ecuaciones correspondientes.

4.2.2 Desarrollo de la interfaz gráfica

La interfaz desarrollada por medio de la herramienta de Matlab GUIDE es uno de los puntos clave que se desarrollan en este Trabajo de Fin de Grado, y la utilización de este programa informático es un pilar fundamental del mismo.

A pesar de ser un programa informático, no se tratarán cuestiones informáticas, sino que lo que pretende es explicar cómo se ha de utilizar el programa para obtener los diferentes resultados.

Debido a que en una interfaz gráfica GUI las acciones con el programa se llevan a cabo mediante la manipulación directa del mismo, el usuario no tiene que conocer los detalles de la programación para poder hacer un uso efectivo del programa. Por ello, la principal característica de una interfaz gráfica GUI es que es muy intuitiva, de manera que una persona que desconozca el funcionamiento de este tipo de interfaz, podrá interactuar con el sistema fácilmente.

Una interfaz gráfica de usuario (GUI), consiste en una interfaz construida con objetos gráficos, como pueden ser, menús, botones, listas, etc.

Esos objetos formarán una interfaz cuando realicen algún cambio al accionar sobre ellos, por ejemplo, una pulsación del ratón o arrastrar un objeto.

Para diseñar una interfaz se deben seleccionar los objetos gráficos que se desee visualizar en pantalla y colocarlos de forma que la interfaz sea fácil de utilizar para el usuario. Matlab permite emplear un conjunto de elementos tales como botones, menús, ventanas, etc. para facilitar el uso de interfaces gráficas.

Los gráficos en Matlab poseen una jerarquía, de forma que el objeto principal y del que dependen todos los demás es la pantalla. En una misma pantalla se pueden abrir una o más ventanas (figures) que a su vez pueden contener uno o más ejes (Axes) para representar así objetos tales como imágenes, líneas, superficies... Dentro de una ventana también se pueden encontrar distintos controles (uicontrols) y menús (uimenu). De esta forma, si borramos un objeto de Matlab, se borrarán automáticamente todos los objetos que dependan de él.

La interfaz desarrollada se compone de dos archivos: un archivo .m, en el que podremos encontrar el código del programa y un archivo .fig, donde se pueden encontrar los controles del programa. Para diseñar la interfaz se ha usado el editor donde hemos colocado los botones necesarios para nuestro programa.

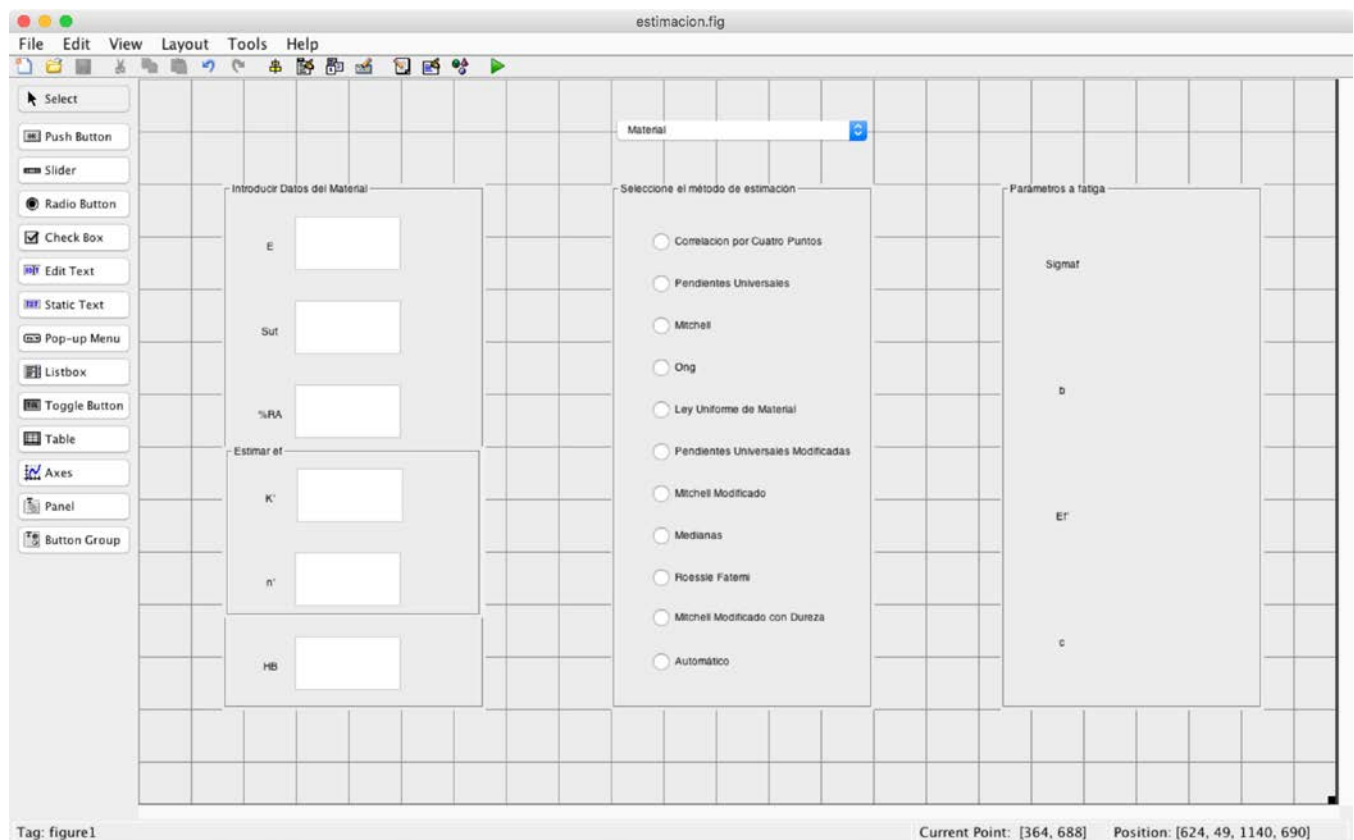


Figura 4-1 Aplicación vista desde el editor GUI

Al hacer doble clic sobre los objetos se abre una ventana donde se pueden seleccionar sus características; tamaño de letra, color de fondo, nombre del botón que se usará para escribir el programa, etc. A continuación se van a detallar los objetos principales del programa:

- Paneles: Para englobar un conjunto de botones.
- Cajetines donde introducir los datos del material: Se trata de varios *Edit Text*, para poder modificar los valores dependiendo del material que deseemos estimar.
- Desplegable donde elegir el material que deseemos estimar: Se trata de un *Pop-up Menu*, que nos permite elegir entre los distintos grupos de materiales que se incluyen en el programa; Aceros y aleaciones de aluminio o titanio.
- Botones de selección de métodos: Se trata de varios *Radio Button*, para elegir el método que queremos emplear en la estimación.
- Cajetines donde mostraremos el resultado de la estimación: Se trata de varios *Static Text*, donde simplemente se muestran resultados de las diferentes operaciones o simplemente para indicar donde se van a introducir o mostrar los datos.

En la Figura 4-1 se puede observar la apariencia final de la interfaz desde la pantalla de edición de la herramienta GUIDE. En esta pantalla se pueden realizar todas las modificaciones necesarias para conseguir la apariencia deseada.

A partir de la Figura 4-2 se van a explicar los diferentes controles.

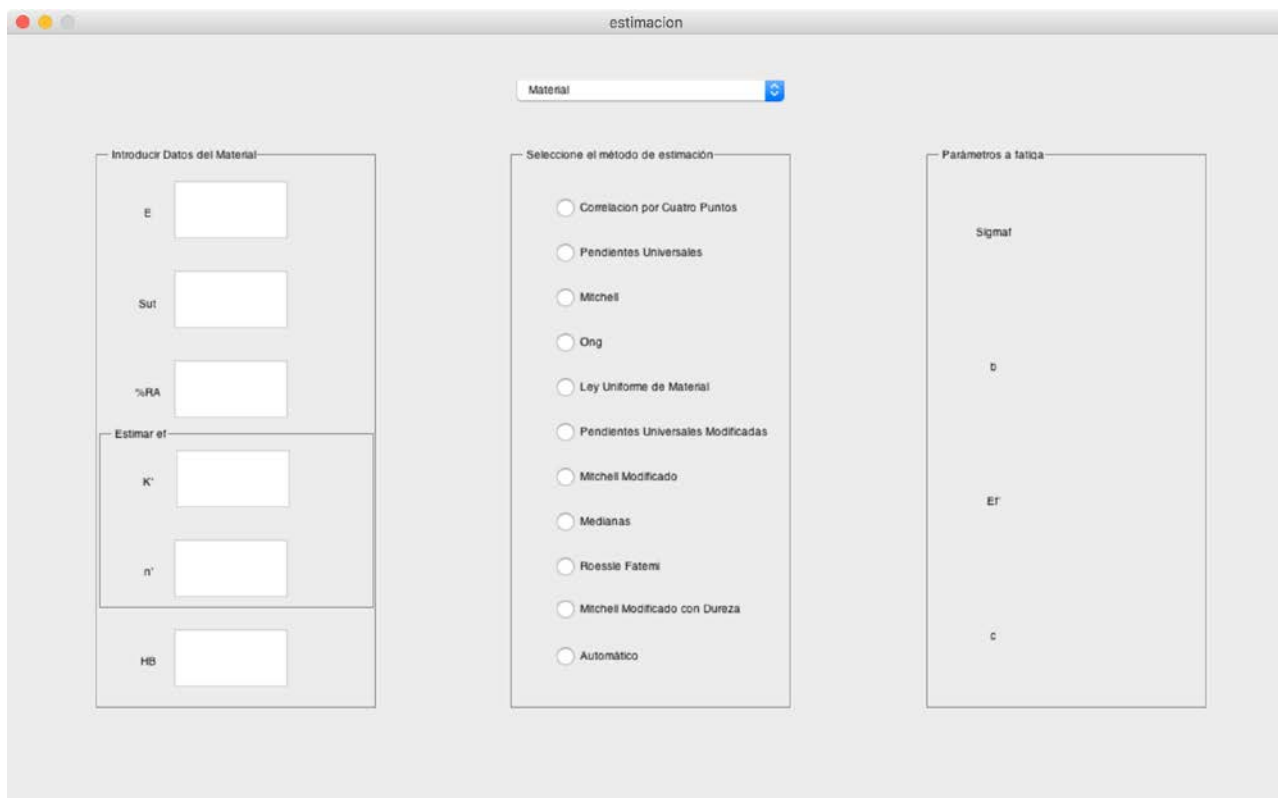


Figura 4-2 Apariencia final de la aplicación

En la parte superior se puede encontrar un desplegable en el que el usuario deberá elegir el grupo de material que desea estimar. Durante el presente trabajo de Fin de Grado han sido evaluados únicamente aceros de baja aleación y aleaciones de aluminio, debido a los problemas encontrados al acceder a bases de datos de materiales. No obstante, la aplicación está diseñada para estimar cualquier tipo de material si se obtienen los datos necesarios para llevar a cabo dichas estimaciones. Es necesario introducir el tipo de material que se está estimando con el fin de restringir el tipo de método utilizado para llevar a cabo la estimación. Los métodos que se evalúan en la aplicación son específicos según el material que se está estimando. A continuación se presenta la Tabla 4-1 con los métodos que son aplicables a cada tipo de material:

Métodos	Aceros	Aleaciones de aluminio y titanio
Método de correlación por cuatro puntos	Aplicable	Aplicable
Método de las pendientes universales	Aplicable	Aplicable
Método de Mitchell	Aplicable	No aplicable
Método de Muralidharan y Manson	Aplicable	Aplicable
Ley Uniforme de Bäumel y Seeger	Aplicable	Aplicable
Método de Ong	Aplicable	Aplicable
Método de Roessle y Fatemi	Aplicable	No aplicable
Método de Mitchell modificado	No aplicable	Aplicable
Método de las Medianas	Aplicable	Aplicable
Método de Mitchell modificado con dureza	No aplicable	Aplicable

Tabla 4-1 Métodos aplicables a cada material

Si el usuario no selecciona el tipo de material que desea estimar, el programa le avisará de ello a través de un mensaje como el mostrado a continuación:

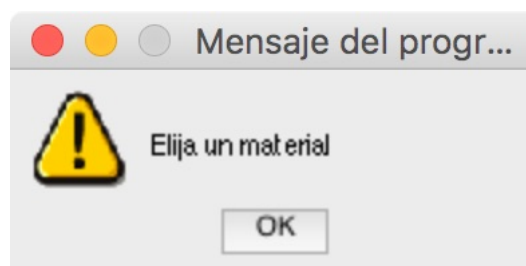


Figura 4-3 Mensaje del programa por falta de selección del material

Por otro lado, si el método seleccionado no es posible aplicarlo al tipo de material seleccionado, nos aparecerá un mensaje del programa avisándonos de ello.

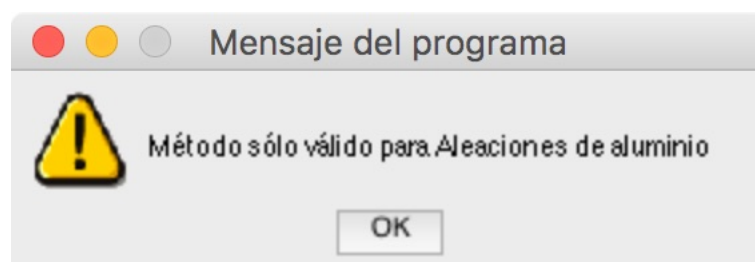


Figura 4-4 Mensaje del programa por inconveniente al aplicar un método

El panel situado a la izquierda se corresponde con la entrada de parámetros donde el usuario podrá introducir los datos del material que desee evaluar. En función de los datos que el usuario introduzca, se permitirá el uso de diferentes métodos de estimación. En la Tabla 3-1 se exponen las variables necesarias para poder evaluar cada método de estimación. No siempre se dispone de todas las variables necesarias para llevar a cabo la misma. El dato del porcentaje de reducción de área, fundamental para calcular la elongación a la fractura, ε_f , no es fácil de obtener, por lo tanto, en el programa se propone una solución a ese problema. Es posible estimar la elongación a la fractura a partir de los datos del comportamiento cíclico del material, K' y n' , mediante la siguiente aproximación

$$\varepsilon_f = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma_u}{E} + \left(\frac{\sigma_u}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}. \quad (70)$$

Debido a que el dato de la elongación a la fractura para llevar a cabo la estimación por determinados métodos debe ser un valor real, al estimarlo se está cometiendo un error, por lo tanto, los resultados pueden no ser tan buenos como lo serían si se dispusiese de ese dato. El programa, que es capaz de identificar esta situación, avisa al usuario de que está estimando el valor de la elongación a la fractura por medio de un mensaje.

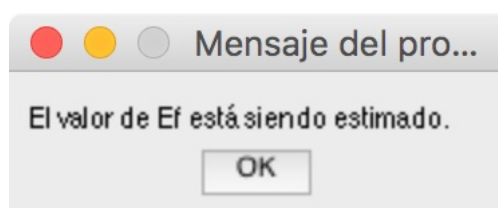


Figura 4-5 Mensaje del programa avisando de la estimación de un valor.

Para que el usuario no introduzca valores que no van a ser usados por la aplicación, al introducir un valor del porcentaje de reducción de área, la aplicación bloquea la introducción de datos en los campos del coeficiente de resistencia cíclica y el exponente de endurecimiento cíclico.



Figura 4-6 Introducción de campo de datos

Si no se dispone de los datos necesarios para llevar a cabo la estimación por el método seleccionado, aparecerá en pantalla un mensaje de error del programa indicándole al usuario que debe introducir valores para estimar por el método seleccionado.

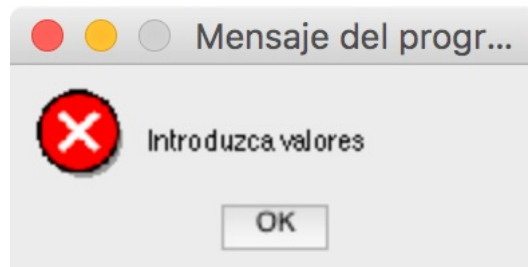


Figura 4-7 Mensaje del programa por falta de valores para llevar a cabo la estimación.

En el panel central, se puede elegir el método de estimación que se desee. Se han incluido un total de diez métodos diferentes, ya explicados en el capítulo anterior. Se ha incluido una opción para que el programa estime automáticamente los parámetros a fatiga utilizando el mejor método según los estudios realizados que se exponen en el siguiente capítulo. Dependiendo del grupo de material que el usuario introduzca y de los datos de los que el usuario disponga, el método automático los analiza y elige el método más idóneo para llevar a cabo la estimación. Al utilizar el método automático aparecerá un mensaje de información del programa mostrándonos qué método ha utilizado para llevar a cabo la estimación.

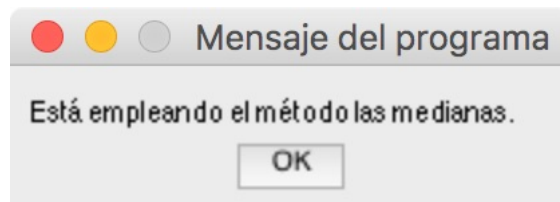


Figura 4-8 Mensaje del programa informando del método empleado en la estimación.

Por último, en el panel de la derecha se muestran los resultados de las estimaciones de los parámetros a fatiga en función del método seleccionado.

5 COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS MÉTODOS PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES A FATIGA

5.1 Comparación bibliográfica

A pesar de la importancia del conocimiento de la vida a fatiga de los materiales, no se había publicado una comparación de los distintos métodos hasta 1995, cuándo la hicieron Park y Song [14].

Material group	E values	Four-point correlation	Original universal slopes	Modified universal slopes	Mitchell's method	Seeger's method	Ong's method	Total number of data points and data set
Unalloyed steels	$E_f(s=3)$	0.570	0.769	0.824	0.738	0.805	0.811	602 72
	$(E_a)_{total}$	0.431	0.669	0.925	0.774	0.885	0.868	
	$(E_a)_{Dset}$	0.234	0.462	0.452	0.330	0.569	0.491	
	$\bar{E}$	0.412	0.634	0.764	0.614	0.753	0.723	
Low-alloy steels	$E_f(s=3)$	0.548	0.750	0.764	0.532	0.768	0.793	1316 137
	$(E_a)_{total}$	0.229	0.444	0.747	0.528	0.645	0.562	
	$(E_a)_{Dset}$	0.224	0.503	0.621	0.514	0.632	0.614	
	$\bar{E}$	0.334	0.566	0.711	0.524	0.684	0.656	
High-alloy steels	$E_f(s=3)$	0.663	0.865	0.867	0.600	0.846	0.865	505 68
	$(E_a)_{total}$	0.313	0.648	0.956	0.808	0.970	0.801	
	$(E_a)_{Dset}$	0.455	0.645	0.656	0.605	0.662	0.681	
	$\bar{E}$	0.477	0.719	0.826	0.671	0.826	0.782	
Aluminum alloys	$E_f(s=3)$	0.567	0.800	0.796	0.721	0.738	0.713	240 29
	$(E_a)_{total}$	-0.043	0.586	0.720	0.907	0.877	0.723	
	$(E_a)_{Dset}$	0.437	0.666	0.704	0.734	0.735	0.712	
	$\bar{E}$	0.320	0.684	0.740	0.787	0.783	0.716	
Titanium alloys	$E_f(s=3)$	0.519	0.759	0.852	0.648	0.778	0.870	54 9
	$(E_a)_{total}$	0.331	0.558	0.892	0.847	0.746	0.921	
	$(E_a)_{Dset}$	0.462	0.500	0.448	0.580	0.472	0.592	
	$\bar{E}$	0.437	0.606	0.731	0.692	0.665	0.794	
All materials	$\bar{E}_f(s=3)$	0.576	0.780	0.801	0.609	0.788	0.805	2717 315
	$(\bar{E}_a)_{total}$	0.271	0.556	0.834	0.688	0.798	0.708	
	$(\bar{E}_a)_{Dset}$	0.303	0.539	0.613	0.514	0.629	0.609	
Total	$\bar{\bar{E}}$	0.384	0.627	0.751	0.606	0.739	0.709	

Tabla 5-1-Comparación de métodos de estimación [19]

Hasta entonces, no se sabía con certeza, qué método estimaba los resultados con mayor exactitud para un material dado. Haciendo uso de una gran cantidad de datos de fatiga recogidos en algunos libros publicados anteriormente, Park y Song [14] discutieron detalladamente la exactitud de los métodos. Introdujeron un nuevo criterio para realizar una comparación sistemática y obtuvieron los resultados cuantitativos que se muestran en la Tabla 5-1. Los diferentes valores de E que se muestran en la Tabla 5-1 se corresponden con la evaluación que realizaron Park y Song, que representa la exactitud del método de estimación. Se especifica con mayor detalle el cálculo de los valores de E en [14]. La Tabla 5-2 muestra el ranking de los métodos de estimación en función del tipo de material [19]. El Método de Muralidharan y Manson de las pendientes universales modificadas es el que mejor estima las propiedades a fatiga para aceros, aunque puede ser utilizado para estimar cualquier tipo de material.

Grupo de material	Ranking			
	1	2	3	4
Aceros sin aleación	Pendientes Universales modificadas	Ley Uniforme de Material	Método de Ong	
Aceros de baja aleación	Pendientes Universales modificadas	Ley Uniforme de Material	Método de Ong	
Aceros de alta aleación	Pendientes Universales modificadas o Ley Uniforme de Material		Método de Ong	
Aleaciones de aluminio	Método de Mitchell	Ley Uniforme de Material	Pendientes Universales modificadas	Ley Uniforme de Material
Aleaciones de titanio	Método de Ong	Pendientes Universales modificadas	Método de Mitchell	
Total	Pendientes Universales modificadas	Ley Uniforme de Material	Método de Ong	

Tabla 5-2 Ranking de los métodos de estimación para cada material [19]

Aunque la Tabla 5-2 muestra que el Método de Mitchell es el más apropiado de los seis para estimar las propiedades de fatiga de los aluminios, Park y Song [14] descubrieron que el método tendía a dar predicciones poco conservativas y sugirieron una modificación al Método de Mitchell. La Tabla 5-3 muestra los resultados incluyendo dicha modificación. Pudieron concluir que la modificación al Método de Mitchell estimaba de forma más precisa las propiedades para las aleaciones de aluminio y titanio.

Material group	E values	Four-point correlation	Original universal slopes	Modified universal slopes	Mitchell's method	Seeger's method	Ong's method	Modified Mitchell's method
Aluminum alloys	$E_f(s=3)$	0.567	0.800	0.796	0.721	0.738	0.713	0.838
	$(E_a)_{total}$	-0.043	0.586	0.720	0.907	0.877	0.723	0.909
	$(E_a)_{Dset}$	0.437	0.666	0.704	0.734	0.735	0.712	0.703
	E	0.320	0.684	0.740	0.787	0.783	0.716	0.856
Titanium alloys	$E_f(s=3)$	0.519	0.759	0.852	0.648	0.778	0.870	0.955
	$(E_a)_{total}$	0.331	0.558	0.892	0.847	0.746	0.921	0.883
	$(E_a)_{Dset}$	0.462	0.500	0.448	0.580	0.472	0.592	0.662
	E	0.437	0.606	0.731	0.692	0.665	0.794	0.830

Tabla 5-3 Comparación de los métodos de estimación para aleaciones de aluminio y titanio [19]

Maggiolaro y Castro [17] compararon su método de las medianas con otros siete métodos de estimación. Concluyeron que para aceros, el método de las medianas realizaba buenas estimaciones y que el Método de las Pendientes Universales modificado y el método de Roessle y Fatemi, daban resultados razonables. Para el caso de las aleaciones de aluminio y titanio, encontraron que se obtenían los mejores resultados con su método de las medianas, y que la Ley Uniforme de Material también los estimaba de forma aproximada. Destacaron que, a la vista de los resultados, la modificación al Método de las Pendientes Universales no debía de ser aplicada para aleaciones de aluminio o titanio.

Basándonos en las referencias bibliográficas podemos concluir que, para el caso de los aceros, el mejor método utilizado para estimar las propiedades a fatiga es el Método de Muralidharan y Manson de las pendientes universales modificadas; siempre que se dispongan de los datos de resistencia última a tensión, σ_u , y elongación verdadera a fatiga, ϵ_f . Cuando no se disponga del dato de elongación verdadera a fatiga, la Ley Uniforme de Bäuml and Seeger o el método de las medianas pueden ser unas buenas alternativas para obtener resultados satisfactorios. Si por el contrario, no disponemos del dato de la resistencia última a tensión, el Método de Roessle y Fatemi es una opción recomendable para obtener resultados exitosos. Por otra parte, para aleaciones de aluminio, podemos determinar que el método de las medianas propuesto por Maggiolaro y Castro nos proporciona la mejor estimación de resultados.

5.2 Propuesta de criterio para la evaluación de métodos

A la hora de evaluar los distintos métodos y calcular el error que se comete al estimar las propiedades a fatiga de los diferentes materiales se ha decidido evaluar por separado las zonas de estimación a ciclos altos y ciclos bajos.

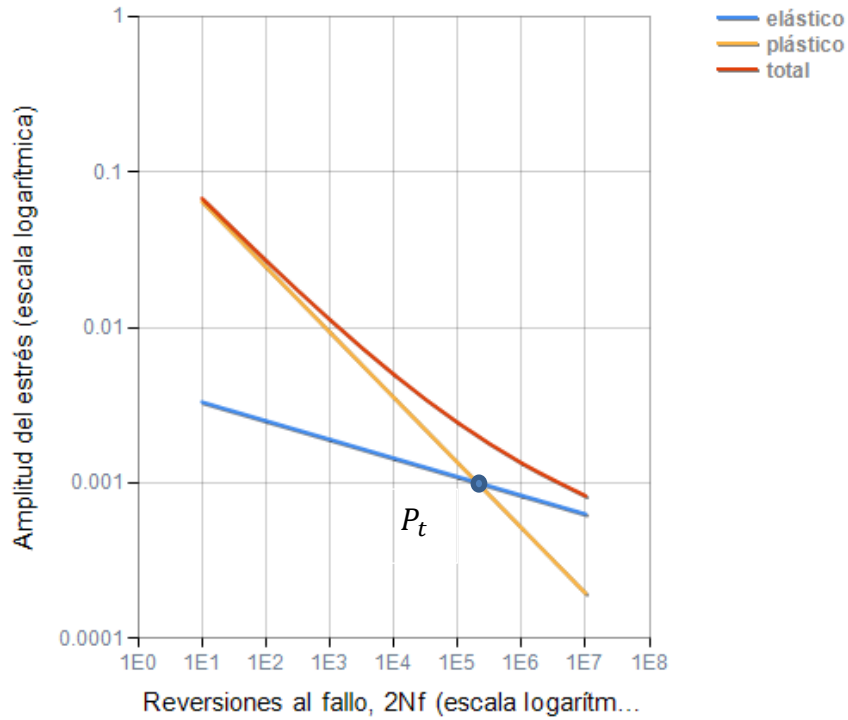


Figura 5-1 Curva total de deformación para el acero 1020 [20]

En primer lugar se calcula el punto de transición entre la curva S-N en términos de deformación elástica (dividida por E) y la curva ϵ -N de cada material. El punto de transición, que de ahora en adelante denotaremos por P_t , se producirá en el punto de corte de las mismas, es decir, cuando

$$\frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b = \epsilon'_f(2N_f)^c, \quad (71)$$

por lo que,

$$P_t = 2N_f = \left(\frac{\sigma'_f}{E \cdot \epsilon'_f} \right)^{\frac{1}{c-b}}. \quad (72)$$

Por tanto, por debajo de ese valor, debemos realizar la estimación con la curva ϵ -N, y por encima, con la curva S-N.

Una vez calculado el punto de transición se calcula el error relativo, ϵ_{rp} , entre la curva ϵ -N real y la análoga estimada.

Para calcular el error relativo, es necesario conocer el error absoluto, que se define como la diferencia entre el valor de la medida y el valor tomado como exacto. El error relativo será el cociente entre el error absoluto y el valor exacto.

Se explica a continuación el proceso para calcular el error relativo entre las curvas ϵ -N y S-N,

$$\frac{\Delta \epsilon_{p_{real}}}{2} = \epsilon'_{f_{real}}(2N_f)^{c_{real}}, \quad (73)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_{p_{est}}}{2} = \varepsilon'_{fest} (2N_f)^{c_{est}}, \quad (74)$$

$$\epsilon_{rp} = \frac{\Delta \varepsilon_{p_{real}} - \Delta \varepsilon_{p_{est}}}{\Delta \varepsilon_{p_{real}}}. \quad (75)$$

Una vez se obtiene el error relativo entre la curva real y la estimada, se calcula la norma del mismo a través de la raíz cuadrada de la integral del error relativo al cuadrado. Considerando como intervalo de integración desde un número mínimo establecido de 100 ciclos², hasta el punto de transición:

$$\|f_{ep}\| = \frac{\sqrt{\int_{100}^{P_t} \epsilon_{rp}^2 d(2N_f)}}{P_t - 100} \quad (76)$$

Debido a que los intervalos de integración son de diferentes amplitudes en el caso de ciclos altos y ciclos bajos, para normalizar la medida, dividimos entre la longitud del intervalo de integración obteniendo el error medio.

El número $\|f_{ep}\|$ es un promedio de la diferencia existente entre la curva de deformación plástica real y la estimada. De este modo, se consigue cuantificar el error que comete el método de estimación para ciclos bajos, es decir, con respecto a la curva real de deformación plástica.

Lo realizamos de forma análoga para la curva S-N real. El punto de transición está calculado.

Se define error relativo entre la curva de deformación elástica real y la estimada,

$$\frac{\Delta \varepsilon_{e_{real}}}{2} = \frac{\sigma'_{f_{real}}}{E} (2N_f)^{b_{real}}, \quad (77)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_{e_{est}}}{2} = \frac{\sigma'_{f_{est}}}{E} (2N_f)^{b_{est}}, \quad (78)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\Delta \varepsilon_{e_{real}} - \Delta \varepsilon_{e_{est}}}{\Delta \varepsilon_{e_{real}}}. \quad (79)$$

Realizamos la norma de la función error pero esta vez, se va a integrar con respecto a unos nuevos límites de integración, siendo el nuevo intervalo de integración desde el punto de transición hasta un número máximo de ciclos establecido en un millón³

$$\|f_{ee}\| = \frac{\sqrt{\int_{P_t}^{10^6} \epsilon_{re}^2 d(2N_f)}}{10^6 - P_t}. \quad (80)$$

² Número de ciclos mínimo considerado por debajo del cual no es habitual que el material rompa por fatiga.

³ Entendiéndose que a partir de 10^6 ciclos se considera vida infinita y que la pieza no va a fallar por fatiga.

El número $\|f_{e_e}\|$ es un promedio de la diferencia existente entre la curva de deformación elástica real y la estimada, y se obtiene el error que comete el método al estimar las propiedades a fatiga para un régimen de alto ciclaje.

Combinando ambos valores, obtenemos el error total que se realiza en la estimación

$$\|f_{e_T}\| = \|f_{e_p}\| + \|f_{e_e}\|. \quad (81)$$

5.3 Materiales

Con el propósito de comparar los diferentes métodos se consiguieron los datos necesarios para realizar las estimaciones en función de los materiales empleados [20] [21]. Se necesitaron los datos de módulo de elasticidad, E , resistencia última a tensión, σ_u , coeficiente de esfuerzo a fatiga, σ'_f , exponente de esfuerzo a fatiga, b , coeficiente de ductilidad a fatiga, ε'_f , exponente de ductilidad a fatiga, c , el porcentaje de reducción de área, %RA, coeficiente de esfuerzo cíclico, K' , y exponente de endurecimiento a la deformación cíclica, n' , ya introducidos anteriormente.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se han evaluado únicamente aceros de baja aleación y aleaciones de aluminio. Se obtuvieron un total de 43 aceros de baja aleación y 17 aluminios. El listado completo de materiales empleados se encuentra en el Anexo I: Materiales evaluados.

5.4 Comparación de métodos

Utilizando el criterio de evaluación descrito anteriormente, se ha calculado el error que cometía cada método al estimar los parámetros a fatiga para diferentes materiales. Debido a que no se disponen de todos los datos para cada material, se han evaluado juntos los materiales de los que se poseía la misma información.

Para los aceros de baja aleación de los que se disponía el porcentaje de reducción de área, %RA, un total de 43 aceros de baja aleación, se presentan los resultados obtenidos en la siguiente tabla en la que en la columna de la izquierda se especifica el método utilizado y en la columna de la derecha el número de veces que ese método se ha aproximado más a los datos reales de los parámetros a fatiga tanto para la curva S-N, como para la curva ε -N, y para la curva completa:

Método	Número de aproximaciones		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	18	9	19
Método de las pendientes universales	3	11	4
Método de Mitchell	4	3	4
Método de Ong	2	0	0
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	2	7	4
Método de Muralidharan y Manson	13	5	11
Método de las medianas	1	8	1

Tabla 5-4 Comparación de métodos para aceros de baja aleación conocido %RA

A la vista de los resultados podemos concluir que utilizando la aplicación desarrollada, el método de estimación que mejor aproxima las propiedades a fatiga para aceros de baja aleación es el método de la correlación por cuatro puntos de Manson en un 44,18% de los casos. El Método de Muralidharan y Manson de las pendientes universales modificadas realiza buenas estimaciones de las propiedades a fatiga de los aceros de baja aleación en un 25,58% de los casos. Los métodos de las pendientes universales, Mitchell y la Ley Uniforme de Bäümel y Seeger han cometido el menor error en la estimación en un 9,3% de los casos evaluados. Según los datos expuestos en la Tabla 5-4 los métodos de correlación por cuatro puntos y de Muralidharan y Manson, proporcionan las mejores estimaciones para la curva ϵ -N, es decir para un número de ciclos bajos, pero una vez sobrepasado el punto de transición las estimaciones no son tan buenas.

Cuando disponemos del dato de la dureza Brinell HB , podemos añadir los métodos de Roessle y Fatemi y el de Mitchell modificado con dureza. Estos métodos junto con los anteriores han sido evaluados para los materiales de los que se disponía ese dato, un total de 34 aceros de baja aleación. Los resultados de la estimación de las propiedades a fatiga son expuestos a continuación:

Método	Número de aproximaciones		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	9	6	13
Método de las pendientes universales	2	6	2
Método de Mitchell	2	3	2
Método de Ong	1	0	0
Ley Uniforme de Bäümel y Seeger	1	7	2
Método de Muralidharan y Manson	12	4	11
Método de Roessle y Fatemi	7	0	4
Método de las medianas	0	8	0

Tabla 5-5 Comparación de métodos para aceros de baja aleación conociendo HB .

Estimando las propiedades a fatiga con la aplicación desarrollada se ha obtenido que el mejor método para estimar dichas propiedades es el método de la correlación de cuatro puntos de Manson, que ha sido el que más se ha aproximado a los resultados reales en un 37,14% de los casos, mientras que el método de Muralidharan y Manson de las pendientes universales modificadas se ha aproximado en un 31,42% de los casos. Aplicando el método de dureza de Roessle y Fatemi se consiguen buenos resultados para ciclos bajos, y es una buena alternativa para calcular las propiedades a fatiga cuando sólo se conoce el dato de la dureza Brinell. El método de Muralidharan y Manson consigue una buena estimación de la curva ϵ -N, es decir, para estimaciones a un bajo número de ciclos.

Para aleaciones de aluminio, se ha conseguido obtener datos del porcentaje de reducción de área para 17 materiales. Estos materiales han sido evaluados para todos los métodos posibles.

Método	Número de aproximaciones		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0	0	1
Método de las pendientes universales	0	2	0
Método de Ong	1	0	0
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	16	0	16
Método de Muralidharan y Manson	0	3	0
Método de Mitchell modificado	0	6	0
Método de las medianas	0	6	0

Tabla 5-6 Comparación de métodos para aleaciones de aluminio conocido %RA.

A la vista de los resultados obtenidos en la evaluación de las aleaciones de aluminio, se puede observar que la Ley uniforme de material de Bäuml y Seeger es el método que mejor estima las propiedades a fatiga de estos materiales, aproximándose a los valores reales en un 94,11% de los casos evaluados. El método de correlación por cuatro puntos de Manson, se aproxima en el 5,88% restante de los casos. El método de las medianas, hace buenas aproximaciones para un alto número de ciclos junto con el método de Mitchell modificado. Para un bajo número de ciclos, la Ley uniforme de material de Bäuml y Seeger es el que mejor estimaciones realiza.

Debido a los problemas encontrados al acceder a determinadas bases de datos de materiales, no ha sido posible comparar el método de Mitchell modificado con dureza con el resto de métodos ya que se ha obtenido el valor de la dureza Brinell para un número muy pequeño de aleaciones de aluminio.

5.5 Cuantificación del error

A continuación se muestran dos tablas con la media de los errores cometidos en la estimación de las propiedades a fatiga para aceros de baja aleación.

Método	Media del error obtenido		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0,0116	$1,180 \cdot 10^{-4}$	0,0117
Método de Mitchell	0,0228	$2,495 \cdot 10^{-4}$	0,0231
Método de las pendientes universales	0,0181	$1,253 \cdot 10^{-4}$	0,0182
Método de Ong	0,0072	0,0010	0,0082
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	0,0044	$1,584 \cdot 10^{-4}$	0,0045
Método de Muralidharan y Manson	0,0044	$2,043 \cdot 10^{-4}$	0,0046
Método de las medianas	0,0116	$1,344 \cdot 10^{-4}$	0,0117

Tabla 5-7 Media de los errores para aceros de baja aleación conocido %RA

Método	Mediana del error obtenido		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0,0018	$9,257 \cdot 10^{-5}$	0,0019
Método de Mitchell	0,0016	$2,160 \cdot 10^{-4}$	0,0018
Método de las pendientes universales	0,0014	$1,043 \cdot 10^{-4}$	0,0015
Método de Ong	0,0017	0,0035	0,0030
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	0,0017	$9,592 \cdot 10^{-4}$	0,0015
Método de Muralidharan y Manson	0,0013	$1,325 \cdot 10^{-4}$	0,0020
Método de las medianas	0,0116	$1,011 \cdot 10^{-4}$	0,0023

Tabla 5-8 Mediana del error para aceros de baja aleación conocido %RA

En las siguientes tablas se muestran la media y la mediana del error cometido en la aproximación por cada método para aceros de baja aleación incluyendo los métodos que evalúan la dureza Brinell del material.

Método	Media del error obtenido		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0,0139	$1,320 \cdot 10^{-4}$	0,0141
Método de Mitchell	0,0119	$2,199 \cdot 10^{-4}$	0,0121
Método de las pendientes universales	0,0224	$1,425 \cdot 10^{-4}$	0,0225
Método de Ong	0,0086	$9,681 \cdot 10^{-4}$	0,0096
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	0,0050	$1,394 \cdot 10^{-4}$	0,0052
Método de Muralidharan y Manson	0,0051	$1,680 \cdot 10^{-4}$	0,0053
Método de Roessle y Fatemi	0,0444	$5,215 \cdot 10^{-4}$	0,0450
Método de las medianas	0,0142	$1,203 \cdot 10^{-4}$	0,0143
Método de Mitchell modificado con dureza	0,0073	$6,452 \cdot 10^{-4}$	0,008

Tabla 5-9 Medias de los errores para aceros de baja aleación conocido HB.

Método	Mediana del error obtenido		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0,0020	$1,030 \cdot 10^{-4}$	0,0022
Método de Mitchell	0,0046	$1,920 \cdot 10^{-4}$	0,0048
Método de las pendientes universales	0,0023	$1,222 \cdot 10^{-4}$	0,0024
Método de Ong	0,0029	$9,040 \cdot 10^{-4}$	0,0035
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	0,0025	$9,871 \cdot 10^{-4}$	0,0026
Método de Muralidharan y Manson	0,0020	$9,569 \cdot 10^{-4}$	0,0023
Método de Roessle y Fatemi	0,0023	$6,255 \cdot 10^{-4}$	0,0028
Método de las medianas	0,0026	$8,3647 \cdot 10^{-4}$	0,0023
Método de Mitchell modificado con dureza	0,0049	$7,266 \cdot 10^{-4}$	0,0030

Tabla 5-10 Medianas de los errores para aceros de baja aleación conocido HB

En la siguiente tabla se muestra la media del error que se comete en la estimación de las propiedades a fatiga por medio de la aplicación para aleaciones de aluminio.

Método	Media del error obtenido		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0,1996	$2,408 \cdot 10^{-4}$	0,1998
Método de las pendientes universales	0,3159	$2,065 \cdot 10^{-4}$	0,3161
Método de Ong	0,0930	0,0035	0,0965
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	0,0022	$2,471 \cdot 10^{-4}$	0,0024
Método de Muralidharan y Manson	0,0493	$1,298 \cdot 10^{-4}$	0,0494
Método de Mitchell modificado	0,5381	$1,184 \cdot 10^{-4}$	0,5383
Método de las medianas	0,0037	222,27	222,274

Tabla 5-11 Media de los errores para aleaciones de aluminio.

Método	Mediana del error obtenido		
	Ciclos bajos	Ciclos altos	Total
Método de correlación por cuatro puntos	0,1380	$2,011 \cdot 10^{-4}$	0,1385
Método de las pendientes universales	0,2747	$1,563 \cdot 10^{-4}$	0,2750
Método de Ong	0,0613	0,0035	0,0641
Ley Uniforme de Bäuml y Seeger	0,0017	$2,278 \cdot 10^{-4}$	0,0018
Método de Muralidharan y Manson	0,0379	$1,262 \cdot 10^{-4}$	0,0379
Método de Mitchell modificado	0,4589	$1,041 \cdot 10^{-4}$	0,4591
Método de las medianas	0,0026	225,59	225,59

Tabla 5-12 Mediana de los errores para aleaciones de aluminio.

Como podemos observar en las tablas anteriores, en general, los valores de las medias son sensiblemente mayores que los de las medianas, por lo que la distribución presenta un comportamiento muy asimétrico. Para la mayoría de los casos, los errores obtenidos son muy pequeños, pero pocos casos con errores demasiado significativos elevan la media haciendo que ésta pierda representatividad respecto al grueso de las estimaciones. Por otro lado, la mediana de las estimaciones representa una medida más robusta ya que es el dato que ocupa la posición central.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusión

Este Trabajo de Fin de Grado nace de la idea de evitar el gasto de tiempo y de grandes cantidades de dinero en realizar los ensayos pertinentes para comprobar las propiedades a fatiga de los materiales metálicos pudiendo, a partir de ensayos más económicos, estimar dichas propiedades de una manera eficiente.

Se ha conseguido desarrollar un programa destinado a terceros que permite estimar las propiedades a fatiga de ciertos materiales metálicos en función de los métodos más apropiados según la bibliografía. Adicionalmente, se ha hecho un gran esfuerzo en cotejar los datos obtenidos a través de la aplicación con los datos reales de cada material.

La lectura de la memoria revela cómo se ha desarrollado el trabajo. Se han partido de unas nociones muy básicas de Matlab y se ha ido implementando la aplicación secuencialmente y como unidades separadas, para unificarlas todas y dar lugar a la aplicación desarrollada.

Se considera cumplido el objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado, que era el diseño de una aplicación que unificase los principales métodos de estimación de las propiedades a fatiga de los materiales metálicos. Se han cumplido también los siguientes objetivos secundarios:

- Automatización de métodos en función del tipo de material.
- Automatización de métodos en función del tipo de datos disponibles.
- Comparativa propia de los diferentes métodos.

6.2 Líneas futuras

La aplicación desarrollada se puede considerar como la base para el estudio de los diferentes métodos de estimación, por lo que existen numerosas opciones que no han sido implementadas y pueden dar lugar a líneas futuras, citadas a continuación:

- Existe la posibilidad de incluir la estimación de las constantes cíclicas de los diferentes tipos de materiales mediante una serie de métodos de estimación con el fin de poder evaluar las propiedades a fatiga a partir únicamente de unos datos de un ensayo de tensión.
- Existe una fuerte relación entre los datos de los distintos ensayos de dureza. Se podrían incluir las distintas conversiones en la aplicación desarrollada con el fin de que se puedan aplicar los distintos métodos partiendo de otros ensayos diferentes al de dureza Brinell.
- Se podría combinar el presente Trabajo de Fin de Grado con una aplicación de estimación de vida a fatiga tanto para ciclos altos como para ciclos bajos, de forma que a partir de la estimación de las propiedades a fatiga pueda realizar la estimación de la vida a fatiga ofreciendo como resultado el número de ciclos de vida que el componente soportará antes de comenzar una grieta.
- Sería recomendable, si cabe la posibilidad, obtener una base de datos de materiales lo suficientemente extensa para poder extender el análisis comparativo de los distintos métodos a cada uno de los tipos de metales que la aplicación permite estimar

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. L. Norton, Diseño de Máquinas: Un enfoque integrado, Cuarta ed., Pearson Educación, 2011.
- [2] A. Wöhler, Test to determinate the forces acting on railway carriage axles and the capacity of resistance of the axles, vol. 11, Engineering, 1871.
- [3] R. Juvinall, Stress, Strain, and Strength, McGraw-Hill, 1967.
- [4] K.-S. Lee y J.-H. Song, «Estimation methods for strain-life fatigue properties from hardness,» vol. 28, nº 4, 2006.
- [5] O. Basquin, The Exponential Law of Endurance Tests, 2 ed., vol. 10, Proc. ASTM, 1910.
- [6] L. A. de Vedia y H. Svoboda, FATIGA, Ensayos Industriales, 2002.
- [7] W. Rambert y W. Osgood, «Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters,» NACA Tech..
- [8] M. Vieira Campos, «Obtención de la Curva S-N para el acero Inoxidable AISI-304,» Escuela Técnica Superior de Ingenieros.
- [9] S. Manson, A complex subject-some simple approximations., 4 ed., vol. 5, Experimental Mechanics, 1965.
- [10] M. Mitchell, «Fundamentals of modern fatigue analysis for design: Fatigue and Microstructure,» *American Society for Metals*, 1979.
- [11] A. J. Bäuml y S. T., «Materials Data for Cyclic Loading,» *Supplement l'Elsevier Science Publishers*, 1990.
- [12] U. Muralidharan y M. S.S., «A modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristic of metals,» *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 110, nº 55, 1988.
- [13] J. Ong, «An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data,» *International Journal Fatigue*, nº 15, 1993.
- [14] J.-H. Park y J.-H. Song, «Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue

- properties,» vol. 17, nº 5, 1995.
- [15] M. Roessle y A. Fatemi, «A strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations,» *International Journal Fatigue*, nº 22, 2000.
- [16] J.-H. Park y J.-H. Song, «New estimation method of fatigue properties of aluminum alloys,» vol. 14, 2003.
- [17] M. A. Meggiolaro y J. Castro, «Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions,» vol. 26, nº 5, 2004.
- [18] J. Li, Z.-p. Zhang, Q. Sun, C.-w. Li y R.-s. Li, «A Modified Method to Estimate Fatigue Parameters of Wrought Aluminum Alloys,» 2010.
- [19] W.-S. Jeon y J.-H. Song, «An expert system for estimation of fatigue properties of metallic materials,» vol. 24, nº 6, 2002.
- [20] «Total Materia,» Key to Metals AG:, 2016. [En línea]. Available: [www..](http://www.totalmateria.com) [Último acceso: 22 Febrero 2016].
- [21] «eFatigue,» [En línea]. Available: <https://www.efatigue.com>. [Último acceso: 4 Febrero 2016].

ANEXO I: MATERIALES EVALUADOS

$E(MPa)$	σ_u	σ'_f	b	ε'_f	c	K'	n'	%RA	HB	Material
207000	318	629	-0.09	0.15	-0.4	1028	0.24	73	85	S1006_1
207000	319	1253	-0.18	0.94	-0.64	770	0.2	73		S1006_2
200000	414	538	-0.073	0.11	-0.41	490	0.11	64	125	S1006_3
207000	469	517	-0.059	0.3	-0.51	572	0.11	66	125	S1006_4
200000	345	641	-0.109	0.1	-0.39	462	0.12	80	90	S1006_5
207000	359	579	-0.09	0.15	-0.43	490	0.12	73	90	S1006_6
200000	414	538	-0.073	0.11	-0.41	490	0.11	64	125	S1009
203000	331	499	-0.1	0.104	-0.408	867	0.244	80.4		S1010_3
207000	414	827	-0.11	0.95	-0.64	945	0.22	68	80	S1015_1
193000	392	807	-0.1173	0.4043	-0.5255	1007	0.229	55.2	126	S1015_2
207000	414	884	-0.124	0.729	-0.581	945	0.213	68	80	S1015_3
206000	627	965	-0.08	0.425	-0.6	1083	0.137	54		S1018_1
203000	441	1287	-0.15	0.42	-0.51	1287	0.28	62		S1020_1
203000	441	1384	-0.156	0.337	-0.485	1962	0.321	61.8	109	S1020_3
186000	393	697	-0.116	0.136	-0.405	1233	0.286	64	108	S1020_4
200000	441	896	-0.12	0.41	-0.51	772	0.18	62	103	S1022_1
203000	441	1521	-0.17	0.4	-0.5	1460	0.28	62	103	S1022_2
207000	547	1525	-0.15	0.6	-0.52	1254	0.23	63		S1025_1
207000	455	1015	-0.14	0.2	-0.44	1558	0.3	59		S1030_1
206000	454	902	-0.12	0.17	-0.42	1545	0.29	59	128	S1030_2
207000	610	1070	-0.1151	0.528	-0.5473	1207	0.208	55.5		S1038
200000	915	2020	-0.151	0.5131	-0.6306	1762	0.191	59	260	S1045_1
207000	1344	1785	-0.086	1.207	-0.825	1751	0.104	59	390	S1045_6
207000	1956	2636	-0.086	0.21	-0.555	3366	0.157	38.3	500	S1045_8
200000	724	1227	-0.095	1	-0.66	1344	0.18	65		S1045_11
200000	1448	1862	-0.073	0.6	-0.7	2310	0.146	51	410	S1045_13
200000	1344	1586	-0.07	0.45	-0.68	1744	0.17	59	379	S1045_17
200000	1566	1793	-0.07	0.35	-0.67	1972	0.15	55	462	S1045_18
202000	1956	2888	-0.09	0.23	-0.56	4634	0.2	38	500	S1045_19
200000	1829	2275	-0.08	0.25	-0.68	2502	0.12	51	525	S1045_20
205000	672	938	-0.1	0.52	-0.54	1403	0.22	45		S1045_23
203000	751	960	-0.08	0.5	-0.52	1178	0.17	44	225	S1045_30

202000	829	1142	-0.0736	0.4947	-0.5152	1168	0.1304	34.1	220	S1050_1
211000	821	1589	-0.1179	0.614	-0.5077	1987	0.2529	49.6		S1050_2
201000	964	1650	-0.1034	0.848	-0.5821	1528	0.158	16.8	241	S1070_1
207000	659	1745	-0.1167	0.5476	-0.5046	2176	0.247	36.2	280	S1070-2
204000	1349	2364	-0.1	0.51	-0.58	3177	0.21	32	421	S1080_1
206000	1298	1787	-0.09	1	-0.69	2028	0.13	29	391	S1080_3
201000	1432	1916	-0.09	0.26	-0.54	2284	0.16	34	391	S1080_4
212000	1251	2216	-0.1249	1.359	-0.6532	1943	0.1794	13.6	309	S1090_1
219000	1090	1456	-0.0942	0.2766	-0.463	1277	0.202	14	259	S1090_3
213000	1147	2055	-0.117	0.9192	-0.6089	2163	0.2016	20	309	S1090_4
214000	1124	1580	-0.0887	0.4621	-0.5067	1964	0.1903	37.6	272	S1090_5
69000	110	159	-0.092	0.9632	-0.6209	160	0.148	87.6	26	Al_1100_2
69000	510	762	-0.0881	0.5111	-0.7324	670	0.073	25	81	Al_2014_1
69000	510	868	-0.1	0.56	-0.75	689	0.08	25	133	Al_2014_2
69000	510	1008	-0.114	1.418	-0.87	963	0.132	25	255	Al_2014_3
70000	475	978	-0.13	0.26	-0.58	887	0.12	35		Al_2024_1
71000	430	758	-0.1	0.29	-0.65	669	0.11	7	95	Al_2024_4
73000	469	1103	-0.124	0.22	-0.59	655	0.065	25		Al_2024_5
75000	279	768	-0.114	0.293	-0.592	974	0.193	60		Al_5182
69000	400	826	-0.115	1.076	-0.797	817	0.145	34.6	95	Al_5456_1
66000	400	701	-0.1014	0.3906	-0.6502	600	0.084	34.6	56	Al_5456_3
66000	301	571	-0.0957	0.561	-0.746	633	0.128	59		Al_6009_1
74000	226	571	-0.0983	0.924	-0.794	577	0.124	60		Al_6009_2
69000	311	636	-0.1	0.8	-0.76	628	0.12	58		Al_6061_2
72000	335	696	-0.1	0.39	-0.69	452	0.05	20	95	Al_6061_3
73000	275	546	-0.09	0.13	-0.59	412	0.05	21	95	Al_6062_1
71000	579	1317	-0.126	0.19	-0.52	0	0.146	33		Al_7075_5
71000	580	886	-0.076	0.446	-0.759	913	0.088	33		Al_7975_7

Tabla 0-1 Materiales empleados