

Caracterización experimental de los parámetros de vida a fatiga en uniones soldadas de perfiles rectangulares utilizadas en autobuses y autocares

J. Pérez Fernández¹, F. Badea Romero², D. Arribas Mantelli³

¹Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA), Universidad Politécnica de Madrid.
jesus.perez.fernandez@upm.es

¹Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA), Universidad Politécnica de Madrid.
francisco.badea@upm.es

¹Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA), Universidad Politécnica de Madrid.
d.arribas@upm.es

La fatiga es la principal causa de fallo en estructuras de vehículos de grandes dimensiones de transporte de pasajeros (V.G.D.T.P.). Éste fallo se localiza generalmente en zonas cercanas a las uniones soldadas utilizadas para la construcción de estos vehículos. En el diseño de estas estructuras, es muy común la utilización de curvas de fatiga propias del material base, y una posterior aplicación de una serie de factores correctores. Este proceso puede inducir a imprecisiones debidas al carácter genérico de los factores utilizados o al desconocimiento en detalle de las características de nuestra pieza. Por ello, la caracterización de la curva de fatiga de la pieza objeto de estudio es de gran utilidad cuando se desean obtener resultados más precisos.

Para este fin, en el trabajo presentado, fueron construidas y ensayadas un total de 30 uniones soldadas de perfiles rectangulares de forma de 'T', muy utilizadas en las estructuras de V.G.D.T.P. Con los resultados obtenidos se determinaron los parámetros característicos de la curva a fatiga de estas uniones. Finalmente fue realizada una comparativa con las propuestas teóricas más extendidas de curvas S-N con el fin de determinar cuál se adapta mejor a este tipo de uniones.

Los resultados obtenidos en el trabajo presentado permitirán un diseño a fatiga más preciso en estructuras de V.G.D.T.P., o de forma más general, de cualquier estructura que presente esta tipología de unión.

1. Introducción

La fatiga es la principal causa de fallo en estructuras de V.G.D.T.P., ya que éstas están sometidas a cargas variables en el tiempo durante su funcionamiento ordinario. Generalmente, el fallo en estas estructuras se localiza en las uniones soldadas de los perfiles rectangulares que las forman. Es, por tanto, de gran importancia caracterizar y conocer el comportamiento a fatiga de estas uniones soldadas[1].

La caracterización del comportamiento frente a fatiga de cualquier material puede ser abordado desde tres perspectivas diferentes [2]. La primera desarrolla es la curva de Tensión frente a vida en ciclos de carga, conocida como la curva S-N (del inglés Stress-Life), es aún muy utilizada hoy en día, especialmente para fatiga de alto número de ciclos. Con el endurecimiento de las condiciones de trabajo de muchas maquinas y estructuras debidas a los procesos de optimización más comunes en las últimas décadas, fue necesario desarrollarse otro modelo de comportamiento a fatiga que contemplara deformaciones plásticas de forma local en el material, se desarrollo entonces la curva de deformación frente a vida (ϵ -N, del inglés Strain-Life). Ésta curva tiene en cuenta tanto la deformación elástica como la deformación plástica del material por lo que puede ser utilizada en todo el rango de vida a fatiga del material, es la que será aproximada en el presente trabajo. Finalmente, existe un último enfoque llamado mecánica de fractura caracteriza la grieta y su avance en la vida del material.

La realización de ensayos de fatiga son generalmente costosos en medios y en tiempo. Por lo que se han concentrado muchos esfuerzos por diferentes autores con el fin de caracterizar la curva de vida a fatiga del material en función de las propiedades del mismo [3]. Para posteriormente aplicarle una nueva serie de aproximaciones y poder así adaptar el comportamiento del material a la pieza en concreto en la que se está trabajando. Estos parámetros tienen en cuenta la forma, tamaño acabado superficial, o condiciones de trabajo de

la pieza en concreto [4]. La utilización de tantos factores y aproximaciones posee el principal inconveniente de la acumulación de incertidumbres en la aplicación de los mismos, además, estos factores se aplican a piezas de diversa naturaleza, por lo que tienen un carácter genérico, siendo difícil en muchas ocasiones evaluar en detalle las características de nuestra pieza.

Con el fin de obtener unos resultados lo más precisos de la vida a fatiga de las uniones soldadas en estructuras de V.G.D.T.P. y evitar la aplicación de aproximaciones, en el trabajo presentado se llevó cabo la construcción y ensayo de 30 uniones soldadas típicas en estas estructuras. Cada ensayo realizado constaba de dos partes diferenciadas. Por un lado se realizó la medición de la deformación máxima del material en la unión, utilizando para ello un equipo de correlación digital de imágenes (CDI) [5]. Por otro lado, se sometió la unión a cargas variables de fatiga hasta su rotura, registrando los ciclos de vida de la misma. De esta forma, de cada ensayo se obtuvo un punto en de la curva ε -N.

Tras la realización de todos los ensayos de fatiga fue posible la construcción de la curva, de la cual fueron extraídos los parámetros característicos que la componen. Finalmente, se llevó a cabo una evaluación de una serie de aproximaciones facilitadas por diferentes autores. Fueron evaluados los métodos de 'Pendiente Universal' [6], 'Pendiente Universal modificada' [7] y de 'Material Uniforme'[8] .

Los parámetros aportados de este trabajo aportan un conocimiento más preciso del comportamiento a fatiga en uniones soldadas de uniones rectangulares de aceros estructurales de gran utilidad en el diseño de estructuras de V.G.D.T.P., así como a nivel mas general de estructuras construidas con este tipo de perfiles que estén sometidas a cargas cíclicas en su funcionamiento.

2. Base teórica y parámetros de la curva ε -N

Cuando un material es sometido a deformación por encima de su límite de proporcionalidad (σ_p) este tendrá una deformación total que será suma de la componente elástica, y la componente plástica, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \quad (1)$$

Donde ε es la deformación total, ε_e es la deformación elástica, ε_p es la deformación plástica, σ es la tensión correspondiente a esta deformación y E es el modulo de Young del material. Se deduce de esta expresión, que para poder conocer las partes correspondiente a de deformación plástica y deformación elástica ante una deformación total dada, es necesario tener curva de tensión frente a deformación del material. El material con el que fueron construidas y soldadas las uniones soldadas fue ensayado obteniéndose dicha curva, la siguiente tabla muestra las principales características mecánicas del material. Cabe destacar que aunque en ocasiones las propiedades de los materiales pueden variar significativamente ante cargas cíclicas con respecto a cartas monótonas, en el caso de aceros dúctiles como es nuestro caso, esta variación es normalmente pequeña, por lo que las propiedades obtenidas en ensayos de tracción suponen una buena aproximación al comportamiento del material ante cargas cíclicas.

Tabla 1: Características del material objeto de estudio.

σ_v (MPa)	σ_{ut} (MPa)	ε_v (%)	E (GPa)	K (MPa)	n	ε_f (%)
298	430	0.34	202	642	0.14	38

Por otro lado, la curva de de deformación frente a vida, es entendida como una suma del daño aportado por la deformación elástica, y el aportado por la deformación plástica. La caracterización de la componente elástica frente a vida, se puede deducirse directamente de la equitación de Tensión-vida propuesta por Basquin:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma &= \sigma_f (2N_f)^b \\ \Delta\varepsilon_e &= \frac{\sigma}{E} \end{aligned} \right| \rightarrow \Delta\varepsilon_e = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b \quad (2)$$

Donde σ_f es el coeficiente de resistencia a fatiga, y b es el exponente de resistencia a fatiga. Por otro lado, Coffin y Manson propusieron la siguiente relación entre deformación plástica y vida a fatiga:

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (3)$$

Donde ε_f es el coeficiente de ductilidad, y c es el exponente de ductilidad. Sumando las expresiones (2) y (3) obtenemos la curva de deformación total frente a vida (ε -N):

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (4)$$

En la siguiente figura se muestra de forma gráfica la ecuación (4), donde también se muestra la interpretación gráfica de cada uno de los parámetros que componen la curva:

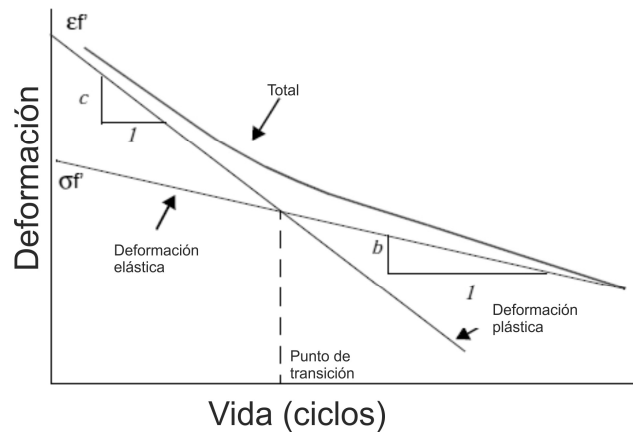


Figura 1: Gráfica de la curva ε -N.

De acuerdo con lo desarrollado en este apartado, los parámetros a determinar para caracterizar completamente la curva de deformación frente a vida de uniones soldadas de V.G.D.T.P. son el coeficiente de resistencia a fatiga (σ_f), es el exponente de resistencia a fatiga (b), el coeficiente de ductilidad (ε_f) y el exponente de ductilidad (c).

3. Ensayos de fatiga

3.1. Descripción de los ensayos

Para la caracterización de la curva fueron fabricadas y ensayadas un total de 30 uniones soldadas. Tanto el material utilizado (S275J) como las dimensiones de los perfiles soldados (60x40x3mm), son muy comúnmente utilizados en la construcción de estructuras de V.G.D.T.P. Las uniones fueron fabricadas en dos configuraciones diferentes, las cuales se pueden ver en la Figura 2, donde se muestran además las dimensiones de las mismas.

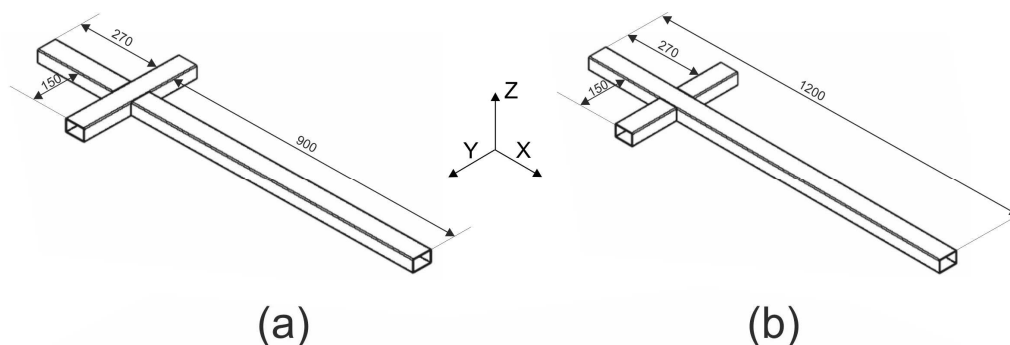


Figura 2: Uniones soldadas fabricadas.

Los ensayos fueron llevados a cabo mediante un cilindro hidráulico capaz de aplicar ciclos de carga a una frecuencia y con una amplitud controladas. La instalación de las uniones soldadas en la bancada de ensayos y su anclaje al cilindro hidráulico se muestran en la siguiente Figura 3. Tal y como se puede apreciar, el cilindro hidráulico genera un estado de carga de flexión en la unión en su recorrido hacia arriba y hacia abajo. El punto de aplicación de la carga fue situado en el voladizo de mayor longitud a una distancia de la cara más cercana de la unión de 840mm.

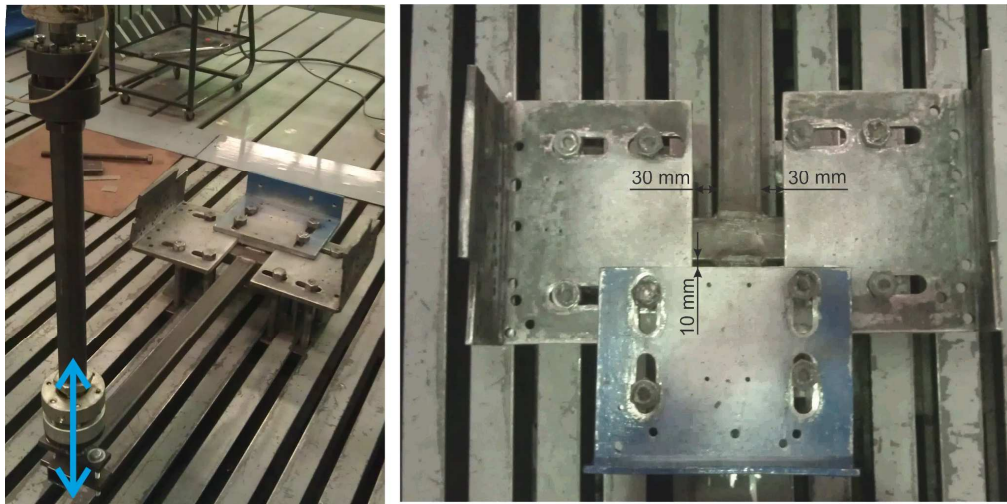


Figura 3: Instalación de las uniones para su ensayo.

3.2. Obtención de la deformación máxima de la unión

Debido a las características geométricas de ambas tipologías de unión soldada y de la configuración del ensayo, la deformación máxima estará localizada en la base del cordón de soldadura de cualquiera de las 4 esquinas de la cara más cercana a la aplicación de la carga. Para la medición de estas deformaciones máximas fue utilizado un equipo de correlación digital de imágenes (CDI). Debido a la imposibilidad de medir las 4 esquinas con una misma configuración de ensayo, fue elegida al azar una de las esquinas para su caracterización. En la siguiente figura se muestra la instalación del equipo CDI así como los mapas de deformación obtenidos para una unión de cada tipología a modo de ejemplo.

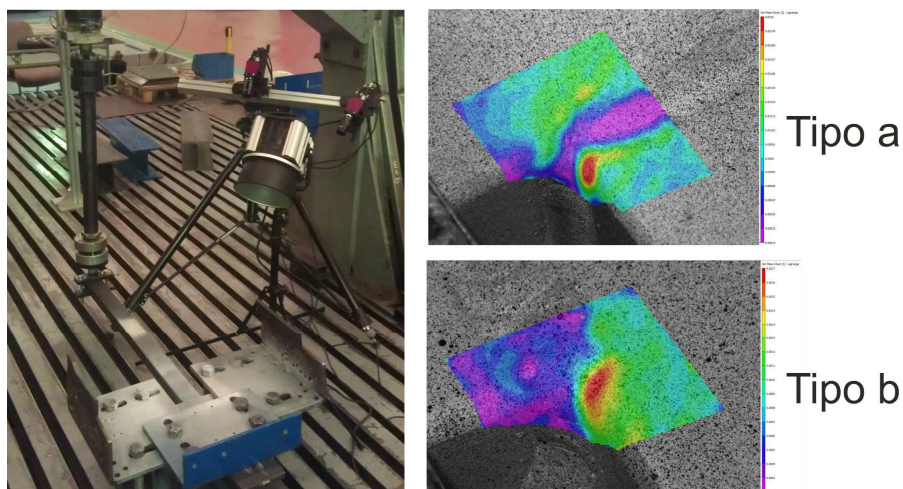


Figura 4: Instalación de las uniones para su ensayo.

3.3. Resultados de ensayos

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del comportamiento a fatiga de cada una de las uniones ensayadas. Se observa la usencia de resultado en alguna de las probetas ensayadas debido a que los resultados no fueron satisfactorios y fueron descartados del estudio. Cabe destacar que estos ensayos son prolongados en el tiempo llegando a duras hasta una semana en ocasiones, por lo que conseguir condiciones estables en este tiempo prolongado se presenta como una tarea complicada. Inestabilidades durante el ensayo como deslizamientos del empotramiento, del anclaje al cilindro hidráulico, etc. pueden desviar las condiciones de ensayo arruinando la validez del mismo. Se observa también como el rango de ciclos de vida cubierto en los ensayos va desde algo menos de $5e^4$ ciclos hasta $1.6e^6$, suficientemente amplio para el fin del estudio. Asimismo vemos como existen menos uniones de tipo B que de tipo A, aunque el numero será suficiente para la evaluación de posibles diferencias significativas en los resultados.

Tabla 2: Resultados de los ensayos de fatiga.

Unión No.	Tipología	$\Delta\varepsilon_t$ (%)	$\Delta\varepsilon_e$ (%)	$\Delta\varepsilon_p$ (%)	Ciclos (N)
1	A	---	---	---	---
2	A	---	---	---	---
3	A	0.165	0.130	0.035	70000
4	A	0.155	0.126	0.029	160000
5	A	0.146	0.121	0.025	455000
6	A	0.146	0.121	0.025	1682000
7	A	0.146	0.121	0.025	263000
8	A	---	---	---	---
9	A	0.155	0.126	0.029	320000
10	A	---	---	---	---
11	A	0.146	0.121	0.025	400000
12	A	0.146	0.121	0.025	181000
13	A	0.151	0.124	0.029	290000
14	A	0.151	0.124	0.029	168000
15	A	0.122	0.110	0.011	430000
16	B	0.171	0.132	0.039	185000
17	A	0.188	0.139	0.049	49000
18	A	0.188	0.139	0.049	51000
19	B	0.219	0.148	0.071	43000
20	B	0.171	0.132	0.049	250000
21	B	0.171	0.132	0.049	105000
22	B	0.131	0.114	0.017	795000
23	A	0.136	0.116	0.020	185000
24	A	---	---	---	---
25	A	0.136	0.116	0.020	116000
26	B	0.131	0.114	0.017	630000
27	A	0.121	0.110	0.011	590000
28	A	0.114	0.103	0.011	655000
29	B	0.171	0.132	0.039	91000
30	B	0.123	0.111	0.012	780000

Con los resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo es posible proceder al cálculo de cada uno de los parámetros que componen la curva de deformación frente a vida de las uniones.

4. Cálculo de los parámetros de la curva ε -N

Con el fin de calcular cada uno de los cuatro parámetros que conforman la curva ε -N, y de acuerdo con las expresiones presentadas en el apartado 2, se realizarán por separado regresiones de la forma de la ecuación (5) para la deformación plástica y para la deformación elástica obtenidas en los ensayos.

$$Y = aX^b \quad (5)$$

Siendo, en el caso de la deformación elástica:

- a = coeficiente de resistencia a fatiga (σ_f).
- b = exponente de resistencia a fatiga (b).

Y para el caso de la deformación plástica:

- a = coeficiente de ductilidad (ε_f).
- b = exponente de ductilidad (c).

En la Tabla 3 muestra los valores obtenidos para estos parámetros. Sustituyendo los mismos en la ecuación (4), la expresión final de la curva ε -N de uniones soldadas de perfiles rectangulares queda según la expresión (6).

Tabla 3: Parámetros de la curva a fatiga.

σ_f/E (%)	b	ε_f (%)	c
0.31	-0.071	34.2	-0.57

$$\Delta\varepsilon_i = 0.0031(2N_f)^{-0.071} + 0.285(2N_f)^{-0.36} \quad (6)$$

Como cabe esperar, ambas pendientes (b y c) son negativas, siendo más pronunciada la pendiente correspondiente a la deformación plástica (-0.071 frente a -0.36), lo que provocará que a altos ciclos de vida la deformación plástica será muy inferior a la deformación elástica. El intercepto (σ_f y ε_f), es muy superior en la deformación plástica que en la elástica (0.31 frente a 34.2), por lo que para bajos ciclos de vida, la curva de deformación plástica dominará el comportamiento a fatiga de la unión.

Los resultados de las regresiones, así como la ecuación final obtenida, están representadas en la Figura 5 sobre los valores de deformación obtenidos en los ensayos. Observamos como efectivamente la influencia de la deformación plástica es cada vez menor a medida que la vida a fatiga de la unión aumenta. El punto de transición está situado apenas a unas pocas miles inversiones del material antes de su fallo.

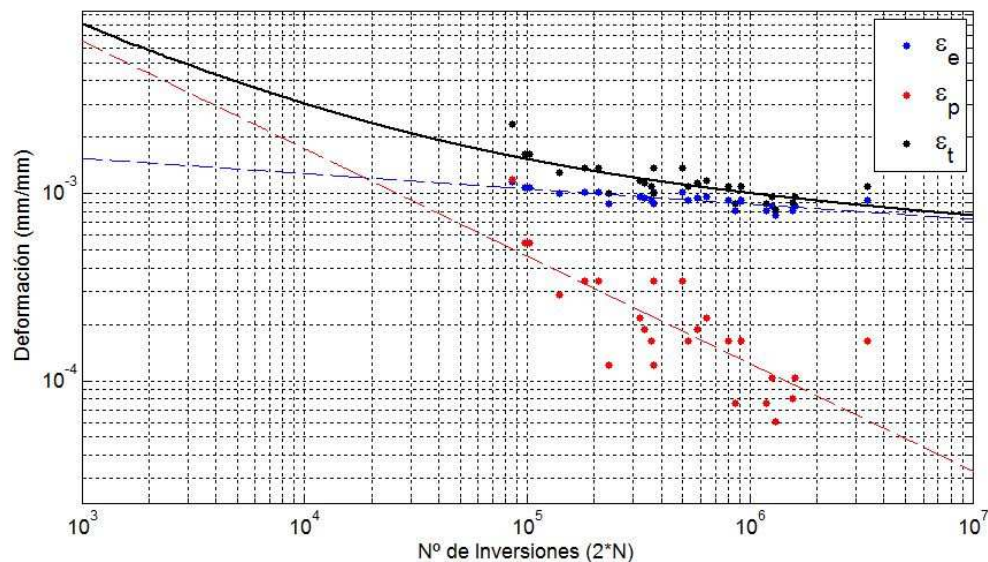


Figura 5: Curva ε -N obtenida experimentalmente.

La curva obtenida es para una esperanza de supervivencia del 50%, y la dispersión de los ensayos tiene una desviación estándar de $\varepsilon_{std} = 0.00014$ (mm/mm), este valor es de gran utilidad cuando se desea calcular una curva de carácter más conservativo, siendo habitual para esperanzas de supervivencia del 90% o del 95%.

5. Evaluación de diferentes modelos teóricos de cálculo de curvas ε -N

Los resultados obtenidos experimentalmente fueron comparados con 3 modelos analíticos propuestos por diferentes autores, la tabla 4 recoge las expresiones para calcular cada uno de los parámetros de la curva ε -N a partir de las propiedades mecánicas del material. Observamos que la Regla de Material Uniforme calcula ε_f utilizando el factor de ductilidad (α), que es igual a la unidad para un material de nuestras características.

Tabla 4: Parámetros de la curva a fatiga.

Parámetro	Pendientes Universales	Pendientes Universales Modificado	Regla de Material Uniforme
σ_f	$1.5 \sigma_{ut}$	$(0.623(\sigma_{ut}/E)^{0.823})E$	$1.5 \sigma_{ut}$
b	-0.12	-0.09	-0.087
ε_f	$0.76 \varepsilon_f^{0.6}$	$0.0196\varepsilon_f 0.155 (\sigma_{ut}/E)^{-0.53}$	0.59α
c	-0.6	-0.56	-0.58

Calculando cada uno de los parámetros según las aproximaciones de la tabla 4 y sustituyéndolos en la ecuación (4), es posible construir la expresión de las curvas ε -N para cada uno de los métodos presentados:

$$\begin{aligned}
 \text{Pendientes universales:} \quad & \Delta\varepsilon_i = 0.0031(2N_f)^{-0.12} + 0.42(2N_f)^{-0.6} \\
 \text{Pendientes universales modif.:} \quad & \Delta\varepsilon_i = 0.0038(2N_f)^{-0.09} + 0.44(2N_f)^{-0.56} \\
 \text{Material uniforme:} \quad & \Delta\varepsilon_i = 0.0031(2N_f)^{-0.087} + 0.59(2N_f)^{-0.58}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Para una mejor comparación entre los diferentes métodos con los resultados experimentales procedemos a representar todas las curvas ε -N obtenidas en un mismo gráfico (Figura 6). Se observa en esta gráfica que tanto

el método de Pendientes Universales Modificado, como el de Material Uniforme presentan unos resultados poco conservadores, especialmente para fatiga de bajos ciclos, para altos ciclos presentan una buena correlación aunque aún de carácter poco conservador. El método de Pendientes universales, en cambio, presenta unos resultados conservadores en relación a los ensayos, ajustándose con una mínima desviación a la curva de los ensayos, para una esperanza de supervivencia de la unión del 90%.

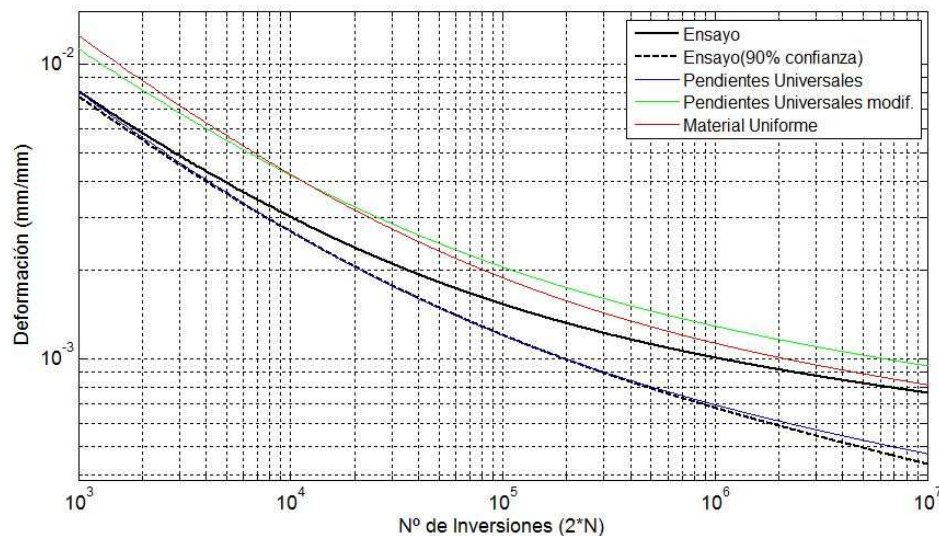


Figura 6: Curva ε -N obtenida experimentalmente.

6. Conclusiones

En el trabajo aquí presentado se ha llevado a cabo la construcción de una curva de deformación frente a vida basada en ensayos, capaz de caracterizar el comportamiento frente a la fatiga de uniones soldadas de perfiles rectangulares para aceros estructurales; que son el tipo de unión utilizada para la construcción de estructuras de V.G.D.T.P.

Se observa en la curva ε -N obtenida como la influencia de la deformación plástica del material es mayor para bajos ciclos de vida, pero realmente pequeña para ciclos altos. El punto de transición se encuentra alrededor de 18000 inversiones (9000 ciclos). Por lo tanto, cualquier sollicitación ante la cual la vida a fatiga sea superior a este valor, vendrá dominado por la deformación plástica del material.

Debido a las características de la curva ε -N, esta no ofrece un límite de fatiga diferenciado, ya que en ningún momento adopta un valor constante. No obstante, en la industria de la automoción es práctica común considerar este límite como la deformación para una vida de $2e^6$ ciclos. De acuerdo a la curva obtenida, la deformación que corresponde a este límite de fatiga es $\varepsilon_e=0.092\%$. Este valor es muy cercano al límite de proporcionalidad del material ($\varepsilon_p \approx 0.1\%$), por debajo del cual la deformación del mismo es completamente elástica.

De entre las expresiones analíticas comparadas, la de las Pendientes Universales Modificada y la de Material Uniforme son de carácter no conservador, mientras que las de las Pendiente Universales presenta unos resultados conservadores con respecto a la curva obtenida experimentalmente. Analizando los parámetros de estas curvas, se observa una buena correlación en todos ellos, con excepción del exponente de ductilidad (c), que es sustancialmente menor en los resultados de ensayos. Es posible que esta diferencia derive de la imposibilidad de las expresiones simplificadas de tener en cuenta la pérdida de ductilidad sufrida por el material afectado térmicamente por la soldadura.

La expresión obtenida para la curva ε -N consigue eliminar fuentes de error venidas de la aplicación de factores correctores diseñados para adaptar ensayos de fatiga genéricos a piezas o conjuntos con características específicas. Posibilitando la obtención de unos resultados de mayor precisión del comportamiento a fatiga de uniones soldadas en estructuras de V.G.D.T.P., y simplificando el proceso para el cálculo de esta curva. Todo esto convierta a la expresión aquí presentada en una herramienta de gran utilidad en el proceso de diseño y optimización de estructuras de V.G.D.T.P.

7. Referencias

- [1] J. A. Pérez, E. Alcalá, A. Martín. Elaboración y validación de modelos FEM de uniones soldadas mediante correlación digital de imágenes, La plata, Argentina, (2013).
- [2] J. A. Bannantine et al. Fundamentals of metal fatigue analysis, Ed. Prentice Hall, 1989. ISBN: 9780133401912.
- [3] M. L. Roessle, A. Fatemi. Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations. *International Journal of Fatigue* 22, (2000), 495-511.
- [4] R. Avilés. análisis de fatiga en Máquinas. Ed. Paraninfo, 2005. ISBN: 9788497323444.
- [5] M. A. Sutton, J. J. Orteu, H. W. Shereier. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Ed .Springer, 2009. ISBN: 9780387787466.
- [6] S. S. Manson. Fatigue: a Complex Subject—Some Simple Approximations. *Experimental Mechanics. Journal of the Society for Experiemntal Stress Analysis*, 5:7, (1965), 193-226.
- [7] U. Muralidharan, S. S. Manson. Modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristics. *Journal of Engineering Materials and Technology—Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 55:8, (1988).
- [8] J. A. Bäuml, T. Seeger. *Materials Data for Cyclic Loading, Supplement I*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990.