

ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DEL LÍMITE INFERIOR DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN ACEROS FERRÍTICOS EN LA TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

Diego Omar Alias, Comisión Nacional de Energía Atómica - Instituto Sábato - Universidad de San Martín, dalias@cnea.gov.ar

Juan Elías Perez Ipiña, CONICET - Grupo Mecánica de Fractura, Universidad Nacional del Comahue, juan.perezipina@fain.uncoma.edu.ar

Carlos Berejnoi, Universidad de Salta, Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, berejnoi@unsa.edu.ar

Resumen— Los resultados de tenacidad a la fractura de aceros ferríticos en la zona de transición dúctil-frágil presentan una gran dispersión, y pueden ser ajustados usando una distribución de Weibull de tres parámetros ($3P-W$). La Norma ASTM E1921 establece a los parámetros de forma y umbral como fijos, iguales a 4 y a 20 MPa.m^{1/2}, respectivamente. Si bien las estimaciones del parámetro de escala, tomando la Norma ASTM o la distribución $3P-W$, resultan similares en cuanto a la convergencia en función del tamaño de la muestra, al igual que la bondad de ajuste de las distribuciones, el valor del límite inferior de la tenacidad a la fractura (Lower Bound, LB) por debajo de la cual no ocurrirá la falla (definida por una probabilidad mínima de 3%) no coincide en todos los casos. En este trabajo se analiza la conveniencia de trabajar con la distribución propuesta por la Norma o con la distribución $3P-W$ estimando los tres parámetros.

Palabras clave— *transición dúctil-frágil, Weibull, Lower Bound.*

1. Introducción

El estudio del comportamiento de los aceros estructurales en el intervalo de temperaturas denominado transición dúctil-frágil ha sido objeto de un gran número de trabajos. Los ensayos de tenacidad a la fractura de aceros ferríticos realizados en esta zona presentan gran dispersión y efectos de tamaño de probeta.

En 1980, Landes y Shaffer [1] propusieron una distribución de Weibull de 2 parámetros para ajustar la dispersión experimental, mientras que en 1982 el propio Landes [2], junto a McCabe, propuso la distribución de Weibull de tres parámetros ($3P-W$) al agregar el parámetro umbral (Ec. 1).

$$P = 1 - \exp \left(- \left(\frac{K - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}} \right)^b \right) \quad (1)$$

En la Ec. (1), K_{\min} es el parámetro umbral, $K_0 - K_{\min}$ es el parámetro de escala y b es el parámetro de forma. El valor de P es la probabilidad acumulada de falla, correspondiendo a la probabilidad de que el material falle a un valor de tenacidad menor o igual a K . Los parámetros de la distribución de Weibull pueden ser estimados por diferentes métodos, entre ellos los de regresión lineal (RL) y de máxima verosimilitud (MV).

La Curva Maestra establecida en la Norma ASTM E 1921 [3], en inglés Master Curve (MC), se utiliza actualmente para describir el comportamiento de la fractura en la transición dúctil-frágil. La MC se basa en la propuesta de Wallin [4, 5], en la que establece que los valores de tenacidad siguen una distribución $3P-W$ con dos de sus parámetros predefinidos como constantes (Ec. (2)).

$$P = 1 - \exp \left(- \left(\frac{K - 20}{K_0 - 20} \right)^4 \right) \quad (2)$$

Las propuestas anteriores están basadas en la distribución de Weibull, estadística que en principio permitiría explicar el efecto de espesor en la tenacidad a la fractura. Si bien se podrían usar otras distribuciones para ajustar los datos experimentales [6], en este trabajo se utilizan solamente las definidas en las Ecs. (1) y (2).

La dispersión arriba mencionada, comúnmente observada en ensayos de uniones soldadas y aceros ferríticos en la zona de transición dúctil-frágil, involucra la existencia de un límite inferior del valor de tenacidad (*Lower Bound, LB*), el cual fue propuesto como independiente del espesor de la probeta, dependiendo solamente del material y de la temperatura de ensayo [2].

Desde un punto de vista tecnológico sería muy conveniente determinar un único valor de tenacidad a la fractura, para caracterizar la tenacidad de un material a una dada temperatura. Obviamente esto debería estar relacionado al valor de tenacidad mínima LB .

Debido a que es posible ajustar los datos de muestras con distribuciones de Weibull con diferentes valores de los parámetros (Ec. (1) y (2)), el valor LB debería definirse para un nivel de probabilidad de falla determinado, por ejemplo 3%. Este valor, identificado como $LB_{3\%}$, surge de las Ecs. (3) y (4), ambas obtenidas considerando $P=0,03$ en las ecuaciones (1) y (2), respectivamente. La Ec. (4) corresponde al $LB_{3\%}$ considerando la propuesta de parámetros fijos de Wallin (MC).

$$LB_{3\%} = \left(\ln \left(\frac{1}{0.97} \right) \right)^{\frac{1}{b}} (K_0 - K_{\min}) + K_{\min} \quad (3)$$

$$LB_{3\%}(MC) = \left(\ln \left(\frac{1}{0.97} \right) \right)^{\frac{1}{4}} (K_0 - 20) + 20 \quad (4)$$

En este trabajo se analiza la conveniencia de trabajar con la distribución $3P-W$ estimando los tres parámetros (Ecuación (3)) o con la distribución propuesta por la Norma (Ecuación (4)).

2. Materiales y Métodos

Se generaron datos a partir de los parámetros de distribuciones $3P-W$ de resultados experimentales de un Round Robin (coordinado por ESIS [7]) de ensayos de tenacidad de un material de acero de recipiente de presión para un reactor nuclear en la transición dúctil-frágil. Estos parámetros se estimaron utilizando máxima verosimilitud. En la Tabla 1 se presentan los parámetros estimados de los conjuntos de datos seleccionados del Round Robin [7]. También se incluye la cantidad de valores censurados, de acuerdo con el criterio establecido en la norma ASTM E1921 [3]. Es posible que, cuando estén presentes algunos valores censurados, el conjunto completo no se ajuste a una distribución $3P-W$. Teniendo esto en cuenta, se eligieron los conjuntos con un número mínimo de valores censurados para generar nuevas muestras simuladas.

Tabla 1. Juegos de valores usados en la generación de datos.

Set	T(°C)	Espesor (mm)	Censurados	K_{min} (MPa√m)	K_0 (Mpa√m)	b
1	-154	50,00	0 de 30	29,46	37,78	1,35
2	-110	12,50	0 de 55	33,42	87,65	3,00
3	-91	12,50	0 de 31	45,22	121,88	2,99
4	-60	12,50	2 de 31	80,63	159,47	2,04
5	-20	100,00	0 de 15	129,96	208,18	3,57

Fuente: elaboración propia

Para cada conjunto de datos detallado en la Tabla 1, se utilizó el método de Monte Carlo para generar nuevos juegos de datos que se ajustan a una distribución Weibull de tres parámetros. Estos juegos tienen diferentes números de elementos (n), es decir, tienen un tamaño de muestra diferente: 5, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50 y 60, teniendo cada muestra 3000 valores.

De esta manera, para cada juego se pueden estimar los parámetros de la distribución $3P-W$ (Ecs. (1) y (2)), para luego calcular los valores medios de $LB_{3\%}$ y $LB_{3\%}(MC)$ dados según Ecs. (3) y (4). Los parámetros de la Ec. (1) fueron estimados usando los métodos de máxima verosimilitud y regresión lineal.

Una vez calculados los valores medios de los LB , se los graficó en función del número n de elementos de cada juego. En cada gráfico también se incluyó el valor teórico de $LB_{3\%}$, obtenidos usando la Ec. (3) con los valores K_{min} , K_0 y b de Tabla 1.

También, para cada juego generado a partir de los datos de Tabla 1, se utilizaron los gráficos conocidos como box plots, para observar de una manera intuitiva la forma de la dispersión presente en los valores LB obtenidos. Estos gráficos presentan la dispersión a través de la representación de los valores intercuartiles: se grafican los intercuartiles 1 (acumula 25% de los datos), 2 (mediana) y 3 (acumula el 75 % de los datos). También, en estos gráficos, se presentan los valores atípicos.

3. Resultados y Discusión

En las Figuras 1 a 5 se presentan los valores $LB_{3\%}$ medios para cada juego de n resultados. Se diferencian las estimaciones de LB realizadas a partir de los parámetros estimados usando máxima verosimilitud (MV) y regresión lineal (RL), a partir de la Ec. 3, y los LB de Ec.4 (identificados como MC).

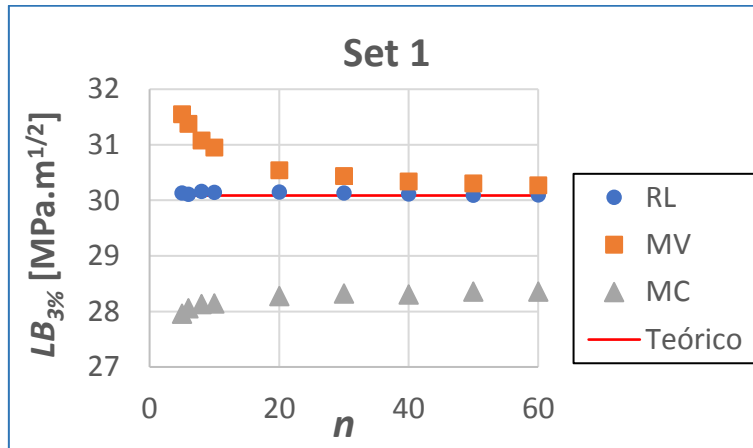


Figura 1. $LB_{3\%}$ medios, juegos generados a partir del Set 1. $K_{min}=29,46 - K_0=37,78 - b=1,35$.
Fuente: elaboración propia

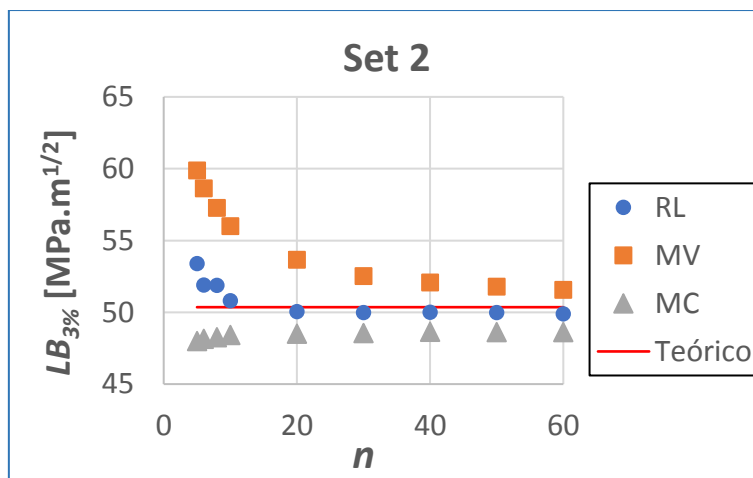


Figura 2. $LB_{3\%}$ medios, juegos generados a partir del Set 2. $K_{min}=33,42 - K_0=87,65 - b=3$.
Fuente: elaboración propia

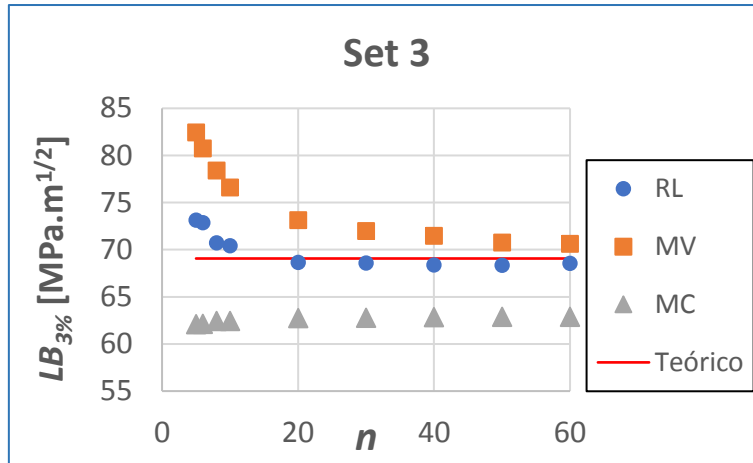


Figura 3. $LB_{3\%}$ medios, juegos generados a partir del Set 3. $K_{min}=45,22 - K_0=121,88 - b=2,99$.
Fuente: elaboración propia

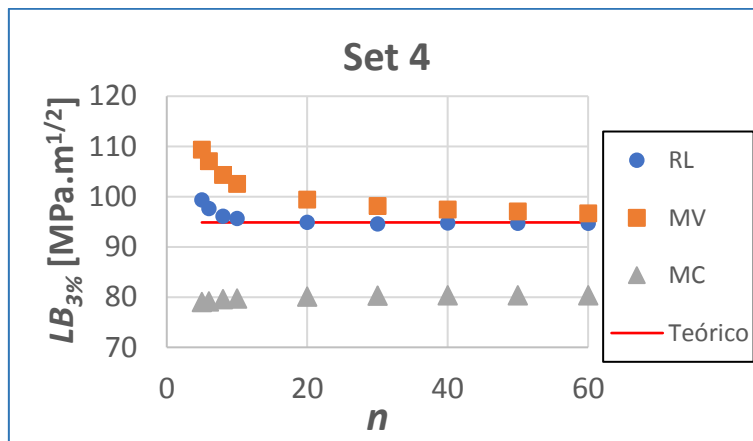


Figura 4. $LB_{3\%}$ medios, juegos generados a partir del Set 4 – $K_{min}=80,63 - K_0=159,47 - b=2,04$.
Fuente: elaboración propia

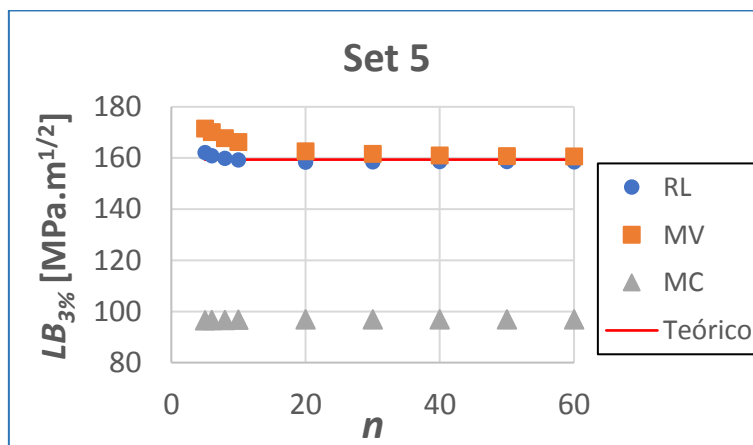


Figura 5. $LB_{3\%}$ medios, juegos generados a partir del Set 3. $K_{min}=45,22 - K_0=121,88 - b=2,99$.
Fuente: elaboración propia

Se observó que, en la mayoría de los casos, la estimación del $LB_{3\%}$ medio usando MV tiende a permanecer constante a partir de alrededor de 20 datos, para RL ese comportamiento es a partir de los 10 datos, y para MC el $LB_{3\%}$ medio casi no varía desde $n=6$, reforzando la idea de que una distribución de Weibull con parámetros fijos lleva asociado un número pequeño de ensayos para buenas estimaciones.

Las estimaciones de $LB_{3\%}$ usando la distribución con parámetros fijos (MC) es siempre conservativa, lo que en principio es bueno, pero puede ser muy conservativa (Figura 5) pasando a ser no conveniente.

En las Figuras 1 a 5 no se presenta la dispersión de resultados para los 3000 valores de LB obtenidos para cada n , ni tampoco la asimetría que se presenta respecto a la media. Es así que se decidió graficar los valores de $LB_{3\%}$ obtenidos por cada método utilizando box plots. La Figura 6 muestra los boxplot de todas las estimaciones (según regresión lineal, máxima verosimilitud y con parámetros fijos) para los juegos generados a partir del Set 4.

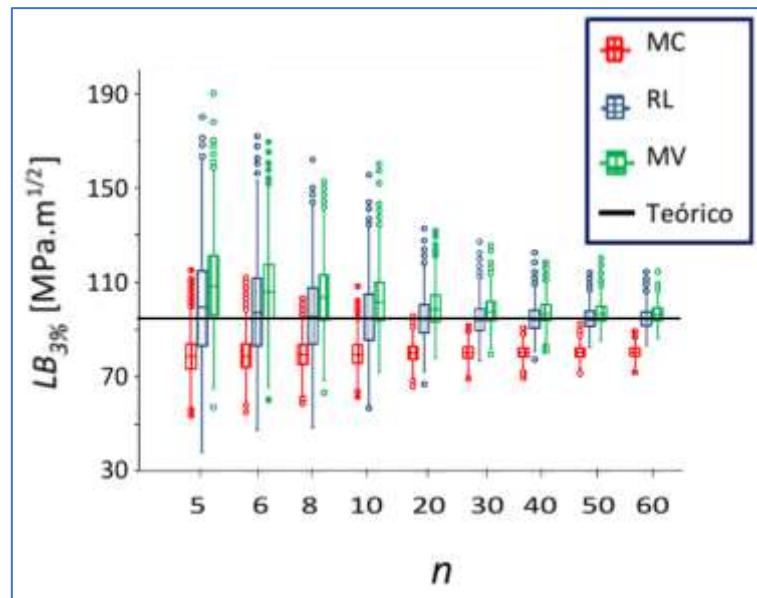


Figura 6. Boxplots para el Set 4. $K_{min}=80,63 - K_0=159,47 - b=2,04$.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 6 se puede observar que la variación de la mediana, de las estimaciones obtenidas en todos los métodos, en función del tamaño de muestra n es similar a la variación de la media. Sin embargo, se observa que las distribuciones para cada n no son simétricas, es decir, la distribución de los valores alrededor de la mediana es asimétrica. También, existe una gran dispersión de valores, sobre todo para los métodos de MV y RL , no así para la distribución con parámetros fijos. Las distancias intercuartiles en los casos de distribución de $3P-W$ de parámetros libres son superiores a las distancias para la distribución $3P-W$ de parámetros fijos.

Por lo mencionado anteriormente, parece ser conveniente el uso de una distribución $3P-W$ con parámetros fijos, ya que seis probetas serían suficientes para una estimación aceptable de un *lower bound* tecnológico. Sin embargo, no hay que perder de vista que una estimación muy conservativa del valor *lower bound* puede ser económicamente

inconveniente. Estas estimaciones conservativas se dieron en el Set 5, con datos generados a partir de parámetros correspondientes a altas temperaturas con espesores grandes, por lo que la ubicación de los juegos de datos respecto de las zonas de transición [8] deberían ser estudiadas en mayor detalle.

4. Conclusiones y recomendaciones

El análisis realizado indicaría que el uso de la distribución $3P-W$ con parámetros fijos, en la estimación de valores de tenacidad a la fractura *lower bound*, en la zona de transición dúctil frágil, resulta beneficioso por el escaso número de ensayos que se necesitarían para estimar valores confiables. Sin embargo, la presencia en algunos juegos de datos, de valores muy conservativos indica la necesidad de profundizar este análisis, para tener en cuenta la zona de trabajo respecto a las diferentes subzonas en la transición dúctil frágil, dependientes éstas del espesor y de la temperatura.

5. Referencias

- [1] LANDES, J.D.; SHAFFER, D.E. (1980). Statistical Characterization of Fracture in the Transition Region. *Fracture Mechanics*, 12th Conference, ASTM STP 700, p.368-382.
- [2] LANDES, J.D.; McCABE, D.E. (1982). Effect of Section Size on Transition Behavior of Structural Steels. *Scientific paper 81-1D7-Metal-P2*, Westinghouse R&D Center.
- [3] ASTM E1921-18 (2018), Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [4] WALLIN, K. (1984). The scatter in KIC-results, *Engineering Fracture Mechanics*, v.19, n.6, p.1085–1093. doi:10.1016/0013-7944(84)90153-X.
- [5] WALLIN, K. (2011). *Fracture Toughness of Engineering Materials: Estimation and Application*, EMAS Publishing, United Kingdom. 543p.
- [6] BEREJNOI, C.; VACCA, S.; GALARZA, C; PEREZ IPIÑA, J.E. (2016). Estimation of the fracture toughness threshold of a ferritic steel at the lower ductile to brittle transition region. *Materials Research*, Brasil, v.19, n.5, p.1102-1107.
- [7] HEERENS, J.; HELLMANN, D. (2002). Development of the Euro fracture toughness dataset, *Engineering Fracture Mechanics*, v.69, n.4, p. 421–449.
- [8] PEREZ IPIÑA, J.E.; BEREJNOI, C. (2010). Size effects in the transition region and the beginning of the upper shelf for ferritic steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 33, n.3, pp. 195-202.