

Propagación de fisuras asistidas por fatiga en acero estructural ASTM A36

Subcritical propagation of fatigue assisted cracks in structural steel ASTM A36

Esteban Rosas Castillo Pereda 

Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Ciudad universitaria, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo – Perú.

*Autor correspondiente: ecastillo@unitru.edu.pe (E. Castillo)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2023.04.01](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2023.04.01)

RESUMEN

En este trabajo se investigó la propagación subcrítica de fisuras inducidas por fatiga en acero ASTM A36 utilizando la ley de París ($dA/dN = C(\Delta K)^m$), que relaciona la velocidad de propagación de fisuras y el factor de intensidad de tensiones, K_{IC} . Este modelo se puede utilizar para predecir la vida útil de componentes o estructuras que se encuentran solicitadas a fatiga. Se ensayaron tres probetas en una máquina de fatiga de flexión en tres puntos, la máquina está equipada con un sistema de adquisición de datos por computadora. Para monitorear la propagación de la fisura se usó la técnica de la marcas de Playa, con los datos obtenidos se graficó la curva a vs N (profundidad de fisura vs número de ciclos), y a partir de esta curva se obtuvo de la curva dA/dN vs a (velocidad de avance de fisura vs profundidad de fisura), y la gráfica dA/dN vs ΔK , para determinar el factor de intensidad de tensiones K_{IC} se utilizó la ecuación de Newman-Raju. Este análisis dio como resultado las constantes de la ecuación de París: $C = 4,0 \times 10^{-6}$ m/ciclo y $m = 0,7$, que se encuentran dentro del rango publicado. También se midió la dureza del material.

Palabras clave: factor de intensidad de tensiones; fatiga y propagación subcrítica de fisuras.

ABSTRACT

In this work, the subcritical propagation of fatigue-induced cracks in ASTM A36 steel was investigated using the Paris law ($dA/dN = C(\Delta K)^m$), which relates the speed of crack propagation and the stress intensity factor, K_{IC} . This model can be used to predict the useful life of components or structures that are subjected to fatigue. Three specimens were tested in a three-point bending fatigue machine, the machine is equipped with a computer data acquisition system. To monitor the propagation of the crack, the Playa mark technique was used. With the data obtained, the curve a vs N (crack depth vs number of cycles) was plotted, and from this curve the dA/dN curve was obtained. dN vs a (crack advancement speed vs crack depth), and the graph dA/dN vs ΔK , to determine the K_{IC} stress intensity factor, the Newman-Raju equation was used. This analysis resulted in the Paris equation constants: $C = 4.0 \times 10^{-6}$ m/cycle and $m = 0.7$, which are within the published range. The hardness of the material was also measured.

Keywords: stress intensity factor; fatigue and subcritical crack propagation.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros llamados de bajo carbono, son los tienen menos del 0,25 %C, y son quienes no toman dureza considerable con temple. Por ello, su resistencia en estado normalizado varía entre 35 a 53 Kg/mm² y sus alargamientos desde el 23 al 33 %. Con los aceros de 0,06 a 0,25 % de carbono, se hacen los puentes para ferrocarril, las estructuras de las estaciones ferroviarias, las torres metálicas de cables eléctricos, también cascos de embarcaciones marinas, columnas de casas, clavos, alfileres, cerraduras de puertas y muchos objetos que se utilizan a diario. En la muchas veces, según nos narra Andreone (2019), se usa el acero tal como viene de la siderúrgica, sin tener que darle tratamiento alguno.



Para estudiar aceros de bajo carbono nos basamos en el diagrama de equilibrio binario hierro carbono (Fe-C); sin embargo, en el estudio de los aceros de alta aleación donde intervienen varios elementos y en especial el Cr, Ni, V y Mo, se usan diagramas pseudo binarios, tomando como referencia el Fe en un valor fijo y variando el porcentaje de Cr y Ni y entonces de acuerdo al porcentaje de elementos formadores de ferrita (α) (alfágenos) y también formadores de austenita (γ) (gamágenos). En este estudio se trabajará con aceros que contienen bajo carbono.

Tenemos que Pérez Ipiña (1995) expresa que la fatiga es un tipo de falla que ocurre en un material que está sometido a una carga cíclica, produciéndose la falla luego de un determinado número de ciclos; en el caso que existan cargas alternadas, se presenta un endurecimiento, acrecentando la fragilidad del componente, así mismo cuando se agota la capacidad del metal por el aumento del endurecimiento, se hacen presente según Forrest (2019) las llamadas extrusiones y fisuras microscópicas, y siendo ellas las se comportan como concentradores de tensiones que debilitan la sección y por tanto se produce la rotura del componente.

Con el uso de la mecánica de fractura se ha logrado según nos explica Pérez Ipiña (1995), el entendimiento del fenómeno de rotura debido a fatiga. En esta rotura presenta tres etapas: nucleación, propagación subcrítica de la fisura, y la fractura.

Este fenómeno de falla por fatiga tiene su inicio debido a una fisura cica que es en muchos casos difícil de identificarla por medio de ensayos no destructivos, es por esto un serio peligro para la integridad de la estructura. En materiales que tienen estructura homogénea, la primera del fenómeno de fatiga depende de las fuerzas de corte que actúan en los planos de deslizamiento que son preferentemente orientados para esta fuerza. Usualmente la fisura comienza en un punto de concentración de fuerzas, que puede ser un defecto del material, o un cambio de sección tal como una esquina aguda, o una fuente de concentración de tensiones generalmente de origen metalúrgico tal como una inclusión no metálica. Nos explica Pérez Ipiña (1995), una vez que se inicia la fisura, se considera terminada la etapa I del proceso de fatiga.

El fenómeno de centralización de tensiones se torna importante y la fisura progresa en un plano perpendicular a la mayor tensión normal. El avance de propagación en la etapa II, nos explica Pérez Ipiña (1995), está supeditado al tamaño de la fisura, por lo que se hace aplicable el concepto de la Mecánica de Fractura lineal. Es por ello que ésta es la zona de interés ingenieril, y se le conoce como la zona de propagación subcrítica de fisuras; en gran parte de los casos de estructuras soldadas, las fallas del cordón de soldadura puede concentrar fisuras cuando el componente se solicite a fatiga, por ello entonces se le da más importancia a la zona II, antes que a la zona I; en lo que respecta a la zona III que es la zona de propagación crítica, la rapidez de avance de fisura aumenta en algunos órdenes de magnitud que ya no presenta interés analizarla y aparece como límite el KIC; tomándose como criterio de fractura $K_a > K_{IC}$.

El trabajo de las pruebas de fatiga es obtener cuantitativamente las posibilidades que tiene el material en trabajo sin destruirse en situaciones de carga cíclica. La capacidad de resistencia del material al fenómeno de fatiga, lo sostiene la norma IRAN-IAS V 500-81 (1995), es dependiente de las características metalúrgicas y mecánicas del material, y también de los tratamientos térmicos que alteran dichas propiedades, así como de la distribución de las tensiones residuales.

Sostiene Pérez Ipiña (1995), el aspecto estructural de la deformación por fatiga, es la formación en la superficie de aspectos salientes y entrantes llamados extrusiones e intrusiones de bandas, que originan las bandas de deslizamiento o fisuras y se da por iniciadas las grietas de fatiga.

Factores que obstaculizan la resistencia a fatiga:

La resistencia a fatiga de un elemento se reduce significativamente por varios factores, que incluyen:

*) Las grietas por fatiga se originan a partir de discontinuidades geométricas, por lo que los concentradores de tensión, como muescas y agujeros, son geometrías que provocan concentraciones de tensión que pueden ocurrir en singularidades metalúrgicas: No se trata solo de discontinuidades, puede ser porosidad e inclusiones.

***) Condiciones de la superficie del elemento como la rugosidad de la superficie (que puede formar concentraciones de tensión), cambios en las propiedades de la superficie, entre la capa dura y el núcleo blando, la superficie exterior y la tensión residual de la superficie donde se inicia la falla aumentan.

****) Propiedades metalúrgicas: Existe un número limitado de agentes metalúrgicos que modifican la estructura de los metales y afectan sus propiedades de fatiga. Las pruebas de fatiga, que miden el efecto de las variables metalúrgicas en las propiedades de fatiga, generalmente se realizan en especímenes lisos y pulidos.

Criterio de Griffith para Propagación de Grietas Elípticas

Griffith está convencido que la reducción de la energía elástica debido a la relajación de la tensión durante la propagación de la grieta debe ser que la grieta que se vuelve inestable y comienza a propagarse. Esto también sostiene De Vedia (2015). La baja en la energía elástica por causa de las tensiones cuando crece la fisura se hace necesario que sea más grande o igual al aumento de la energía superficial debido a la formación de otras superficies de posibles fracturas.

De Vedia, (2015) sostiene que la matemática de este criterio para una plancha de espesor uniforme y elongación grande con fisura de paso elíptica, sujeta a una condición de tensión uniforme ' σ ' en una determinada dirección viene dada por el análisis de la capacidad elástica perturbada por la presencia de una fisura elíptica de longitud $2a$.

Consideremos primero la mirad superior de la elipse. La reducción de la energía ' u ' causada por la presencia de un elemento cuya longitud de fisura dx en la placa es:

$$du = \int_0^y \sigma_y dx \cdot dy = dx \int_0^y \sigma_y dy = dx \sigma_y \cdot y|_0^y = dx \sigma_y y \quad (1)$$

Todo el proceso está dentro del elástico campo Suponiendo que ocurre en, la integral tiene el valor

$$du = \frac{\sigma \cdot y}{2} dx \quad (2)$$

Por lo tanto la energía liberada por la aparición de una fisura semielíptica es:

$$2u = \frac{\sigma \pi a b}{2} \quad (3)$$

Inglis confirmó que en el campo elástico se da: $b = \frac{2\sigma a}{E}$ y $2u = \frac{\sigma^2 \pi a^2}{E}$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{\sigma^2 \pi a^2}{E} - 4aT \right) = 0 \quad (4)$$

donde $a = a_{cr} = \frac{2ET}{\pi \sigma^2}$ es la longitud de fisura crítica para la inestabilidad, por lo que $\sigma_c = \left(\frac{2ET}{\pi a} \right)^{1/2}$.

Criterio de Erwin para la determinación de la intensidad de tensión en la fractura

El criterio de extensión de una fisura según Griffith se basa en el análisis de tensiones elásticas en materiales frágiles y asume que los efectos de la deformación plástica son insignificantes. Sin embargo, las grietas que se propagan con una gran deformación plástica pueden satisfacer la relación $\sigma \sqrt{a} = cte$, derivada del criterio de Griffith. Como explica De Vedia (2015), esta realidad se basa en la existencia de un valor de energía de deformación plástica que Griffith no previó. Fue en este momento que Irwin desarrolló esta relación entre el término de energía potencial elástica G , la tensión y la deformación del campo elástico lineal se calculan determinando el trabajo realizado por la fisura cuando crece su longitud durante la propagación, que es:

$$w = 2 \int_0^{\Delta a} dw = \int_0^{\Delta a} \sigma_{yy} V dx$$

El trabajo total para la propagación de grietas por unidad de longitud dx debido al crecimiento de la fisura viene dado por

$$G = \int_0^{\Delta a} \frac{\sigma_{yy} V dx}{\Delta a}$$

donde, σ_{yy} es el esfuerzo de tracción. V : es el desplazamiento en la dirección Y , Δa : es la unidad de longitud de crecimiento de grieta.

Suponiendo que la extensión de la grieta tiene lugar en un campo elástico, podemos garantizar que la reducción de la energía potencial elástica por unidad de longitud es igual al trabajo realizado durante la propagación de la grieta.

Y está dada por:
$$G = \int_0^{\Delta a} \frac{\sigma_{yy} V}{\Delta a} dx.$$

En la mayoría de los casos, el parámetro K contiene índices: I, II y III, los que representan los tres modos de carga diferentes de los cuerpos fisurados. El modo I es el modo inicial en el que el cuerpo se encuentra bajo estrés normal. El movimiento de la superficie de la grieta se da en forma perpendicular al plano de la grieta. (Cuadro 1.)

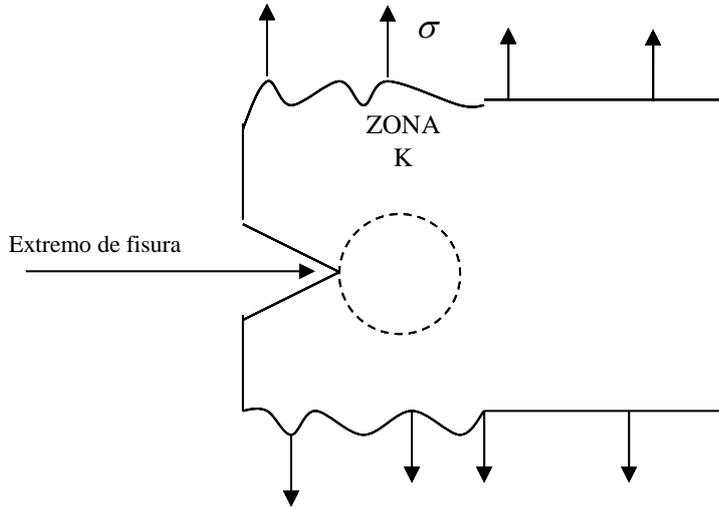


Figura 1. K: Representa el Factor de intensidad de tensión [MPa.m^{1/2}].

Lo que se gana con escribir la ecuación en función del parámetro K que es factor de tensión es que, de esta forma, la ecuación nos da la distribución invariable de la tensión en la región próxima al vértice de fisura. Según Távara (1996), la fuerza aplicada, el tamaño de la fisura y la geometría del sistema afectan el valor de K.

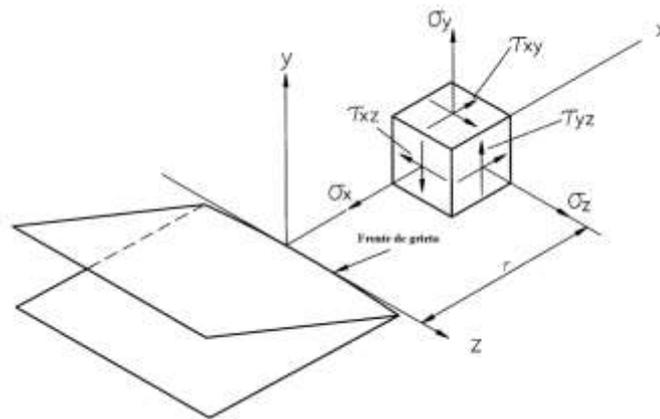


Figura 2. Sistema de coordenadas y tensiones en el entorno del frente de grieta

Si conocemos los valores de fuerza y deformación próximos al vértice de la fisura, podemos extender la integral de Erwin para la determinación del parámetro G, mediante:

$$G = \int_0^{\Delta a} \frac{\sigma_{yy} V}{\Delta a} dx = \int_0^{\Delta a} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi x}} \cdot \frac{K_I(2-2\nu)}{M} \cdot \sqrt{\frac{\Delta a-x}{2\pi \Delta a}} dx \quad (5)$$

Arreglando los términos, en la ecuación anterior se obtiene:

$$G = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} \cong \frac{K_I^2}{E} \quad (6)$$

Por lo tanto, para $G = G_c$, dado que $K_I = K_{IC}$, el criterio de Griffith para la variabilidad de grietas se expresa por $K_I = K_{IC}$, y la formación de la llamada fisura sucede si K_I es mayor que (tenacidad del material).

Si una placa infinita tiene una fisura elíptica continua infinitamente afilada, entonces:

$$K_I = Y\sigma(\pi a)^{1/2} \quad (7)$$

donde 'a' representa la mitad del tamaño de la grieta. "σ" es la tensión dotada en la región separada de la fisura.

En cambio, según Griffith:

$$G = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} = \frac{[\sigma(\pi a)^{1/2}]^2}{E} \quad (8)$$

Obteniéndose $G = \frac{K_I^2}{E}$

El valor de la cantidad K depende de la carga aplicada externamente o el esfuerzo nominal (σ), el tamaño de la fisura ("a") y de la forma de fisura. La magnitud de K que se aplicará se puede determinar para varias combinaciones de geometrías, geometrías y tamaños de grietas.

Para grietas semielípticas superficiales, utilice la ecuación de Newman-Raju para obtener el valor de K.

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}, \frac{a}{b}, \varphi\right) \quad (9)$$

donde σ_m y σ_b son las funciones dependientes de la tracción y de la flexión, respectivamente.

Al calcular la función analítica propone TAVARA, A. (1996) se obtiene el K_I de Newman-Raju como:

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{w}, \varphi\right) \quad (10)$$

En la cual:

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} ; \quad F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] f_\varphi f_w g.$$

Proliferación de fisuras desarrolladas por la fatiga

Cuando un componente con fisura se somete a una carga cíclica, la fisura puede aumentar si el valor de K_I es inferior a K_{IC} . (Las grietas pueden ocurrir como resultado de la deformación plástica cíclica localizada, y dicha nucleación ocurre incluso cuando la tensión nominal está muy por debajo del límite elástico). Entonces, el desarrollo por cada ciclo es pequeño (del orden de 0,1 μm), pero: DE VEDIA, L. (2015) sostiene que la progresión de la fisura puede alcanzar valores muy importantes para un gran número de ciclos.

Cuando la fisura logra la longitud peligrosa de $K_I = K_{IC}$, la fisura se propaga rápidamente y se produce una fractura frágil.

Afirmamos que el rendimiento total está determinado por la cantidad de ciclos necesarios para que la fisura crezca de su tamaño original hasta los denominados valores críticos. La expresión más común para el comportamiento de fatiga del material es la velocidad de extensión por ciclo da/dN.

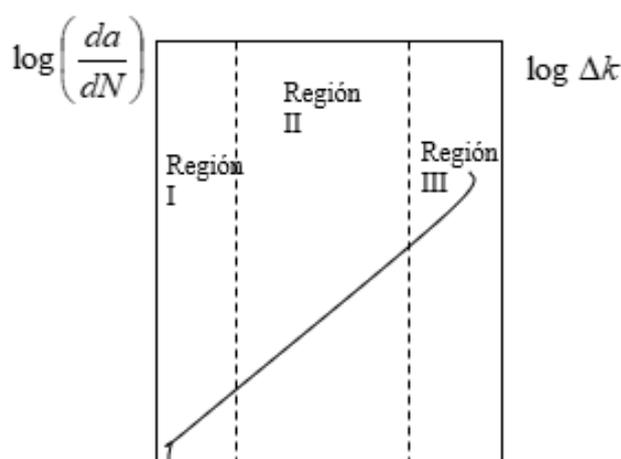


Figura 3. Gráfico que nos muestra el comportamiento del crecimiento de una fisura a causa de la fatiga.

La región I es la denominada etapa inicial y marca el tamaño umbral del factor de intensidad de la tensión (Δk). Por debajo de este umbral normalmente no se observa crecimiento de grietas. El desarrollo por ciclo es muy bajo en esta zona. La diferencia entre el inicio y la extensión de las grietas por fatiga es una definición técnica, ya que la propagación de las grietas por fatiga comienza desde el primer ciclo de carga.

La Región II es la región de mayor interés, con velocidades de extensión promedio que van desde alrededor de 10^{-4} y 10^{-2} mm/ciclo. Por lo tanto, el comportamiento se puede describir mediante una relación lineal entre $\log(da/dN)$ y $\log(\Delta K)$ en una amplia gama de valores de ΔK . Esto permite la caracterización de la tasa del desarrollo de grietas por fatiga de la mayoría de materiales. Esta fórmula es la fórmula PARIS-EDORGAN: $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$. Donde 'C' y 'm' son valores constantes dependientes del material obtenidas de ensayos utilizando probetas con fisuras de longitud "a". Relación entre "a" y cantidad de ciclos "N", se determina en cada punto da/dN. Estas constantes proporcionan información sobre la proliferación de grietas por fatiga. En esta parte, la tasa de crecimiento por cada ciclo (da/dN) se controla mediante el factor de intensidad de estrés propuesto por la ley de Paris.

En la parte III, el valor de ΔK está tan cerca de K_{IC} que sucede un crecimiento rápido de grietas por ciclo, alcanzando rápidamente ΔK_{IC} y eventualmente provocando falla de los componentes. Por ello, desde un punto de vista del estudio de fatiga y vida útil de los componentes, esta área tiene poca importancia práctica.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Los materiales y equipos

2.1.1. El material de investigación.

El objeto de prueba fue acero dulce ASTM A36. Se trata de un acero estructural laminado en caliente de baja aleación y alta resistencia de 25,4 mm de espesor suministrado por SIDER PERÚ.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de los aceros ASTM A36 (por fabricante).

Composición Química					Propiedades Mecánicas		
% de C	% de Si	% de Mn	% de P	% de S	Extremo de Fluencia en kg/mm ²	Resistencia a Tracción en kg/mm ²	Extensión en %
0.28	0.41	1.20	0.05	0.06	23	42	20

Equipamiento usado.

- Probador de fatiga de tracción y flexión de 3 puntos con un sistema computarizado para adquisición de datos.
- Computadoras, tableros de interfaz, celdas de carga, medidores de clic.

2.1.2 Equipos y materiales utilizados.

a) Muestra: Para ensayo de fatiga por flexión en 3 puntos en el aire.

b) Preparación de muestras:

- Fresadora horizontal TOSOLOMUC/4 kW 220 V.
- Molino BOSH 220 V/60 Hz – 27.000 rpm.
- Cuchilla carburada (para cortar en la muestra)

c) **Método de ensayo de fatiga:**

- Probador de fatiga por tracción y flexión de 3 puntos con sistema computarizado de adquisición de datos. Esto permite ajustar la repetición entre 2,2 y 48 Hz y cargas hasta 2 tn. Se inicia a controlar el motor eléctrico de forma manual, automática o con un temporizador. Un amplificador de señal en la celda de carga permite la calibración de la carga. Contador de ciclos y cambiador de velocidades.

2.2. Proceso de experimento. Método y Técnica

Se utilizó un método experimental de mejora de estímulos para evaluar las propiedades mecánicas, basado en pruebas, e interpretación de resultados, discusión y análisis de curvas características que se obtienen en las pruebas. Las muestras se analizaron sin tratamiento. Para controlar la progresión de grieta, se utilizó técnica de marca de playa y la carga se redujo al 50 % de la carga de prueba para determinar la progresión de la grieta. Cada banda de marcador de playa representa un punto de tiempo en el que se produjo la propagación de grietas. Se usó la ecuación de Newman-Raju para relacionar la geometría de la fisura superficial y las condiciones de carga con el K_I aplicado, respectivamente.

2.3. Preparación para la prueba

Las probetas se prepararon a partir de una placa de acero dulce ASTM A36 de 1,26 cm (grosor) x 5,05 cm (ancho) x 20 cm (largo). Se realizaron tres probetas de acuerdo con la norma ASTM 399. Las propiedades geométricas de la muestra se dan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Propiedades geométricas de especímenes (probetas).

Características geométricas de la probeta de fatiga según la norma ASTM 399				
Espesor (e)	Ancho (a)	Largo (L)	Profundidad (p)	Longitud de fisura (l)
1,26 cm	5,05 cm	20 cm	Máximo 0,3 cm	máximo 1,6 cm

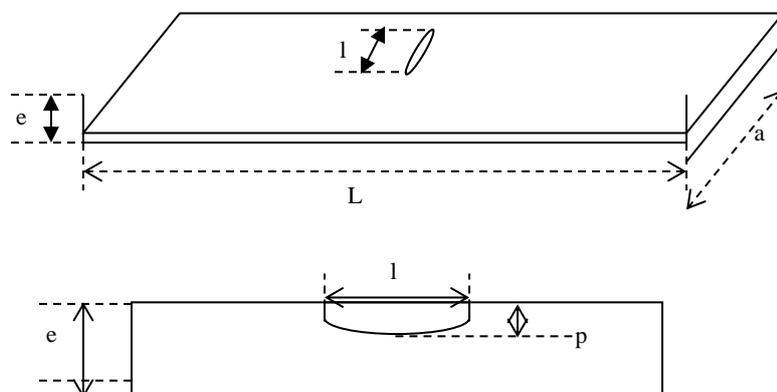


Figura 4. Representación del concentrador de tensiones.

2.4. Antecedentes del trabajo

Todos los componentes están sometidos a procesos de fatiga y fractura más o menos severos. La falla de materiales es un caso que se ha vuelto cada vez muy importante desde la Revolución Industrial, cuando comenzó la producción masiva de grandes máquinas y estructuras. Ocasionalmente, IPIÑA, J, E. (1996) afirma que los esfuerzos por debajo de la resistencia a la tracción del material pueden conducir a la falla repentina de las estructuras de acero y la falla del componente.

La destrucción es un problema tan antiguo como las primeras estructuras hechas por el hombre. Hoy, el problema se ve agravado por la complejidad de la sociedad y los crecientes avances tecnológicos.

Hasta hace algunas décadas, los componentes estructurales o mecánicos se diseñaban casi exclusivamente teniendo en cuenta la resistencia a la tracción o el límite elástico de un material. Sin embargo, la introducción de la construcción completamente soldada reveló cuán inadecuado es este diseño para estructuras que contienen grietas, y todos los materiales están sujetos a imperfecciones microestructurales y también se encontraron falta de homogeneidad inherentes al proceso de fabricación (dislocaciones, estomas, etc.). Inclusiones no metálicas y grietas. Las grietas son los defectos más peligrosos. Las grietas actúan como concentradores de tensión y, a menudo, se propagan en condiciones de carga inferiores a las diseñadas, lo que provoca fallas catastróficas.

Por lo tanto, es necesario comprender la interacción entre la carga aplicada, el entorno, la presencia de defectos (las grietas son las más peligrosas) y, por supuesto, las propiedades inherentes del material. Y también desarrollar métodos de análisis de tensión más precisos que puedan determinar las concentraciones de tensión locales y utilizar márgenes de seguridad más precisos.

Los criterios de diseño tradicionales mostraron sus mayores deficiencias cuando quedó claro que ciertas condiciones de falla podrían ocurrir a niveles de tensión antes del límite de diseño. Gracias a nuestro conocimiento de la mecánica, pudimos mejorar las condiciones de diseño para tener en cuenta los efectos de los defectos de los materiales y las condiciones de funcionamiento, y eliminar los efectos de las fallas.

La mecánica de fractura, es una disciplina que considera los efectos de los defectos similares a grietas (tanto a micro escala como a macro escala) en la integridad estructural. Según Jones (2004) se basan en el hecho de que las grietas o defectos similares a grietas que estaban originalmente presentes pueden propagarse durante la vida útil de la estructura.

La mecánica de fractura cuantifica con precisión los tres parámetros más importantes: la tensión total sobre la estructura, las propiedades de resistencia a la fractura del material y el tamaño de los defectos similares a grietas presentes. Un criterio de diseño para un material dado con una tenacidad dada es calcular el tamaño crítico de grieta que conduce a la falla bajo las condiciones de carga dadas aplicadas a ese material.

La resistencia mecánica de fractura al daño indica la presencia de grietas subcríticas en la estructura del elemento, lo que permite la posibilidad de crecimiento de grietas hasta cierto límite. Si se conoce la tenacidad del material, la relación proporcionada por la mecánica de la fractura se puede utilizar para derivar el tamaño crítico de fisura en el que falla el elemento. En general, el tamaño máximo permisible se obtiene dividiendo el tamaño crítico de grieta por el factor de seguridad. Es válida hasta que la grieta alcanza el tamaño mayor permitido.

Este trabajo se basa en la investigación de:

- Portela, A. Aliabadi, M. H. and Rooke, D. P. (1993) "Dual boundary element incremental analysis of crack propagation". *Computers Struct* 46/2, 237-247
- Aliabadi, M. H. and Rooke, D. P. "Numerical fracture Mechanics" Kluwer Academic Publishers, London, UK
- Aliabadi, M. H. (1997) "Boundary element formulations in fracture mechanics" *appl. Mech. Rev.* 50/2, 83-96.
- JE Ortiz, AP Cicilino. L. Otegui, "Modelado Numérico de Propagación de Grietas por Fatiga en Sólidos Micro fisurados", Departamento de Soldadura y Fractura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata - CONICET. 2000.

Este trabajo muestra un estudio del mecanismo de propagación de grietas inducido por fatiga en materiales fisurados. La extensión de la grieta se modela mediante un análisis basado en el método de elementos de contorno (BEM). Este método es eficaz para modelar fisuras, su relación con las micro fisuras y los nódulos en los materiales, y el efecto de las micro grietas en la extensión de la grieta principal.

- J. Ortiz, AP Cisilino, y J. L. Otegui, “Efecto de las microgrietas sobre la micromecánica del crecimiento de grietas por fatiga en fundición dúctil templada”, Departamento de Soldadura y Fractura – INTEMA, Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería – CONICET, Marzo Dell Plata, Argentina, versión final recibida el 27 de abril de 2001.

Se ha estudiado el efecto de las microgrietas sobre el mecanismo de crecimiento de grietas por fatiga en hierro fundido dúctil templado.

El mecanismo de desarrollo de grietas por fatiga se ha modelado utilizando el método de elementos de contorno, que permite una evaluación precisa de la interacción entre la grieta y las micro fisuras que se originan en los nódulos de grafito. Se consideran los efectos del tamaño del nudo, la distribución y el cierre de grietas.

2.5. Ensayo de dureza

2.5.1. Dureza.

Se realizó una prueba de dureza superficial en la muestra suministrada con una precarga de 10 kgf y una carga máxima de 100 kgf.

2.6. Prueba de fatiga

Se sometieron especímenes de acero dulce ASTM A36 a seis pruebas de fatiga de flexión en los tres puntos en el aire. Las condiciones de la prueba de fatiga se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 3.

Propiedades de ensayo de Fatiga				
tensión Máx Kgf /cm2	tensión Mín. Kgf /cm2	frecuencia Hz	excentricidad mm	coeficiente de Asimetría R
2041	434	13	13,4	0,2

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados metalográficos

Las probetas en estado de suministro y sus respectivas microestructuras se presentan en la siguiente figura:

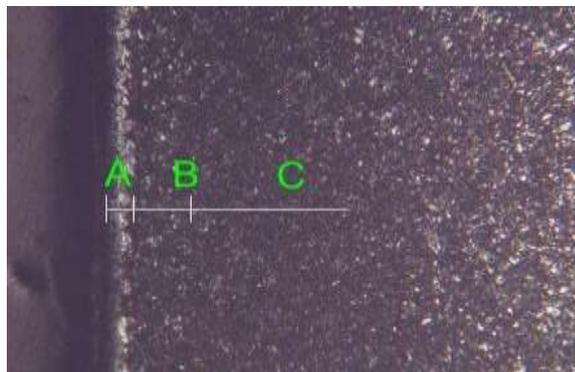


Figura 5. Aquí se muestra la micro estructura del acero ASTM A36 en su estado de suministro; se observan las fases presentes: ferrita α (claro) y perlita (oscuro).

Estos son los resultados de la prueba de fatiga. La siguiente tabla muestra los resultados de las pruebas de fatiga de los especímenes (probetas) tal como se enviaron.

Tabla 4. Número de ciclos (N), propagación de grietas (a y c), velocidad de propagación subcrítica (da/dN) y valores de variación de factor de intensidad de tensión (ΔK) para acero dulce ASTM A36 en condiciones de envío.

N (ciclos)	a (mm) $\pm 0,001$	c (mm) $\pm 0,001$	da/dN (mm/ciclo)	ΔK (MPa.mm ^{1/2})
124014	1,123	5,647	2,805E-05	12,286
135515	1,632	7,312	2,841E-05	14,728
151011	1,882	7,521	3,114E-05	15,679
166012	2,457	8,713	3,110E-05	18,539
186521	2,879	9,539	3,521E-05	20,722
200511	3,414	10,759	3,811E-05	21,9774
207511	3,486	10,759	3,615E-05	22,618
228521	4,219	12,539	4,411E-05	25,729
234518	4,339	13,688	4,162E-05	27,239
252111	4,778	14,357	4,719E-05	29,818
268219	5,479	16,569	5,188E-05	32,289
265518	5,539	17,728	5,521E-05	34,268
294015	6,613	19,578	5,671E-05	42,359
298519	7,281	21,487	6,321E-05	52,289
3013445	7,439	22,168	6,190E-05	61,232
339239	7,614	22,538	6,541E-05	66,722
316379	7,879	24,522	6,735E-05	62,249

Tabla 5. Estos son los valores de constantes m y C que requiere la Ley de Paris para probetas de acero ASTM A36 en suministro.

Constantes Condición	m	C (mm/ciclo)
SUMINISTRO	0,6977 \pm 0,257	(4,010 \pm 0,358) x 10 ⁻⁶

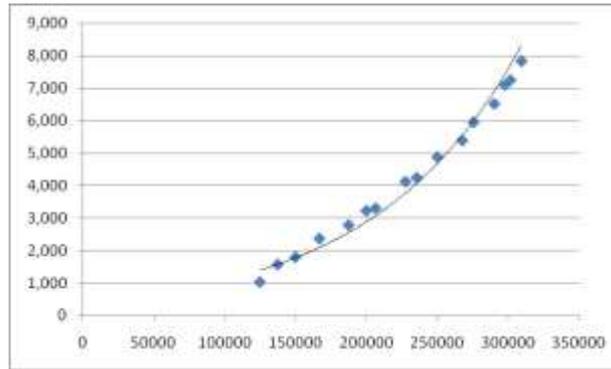


Figura 6. Aquí el gráfico de “a” –“N” (profundidad de fisura Vs número de ciclos)

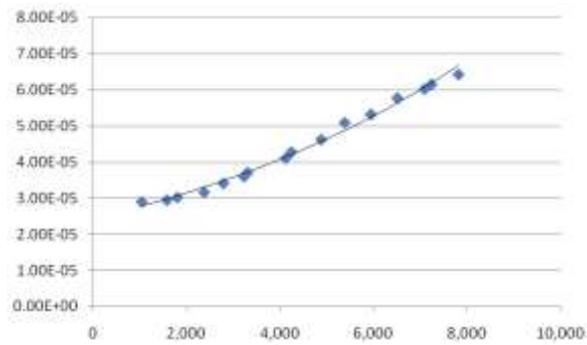


Figura 7. Aquí el gráfico de “da /dN” – “a” (velocidad de avance de fisura Vs profundidad de fisura)

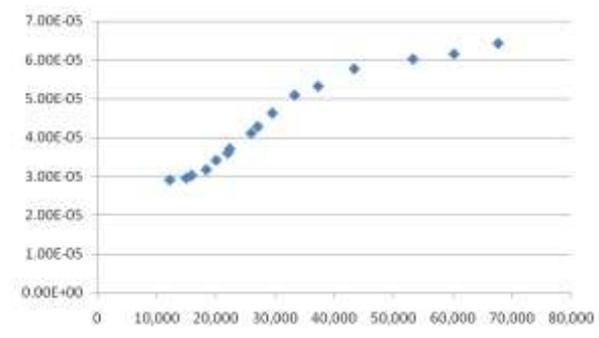


Figura 8. da / dN - ΔK

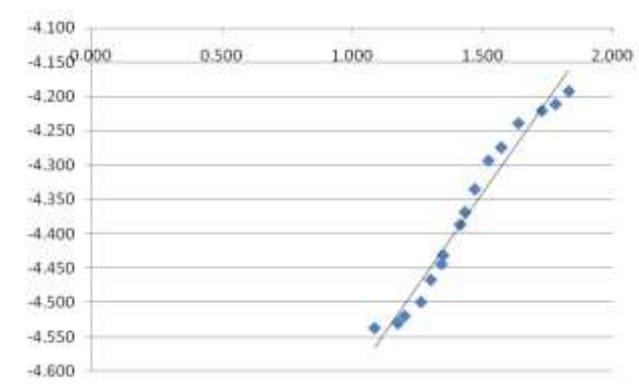


Figura 9.

A continuación, se muestran imágenes de las muestras proporcionadas para las pruebas de fatiga. También se pueden observar marcas de playa. Estos fueron medidos utilizando el programa AutoCAD 2007.

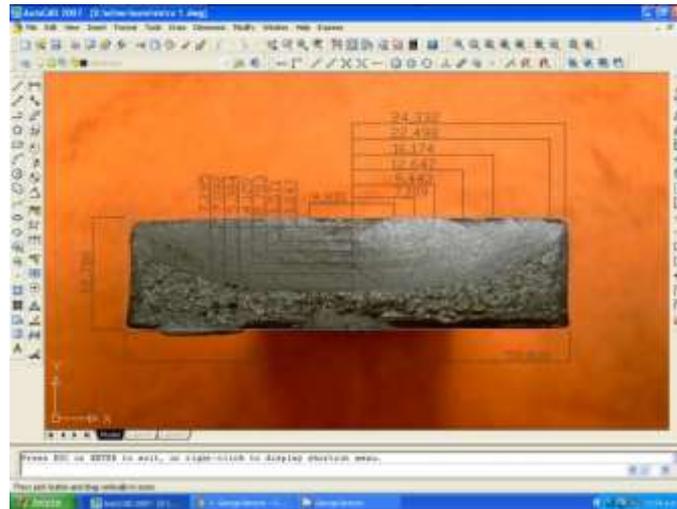


Figura 10. $\text{Log}(da / dN) - \text{Log}(\Delta K)$

El siguiente diagrama muestra la rotura de un tubo de ensayo tal como se recibió, hecho de acero ASTM A36. Aquí se observan dos zonas. Una zona blanda correspondiente a la rotura por fatiga y otra zona rugosa correspondiente a la rotura por tensión superficial restante.

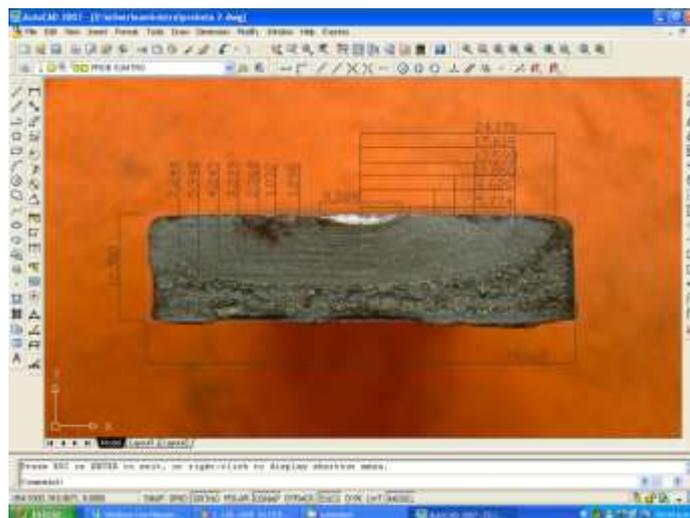


Figura 11. Fractura de una probeta.

La siguiente imagen muestra el crecimiento de grietas de un concentrador de tensión. Se observa un crecimiento asimétrico con un ligero desplazamiento hacia el centro de acción de la carga.

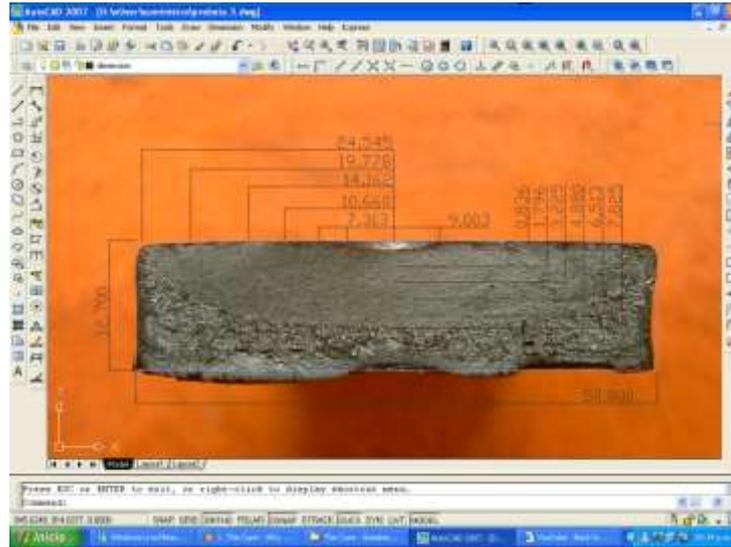


Figura 12. Probeta en suministro.

La figura adjunta corresponde a la muestra de acero ASTM A36. Las marcas de playa se pueden ver en zonas suaves (marcas de playa). Cada banda de marcador de playa representa un período durante el cual ocurrió la propagación de grietas.

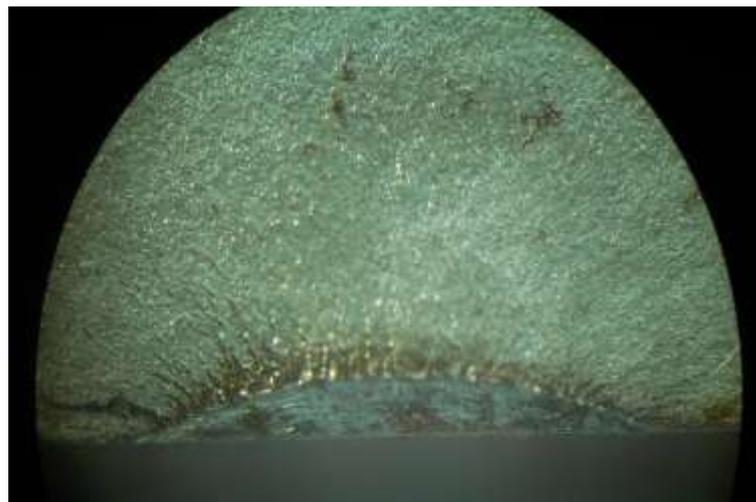


Figura 13. Esta imagen muestra el frente de la fisura, mostrando la primera fisura propagándose desde el concentrador de tensión.

3.2. Discusión Del diagrama

“a”-“N”, se puede observar una tendencia exponencial de crecimiento de grietas con el número de ciclo. Del diagrama de $da/dN - a$, se puede ver que la velocidad de propagación de grietas subcríticas varía exponencialmente a medida que crece la grieta. Del gráfico de $da/dN - \Delta K$ podemos ver que la curva tiende a ser lineal solo en la zona de propagación subcrítica. Por esta razón, aplicamos logaritmos a ambos términos en la ecuación de París para la linealización.

Un gráfico de $\text{Log}(da/dN) - \text{Log}(\Delta K)$ arroja una tendencia lineal, a partir de la cual se calculan los valores de pendiente e intercepción utilizando el método de mínimos cuadrados, y los valores asociados a la constante 'c'. pararse. y la "m" de la Ley de París.

Los valores resultantes para las constantes de la ley de Paris 'c' y 'm' relacionan 'm' con el material y 'c' con el medio en el que se realizó la prueba. Nótese que estos valores son consistentes con los publicados por otros autores para aceros dulces o de baja aleación ensayados en ambientes similares.

4. CONCLUSIONES

A partir de un análisis de los resultados, es posible predecir la extensión subcrítica de grietas semielípticas inducidas por fatiga en modelos de acero ASTM A36 aplicando la ecuación de **Newman-Raju** para calcular el factor de intensidad de tensiones.

Los valores resultantes para constantes de la ley de Paris 'c' y 'm' relacionan 'm' con el material y 'c' con el medio en el que se realizó la prueba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreone, C. A. (2019). *Aceros*. Convención Nacional de Energía Atómica. Argentina.
- Broek, D. (s.f.). *The practical use of fracture mechanics*. Fracturesearch Inc, Galena.
- De Vedia, L. A. (2015). *Mecánica de fractura*, Argentina.
- Forrest, P. G. (2019). *Fatiga de los metales*. Editorial Urmo Madrid.
- Jones, D. A. (2004). *Principles and Prevention of corrosion*. Prentice Ha, Inc.
- Newman, J. y Raju, I. (1981). An empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack. *Engng Fract Mech*, 15 (1-2), 185 -192.
- Pérez Ipiña, J. (1995). *Curso especializado tópicos de mecánica de fractura*. Universidad del Comahue, Argentina.
- Távora, A. (1996). *Influencia de Níquel en la Susceptibilidad a la Corrosión – Fatiga de Aceros Inoxidables duplex soldados en agua de mar*. Universidad Nacional de Mar del Plata.