



Certificación ISO 9001:2008 ‡

EVALUACIÓN DE DEFECTOS TIPO ENTALLA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN PARA USO ESTRUCTURAL

Jorge Terán Guillén
Sergio Cicero González
Maura Arroyo Olvera
Angélica del Valle Moreno
Andrés Torres Acosta
Miguel Martínez Madrid

Publicación Técnica No. 463
Sanfandila, Qro, 2016

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Evaluación de defectos tipo entalla en aceros de
baja aleación para uso estructural**

Publicación Técnica No. 463
Sanfandila, Qro, 2016

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte por el Dr. Jorge Terán Guillén, Ing. Maura Arroyo Olvera, Dra. Angélica del Valle Moreno, Dr. Andrés Torres Acosta y el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Se agradece la colaboración del Dr. Sergio Cicero González de la Universidad de Cantabria, así como del Dr. Andrés Torres Acosta y el Dr. Miguel Martínez Madrid, por parte del Instituto Mexicano del Transporte.

Contenido

| | | |
|--------------|------------------------|-----|
| Resumen | | iii |
| Abstract | | iv |
| Resumen | Ejecutivo | v |
| Capítulo 1. | Introducción | 1 |
| Capítulo 2. | Antecedentes | 3 |
| Capítulo 3. | Desarrollo del Estudio | 9 |
| Capítulo 4. | Resultados y Discusión | 15 |
| Capítulo 5. | Conclusiones | 33 |
| Bibliografía | | 35 |

Resumen

Este trabajo presenta la evaluación del efecto del radio de la entalla en la tenacidad a la fractura en un acero de baja aleación para uso estructural y la obtención de los diagramas de evaluación de falla considerando este efecto. Para el desarrollo de los diagramas de evaluación se consideró el efecto de los esfuerzos residuales y una fisura elíptica superficial con la razón geométrica que más afecta la integridad del componente. Se utilizaron dos condiciones de carga: el histórico de tensiones obtenidos del monitoreo del tránsito vehicular del mes de julio de 2015 y el resultado de la simulación por elementos finitos de las cargas que producen cuatro tractocamiones T3S3 colocados a la mitad del claro del puente. Se concluye que para el acero de baja aleación utilizado (AISI/SAE 4140) existe una correlación entre la tenacidad a la fractura y el radio de la entalla, ya que la tenacidad se incrementa por el efecto del radio de la entalla. Este efecto también se manifiesta en la disminución del parámetro K_r en los diagramas de evaluación de falla con las condiciones de operación de carga de operación de un puente vehicular. Este material con defectos tipo entalla puede ser un buen candidato para utilizar en las estructuras siempre y cuando los procesos constructivos no modifiquen su microestructura y no rebasen su capacidad de carga.

Abstract

This investigation presents the evaluation of notch radius effect on fracture toughness of a low alloy steel for structural use and to obtain the failure assessment diagrams (FAD) considering this effect. The FAD analysis was performed by assuming residual stresses and an elliptical superficial crack with geometric ratio that could affect the components integrity. Two loading conditions were considered as well. One caused by obtaining vehicular traffic monitoring on the month of July of 2015, and second load type, with the produced by the total weight of four heavy trucks (T3S3) crossing in the middle of the cable stayed bridge. It can be concluded that for the low alloy steel used (AISI / SAE 4140), a correlation between the fracture toughness and the notch radius was found, since the toughness is increased by the effect of the notch radius. This effect is also reflected in the decreasing parameter K_r of FADs with the load operating conditions of a vehicular bridge. The notched material with this defects type, can be a good candidate to be used in the structures as long as the construction processes does not modify its microstructure and neither exceeds its load carrying capacity.

Resumen ejecutivo

Es una práctica común en los estudios de integridad estructural considerar a los defectos como fisuras y no como entallas, esta práctica da resultados muy conservadores debido a que los defectos tipo entallas presentan una pseudo-singularidad alrededor del defecto que modifica el estado de esfuerzo. Por tal razón, es importante considerar el efecto de la entalla en los diagramas de evaluación de falla para los estudios de integridad estructural. Para el desarrollo de este enfoque se estudió el efecto del radio de la entalla en la tenacidad a la fractura en un acero de baja aleación conocido como acero AISI/SAE 4140. Se obtuvieron las propiedades en tracción en probetas normalizadas de acuerdo a la norma ASTM E-8. De acuerdo a la norma ASTM E-1820 se fabricaron probetas de flexión en tres puntos con diferentes tamaños de radio y se ensayaron hasta la fractura de la probeta. Posteriormente, se obtuvieron los diagramas de evaluación de falla (FAD) para evaluar la integridad estructural de un anclaje de un puente atirantado fabricado con este tipo de acero. Las condiciones de carga que se utilizaron fueron: el histórico del tránsito vehicular del mes de julio del 2015 y los resultados de la simulación por elementos finitos de cuatro tractocamiones T3S3 colocados a la mitad del claro del puente. Se consideró un defecto superficial postulado con una sola razón geométrica para obtener los FADs.

Con base en la metodología del FAD se obtuvieron las siguientes conclusiones relativas al comportamiento del anclaje:

- Sin esfuerzo residual, independiente del radio de la entalla, el acero 4140 tenderá a fallar por colapso plástico
- Este material con defectos tipo entalla puede ser un buen candidato para utilizar en las estructuras siempre y cuando los procesos constructivos no modifiquen su microestructura y no rebasen las condiciones de operación analizada en este estudio.

1 Introducción

La aplicación de materiales de alta resistencia en las estructuras civiles puede generar problemas durante el proceso constructivo por la presencia de defectos que modifican tanto el estado de esfuerzos como la microestructura, que trae como consecuencia un cambio en las propiedades mecánicas que pueden hacer que el material se comporte de manera frágil y más susceptible a la fractura. Aunado a esto están las cargas de operación de la estructura que hacen que esta situación sea más crítica por la concentración de esfuerzos que se generan en los defectos y se conviertan en sitios preferenciales de inicio de crecimiento de grieta. Una de las formas que permite conocer el efecto que puede tener la concentración de esfuerzos en un defecto es ensayar probetas de fractura con defectos tipo entalla, las cuales permiten relacionar el radio de la entalla con la capacidad resistente a fractura del material.

Por lo general, existe una práctica común en los análisis de los defectos mediante la aplicación de la teoría de la mecánica de la fractura considerando a los defectos concentradores de esfuerzos como fisuras y no como entallas, por lo cual, los resultados de estos análisis pueden ser muy conservadores. La teoría de la distancia crítica nos permite estudiar probetas entalladas para conocer el efecto que pueden tener las entallas de diferente tamaño en el comportamiento a la fractura, la cual pueden dar resultado menos conservadores [1,2]

Por otra parte, los diagramas de falla (FAD, por sus siglas en inglés) son una herramienta ingenieril que posibilita visualizar la interrelación entre la fractura y el colapso plástico con base en dos parámetros adimensionales, L_r y K_r , que dependen de las propiedades mecánicas y de fractura [3,4]. Alternativamente, en los diagramas de falla es posible analizar el efecto de los esfuerzos residuales en componentes estructurales generado durante el proceso de soldadura para la evaluación de la integridad estructural. Es así como esta herramienta permitirá evaluar si el comportamiento de un anclaje fabricado de acero de baja aleación operará de manera segura o insegura en las condiciones de carga existentes en un puente atirantado.

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de radio de la entalla en la tenacidad a la fractura en probetas entalladas con diferentes tamaños de radio: 0, 0.5, 1.5, 2.0 y 2.5. Posteriormente, se utilizarán estos resultados para convertir de una condición de fisura en una condición de entalla mediante el parámetro L , que es la distancia crítica, para obtener los diagramas de evaluación de entalla en un componente de anclaje de un puente atirantado fabricado de acero AISI/SAE 4140. Se asumirá una entalla elíptica superficial y esfuerzos residuales en dicho componente.

2 Antecedentes

2.1 Metodología para incorporar las entallas en los diagramas de evaluación de falla.

La evaluación por mecánica de la fractura de la severidad de los defectos presentes en el material requiere del conocimiento de la tenacidad a la fractura del material. Esta propiedad define la resistencia a la rotura del material en presencia de defectos. La teoría de la mecánica de la fractura tiene dos aproximaciones: la primera, donde al determinar un parámetro global, como la tenacidad a la fractura, pueden predecir el comportamiento del material en presencia de defecto sin tomar en cuenta los efectos de la microestructura. La segunda, que se conoce como aproximación local, toma en cuenta los efectos microestructurales en el defecto al momento de la rotura [2].

En el marco de la aproximación local se ha desarrollado la Teoría de las Distancias Críticas, que permite predecir el comportamiento a la fractura de un material considerando los defectos como concentradores de esfuerzos o entallas y que la rotura del material ocurrirá cuando el campo de esfuerzos evaluado a una determinada distancia crítica alcance un cierto valor. Es decir, para la aplicación de esta teoría se requiere del conocimiento de la distribución de los esfuerzos en la entalla y la distancia crítica (L). Dos de los métodos que permiten determinar el parámetro L son el Método del Punto (Point Method, PM) y el Método de la Línea (Line Method, LM) [5], los cuales se presentan a continuación.

2.1.1 Método del Punto (Point Method, PM)

Es el método más simple de la teoría de las distancias crítica puesto que establece que la falla del material ocurrirá cuando los esfuerzos a una distancia de L/2 a partir de la raíz de la entalla sea igual al σ_0 .

$$\sigma\left(\frac{L}{2}\right) = \sigma_0 \quad (2.1)$$

Donde σ_0 representa el esfuerzo o resistencia inherente del material.

En ciertos problemas (fractura de cerámicos y compuestos, fatiga de metales) $\sigma_0 = \sigma_U$, mientras en otros casos (fractura de polímeros y metales) el valor de σ_0 es más alto, aunque todavía constante.

2.1.2 Método de la línea (Line Method, LM)

Es análogo al método del punto, pero en este caso asume que la rotura se produce cuando la tensión media a lo largo de una determinada distancia, definida como d, es igual a la resistencia inherente del material. Se puede demostrar teóricamente que es igual a 2L, por lo que es descrito el criterio de LM como:

$$\frac{1}{d} = \int_0^d \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (2.2)$$

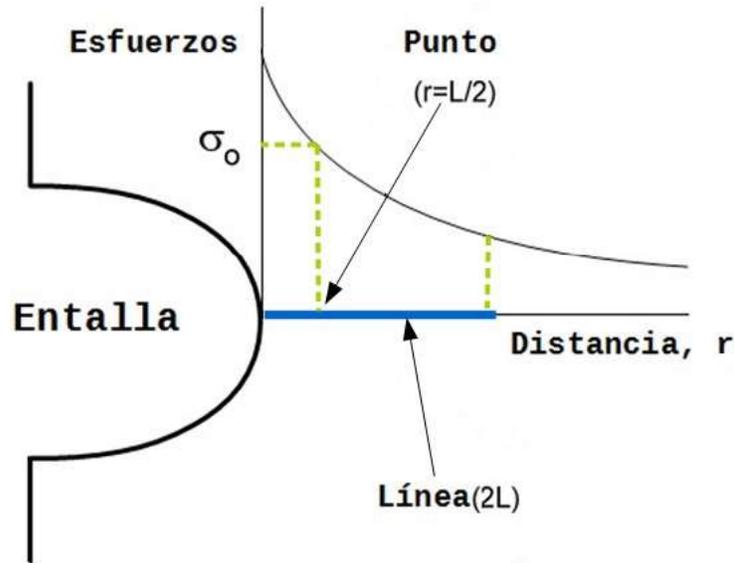


Figure 2.17 Esquema del método del punto y línea [5].

2.1.3 Relación entre la TDC y MFLE

Para hacer una relación entre la Teoría de las Distancias Críticas (TDC) y la Mecánica de la Fractura Líneal Elástica MFLE [5], se considera el caso particular de una entalla con un radio igual a cero, $\rho = 0$, que representa una grieta aguda. En la fractura frágil aparecerá cuando el factor de intensidad de esfuerzo sea igual al valor de la tenacidad a la fractura, K_C . Debido a que la tenacidad a la fractura es una propiedad del material, se deduce que debe haber una relación entre K_C y las constantes utilizadas en el método del punto. Esta relación es obtenida a partir del método del Punto y el campo de esfuerzos proporcionado por la MFLE:

$$\sigma_f = \frac{K_C}{\sqrt{\pi a}} \quad (2.3)$$

Donde σ_f es el esfuerzo a la fractura y a es la longitud de grieta.

Si se tiene en cuenta que en la rotura $K = K_C$

$$\sigma(r) = \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (2.4)$$

La expresión anterior es válida para $r \ll a$, lo significa que a debe ser más grande que la distancia crítica, L . De (2.4) resulta:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_C}{\sigma_0} \right)^2 \quad (2.5)$$

Donde K_C es el factor de intensidad de esfuerzos crítico y el esfuerzo σ_0 , que caracteriza la resistencia inherente del material. Esta ecuación relaciona la tenacidad a la fractura con las constantes de la TDC. Debemos tomar en cuenta que las expresiones (1) y (2) son válidas para una grieta central pasante de una placa de dimensiones infinita, por lo que para otras grietas hay que considerar el factor geométrico, F . Una expresión análoga puede ser deducida para fatiga:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{TH}}{\Delta\sigma_0} \right)^2 \quad (2.6)$$

Por otro lado, los diagramas de análisis de fractura o diagramas de fallo (Failure Assessment Diagrams, FAD) es una herramienta que permite la evaluación de la fractura con base a dos parámetros normalizados, K_r y L_r , que se definen como:

$$K_r = \frac{K_I}{K_C} \quad (2.7)$$

$$L_r = \frac{F}{F_y} \quad (2.8)$$

Donde F es la carga aplicada y F_y es la carga de colapso plástico, la curva K_r contra L_r representa el límite de la resistencia a la fractura. La estimación se basa en la posición de las coordenadas del punto (K_r , L_r) con respecto a la línea de falla. Se considera que un componente opera de manera segura cuando un punto se localiza debajo de la línea de falla e inseguro cuando se incrementa la carga o crece la grieta, de tal forma que las coordenadas del punto se encuentra arriba de la línea de falla. La condición crítica es cuando un punto intersecta la línea de falla, ver Figura 1.

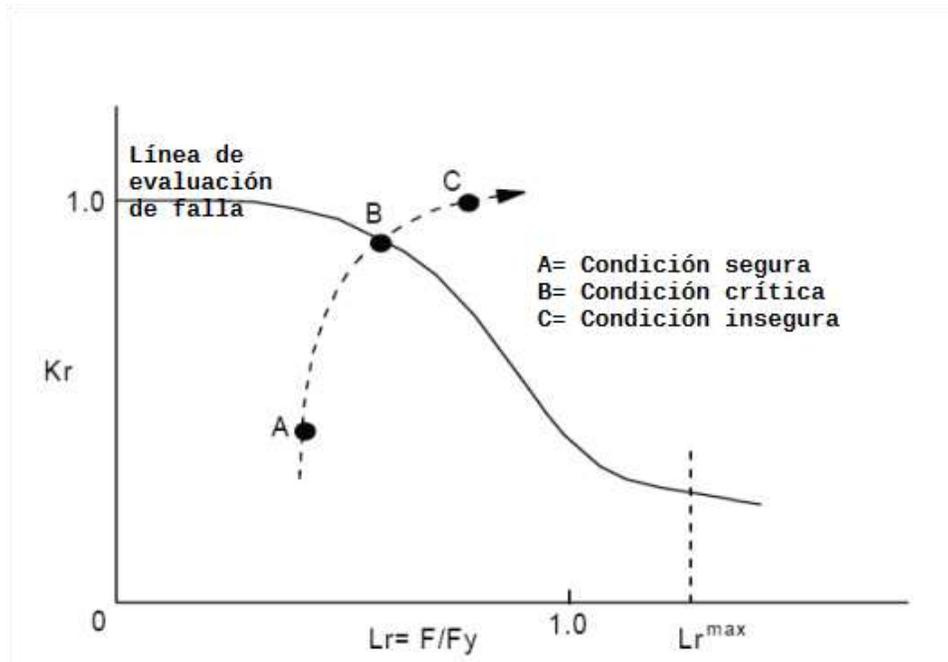


Figura 1. Diagrama de análisis de fractura, donde se indica las tres posibles situaciones: A, Segura, B Condición crítica y C, Insegura [2].

2.1.4 Análisis de entallas utilizando los diagramas de evaluación de falla (FAD).

Con base a las expresiones de la TDC se puede correlacionar una expresión que nos permita determinar la tenacidad a la fractura aparente K_{IN} , que es el valor de la tenacidad a la fractura obtenida en componentes entallados, con la distribución de esfuerzos cerca de la entalla dada por [1,2]:

$$\sigma(r) = \frac{K_I}{\sqrt{\pi}} \frac{2(r+\rho)}{(2r+\rho)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.9)$$

Si se considera el método del punto (PM) dada por la ecuación (2.1), la definición del parámetro L, ecuación (2.5) y asumiendo que en la fractura K_I es igual a K_{IN} , la tenacidad a la fractura aparente para un material con entalla, obtenemos la siguiente expresión:

$$K_{IN} = K_C \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L}\right)} \quad (2.10)$$

Si procedemos de la misma forma que para LM, obtenemos la siguiente expresión:

$$K_{IN} = K_C \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (2.11)$$

Ya sea utilizando (2.10) o (2.11), básicamente el problema consiste en transformar un problema con entalla en un problema con fisura, por el cual el material que tiene una resistencia a la fractura K_C se obtiene una mayor resistencia debido a la entalla (K_{IN}). Una vez obtenido el valor de K_{IN} se puede definir el parámetro K_r para el análisis mediante los FADs.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IN}} \quad (2.12)$$

Donde la corrección por entalla puede aplicarse a los FADs en dos lugares distintos: 1) En una de las coordenadas del diagrama (K_r , L_r), específicamente en K_r , ya que en el parámetro L_r depende de la carga de colapso plástico, y por consiguiente, del límite elástico del material y no por el radio de entalla que este pudiera tener[1]. El otro lugar donde se puede aplicar la corrección de entalla es en la línea de falla, tomando las ecuaciones que describen la línea de falla o estimación [2], tomando la definición del nivel 2B de acuerdo a la norma BS7910[10]:

a) Para $L_r \leq L_{r \max}$:

$$K_r = f(L_r) = \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r \sigma_Y} + \frac{L_r^3 \sigma_Y}{2E\varepsilon_{ref}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

b) Para $L_r > L_{r \max}$

$$K_r = 0 \quad (2.14)$$

Que en el caso de aplicar la corrección de entalla relacionada al PM, la expresión queda:

$$K_r = \frac{K_I}{K_C} = \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r \sigma_Y} + \frac{L_r^3 \sigma_Y}{2E\varepsilon_{ref}} \right)^{-\frac{1}{2}} \times \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L}\right)} \quad (2.15)$$

En este trabajo se aplicó la corrección de la entalla en el parámetro K_r .

3 Desarrollo del estudio

3.1 Metodología

En la figura 3.1, se muestra el diagrama que describe la metodología utilizada en este trabajo.

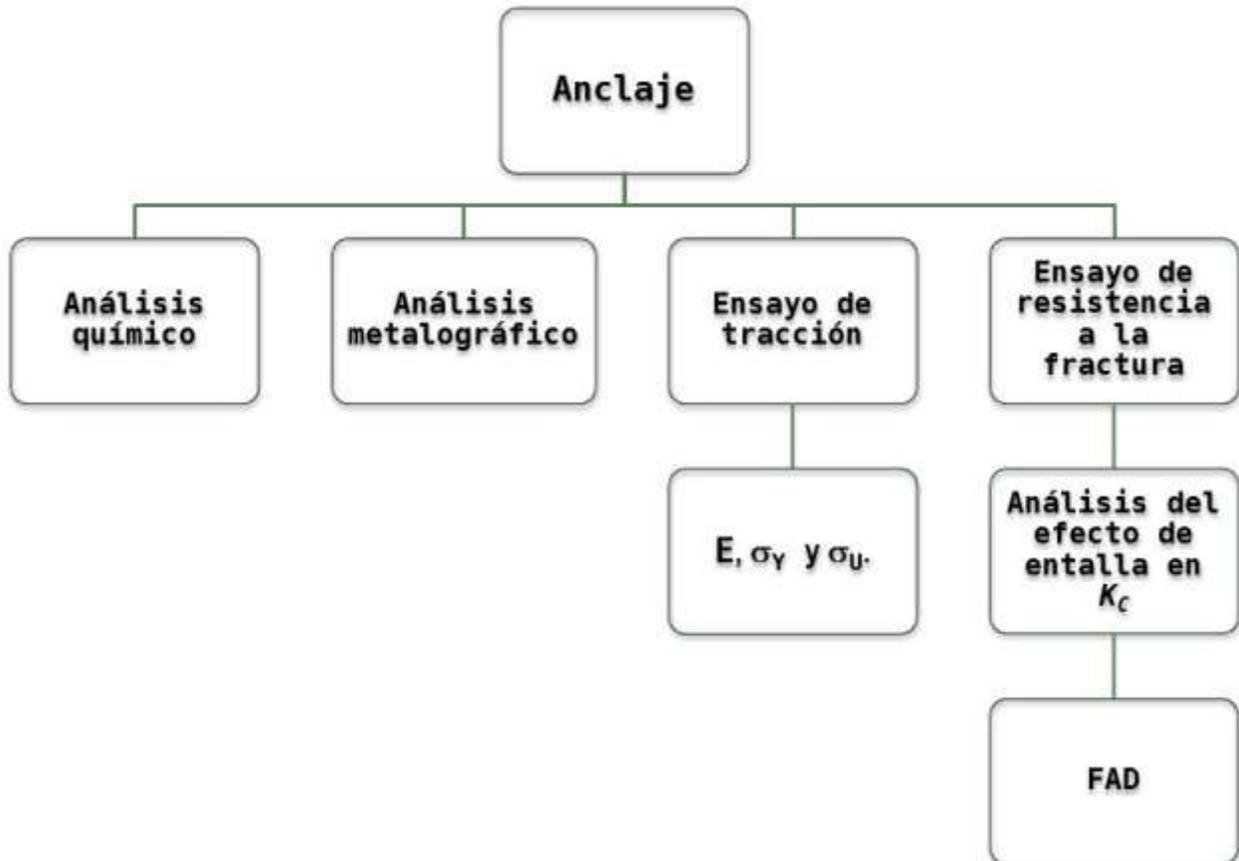


Figura 3.1 Diagrama de la metodología utilizada.

3.2 Metalografía y composición química

La preparación de la muestra consistió en montaje con baquelita para una mejor manipulación. Después fue pulida a espejo, utilizando lijas desde el número 120 hasta 2000, y alúmina de $1\mu\text{m}$ hasta $0,05\mu\text{m}$. Posteriormente, la muestra pulida

fue atacada previamente con nital al 2% [7]. La observación fue realizada en un microscopio metalográfico de platina invertida. La captura de las fotomicrografías fue obtenida con una cámara digital con el objetivo 5X del microscopio.

3.3 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados de acuerdo con la norma ASTM E-8 [8] en una máquina servohidráulica de 100kN. La geometría de la probeta se muestra en la figura 3.2. Las pruebas fueron realizadas bajo control de carga a una velocidad de 0.108 kN/s.

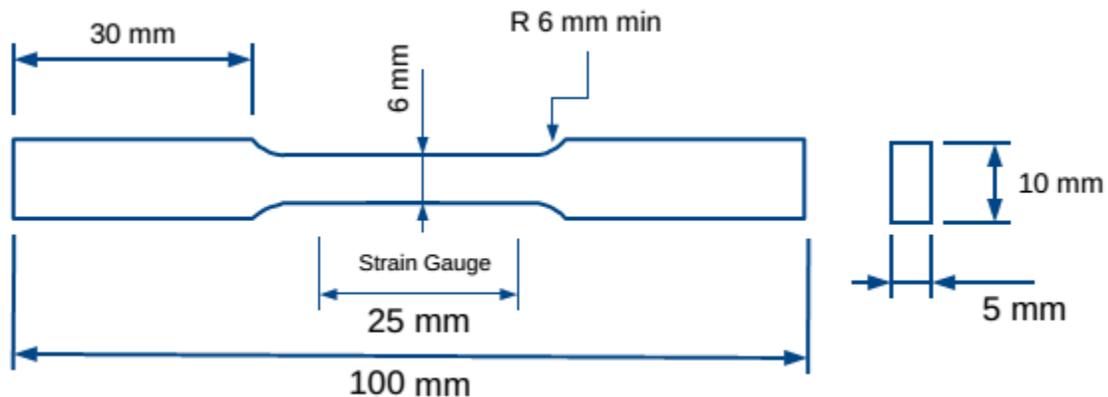


Figura 3.2 Geometría de la probeta de tracción.

3.4 Ensayos de resistencia a la fractura

Los ensayos se desarrollaron siguiendo la norma ASTM E-1820 [9]. La geometría de las probetas que se seleccionó fueron probetas de flexión en tres puntos (SE(B) por sus siglas en inglés), figura 3.3. Las dimensiones de las probetas fueron: espesor (B) de 15 mm, ancho de la probeta (W), 30 mm. Así, se dividieron un total de 30 probetas en lotes de 5, y en cada lote fueron mecanizados entallas con radios diferentes: 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm. Se asumió un radio igual a cero a las probetas preagrietadas por fatiga hasta una longitud de grieta $a = 0.50W$. Para medir la longitud de grieta se utilizó el método visual, que consiste en dibujar una línea a partir de la entalla y verificar, mediante microscopía óptica, que la grieta alcance la distancia seleccionada. Una vez que las probetas estuvieron preagrietadas, fue aplicada una carga monótonica bajo control de desplazamiento hasta la rotura de la probeta, con una la velocidad de desplazamiento de 0.30 mm/min. Los otros lotes con radios de entalla distintos de cero no fueron preagrietados, únicamente se procedió a aplicarle la carga hasta la rotura.

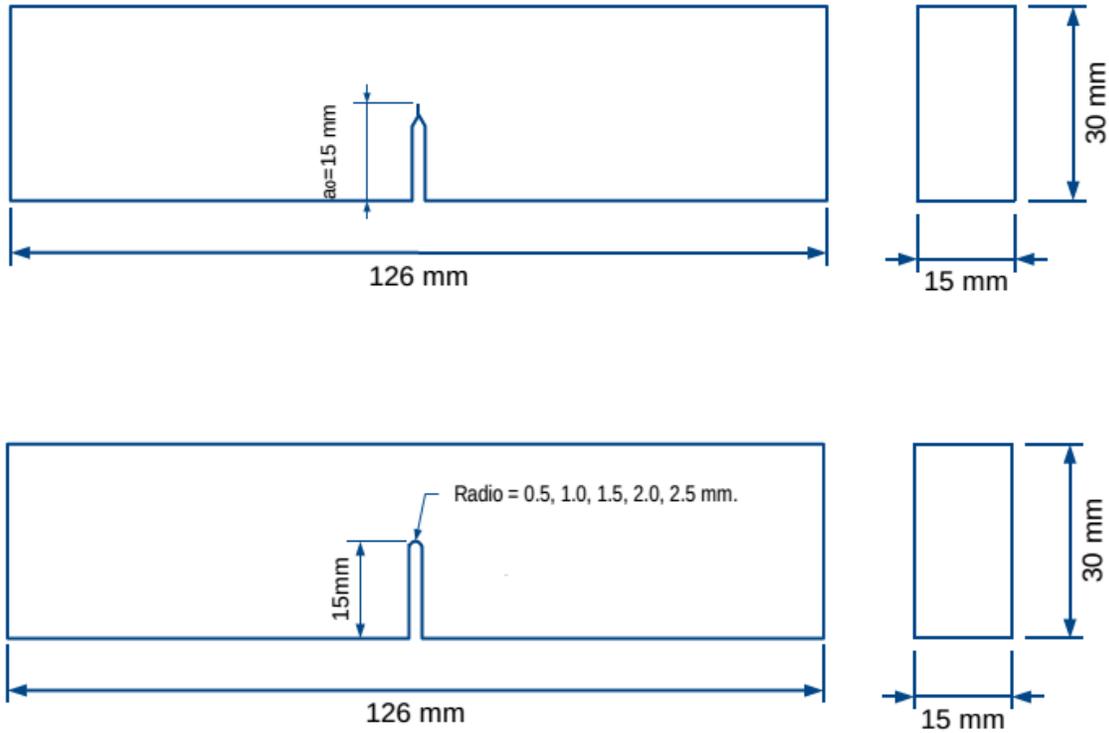


Figura 3.3 Geometría de la probeta de flexión en tres puntos SE(B).

3.5 Diagramas de evaluación de falla

Para la evaluación de defectos, tanto fisuras como entallas, así como la interacción de cavidades detectadas en los anclajes se utilizaron los diagramas de evaluación de falla de acuerdo con el procedimiento y reglas de interacción de la BS7910-2005 [10], seleccionando la opción 2B para obtener la curva de evaluación de falla:

Para $L_r \leq L_{max}$:

$$K_r = \left(\frac{E \varepsilon_{ref}}{L_r \sigma_Y} + \frac{L_r^3}{2E \varepsilon_{ref}} \right)^{-0.5} \quad (3.1)$$

para $L_r > L_{max}$, $K_r = 0$

Los puntos coordinados sobre el diagrama fueron calculados a partir de las siguientes expresiones [10]:

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{Mat}}$$

$$K_I^P = (Y\sigma)_P \sqrt{\pi a} \quad (3.2)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y}$$

Donde K_r es la razón del factor de intensidad de esfuerzos principal o nominal, K_I^P , con la tenacidad a la fractura, K_{mat} , Y es el factor de corrección del factor de intensidad de esfuerzos, a es la longitud de grieta, L_r es la razón de la tensión de referencia en la sección neta, σ_{ref} , y σ_y el límite elástico.

Por otra parte, debido a que el componente se une a la columna del puente mediante el proceso de soldadura y el análisis de falla mostró que la fractura estaba del lado del metal base, se consideró de una manera conservadora una interacción plástica más un esfuerzo residual, en el cual este último tiene el mismo valor que el límite de fluencia del material base y no contribuye al colapso plástico, solo se tuvo en cuenta para el cálculo del parámetro K_r [10]. Donde en una situación general sin desalineamiento o discontinuidades locales, K_r es definida como:

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{Mat}} + \frac{K_I^S}{K_{Mat}} + \rho \quad (3.3)$$

$$K_I = (Y\sigma)_P + (Y\sigma)_S \sqrt{\pi a} \quad (3.4)$$

$$(Y\sigma)_P = Mf_w (M_m P_m + M_b P_b) \quad (3.5)$$

$$(Y\sigma)_S = (M_m Q_w + M_b Q_b) \quad (3.6)$$

Donde K_I^S es factor de intensidad de esfuerzos debido a las tensiones residuales y ρ es el factor de corrección por plasticidad, si la razón $K_I^S/(K_I^P/L_r)$ es menor que 4 entonces ρ , es definida de acuerdo con el procedimiento simplificado de la BS7910 (anexo R), de la siguiente forma:

$$\rho = \rho_1 \quad L_r \leq 0.8 \quad (3.4)$$

$$\rho = 4\rho_1(1.05 - L_r) \quad 0.8 < L_r < 1.05 \quad (3.5)$$

$$\rho=0 \qquad 1.05 \leq Lr \qquad (3.6)$$

$$\rho_1 = 0.1 \left(\frac{K_I^S L_r}{K_I^P} \right)^{0.714} - 0.007 \left(\frac{K_I^S L_r}{K_I^P} \right)^2 + 0.00003 \left(\frac{K_I^S L_r}{K_I^P} \right)^5 \qquad (3.7)$$

El defecto analizado fue el siguiente:

a) Grieta elíptica superficial postulada con tres razones geométricas: $a/2c = 0.2$, 0.5 y 1.0 [10]. Esto corresponde a la estimación más general de los anclajes, asumiendo la hipótesis que este tipo de defectos es el más representativo del componente estructural analizado. La forma esquemática de la geometría se muestra en la figura 3.4.

Se asumió que no había propagación de grietas por fatiga [11], debido a que la variación de los esfuerzos en este tipo de anclaje es muy limitada y, por consiguiente, el proceso de fatiga probablemente no ocurra.

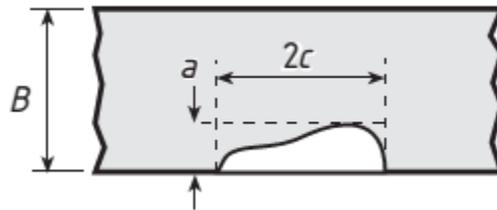


Figura 3.4 Representación esquemática de las geometrías de grietas en una placa: (a) Grieta semielíptica superficial

La evaluación se realizó para determinar si el anclaje trabajaría de forma segura bajo los siguientes escenarios:

a) Se tomó el historial del tránsito vehicular del mes de julio del 2015, porque fue el mes donde ocurrió un evento crítico en uno de los anclajes. Siendo el esfuerzo de tensión máximo resultante en los anclajes de 301.05 MPa.

b) De los 112 tirantes, el resultado de la simulación por elemento finito de la carga máxima originada cuando cuatro tractocamiones (T3S3) están a la mitad del claro del puente, que corresponde a un esfuerzo de tensión (P_m) máximo de 354.071 MPa.

En ambos casos se realizó el análisis bajo las hipótesis de tensiones residuales por soldadura nulas y de tensiones residuales constantes en el espesor e iguales al esfuerzo de cedencia del material, de acuerdo con el "Level 1" del Annex C del FITNET FFS Procedure [12].

4 Resultados y Discusión

4.1 Metalografía y composición química

En la tabla 4.1 se muestra el análisis químico reportado por el proveedor para el acero utilizado en esta investigación y en la figura 4.1 aparece la microestructura del material, fundamentalmente ferrítico-perlítica. El tamaño de grano fue medido utilizando la plantilla comparativa de tamaños de grano del microscopio de platina invertida Olympus PMG3. Se observó que el tamaño de grano se encuentra entre 7 y 8 ASTM. La figura 4.2 muestra la microestructura ferrítico perlita mediante el microscopio electrónico de barrido S-3700 marca Hitachi.

Tabla 4.1 Composición química del anclaje.

| % en peso | Acero 4140 |
|-----------|------------|
| C | 0.41 |
| Si | 0.25 |
| Mn | 0.88 |
| P | 0.35 máx. |
| S | 0.040 máx. |
| Cr | 0.95 |
| Mo | 0.2 |

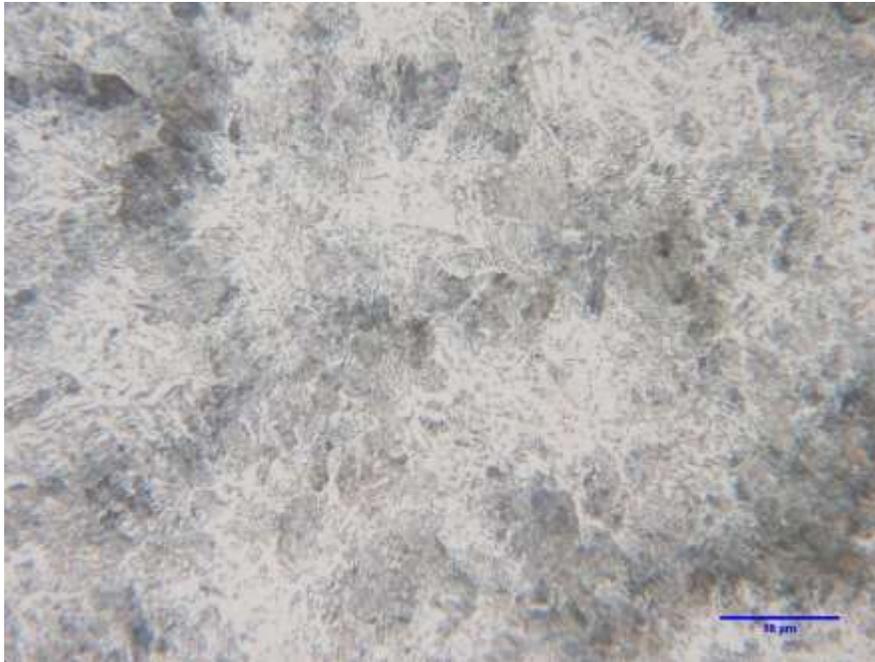


Figura 4.1 Microestructura de ferrita y perlita del acero 4140 observada en el microscopio



Figura 4.2 Microestructura de ferrita y perlita del acero 4140 observada en el microscopio electrónico de barrido.

4.2 Pruebas de tracción uniaxial

En la Tabla 4.2 se muestran los valores promedios, desviación estándar y porcentaje del coeficiente de variación de las propiedades mecánicas. De acuerdo con los resultados, el acero 4140 presenta un coeficiente de variación menor del 10%, por lo que se puede considerar aceptables los ensayos de tracción. Por otro lado, el promedio del porcentaje de elongación es 15%, lo cual implicaría una tendencia a comportarse de una manera dúctil debido al tipo de microestructura y propiedades mecánicas. Las curvas de esfuerzos versus deformación de los ensayos de tracción se presentan en la figura 4.3.

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas del acero.

| Probeta | E (MPa) | σ_Y (MPa) | σ_U (MPa) | %e |
|-----------------------|---------|------------------|------------------|-------|
| 1 | 201002 | 311.28 | 631.46 | 12.38 |
| 3 | 200507 | 270.21 | 663.29 | 13.34 |
| 5 | 200306 | 305.53 | 636.29 | 16.72 |
| 6 | 200016 | 287.13 | 652.19 | 15.90 |
| 7 | 200873 | 289.95 | 645.68 | 16.83 |
| 8 | 201296 | 307.34 | 637.86 | 15.69 |
| 10 | 201564 | 270.79 | 662.79 | 15.10 |
| 11 | 203313 | 297.74 | 631.99 | 16.12 |
| Promedio | 201110 | 292.50 | 645.20 | 15.26 |
| Desv. Estandar | 1025.99 | 15.92 | 13.00 | 1.60 |
| %C.V | 0.51 | 5.44 | 2.01 | 10.49 |

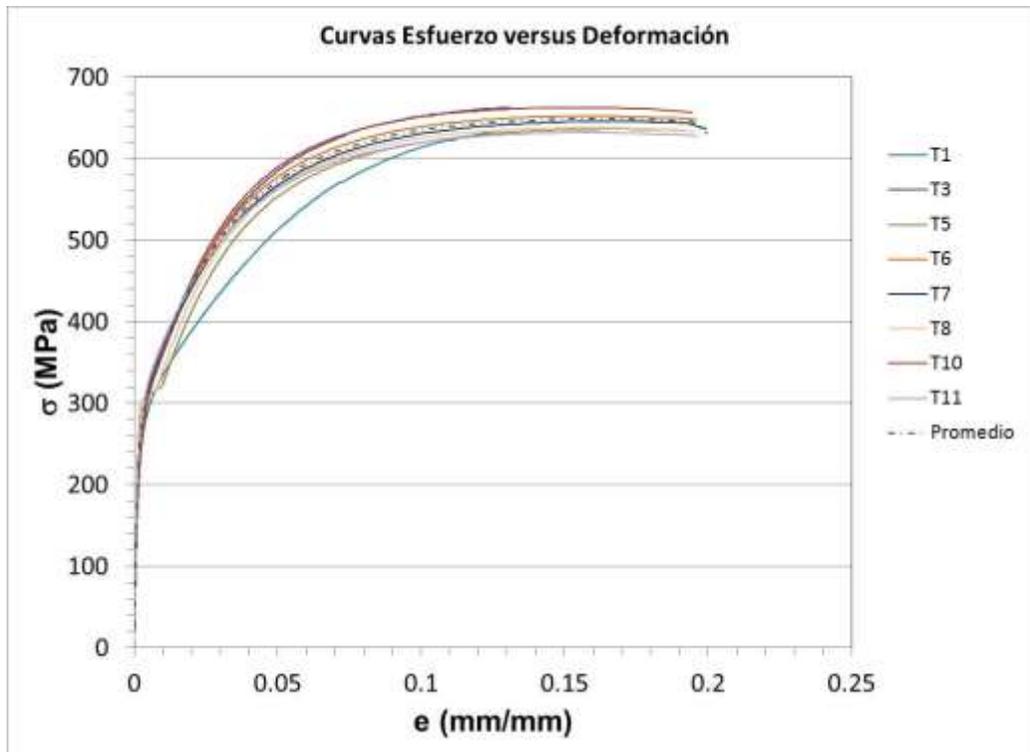


Figura 4.3 Curvas de esfuerzo versus deformación de algunas de las probetas ensayadas en tracción uniaxial.

4.3 Ensayos de resistencia a la fractura

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos de cada una de las probetas ensayadas hasta la fractura. Los resultados de las probetas con radio cero se consideraron para determinar la tenacidad a la fractura. Resumiendo en la Tabla 4.4 los resultados obtenidos, los cuales muestran que el valor más alto de tenacidad a la fractura se obtiene en las probetas con radio igual a 2.5 mm y la menor tenacidad se obtiene con las probetas preagrietadas con un radio de cero milímetros. También se nota que la mayor dispersión de esta propiedad se presenta con las probetas con radio de 1.5 mm y una menor dispersión con radio de 2.5 mm.

Tabla 4.3 Resultados de la tenacidad a la fractura de los especímenes con radios distintos de entalla.

| Probeta | Radio de entalla (mm) | $P_{m\acute{a}x}$ (kN) | K_{Jc} (MPa m ^{1/2}) |
|---------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0.0 | 15.11 | 190.40 |
| 2 | 0.0 | 14.35 | 176.12 |
| 3 | 0.0 | 14.89 | 188.88 |
| 4 | 0.0 | 14.84 | 200.89 |
| 5 | 0.0 | 14.88 | 195.41 |
| 11 | 0.5 | 15.64 | 318.63 |
| 12 | 0.5 | 15.99 | 287.57 |
| 13 | 0.5 | 16.09 | 296.67 |
| 14 | 0.5 | 15.72 | 297.01 |
| 21 | 1.0 | 16.67 | 340.88 |
| 22 | 1.0 | 16.76 | 362.26 |
| 23 | 1.0 | 16.94 | 339.61 |
| 24 | 1.0 | 16.79 | 326.98 |
| 25 | 1.0 | 16.84 | 329.86 |
| 31 | 1.5 | 17.39 | 376.38 |
| 32 | 1.5 | 17.80 | 331.02 |
| 33 | 1.5 | 17.76 | 331.15 |
| 34 | 1.5 | 17.20 | 330.44 |
| 35 | 1.5 | 17.98 | 384.13 |
| 41 | 2.0 | 18.31 | 431.48 |
| 42 | 2.0 | 18.06 | 424.49 |
| 43 | 2.0 | 16.74 | 401.69 |
| 44 | 2.0 | 17.91 | 406.45 |
| 45 | 2.0 | 18.07 | 422.06 |
| 51 | 2.5 | 19.46 | 474.00 |
| 52 | 2.5 | 19.69 | 453.02 |
| 53 | 2.5 | 19.64 | 452.61 |
| 54 | 2.5 | 19.23 | 452.61 |
| 55 | 2.5 | 18.81 | 476.85 |

Tabla 4.4 Resumen de los ensayos de resistencia a la fractura.

| Número de probetas | Radio de entalla (mm) | $P_{m\acute{a}x}$ (kN) Promedio | K_{JC} (MPa m ^{1/2}) Promedio | K_{JC} Desv. Estándar | K_{JC} % C.V. |
|--------------------|-----------------------|------------------------------------|--|----------------------------|--------------------|
| 5 | 0.0 | 14.82 | 190.34 | 9.24 | 4.85 |
| 4 | 0.5 | 15.86 | 305.95 | 13.19 | 4.31 |
| 5 | 1.0 | 16.80 | 339.92 | 13.86 | 4.08 |
| 5 | 1.5 | 17.63 | 350.62 | 27.19 | 7.75 |
| 5 | 2.0 | 17.82 | 417.23 | 12.62 | 3.02 |
| 5 | 2.5 | 19.37 | 461.81 | 12.46 | 2.70 |

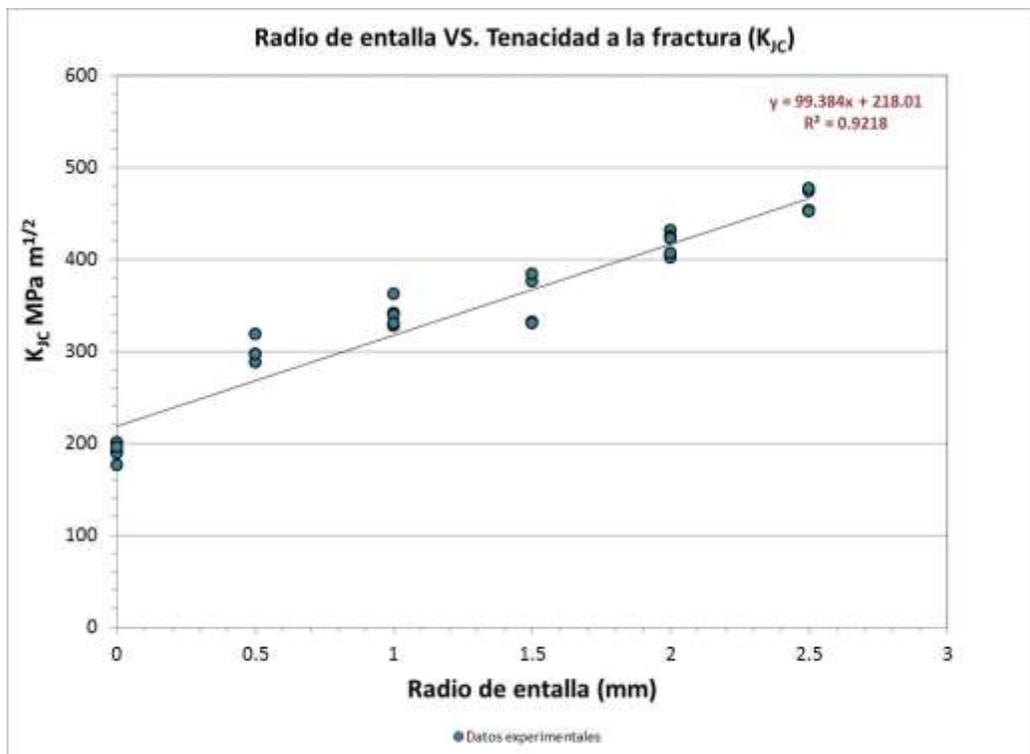


Figura 4.4 Resultados de tenacidad a la fractura en función del radio de la entalla.

La figuras 4.4 muestra la correlación que existe entre el radio de la entalla con la tenacidad a la fractura. La cual indica que entre más grande sea el radio de la entalla, la tenacidad a la fractura se incrementa.

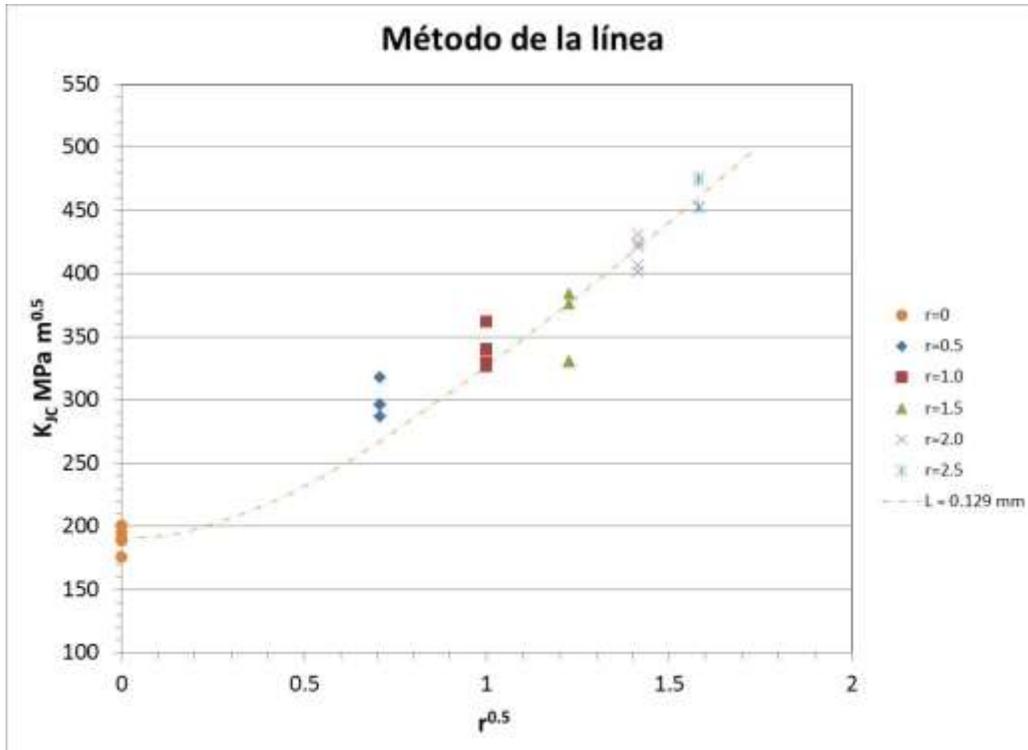


Figura 4.5 Resultados de tenacidad a la fractura en función del radio de la entalla.

Las figuras 4.5 y 4.6 recogen los resultados obtenidos del efecto del radio de la entalla en la tenacidad a la fractura de acuerdo a la teoría de las distancias críticas. Donde se determinó la distancia crítica de acuerdo al método de la línea y el método del punto. Se puede decir que los resultados obtenidos son muy aproximados y se percibe cierto efecto del radio de la entalla, pues existe una tendencia de la resistencia a fractura al tomar mayores valores a medida que aumenta el radio de entalla.

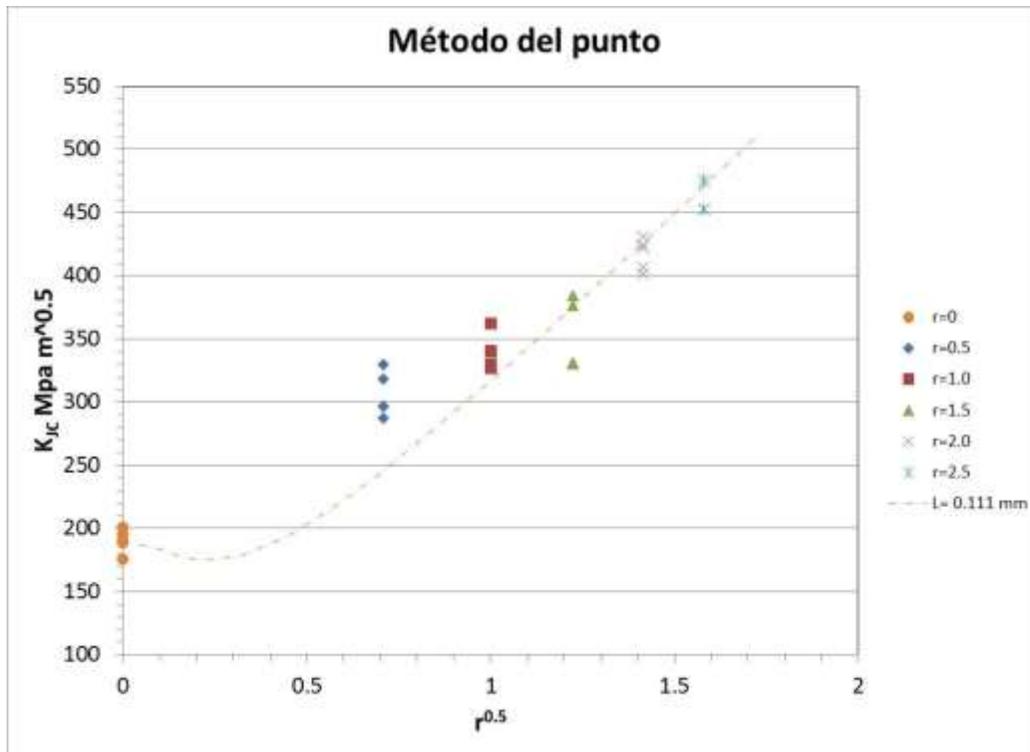


Figura 4.6 Resultados de tenacidad a la fractura en función del radio de la entalla.

4.4 Fractografía

La superficie de fractura característica de los ensayos de resistencia a la fractura de las probeta 2 con un radio de entalla de cero milímetros y la probeta 5 con un radio de entalla de 2.5 mm aparecen desde la figura 4.7 hasta la figura y 4.13 en donde se perciben los cambios de los mecanismos de fractura.

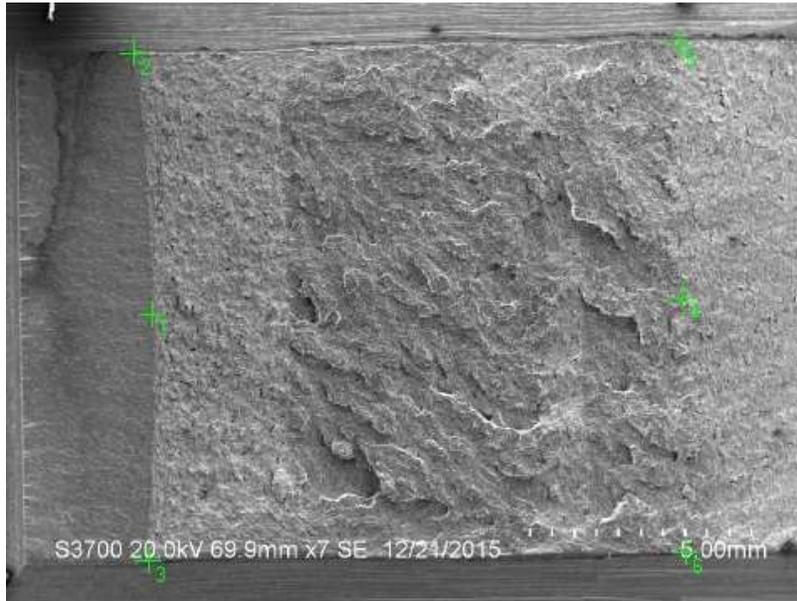


Figura 4.7 Macro de la superficie de fractura donde se analizó el mecanismo de fractura de la probeta 2 con radio de entalla de 0.0 mm.

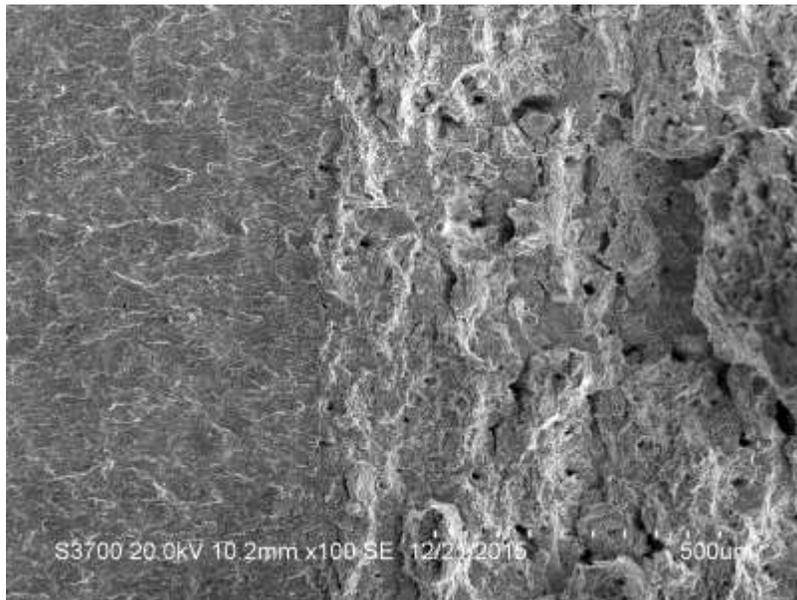


Figura 4.8 Superficie de fractura en la marca 1, zona de preagrietamiento por fatiga e inicio de grieta. Se observa un mecanismo de fractura dúctil denominado coalescencia de microhuecos.

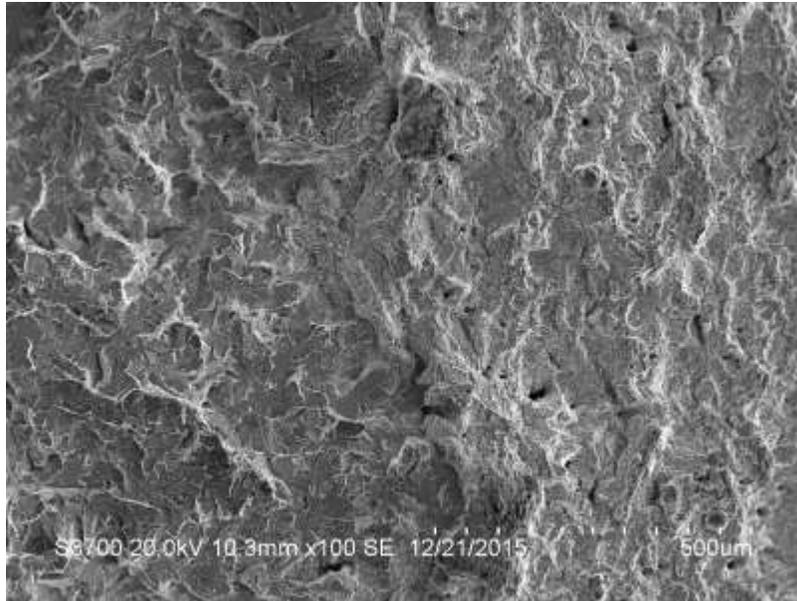


Figura 4.9 Superficie de fractura en la marca 4, zona de fractura final, zona ubicada en el centro de la probeta 2 con radio de entalla de 0.0 mm. Se observa un mecanismo de fractura frágil denominado cuasiclívaje.

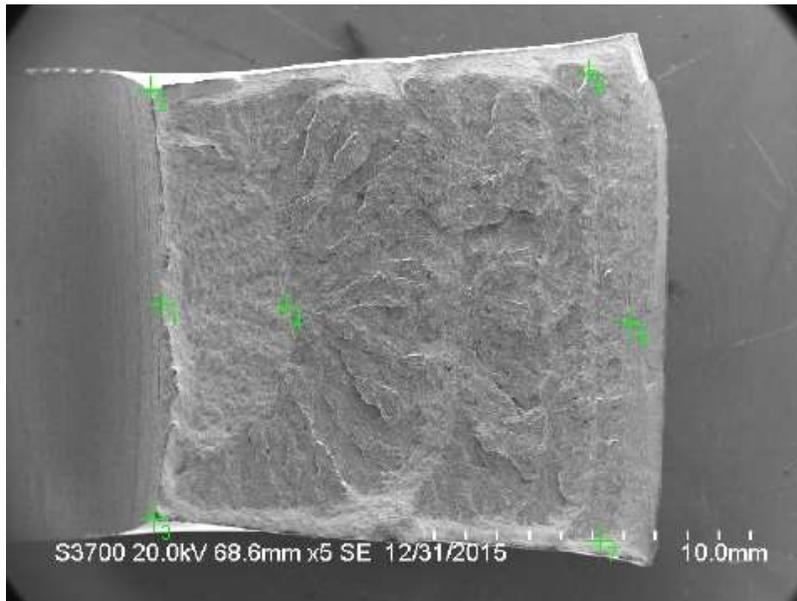


Figura 4.10 Macro de la superficie de fractura donde se analizó el mecanismo de fractura de la probeta 52 con radio de entalla de 2.5 mm.

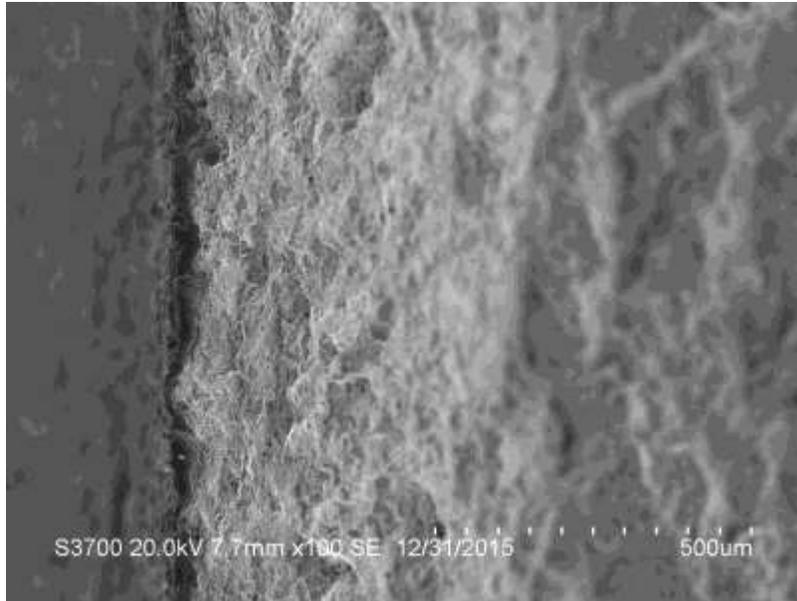


Figura 4.11 Marca 1 de la superficie de fractura entre la zona de inicio de grieta, zona ubicada en el centro de la probeta 52 con radio de entalla de 2.5 mm.

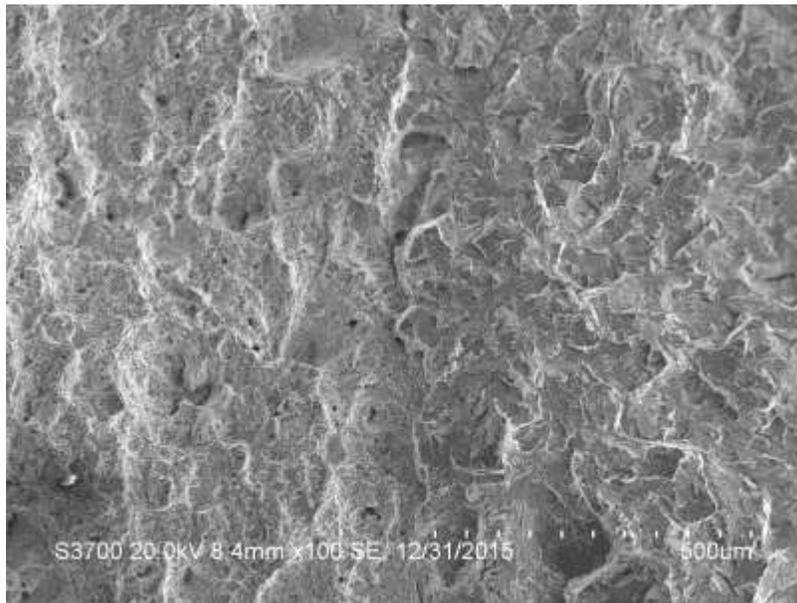


Figura 4.12 Marca 4 de la superficie de fractura en la zona central intermedia de crecimiento de grieta, donde se observa el cambio de mecanismo de fractura de dúctil a frágil. Probeta 5 con radio de entalla de 2.5 mm.

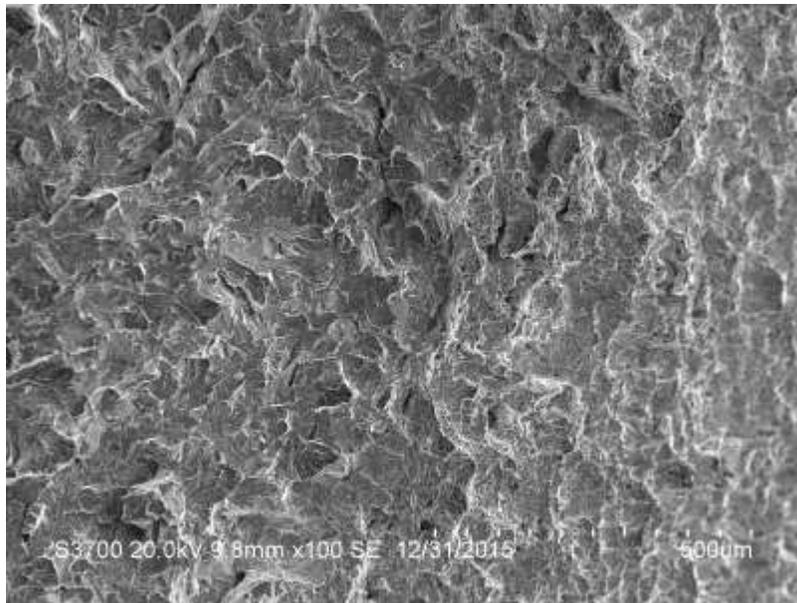


Figura 4.13 Superficie de fractura en la marca 5, zona de fractura final, zona ubicada en el centro de la probeta 52 con radio de entalla de 2.5 mm. Se observa un mecanismo de fractura frágil denominado cuasiclivaje.

4.4 Análisis FAD

Se realizó la estimación de la integridad estructural siguiendo el procedimiento delineado en la sección 3.5 de la norma BS 7910 [10]. En el caso de la grieta semielíptica y el factor de intensidad de esfuerzos (K_I) fueron medidos en el punto de la cara frontal donde el valor es máximo. Esto corresponde al punto de la superficie para razones geométricas ($a/2c$) de 0.2, 0.5 y 1.0, en relación con el punto más profundo para una razón geométrica de 0.2. El valor de K_{mat} es equivalente al valor mínimo de tres ensayos de fractura, siguiendo las indicaciones de la BS7910 Por consiguiente, el número de ensayos realizados en condición de fisurados (5 ensayos con un radio de entalla igual a cero) corresponden al valor mínimo mostrado en la tabla 4.3 ($K_{mat} = 176.12 \text{ MPa m}^{1/2}$). El valor del punto de cedencia fue considerado el valor promedio ($\sigma_Y = 292.50 \text{ MPa}$), ver tabla 4.2.

La figura 4.14 muestra los resultados sin tomar en cuenta el esfuerzo residual. El análisis corresponde a la situación donde el tamaño de defecto se incrementa y la carga permanece constante. La grafica muestra diferentes relaciones geométricas asumiendo la carga máxima promedio del mes de julio de 2015. Una longitud inicial del defecto de 2.0 mm resulta representativo de la resolución del ultrasonido (NDT) [13]. De la figura se nota que la situación más crítica es la razón geométrica de $a/2c=0.2$ porque cruza la línea de falla y las otras razones geométricas no alcanzan dicha línea. Por lo cual la razón geométrica de 0.2 se utilizó para los análisis posteriores del efecto del radio de la entalla.

En la figura 4.15 se comparan el efecto del radio de la entalla en la longitud de grieta crítico para una razón geométrica de $a/2c= 0.2$. Se nota que con los radios distintos de cero tienden a desplazar hacia arriba y convergen las coordenadas (K_r y L_r) en un punto sin importar el tamaño del radio de la entalla. En otras palabras, si el valor de la tenacidad a la fractura es constante, con distintos radios se necesitaría distintas cargas para alcanzar la longitud de grieta crítica.

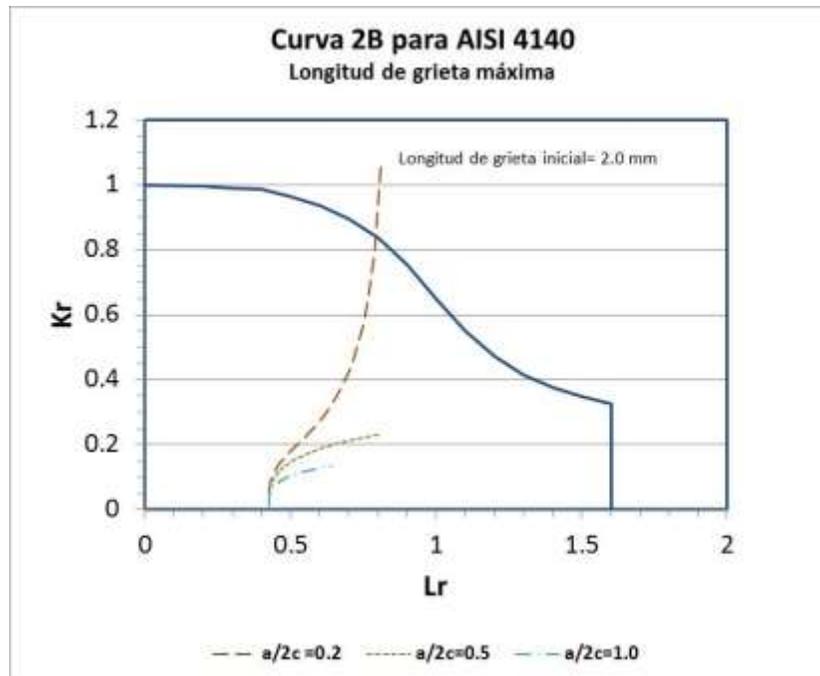


Figura 4.14 Efecto de las diferentes razones geométricas en la longitud de grieta crítica considerando una grieta elíptica superficial postulada.

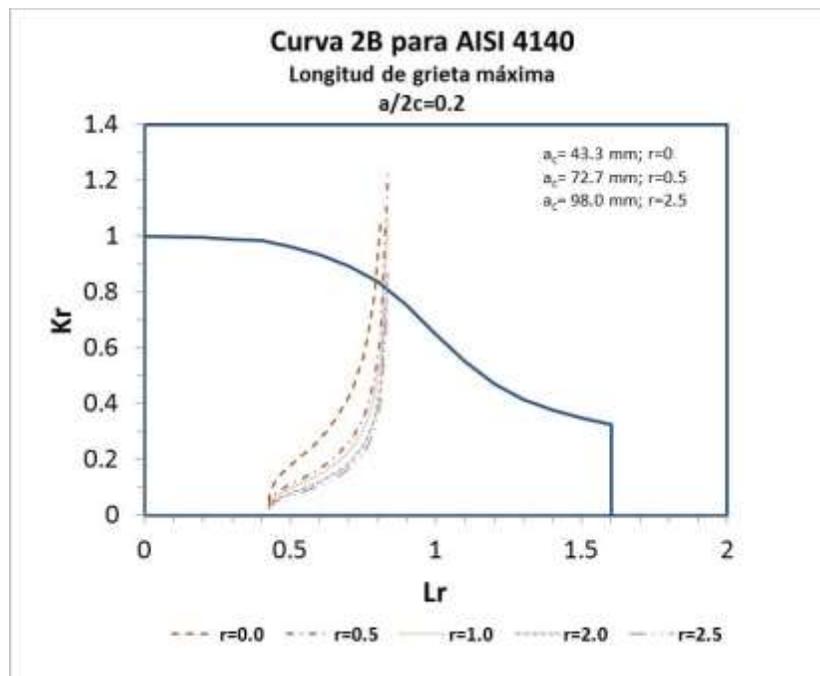


Figura 4.15 Efecto del radio de la entalla en la longitud de grieta crítica.

En las hipótesis de carga, se consideraron dos escenarios; con y sin esfuerzo residual. La figura 4.16 muestra el análisis realizado para un defecto de longitud de 2 mm, con diferentes radios y una razón de geométrica de 0.2. No se toma en cuenta los esfuerzos residuales. De la gráfica se observa que todos los valores críticos intersectan la línea de L_r^{\max} , que es la condición donde se produce el colapso plástico.

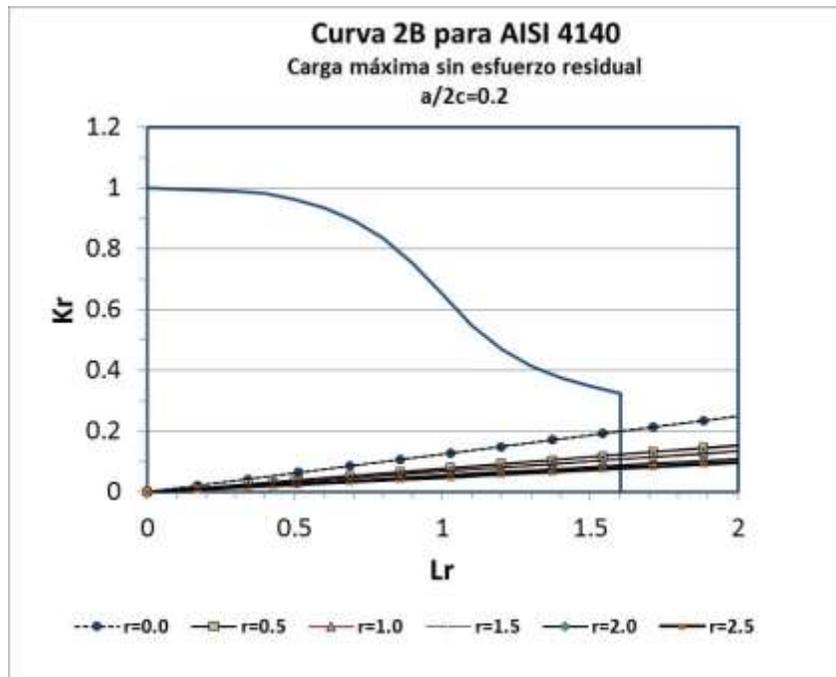


Figura 4.16 Efecto del radio de la entalla en la carga crítica considerando un defecto superficial postulado con una razón geométrica de $a/2c=0.2$ y diferentes radios.

El análisis con esfuerzo residual fue realizado con base en el nivel 1 del FITNET FFS Annex C (perfiles de esfuerzos residuales) [12], el cual considera que la componente longitudinal y transversal de los esfuerzos residuales es de tensión y distribuido uniformemente en la dirección transversal y a través del espesor, con una magnitud igual a la resistencia de cedencia a temperatura ambiente; $Q_m = \sigma_Y$. Se asumió que la tenacidad a la fractura del material en las áreas donde se presenta el esfuerzo residual es igual al del material base, dado que no presentan cambios microestructurales sustanciales en la microestructura. Se observa cómo los puntos de las coordenadas K_r y L_r se desplazan hacia arriba con los esfuerzos residuales, ver figura 4.17. Por consiguiente, al considerar los esfuerzos residuales y un radio igual a cero, se observa un efecto mayor en la integridad estructural del anclaje, debido a que la línea se desplaza hacia arriba quedando el

valor crítico en el límite donde se puede presentar un cambio en los mecanismo de fractura; de colapso plástico a un comportamiento elástico-plástico.

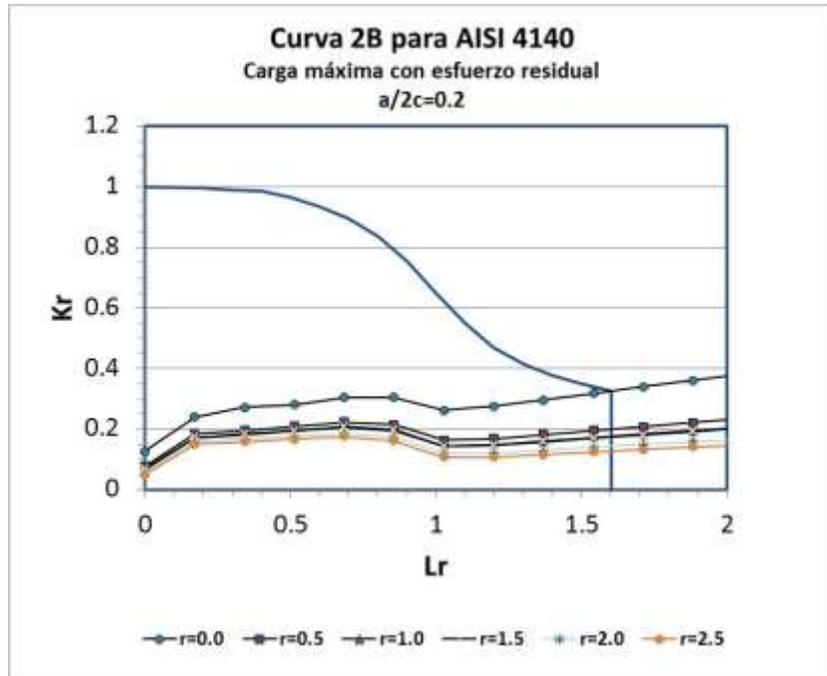


Figura 4.17 Efecto del radio de entalla y esfuerzo residual en la carga crítica para un defecto elíptica superficial postulado de $a/2c=0.2$ y radios distintos.

En la tabla 4.5 se muestra el factor de reserva para la carga, carga máxima y el factor de intensidad e esfuerzo límite. En la tabla se nota una disminución del 15% del factor de reserva para la condición donde se toma en cuenta los esfuerzos residuales con respecto al factor que no los toma en cuenta. También en la tabla se percibe que la carga máxima es la misma para las dos condiciones de carga (con y sin esfuerzo residual) y sin importa el radio de la entalla. Se presenta un incremento del 60% del factor de intensidad de esfuerzos límite por el efecto del esfuerzo residual.

Tabla 4.5. Resultados de factores de reserva (F^L), carga máxima (P_{max}) y factor de intensidad de esfuerzos límite ($K_{Límite}$).

| Cargas de operación | Tipo de esfuerzo | Parámetros | Radio de entalla | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | r = 0 | r = 0.5 | r = 1.0 | r = 1.5 | r = 2.0 | r = 2.5 |
| Julio de 2015 | Sin esfuerzo residual | F^L | 3.76 | 3.76 | 3.76 | 3.76 | 3.76 | 3.76 |
| | | P_{max} (Ton) | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 |
| | | $K_{Límite}$ | 35.32 | 35.32 | 35.32 | 35.32 | 35.32 | 35.32 |
| | Con esfuerzo residual | F^L | 3.76 | 3.76 | 3.76 | 3.76 | 3.76 | 3.76 |
| | | P_{max} (Ton) | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 |
| | | $K_{límite}$ | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 |
| T3S3 | Sin esfuerzo residual | F^L | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.19 |
| | | P_{max} (Ton) | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 |
| | | $K_{LímiteC}$ | 35.32 | 35.32 | 35.32 | 35.32 | 35.32 | 35.32 |
| | Con esfuerzo residual | F^L | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.19 | 3.19 |
| | | P_{max} (Ton) | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 | 1131.02 |
| | | $K_{Límite}$ | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 |

5 Conclusiones

1. El material 4140 tiene una microestructura de normalizado y sus propiedades mecánicas corresponden a este tipo de microestructura (perlita fina + ferrita), la cual se espera un comportamiento dúctil, que fue corroborado por la metalografía, pruebas de tensión y fractura. El análisis fractográfico señala un cambio en el mecanismo de fractura dúctil a una fractura por cuasiclivaje, seguramente debido al endurecimiento por deformación que sufre el material durante los ensayos de fractura.
2. Los ensayos de tenacidad a la fractura muestran que existe una correlación entre la tenacidad a la fractura y el radio de la entalla, donde la tenacidad se incrementa por el efecto del radio de la entalla.
3. Los diagramas de evaluación de falla indican que el componente operará de manera segura en las dos condiciones de carga analizadas, pero cuando las cargas de operación se incrementen, posiblemente, el componente fallará por colapso plástico.

Bibliografía

- [1] Cicero S., Madrazo V., Carrascal I.A., Cicero R., Assessment of notched structural components using failure assessment diagrams and the theory of critical distances. *Engineering fracture mechanics* 78 (2011) 2809-2825.
- [2] Cicero S., Madrazo V., Carrascal I.A., Laporte M. Evaluación de entallas mediante diagramas de fallo. *Anales de Mecánica de la Fractura* 28, Vol. 2(2011).
- [3] Milne I., Ainswoth R.A., Dowling A.R., Stewart A.T. Assessment of the integrity of structures containing defects. *Int. J. Press & Piping* 32 (1988), 3-104.
- [4] R6. Assessment of the integrity of structures containing defects. Revision 4. Gloucester: British Energy Generation Limited; 2001.
- [5] Taylor, D., *Theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics*, Elsevier, 2007
- [6] Creager M., Pairs C., Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking. *Int. J. Fracture* 1967; 3:247-52.
- [7] Bramfitt BL, Benschoter OA. *Metallographer's guide*. Materials Park, Ohio: ASM International; 2002.
- [8] E 8-04 Standard test method for tension testing of metallic materials of Metallic Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. O3.01. Easton, USA.
- [9] ASTM Standard E 1820-11, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", *ASTM Standards on Disc*, Vol.03.01. 2011. West Conshohocken, Philadelphia.
- [10] BS 7910: 2005. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. London: British Standards Institution; 2005.
- [11] Astiz MA, Composite construction in cable-stayed bridge towers. In: *IABSE reports*. vol. 999; 1997. p. 127–32.
- [12] Kocak M, Hadley I, Szavai S, Tkach Y, Taylor N, editors. *FITNET fitness-for-service (FFS) procedure*, vol. II. Geesthacht: GKSS; 2008
- [13] Kocak M, Webster S, Janosch JJ, Ainsworth RA, Koers R, editors. *FITNET fitness-for-service (FFS) procedure*, vol. I. Geesthacht: GKSS; 2008.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>