



*Certificación ISO 9001:2008 ‡*

---

---

# **Metodología para determinar el comportamiento estadístico de las propiedades mecánicas de elementos de acero estructural para estudios de confiabilidad**

José Alfredo López López  
Francisco Javier Carrión Viramontes  
Jorge Terán Guillén  
María Guadalupe Lomelí González  
Andrés Hernández Guzmán  
Mario Alberto Montes Zea  
Juan Antonio Quintana Rodríguez  
Saúl Enrique Crespo Sánchez

**Publicación Técnica No. 411  
Sanfandila, Qro. 2014**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Metodología para determinar el comportamiento estadístico de las propiedades mecánicas de elementos de acero estructural para estudios de confiabilidad**

**Publicación Técnica No. 411**  
**Sanfandila, Qro. 2014**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. José Alfredo López López, Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Dr. Jorge Terán Guillén, Ing. María Guadalupe Lomelí González, Ing. Andrés Hernández Guzmán, Tec. Mario Alberto Montes Zea, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez y el M. en I. Saúl Enrique Crespo Sánchez.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid por la revisión y comentarios de este estudio.

# Contenido

---

Resumen	iii
Abstract	v
Resumen ejecutivo	vii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Antecedentes	7
2.1 Confiabilidad Estructural	7
2.2 Puente Río Papaloapan	14
Capítulo 3. Metodología	19
3.1 Desarrollo del estudio	19
3.2 Pruebas No Destructivas (PND)	22
3.3 Pruebas Destructivas (PD)	27
Capítulo 4. Resultados	39
4.1 Pruebas No Destructivas (PND)	39
4.2 Pruebas Destructivas (PD)	54
4.3 Funciones de Densidad de Probabilidad	76
Capítulo 5. Conclusiones	95
Referencias	97

# Resumen

---

En este estudio se muestra la metodología para determinar el comportamiento estadístico de las propiedades mecánicas de elementos de acero estructural para estudios de confiabilidad. Para cumplir con este propósito se presenta el caso de los elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan que fueron retirados de servicio en 2008 y 2009. Uno de los objetivos de este documento es que otros estudios lo puedan tomar como una guía, por lo que se proporcionan los procedimientos de cada prueba realizada.

Los resultados pueden ser utilizados posteriormente en estudios de simulación, estimación de la vida residual, evaluación de la probabilidad de falla y confiabilidad estructural.

Al igual que en un estudio anterior, el material cumple con los requisitos químicos que indica la norma ASTM A148/A148M (norma de diseño), en lo que respecta al contenido máximo de fósforo y azufre, así como en las propiedades mecánicas del esfuerzo último a la tensión y el esfuerzo de cedencia. Pero no cumple en lo que se refiere a la elongación y la reducción de área (valor mínimo), lo que significa que el material tiene baja ductilidad, por lo que en procesos de acumulación de daño no existirán deformaciones evidentes a simple vista.



# Abstract

---

This document presents the methodology to determine the statistical behavior of the mechanical properties of structural steel elements for reliability studies. To comply with this purpose we are presenting the case of elements of the upper anchorage of the bridge Río Papaloapan that were removed from service in 2008 and 2009. One of the goals of this document is that other researches may take this as a reference, so we provide here the procedures on each test. These results can be used in simulation studies, residual life estimation, evaluation of the probability of failure and structural reliability.

As in a previous study, the material meets the chemical requirements that indicates the ASTM A148/A148M standard (standard of design), regarding the maximum content of phosphorus and sulfur, as well as the mechanical properties of the ultimate tension stress and the yield stress. But the material fails in elongation and reduction of area (minimum) test's, which means that the material has low ductility, so that processes of accumulation of damage there will not be detected easily.



# Resumen ejecutivo

---

En esta investigación se establece la metodología para determinar el comportamiento estadístico de las propiedades mecánicas de elementos de acero estructural para estudios de confiabilidad. Con este propósito se presenta el caso de los elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan que fueron retirados del puente en el año 2008 y 2009, y en donde participó el Instituto Mexicano del Transporte.

Un objetivo del trabajo es mostrar la metodología empleada para que otros estudios lo puedan tomar como una guía. Cabe aclarar que el trabajo se realizó considerando que personal está capacitado para poder realizar los ensayos aquí expuestos de acuerdo a las normas empleadas, por lo que solamente se proporcionan los procedimientos de cada prueba.

Los resultados que se presentan en este trabajo pueden ser utilizados posteriormente en estudios de confiabilidad o en otro tipo de investigaciones, como por ejemplo, estudios de simulación de crecimiento de grietas, calibración de modelos estructurales, estimación de la vida residual o evaluación de la probabilidad de falla en elementos de anclaje superior.

Para este fin, el trabajo se dividió en 5 capítulos, el primer capítulo de refiere a la introducción, en donde se explica de manera somera los conceptos de probabilidad de falla, así como el proceso para poder realizar las evaluaciones de la confiabilidad estructural, la metodología propuesta para obtener el comportamiento estadístico de las propiedades mecánicas y el proceso para obtener las funciones de densidad de probabilidad de cada propiedad mecánica.

En el segundo capítulo se enfoca hacia los antecedentes del proyecto, en donde se detalla el tema de la confiabilidad estructural y se explica en forma breve el proyecto de rehabilitación del puente Río Papaloapan, que es la fuente del material utilizado en este estudio.

Aquí cabe aclarar que los estudios de confiabilidad estructural se emplean dos tipos de distribuciones, una que se refiere a la resistencia y otra que trata sobre las cargas a las que es sujeto el material. En este trabajo solamente nos referimos al caso de la resistencia, es decir, los ensayos que son necesarios para obtener la curva de probabilidad de la resistencia del material y de los parámetros que la reducen, como es la presencia de poros, inclusiones o grietas, que dan por resultado una de las fuentes de entrada en los modelos de deterioro.

En el tercer capítulo se expone la metodología para la obtención de las propiedades mecánicas del material y de los parámetros que la reducen, además se explica el procedimiento de prueba de cada uno de los ensayos realizados.

El cuarto capítulo trata sobre los resultados obtenidos con la metodología empleada, así como la generación de las funciones de densidad de probabilidad de cada parámetro de prueba y las ecuaciones con las que se pueden realizar las simulaciones a partir de estas curvas.

Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo, en donde se destaca que:

- a) Se encontraron discontinuidades en la superficie de los elementos de anclaje estudiados con el empleo de líquidos penetrantes.
- b) Al igual que en estudios realizados en el año 2000, el material cumple con los requisitos químicos que la norma ASTM A148/A148M, en lo que respecta al contenido máximo de fósforo y azufre, así como en las propiedades mecánicas del esfuerzo último a la tensión y el esfuerzo de cedencia.
- c) Pero no cumplió en lo que se refiere a la elongación mínima y la reducción de área, lo que significa que el material tiene baja ductilidad.
- d) En lo que respecta a las pruebas de mecánica de la fractura, el material cumple en lo que respecta a la pendiente  $m$ , la cual es similar a otros materiales de su tipo, pero la constante  $C$  es mayor, lo que en su conjunto indica que el material al aplicar la ecuación de Paris, tiene mayor velocidad de crecimiento de grieta comparado con materiales como el acero al carbono o con aceros forjados.

Lo anterior aunado a que se encontraron zonas con diferente dureza, así como la presencia de micro poros y grietas cortas, en la parte media del elemento de anclaje superior, hace que estos elementos estructurales sean susceptibles a los procesos de acumulación de daño por fatiga u otros mecanismos de falla.

# 1 Introducción

---

Este trabajo tiene como objetivo dar a conocer la metodología empleada para describir el comportamiento estadístico de defectos superficiales e internos, así como de las propiedades mecánicas, químicas y metalográficas, de elementos de acero estructural, empleados en los estudios de confiabilidad estructural. Se ejemplifica, con el estudio del caso de elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan (Figura 1).



**Figura 1. Puente Río Papaloapan**

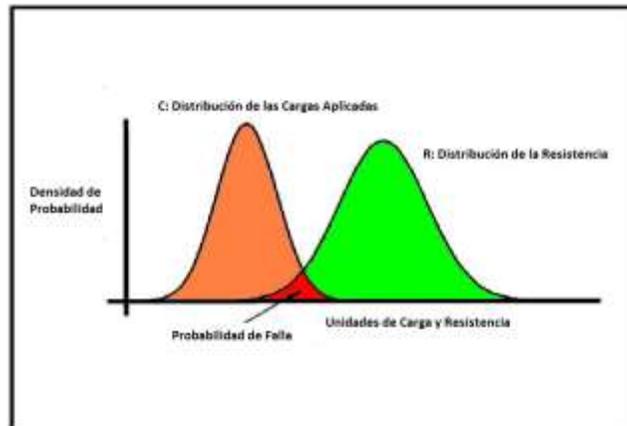
La palabra confiabilidad aquí nombrada se refiere a estimar la probabilidad de que un sistema -o los componentes del sistema- cumplan satisfactoriamente la función para los que fueron diseñados, durante un periodo de tiempo definido y en condiciones específicas de operación. Cuando un evento interrumpe el funcionamiento normal del sistema o uno de sus elementos, el resultado se le conoce como falla.

Los estudios de confiabilidad se han desarrollado conjuntamente con el desarrollo de la tecnología y se utilizan en diferentes campos del conocimiento, destacando la utilización desde la industria militar, aeronáutica, espacial y nuclear, hasta sistemas de ingeniería simples. También se emplean en las diferentes fases del desarrollo de los sistemas, que abarca desde la planeación, diseño, construcción, hasta la operación y mantenimiento. La importancia de realizar estos estudios,

radica en la posibilidad de aumentar la vida útil del sistema, que implica al mismo tiempo, la disminución de los riesgos: para la salud, la vida de las personas, para el medio ambiente e incluso económicos.

El objetivo de la teoría de la confiabilidad, es determinar principalmente las fallas de los sistemas, sin embargo, no investiga los fenómenos que la causan, el enfoque es hacia la frecuencia con que ocurren. Por lo tanto, no es una teoría de la física de las fallas, sino una teoría estadística, es decir, es una teoría de probabilidades.

Por lo tanto, en el caso de la confiabilidad estructural, el objetivo es determinar la probabilidad de falla de estructuras tomando en cuenta las incertidumbres asociadas con la resistencia de los materiales y las cargas a las que son sometidos. La respuesta de una estructura se evalúa por medio de modelos, que toman como base los datos estadísticos recopilados previamente para ambos casos, la resistencia y las cargas, para lo cual se emplean diferentes métodos para la cuantificación de la probabilidad de estos comportamientos. En la Figura 2, se indica el resultado de estas evaluaciones, en donde la zona marcada con rojo, es la zona de probabilidad de falla, es decir, en donde se traslapan las distribuciones de carga y resistencia.



**Figura 2. El concepto de probabilidad de falla**

El comportamiento ideal para que el sistema esté libre de falla, es que la distribución de la resistencia nunca se traslape con la distribución de las cargas aplicadas, sin embargo, en la realidad esto no sucede por varias razones. Para el caso de la distribución de carga aplicada existe una enorme variabilidad que incluye la acción del viento, sismos, cargas dinámicas atípicas, entre otros. Y en el caso de la distribución de la resistencia, ésta puede verse disminuida por la presencia de discontinuidades como poros o grietas, dureza heterogénea, esfuerzos residuales por soldaduras o generados durante la fabricación, o bien, debido a los procesos de corrosión o fatiga.

En la actualidad existen diversas propuestas para evaluar la confiabilidad estructural, una de ellas se indica en la Figura 3, en la cual se puede observar que es necesaria la evaluación de las propiedades mecánicas y químicas de los materiales, ya que estos definirán, la distribución de la resistencias (Figura 2), y son la fuente de datos iniciales en los estudios de simulación con los que se determina la confiabilidad de la estructura (Figura 3). Como puede observarse en esta figura, la evaluación de la confiabilidad estructural involucra varias etapas y diferentes estudios, en donde la finalidad es obtener los datos de las cargas aplicadas y de la resistencia del sistema, así como conocer los eventos que pueden aumentar la carga o disminuir la resistencia.



**Figura 3. Evaluación de la Confiabilidad Estructural**

Para evaluar la probabilidad de falla, se utiliza la simulación Monte Carlo, por lo que es necesario definir las funciones de densidad de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés) tanto de las cargas como de la resistencia y de los parámetros que aumentan o disminuyen a éstas. Este trabajo tiene por objetivo establecer solamente las funciones de densidad de probabilidad para la resistencia del material, así como, de los parámetros que pueden disminuirla, como es el caso de

la presencia de discontinuidades, poros o grietas. También se estableció, como otro objetivo, para comprender mejor el comportamiento del material, definir la composición química del material para conocer si cumple con la norma especificada por diseño y la microestructura para conocer el tamaño de grano, con el fin de tener un panorama general del material de estudio. En la Figura 4, se muestra el esquema de las pruebas realizadas y los parámetros de prueba asociados a cada uno.

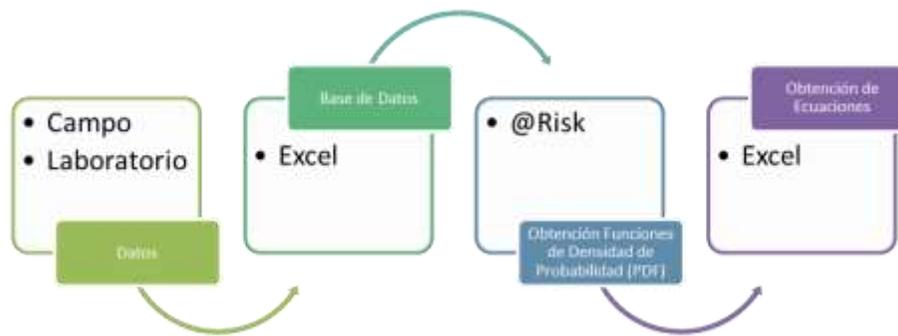


**Figura 4. Metodología para determinar el comportamiento estadístico de las propiedades mecánicas de elementos de acero estructural**

Como se observa en la Figura 4, existen dos conjuntos de pruebas: las pruebas no destructivas y las pruebas destructivas. La finalidad principal de las pruebas no destructivas, es encontrar discontinuidades superficiales (inspección visual y líquidos penetrantes) o discontinuidades internas (ultrasonido), con el fin de definir la distribución estadística de estos defectos y que pueden dar lugar a zonas de concentración de esfuerzos en los procesos de deterioro como la fatiga o la corrosión, lo cual provoca un decremento en la resistencia del material.

Por el otro lado, el conjunto de pruebas destructivas tienen por objetivo definir la resistencia del material (pruebas de tensión y de mecánica de la fractura), la composición química y metalográfica del acero.

Como se ha indicado anteriormente, estos datos son analizados posteriormente, para obtener las funciones de densidad de probabilidad, que describe las características estadísticas de cada parámetro de prueba, con el software @Risk<sup>[1]</sup> y con regresión lineal se obtienen las ecuaciones que serán utilizados en las simulaciones Monte Carlo. La Figura 5 muestra el esquema de este proceso.



**Figura 5. Esquema del proceso para obtener las funciones de densidad de probabilidad.**

Como ejemplo de la aplicación de esta metodología, se ha elegido presentar el caso de los elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan, los cuales fueron obtenidos de los trabajos de rehabilitación de los años 2008 (5 piezas) y 2009 (1 pieza).

El trabajo se dividió en 5 capítulos, el primer capítulo de refiere a esta introducción. El segundo capítulo se enfoca hacia los antecedentes del proyecto, en el cual se detalla el tema de la confiabilidad estructural y el proyecto de rehabilitación del puente Río Papaloapan, que es la fuente del material utilizado en este estudio.

En el tercer capítulo se expone la metodología para la obtención de las propiedades del material y se explica el procedimiento de prueba de cada uno de los ensayos realizados. Aquí cabe aclarar que en los estudios de confiabilidad estructural se emplean dos tipos de distribuciones, una que se refiere a la resistencia del material y otra que se enfoca a las cargas aplicadas al elemento de anclaje. En este trabajo solamente nos referimos al caso de la resistencia, es decir, los ensayos que son necesarios para obtener la curva de probabilidad de la resistencia y de los parámetros que la reducen, como es la presencia de poros, inclusiones o grietas, con el fin de poderlos considerar en los modelos de simulación. Para obtener la distribución de cargas, se realizan otros estudios de campo y de gabinete, como son los estudios de pesos y dimensiones, aforos vehiculares en el sitio, historial de las condiciones climáticas, sismos, entre otros, los cuales no se tratan en este documento.

En el cuarto capítulo se exponen los resultados obtenidos con la metodología empleada, así como la generación de las funciones de densidad de probabilidad de cada parámetro de prueba y las ecuaciones con las que se pueden realizar las simulaciones a partir de estas curvas. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y los principales hallazgos.



## **2 Antecedentes**

---

En este capítulo se exponen los antecedentes del proyecto, para lo cual se enfocan dos temas: los estudios de confiabilidad estructural y el proyecto de rehabilitación del puente Río Papaloapan, que es la fuente del material utilizado en el proyecto.

### **2.1 Confiabilidad estructural**

La palabra confiabilidad aquí nombrada se refiere a estimar la probabilidad de que un sistema -o los componentes del sistema- cumplan satisfactoriamente la función para las que fueron diseñados, durante un periodo de tiempo definido y en condiciones específicas de operación. Cuando un evento interrumpe el funcionamiento normal del sistema o uno de sus elementos, el resultado se le conoce como falla.

Los estudios de confiabilidad se han desarrollado conjuntamente con el desarrollo de la tecnología y se utilizan en diferentes campos del conocimiento, destacando la utilización desde la industria militar, la aeronáutica, espacial y nuclear, hasta sistemas de ingeniería simples. Se aplica también en las diferentes fases del desarrollo de los sistemas, que abarca desde la planeación, diseño, construcción, hasta la operación y el mantenimiento. La importancia de realizar estos estudios radica en la posibilidad de aumentar la vida útil del sistema, que implica al mismo tiempo, la disminución del riesgo para la salud, para la vida de las personas o para el medio ambiente.

#### **2.1.1 Desarrollo**

Fue durante la guerra de Corea, que el gobierno de Estados Unidos de América identificó que las fallas en los equipos electrónicos militares estaban representando graves pérdidas económicas y humanas, lo que dio lugar a una disminución de la efectividad militar. Desde entonces el departamento de defensa de Estados Unidos de América, reglamentó la compra de equipos electrónicos bajo especificaciones de confiabilidad.

En el año de 1950 se inicia el desarrollo de las plantas nucleares, es entonces que los estudios de confiabilidad se emplearon significativamente desde el proceso de diseño, hasta para garantizar la operación eficiente de los sistemas de seguridad.

En los años 60's los principales actores en los estudios teóricos y prácticos de la confiabilidad, son los Estados Unidos de América y la Unión Soviética. Es en esos años que empieza a expandirse la utilización de los conocimientos de confiabilidad

a otros países, a otros sistemas y tecnologías, por lo que se consolida la Teoría de la Confiabilidad como una teoría matemática.

### 2.1.2 El objetivo de la confiabilidad estructural

El objetivo de la teoría de la confiabilidad, es determinar principalmente las fallas de los sistemas, sin embargo, no investiga los fenómenos que la causan, el enfoque es hacia la frecuencia con que ocurren. Por lo tanto, no es una teoría de análisis de fallas, sino una teoría estadística, es decir, es una teoría de probabilidades.

En el caso de la confiabilidad estructural, el objetivo es determinar la probabilidad de falla de las estructuras, tomando en cuenta las incertidumbres asociadas con la resistencia de los materiales y las cargas aplicadas. La respuesta de una estructura se evalúa por medio de modelos de deterioro, que toman como base los datos estadísticos recopilados previamente para ambos casos, para la resistencia y para las cargas, y se emplean diferentes métodos para la cuantificación de la probabilidad de estos comportamientos.

### 2.1.3 Incertidumbres

Normalmente en las mediciones que se realizan ya sea en laboratorio o en campo, se establece la incertidumbre de la medición, la cual puede ser definida como un parámetro asociado al resultado de la medición, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos a la magnitud medida o mensurando<sup>[2]</sup>. Por este motivo es necesario realizar varias mediciones del mismo parámetro, con el fin de establecer la incertidumbre de estas mediciones, es decir, conocer su desviación estándar.

En los estudios de confiabilidad estructural, existen 3 incertidumbres asociadas: las físicas, las estadísticas y las del modelo de simulación.

- i) Las incertidumbres *físicas*, están asociadas a la variabilidad de la carga, a la geometría de la estructura o a las propiedades del material.
- ii) Las incertidumbres *estadísticas* son dependientes de la cantidad de datos disponibles para el análisis de algún parámetro en específico y disminuyen cuanto mayor sea la cantidad de información. En la mayoría de los casos el modelo probabilístico de las incertidumbres involucradas en el problema se hace asignándoles una función de probabilidad (función de densidad de probabilidad, PDF por sus siglas en inglés), con los parámetros de distribución estimados del análisis de la información recopilada y/o con base en la información subjetiva o por la experiencia previa. Estos parámetros son dependientes de la cantidad de datos recopilados y, también, influye el modelo matemático elegido para representar la función de densidad de probabilidad de los datos analizados, ya que al usar el modelo matemático en el cálculo de la confiabilidad estructural, podría suceder que el punto de falla más

probable se encuentre en las colas de las distribuciones, donde hay poca información y en donde la probabilidad de falla es muy sensible.

- iii) Las incertidumbres del *modelo* se deben a la idealización utilizada en el modelo de simulación, para calcular el comportamiento de la estructura y son el resultado de las simplificaciones realizadas, del desconocimiento de las condiciones de frontera, del efecto de otros parámetros y sus interrelaciones, los cuales no están incluidas en el modelo.

Con lo anteriormente expuesto, los estudios de confiabilidad tendrán una incertidumbre asociada, la cual dependerá en gran parte del grado de aproximación a la realidad de los modelos y, por lo tanto, a una correcta selección de las variables que representen en la medida de lo posible el fenómeno estudiado.

### 2.1.4 Sobre las variables

Un paso importante en el análisis de la confiabilidad, como se explicó anteriormente, es decidir cuáles parámetros deben ser modelados como variables aleatorias (variables estocásticas) y cuáles deben ser modelados como parámetros constantes (parámetros determinísticos).

Se conoce como estado límite, a un evento cuya ocurrencia debe evitarse para asegurar el adecuado comportamiento de la estructura. Por lo tanto, es necesario poder representar dicho evento a través de un modelo matemático y calcular, de este modo, su probabilidad de ocurrencia. Si consideramos que para un elemento estructural para el cual la resistencia  $R$  es modelada como una variable aleatoria, y sujeta a una carga  $C$  también aleatoria (Figura 2), la función que representa dicho estado límite será simplemente:

$$G(X) = R - C \quad (2.1)$$

donde  $R$  y  $C$  son funciones de las variables aleatorias denotadas como  $X = (X_1, \dots, X_n)$ .

Estas  $n$  variables aleatorias en  $X$  son conocidas como variables básicas y pueden representar las incertidumbres físicas, las estadísticas y las del modelo. Por lo que la resistencia y la carga, cada una están en función de las variables básicas aleatorias.

La función del estado límite o función de falla, está definida de tal modo que los valores positivos de  $G(X)$  corresponden a situaciones seguras y los negativos a situaciones de falla. En confiabilidad estructural la función de falla, usualmente resulta del análisis mecánico de la estructura.

## 2.1.5 Probabilidad de falla

La confiabilidad estructural se expresa normalmente en términos de ecuaciones de estados límite  $G(X)$ , también llamados funciones de falla,  $F$ :

$$F = \{G(X) < 0\} \quad (2.2)$$

La probabilidad de que suceda un evento de falla  $F$  viene dada por la probabilidad de que la carga  $C$  supere a la resistencia  $R$  de la estructura:

$$P = P(R - C < 0) = P(R < C) \quad (2.3)$$

Las cargas impuestas o los efectos de éstas,  $C$ , en una estructura, y la capacidad o resistencia de la misma,  $R$ , para un evento determinado, se podrían representar por dos curvas de distribución de probabilidad como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.

Asumiendo que la resistencia  $R$  y la carga  $C$ , son independientes, (lo cual es aproximadamente cierto para el caso en el que las cargas sean estáticas), existirá siempre la posibilidad de que  $R < C$  y la estructura falle. Por el contrario, si  $R > C$ , la estructura es segura.

El cálculo de la probabilidad de falla se puede efectuar resolviendo la siguiente ecuación:

$$P_F = P(\text{falla}) = P(R < C) \quad (2.4)$$

$$P_F = \int_{-\infty}^{\infty} P(R < x) \cdot P(x < C < x + dx) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(C) \cdot g(R) dx \quad (2.5)$$

La integral anterior calcula la probabilidad de que sucedan aquellos valores  $x$  en los que la resistencia  $R$  es menor a la carga  $C$ , de tal modo que ocurre la falla. Esta integral es difícil de resolver, por lo que la solución a través de la simulación numérica resulta adecuada y eficiente.

## 2.1.6 Cálculo de la confiabilidad

Como se ha visto anteriormente, la probabilidad de falla puede ser obtenida al calcular la probabilidad de que  $G < 0$  (Ecuación 2.2). Sin embargo, como existen muchas variables aleatorias involucradas, hace que sea necesario el cálculo de la función de densidad de probabilidad de la función  $G$  y una integración múltiple sobre la región de falla en la que  $G < 0$ . Este procedimiento exacto rara vez puede ser aplicado, debido a que la función de densidad de probabilidad de  $G$  es desconocida y además es difícil de obtener. Por este motivo, alternativamente se

ha propuesto que la probabilidad de falla puede ser estimada por simulación numérica, el cual modela la aleatoriedad de las variables básicas y calcula el valor de  $G$ . Esto permite evaluar el número de veces en los que  $G$  resultó menor que 0. Normalmente es necesario realizar un gran número de iteraciones, para que las estimaciones de la probabilidad de falla sean correctas.

Un método comúnmente utilizado de simulación se conoce con el nombre de Simulación Monte Carlo, la cual tiene su origen en la teoría de juegos. Este método asigna valores a las variables aleatorias haciendo una selección al azar, para un conjunto de parámetros de carga y resistencia, para cada selección el valor de  $G$  se calcula. Si se repite el proceso de simulación  $N$  veces y de éstas  $G$  fue negativo  $N_f$  veces, la probabilidad de falla podría ser estimada como la frecuencia de la ocurrencia de eventos de falla:

$$P_F = \frac{N_f}{N} \quad (2.6)$$

Comúnmente la confiabilidad estructural, es indicado a través del *índice de confiabilidad*  $\beta$ , y se estima utilizando la función de densidad de probabilidad normal  $\Phi(\cdot)$ .

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (2.7)$$

Por lo que una vez calculada la probabilidad de falla ( $P_F$ ), se calcula el índice de confiabilidad a través de la función inversa de la distribución normal de la probabilidad de falla, con promedio cero y varianza de 1, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (2.8)$$

Donde:

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt \quad (2.9)$$

También existen otros métodos para estimar la probabilidad de falla, como son:

- Aproximación por métodos analíticos, FORM/SORM (*First Order* o *Second Order Reliability Methods*)
- Métodos de confiabilidad anidados

## 2.1.7 Variables para el cálculo de la confiabilidad estructural

Para el caso del puente Río Papaloapan, el cálculo de la confiabilidad estructural, se realizará por simulación numérica, empleando para ello simulaciones por elemento finito con el método Monte Carlo y, como se mencionó anteriormente, un paso importante es la definición de las variables estocásticas y los parámetros determinísticos (constantes). En este caso el estudio se enfoca solamente a la falla de los elementos de anclaje superior, por lo cual es necesario establecer las variables apropiadas para realizar las estimaciones, con el fin de obtener una baja incertidumbre en las estimaciones. Cabe aclarar que como se ha mencionado anteriormente el estudio únicamente es para definir los parámetros de resistencia, no se incluye en esta sección lo referente a los parámetros de carga que se deberá considerar para estudios futuros.

### 2.1.7.1 Variables estocásticas

Las variables estocásticas para el caso de estudio, se muestran en la Tabla 2.1, para carga y resistencia. Para el modelo de simulación, las propiedades mecánicas son consideradas variables estocásticas, debido a que el material proviene de fundiciones y es heterogéneo, por lo que al simular un elemento de anclaje no se conoce en realidad la propiedad mecánica en específico de éste, por lo que solamente se pueden hacer estimaciones aproximadas. Si el material proviene de un lote o una barra, perfectamente caracterizada y homogénea, los parámetros serían entonces considerados como parámetros determinísticos.

**Tabla 2.1 Relación de variables estocásticas**

Variable	Unidades	Carga	Resistencia
Velocidad del viento	m/s	✓	
Aceleración por sismos	m/s <sup>2</sup>	✓	
Tránsito vehicular por carril	Vehículo/hr/carril	✓	
Peso vehicular	kg	✓	
Aumento del peso por lluvia	kg	✓	
Dureza	HRC		✓
Esfuerzo de cedencia	MPa		✓
Esfuerzo último a la tensión	MPa		✓
Módulo de elasticidad	GPa		✓
Velocidad de propagación de grieta (pendiente m)	Adimensional		✓
Valor de la constante C	mm/ciclo		✓
Rango de intensidad de esfuerzos máximo ( $\Delta K$ max)	MPa m <sup>1/2</sup>		✓
Tamaño de poros y grietas	mm		✓
Ubicación de poros y grietas (coordenadas x, y)	mm		✓

### 2.1.7.2 Parámetros determinísticos

Los parámetros determinísticos para el caso de estudio, se muestran en la Tabla 2.2, tanto para carga como para la resistencia. Con respecto a la geometría de los elementos de anclaje superior, son 3 tipos de geometrías, pero no se consideran estocásticas ya que las simulaciones se hacen con respecto a un elemento de anclaje en específico. Y cuando se trata de obtener la probabilidad de falla del puente, en este caso, se especifican las geometrías que tiene cada elemento de anclaje de acuerdo a como se encuentran instalados en el puente, dato que se tiene plenamente identificado.

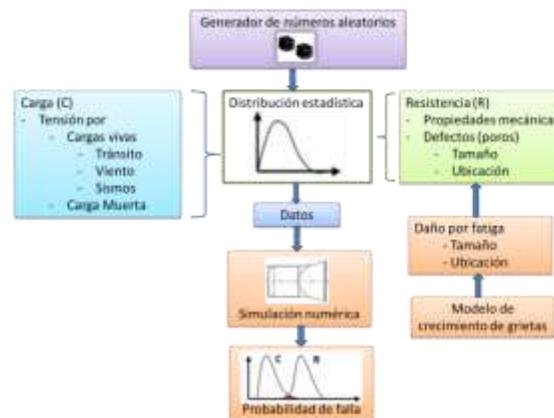
**Tabla 2.2 Relación de parámetros determinísticos**

Variable	Unidades	Carga	Resistencia
<b>Peso del tablero</b>	kg	✓	
<b>Módulo de Poisson</b>	adimensional		✓
<b>Geometría del elemento de anclaje superior (coordenadas <math>x, y, z</math>)</b>	mm		✓

Con respecto al peso del tablero, se ha considerado como un parámetro determinístico, sin embargo, ante la presencia de humedad o lluvia (en otros sitios incluso se puede considerar a la nieve), el peso del tablero se modifica, sin embargo se deben de obtener los datos de la variabilidad de este parámetro para poder considerarlo en los modelos de simulación, por lo que es mejor tratarlo como un valor constante e incluir este aspecto en las definiciones de incertidumbre.

### 2.1.8 Modelo de simulación

En la Figura 6, se muestra el diagrama de proceso para calcular la probabilidad de falla de un elemento de anclaje superior. Como puede observarse, los datos se obtienen a partir de las distribuciones estadísticas de cada variable considerada en el modelo y se generan números aleatorios con el método Monte Carlo.



**Figura 6. Esquema del proceso para el cálculo de la probabilidad de falla para elementos de anclaje superior**

## **2.2 Puente Río Papaloapan**

Como parte de este estudio se ha elegido utilizar el acero estructural del puente Río Papaloapan, por lo cual se hará una breve reseña del proyecto de rehabilitación del puente, de donde se obtuvieron los elementos de anclaje superior que se analizan en este proyecto.

### **2.2.1 Descripción general**

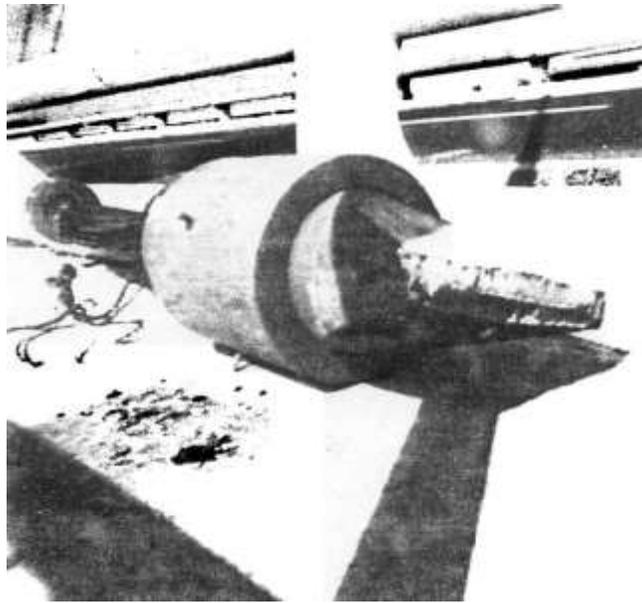
El puente Río Papaloapan es un puente atirantado con un claro de 203 m y una longitud total de 343 m, localizado en el estado de Veracruz, México. El puente tiene 112 cables distribuidos en 8 semi-arpas con 14 cables cada uno (Figura 7).



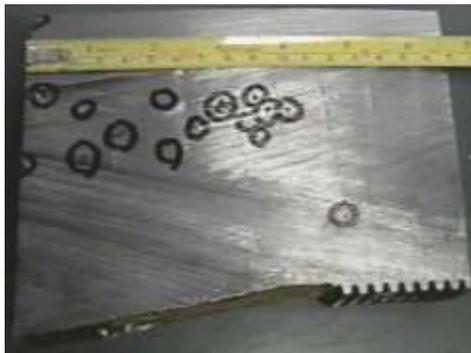
**Figura 7. Puente Río Papaloapan**

### **2.2.2 Falla en el año 2000**

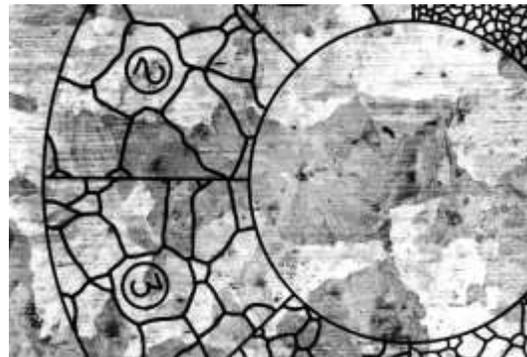
En el año 2000 se presentó el colapso de un tirante en este puente (Figura 8), en el cual el Instituto Mexicano del Transporte participó en el análisis de falla y realizó diversas pruebas mecánicas para determinar las propiedades mecánicas del material, con los cuales se concluyó que el material constitutivo de la pieza fallada presentaba una baja resistencia a los daños acumulados por fatiga, debido principalmente a dos factores, la existencia de inclusiones o porosidades y además presentaba en la microestructura del material un tamaño de grano grueso (Figuras 9 y 10) <sup>[3]</sup>.



**Figura 8. Falla del elemento de anclaje superior del cable 11 semi-arpa 7, ocurrida en enero de 2000**



**Figura 9. Sección del elemento de anclaje superior con alto contenido de poros**



**Figura 10. Imagen de la microestructura del elemento de anclaje superior**

### **2.2.3 Estudios 2001 y 2002**

En los años 2001 y 2002, con este conocimiento se desarrollaron pruebas por ultrasonido (Figura 11), para calificar al material de los elementos de sujeción del puente, determinando para ello el tamaño de grano fino y grueso <sup>[4]</sup>.



(a) Reflejo de pared posterior de un material con tamaño de grano grueso (ASTM 1 y 2).



(b) Reflejo de pared posterior de un material con tamaño de grano fino (ASTM 7 y 8).

**Figura 11. Comparación de las reflexiones de pared posterior de dos materiales con tamaño de grano diferente de un block de referencia**

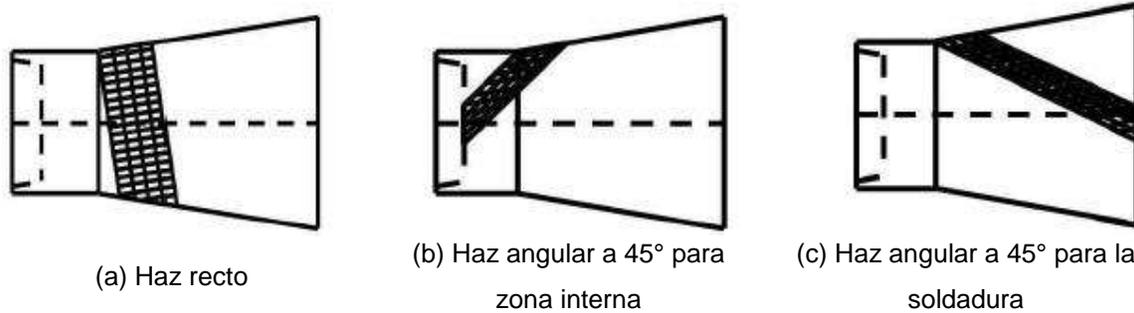
La Figura 11 (a), muestra la pérdida de energía de la señal ultrasónica al pasar por la probeta mientras que en la Figura 11 (b), se observa los rebotes de la señal sin que se pierda la energía de la señal ultrasónica. Esta pérdida de energía se debe al tamaño de grano grueso de la microestructura del material, el cual interfiere con el paso de la señal.

## 2.2.4 Inspecciones en el año 2003 con ultrasonido

En el año 2003 se realizaron las inspecciones por ultrasonido en el puente (Figura 12 y 13), para calificar al material de los elementos de sujeción de los 112 tirantes del puente, en los que se encontraron que 16 de ellos tenían la misma característica que la pieza que falló en el año 2000, es decir, presentaban tamaño de grano grueso <sup>[4]</sup>.



**Figura 12. Inspección por ultrasonido de un elemento de anclaje superior**



**Figura 13. Regiones de inspección con ultrasonido**

Como resultado de este estudio se sugirió reemplazar estos 16 elementos de anclaje superior del puente (Tabla 2.1), así como también, el reemplazo de 4 elementos adicionales, elegidos al azar, con el fin de tener una representación de los elementos que quedarán en el puente calificados como “en buen estado”, con los cuales se realizarán los estudios de confiabilidad estructural <sup>[5,6]</sup>.

Aquí cabe aclarar que existen tres tipos de geometrías de los elementos de anclaje superior y que la geometría del tipo 2 son los elementos de anclaje superior que presentaron mayor deficiencia estructural (14 piezas).

**Tabla 2.1 Resultados de la inspección por ultrasonido**

Deficiencia estructural	Número de elementos de anclaje	Tipo de elemento
Tamaño de grano grande (ASTM 2)	8	2
Alto contenido de poros	2	1 y 3
Probable tamaño de grano grande	6	2

## 2.2.5 Trabajos de rehabilitación en los años 2008 y 2009

En el año 2008 se llevó a cabo el proyecto de rehabilitación en donde se sustituyeron estos 20 elementos de anclaje superior <sup>[7]</sup> y en el año 2009 se sustituyó otro más, ya que durante los trabajos de rehabilitación del año 2008, se presentó un comportamiento dinámico anómalo de un tirante ante la presencia de vientos fuertes (Figura 14).



**Figura 14. Trabajos de rehabilitación en el puente**

En total se obtuvieron 6 piezas para los estudios de confiabilidad estructural (Figura 15): 4 elegidos al azar, uno más que se identificó inicialmente con tamaño de grano grueso -pero que en la realidad presentó un tamaño de grano fino, con una gran cantidad de porosidades- y el que se obtuvo de la rehabilitación del año 2009.



**Figura 15. Elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan**

## **3 Metodología**

---

En este capítulo se expone la metodología para la obtención de las propiedades del material y se explica el procedimiento de prueba de cada uno de los ensayos realizados. Como se ha explicado anteriormente, existen dos distribuciones para obtener la probabilidad de falla, la que se refiere a la resistencia del material y la de las cargas a las que es sujeto el elemento de anclaje. En este reporte solamente se refiere al caso de la resistencia, es decir, los ensayos que son necesarios para obtener la curva de probabilidad de la resistencia y de lo que la reduce, como es la presencia de poros, inclusiones o grietas, con el fin de poderlos considerar en los modelos de simulación.

Las pruebas de laboratorio se dividieron en dos tipos, pruebas no destructivas (ultrasonido y líquidos penetrantes) y pruebas destructivas (análisis químico, metalografías, dureza, tensión y de mecánica de la fractura). A continuación se explica el desarrollo del estudio, el procedimiento de cada una de las inspecciones y su finalidad.

### **3.1 Desarrollo del estudio**

Para la ejecución del proyecto, éste se dividió en varias etapas (como se indica en la Figura 16). En esta figura, se puede observar que la aplicación de las pruebas no destructivas es el paso inicial del proceso, el objetivo de estas pruebas es determinar las zonas de concentración de esfuerzos originales en la superficie o internamente del elemento de anclaje superior.

Aquí cabe aclarar que el proceso de manufactura de los elementos de anclaje superior juega un papel importante en el proceso de deterioro, ya que fueron fabricadas por un proceso de fundición, el cual tiene como uno de los principales problemas la heterogeneidad del material resultante, lo que da lugar a la presencia de inclusiones y fases de material no deseados, además, de porosidades y rechupes. Por lo que es importante conocer la ubicación preferencial de estos, así como el tamaño y la forma, con el fin de incorporarlos a los modelos de simulación numérica. También se encontraron en las inspecciones realizadas durante el proceso de rehabilitación del puente, la presencia de grietas de tamaño importante en varias piezas retiradas, en la zona afectada por el calor (punta del elemento de anclaje superior).



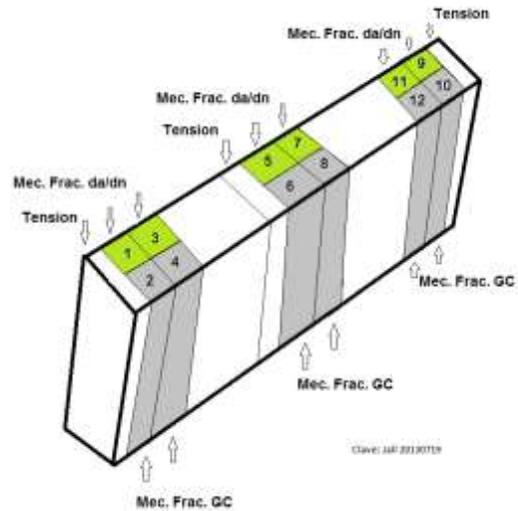
**Figura 16. Proceso de ejecución del estudio**

Posteriormente a la realización de las pruebas no destructivas, se cortó la pieza como se indica en la Figura 17, la sección de 30 mm correspondiente a la unión soldada, se dejó intacta para la realización de estudios posteriores.



**Figura 17. Corte del elemento de anclaje superior**

De la sección con longitud de 160 mm, una vez cortada, se le volvió a inspeccionar con ultrasonido y líquidos penetrantes con el fin de comprobar la existencia de discontinuidades. Después de estas inspecciones, se obtuvieron las probetas de tensión y mecánica de la fractura, como se indica en la Figura 18, de las secciones remanentes se obtuvieron las muestras para las pruebas de dureza, análisis químico y metalografías.



**Figura 18. Corte para la obtención de probetas**

A continuación se explican cada uno de los ensayos.

## **3.2 Pruebas No Destructivas (PND)**

Las Pruebas No Destructivas (PND), son técnicas de inspección que se utilizan para la detección y evaluación de discontinuidades (poros, inclusiones, grietas, entre otros), que pueden existir tanto en la superficie como en el interior de los materiales.

Las PND, se utilizan en una gran variedad de industrias y en varias etapas como es en:

- Recepción de materia prima
- Procesos de fabricación
- Maquinado o ensamble de piezas
- Procesos de soldadura
- Procesos de reparación con soldadura
- Mantenimiento preventivo

Para este proyecto se utilizaron 2 técnicas de inspección no destructiva:

- Líquidos penetrantes
- Ultrasonido

La finalidad de esta sección no es exponer la teoría de cada una de las pruebas sino más bien, exponer los parámetros de prueba y el procedimiento de cada una y en el siguiente capítulo se indican los resultados obtenidos.

### **3.2.1 Prueba con líquidos penetrantes**

La inspección por líquidos penetrantes es un tipo de prueba no destructiva que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales examinados y puede emplearse en materiales tan diversos como metales, cerámicos, vidrios, plásticos, entre otros. Esta característica lo hace útil en innumerables campos de la industria. Esta técnica, está basada en el fenómeno de capilaridad, que permite evidenciar de una manera rápida y confiable, discontinuidades abiertas a la superficie (fisuras, porosidad, pliegues, etc.) sobre casi cualquier componente, independientemente de la geometría y del material de la pieza.

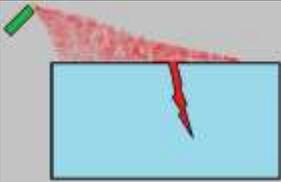
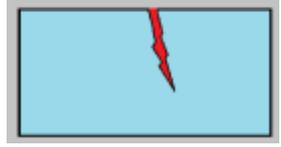
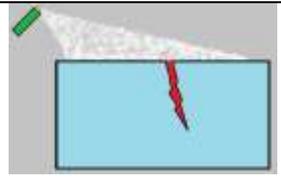
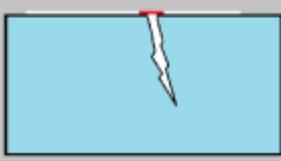
#### **3.2.1.1 Ventajas y limitaciones de la prueba**

El método de líquidos penetrantes presenta varias ventajas, como es el hecho que es un procedimiento relativamente barato y fácil de realizar, se puede aplicar en materiales metálicos y no metálicos, y no requiere de equipos muy costosos. Dentro de las limitaciones se encuentran las siguientes: solamente detecta discontinuidades abiertas a la superficie, no puede usarse en materiales muy porosos y es difícil su aplicación en superficies muy rugosas.

### 3.2.1.2 Procedimiento de prueba

El procedimiento para la aplicación de la técnica de líquidos penetrantes se presenta en la Tabla 3.1 y están de acuerdo a las normas ASTM E165 <sup>[8]</sup> y ASTM E1417 <sup>[9]</sup>.

**Tabla 3.1 Procedimiento de la técnica de líquidos penetrantes**

Paso	Descripción	Imagen
1	<b>Limpieza inicial y secado:</b> Consiste en limpiar perfectamente la zona de interés para dejar a las posibles discontinuidades, libres de suciedad o con materiales extraños, en este caso se utilizó desengrasante en aerosol y se empleó una franela con microfibras, se permitió el secado al aire ambiente (Tiempo: 15 minutos).	
2	<b>Aplicación del líquido penetrante:</b> Se cubre la zona de interés con el líquido penetrante y se deja transcurrir el tiempo para permitir que el líquido se introduzca por capilaridad en las discontinuidades. (Tiempo: 15 minutos)	
3	<b>Limpieza intermedia:</b> Se remueve el exceso de líquido de la superficie, evitando quitar aquel que se encuentra dentro de las discontinuidades, de acuerdo al tipo de emulsión utilizada, éste se puede remover con agua o solventes. En este caso se empleó un paño humedecido con solvente.	
4	<b>Aplicación del revelador:</b> Sobre la superficie se aplica el revelador (preparación acuosa o alcohólica), que deja sobre la superficie una fina capa de polvo blanco. (Tiempo de espera: 15 minutos).	
5	<b>Inspección:</b> La fina capa del revelador absorberá el líquido retenido en las discontinuidades, llevándolo a la superficie para hacerlo visible (por contraste o por fluorescencia, de acuerdo a la técnica empleada) y se registran las indicaciones. En este caso se realizaron los registros con fotografías y cinta métrica de acero.	
6	<b>Limpieza final:</b> Aunque los agentes químicos utilizados no son corrosivos, es una buena práctica dejar limpio el espécimen de ensayo.	
7	<b>Evaluación:</b> Con análisis de imagen y las fotografías de los registros se evalúan las discontinuidades, para obtener las funciones de densidad de probabilidad por ubicación y tamaño de discontinuidad. En este caso se utilizó el software ImageJ, para el recorte de imágenes y evaluación de las discontinuidades por selección de color.	

### **3.2.1.3 Equipo utilizado**

El equipo utilizado para realizar este ensayo consistió en:

- Juego de líquidos penetrantes de la marca Magnaflux, para luz visible, removible con solvente.
- Cámara fotográfica digital marca Canon modelo EOS T4i, con lente zoom 28-70 mm.
- Cinta métrica de acero.
- Software ImageJ, para procesamiento de imagen y medición.

## **3.2.2 Prueba con ultrasonido**

El ultrasonido industrial es un método de inspección volumétrica de los más versátiles y de mayor alcance en la industria. Se basa en la emisión de una vibración mecánica (sonido) en un rango mayor del audible por el ser humano, que se transmite a través de un medio físico y se registra el eco que proviene del rebote de la señal, ya sea por la pared del material inspeccionado o por la presencia de uno o más discontinuidades. Se conoce como emisión ultrasónica a los sonidos que se emiten por arriba de los 20 KHz. Para la prueba con ultrasonido en materiales el rango es de 0.2 a 25 MHz. El principio de operación se basa en la impedancia acústica, que es la resistencia que posee el material a paso de una onda de sonido.

El ultrasonido industrial se utiliza para la detección y caracterización de discontinuidades, medición de espesores, extensión y grado de corrosión, determinación de características físicas y micro estructurales, entre otros.

### **3.2.2.1 Ventajas y limitaciones de la prueba**

Dentro de las ventajas del ensayo por ultrasonido son que la prueba se realiza rápido con resultados inmediatos, se puede determinar la posición de las discontinuidades internas, la orientación y sus dimensiones. Posee alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas y se pueden inspeccionar grandes espesores de material, debido a la alta capacidad de penetración del haz ultrasónico. Posee buena resolución para poder distinguir dos discontinuidades próximas entre sí, se puede hacer la inspección por un lado de la muestra y no se requiere condiciones especiales de inspección.

Algunas limitaciones de la técnica son baja velocidad de inspección cuando se hace manualmente, se requiere de personal con buena preparación técnica y gran experiencia. Dificultad de inspeccionar geometrías complejas, espesores muy delgados o de configuración irregular (cambios de espesor). Dificultad para detectar o evaluar discontinuidades cercanas a la superficie en donde se coloca el transductor. Se requiere de patrones certificados para calibración y referencia. Las mediciones son afectadas por la estructura del material (tamaño de grano y tipo de material), la temperatura, tipo de acoplante, entre otros.

### 3.2.2.2 Procedimiento de prueba

El procedimiento para la aplicación de la técnica de ultrasonido se presenta en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Procedimiento de la técnica de ultrasonido**

Paso	Descripción
1	<b>Limpieza inicial y secado:</b> Consiste en limpiar perfectamente la zona de interés para tener una superficie libre de suciedad o de materiales extraños, en este caso se utilizó desengrasante en aerosol y se empleó una franela con microfibras, se permitió el secado al aire ambiente (Tiempo: 15 minutos).
2	<b>Calibración del equipo:</b> Se realiza la calibración del equipo, de acuerdo con los procedimientos establecidos en el Instituto Mexicano del Transporte, la finalidad es obtener mediante el uso de un patrón calibrado, las distancias óptimas del reflejo de la pared posterior a la ubicación del transductor. El equipo utilizado fue de la marca NDT Systems modelo Quantum TE con un transductor de 5 MHz.
3	<b>Aplicación de acoplante:</b> El objetivo del uso de acoplante es eliminar la capa de aire que puede existir entre el transductor y la pieza a inspeccionar. En este caso se empleó líquido daltha y grasa.
4	<b>Realización de la inspección:</b> Sobre la superficie se coloca el transductor y se registran los resultados de acuerdo con los procedimientos establecidos por el Instituto Mexicano del Transporte.
5	<b>Limpieza final:</b> Aunque los agentes químicos utilizados no son corrosivos, es una buena práctica dejar limpio el espécimen de ensayo.
6	<b>Evaluación:</b> Con los registros de las discontinuidades, se pueden obtener las funciones de densidad de probabilidad por ubicación y tamaño de discontinuidades, utilizando para ello el software @Risk <sup>[1]</sup> que es un módulo dentro del software Excel.

### 3.2.2.3 Equipo utilizado

El equipo utilizado para realizar los ensayos fueron: equipo de ultrasonido industrial (Figura 19), un transductor de 5 MHz y grasa automotriz como acoplante.



**Figura 19. Equipo de ultrasonido Quantum-TE de NDT Systems**

### 3.3 Pruebas Destructivas (PD)

Las Pruebas Destructivas (PD), son pruebas en donde las probetas y/o especímenes de ensayo sufren cambios irreversibles como resultado de los ensayos. En muchos casos las probetas deben ser maquinadas para cumplir con las normas que rigen los ensayos y -una vez terminada la prueba- las probetas son almacenadas o eliminadas, de acuerdo a los requisitos del cliente.

Las pruebas destructivas que se realizaron en este proyecto, abarcaron 3 grupos: mecánicas, químicas y metalográficas, y las probetas se obtuvieron de las secciones indicadas en la Figura 18. A continuación se describe el procedimiento de cada una de las pruebas.

#### 3.3.1 Propiedades mecánicas

Para obtener las propiedades mecánicas del material, se aplicaron las pruebas de dureza, tensión y mecánica de la fractura, con respecto a este último, se realizaron las pruebas para determinar la velocidad de crecimiento de grieta ( $da/dN$ ). Los procedimientos de estas pruebas se presentan a continuación.

##### 3.3.1.1 Prueba de dureza HRC

Las mediciones de dureza determinan la resistencia del material a la penetración, al desgaste o al rayado de las superficies. Esta prueba se puede correlacionar con el esfuerzo de tensión, resistencia al desgaste, ductilidad y otras características físicas de los materiales metálicos y es utilizado para control de calidad y selección de materiales. Las pruebas de dureza consisten en una aplicación lenta de carga de un penetrador (con geometrías específicas por tipo de prueba, en este caso fue Rockwell C), sobre la superficie lisa y plana de la muestra (ASTM E18<sup>[10]</sup>).

Para este proyecto, el objetivo de la prueba fue determinar la dureza en diferentes zonas de los elementos de anclaje, con el fin de conocer el perfil de dureza con respecto a la geometría del elemento de anclaje, ya que debido a los gradientes de enfriamiento por el proceso de manufactura de los elementos de anclaje superior (fundición), se espera que se presenten diversas durezas debido al cambio en las velocidades de enfriamiento, los cuales darían indicios de un material heterogéneo con zonas con diferentes resistencias mecánicas y de ductilidad diferente. A este respecto, cabe recordar que cuando disminuye la dureza, disminuye la resistencia mecánica y aumenta la ductilidad, y viceversa.

A continuación se indica el procedimiento de la prueba y los equipos utilizados.

### 3.3.1.1.1 Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba, para el ensayo de dureza Rockwell C, se indica en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Procedimiento para la medición de dureza Rockwell C**

Paso	Descripción
1	<b>Obtención de la muestra</b>
2	<b>Corte de probetas</b>
3	<b>Rectificado de superficies:</b> Se realiza con la rectificadora de superficies planas.
4	<b>Aplicación de precarga:</b> Se utilizó una precarga de 13.3 a 44.48 kN (3 a 10 kip) (Tiempo: 15 segundos).
5	<b>Aplicación de carga:</b> Se utilizó un indentador cónico con punta de diamante y con carga de 150 kgf.
6	<b>Evaluación:</b> Obtención de las funciones de densidad de probabilidad de la dureza con el software @Risk <sup>[1]</sup> que es un módulo dentro del software Excel.

### 3.3.1.1.2 Equipo utilizado

Los equipos utilizados para esta prueba son los siguientes:

Para corte y fabricación de probetas utilizadas fueron:

- Sierra cinta horizontal
- Rectificadora de superficies planas
- Durómetro

Con la sierra cinta horizontal se obtuvieron las secciones de probetas indicadas en la Figura 18. En la Figura 20 se muestran estas secciones ya cortadas.



**Figura 20. Corte de probetas con la sierra cinta horizontal**

La rectificadora de superficies planas (Figura 21), se utilizó para dejar rectificado las caras de la probeta y paralelas entre ellas.



**Figura 21. Rectificadora de superficies planas**

Para la realización de la prueba de dureza, se utilizó un equipo de la marca Hoytom, modelo 713FR, que se muestra en la Figura 22.



**Figura 22. Durómetro Hoytom modelo 713 FR**

### 3.3.1.2 Prueba de tensión

El ensayo de tensión proporciona información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales bajo la acción de una carga axial, esta información es útil para la comparación entre materiales, desarrollo de aleaciones, control de calidad y diseño. Los datos que se obtienen de la prueba son: esfuerzo de cedencia, esfuerzo último de tensión, el módulo de elasticidad (o de Young), % de elongación y el % de la reducción de área.

A continuación se indica el procedimiento de la prueba y los equipos utilizados.

#### 3.3.1.2.1 Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba para el ensayo de tensión se indica en la Tabla 3.4, para una geometría de probeta mostrada en la sección Figura 26.

**Tabla 3.4 Procedimiento para la prueba de tensión**

Paso	Descripción
1	<b>Obtención de la muestra</b>
2	<b>Corte de probetas</b>
3	<b>Perfil de la probeta:</b> Se realiza con la electroerosionadora
4	<b>Rectificado de superficies:</b> Se realiza con la rectificadora de superficies planas.
5	<b>Marcado de la zona calibrada</b>
6	<b>Ensayo de la prueba</b>
6.1	<b>Condiciones de prueba:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Velocidad de carga: 10 N/seg</li><li>- Control por carga</li><li>- Medición de elongación con extensómetro</li></ul>
7	<b>Mediciones:</b> Se miden posteriormente a la fractura de la probeta, la reducción de área y la longitud final de la zona calibrada. Y se calculan los parámetros de porcentaje (%) de reducción de área y % de elongación.
8	<b>Gráficas:</b> Se hace una gráfica con los datos de esfuerzo y deformación, con el que se determina el esfuerzo de cedencia, el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo de tensión.
9	<b>Evaluación:</b> Obtención de las funciones de densidad de probabilidad de los diversos parámetros de la prueba de tensión, después de terminar con todos los ensayos de tensión (al menos tres), con el software @Risk <sup>[1]</sup> que es un módulo dentro del software Excel.

#### 3.3.1.2.2 Equipo utilizado

Los equipos utilizados para esta prueba son los siguientes:

Para corte y fabricación de probetas utilizadas fueron:

- Sierra cinta horizontal
- Electroerosionadora
- Rectificadora de superficies planas

- Máquina Instron modelo 8801
- Celda de carga de 100 KN
- Dispositivos de sujeción de caras planas
- Extensómetro longitudinal con carrera de 25 mm.
- Base magnética
- Calibrador vernier

Una vez obtenidas las secciones de corte (Figura 20), se obtuvieron las probetas con el perfil de la probeta (Figura 26), con el corte en la electroerosionadora del perfil de la probeta y seccionamiento para obtener piezas con un espesor de 6.5 mm (Figura 23) y con la rectificadora de las superficies planas se obtuvo el paralelismo entre las caras y el espesor indicado (Figura 21).



**Figura 23. Electroerosionadora**

Para la realización de la prueba de tensión, se utilizó la maquina servo hidráulica Instron modelo 8801 que se muestra en la Figura 24.



**Figura 24. Maquina servo hidráulica Instron 8801**

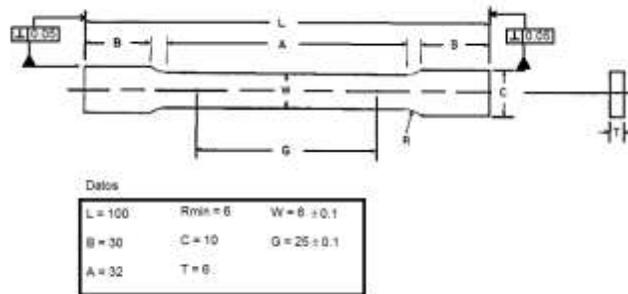
También se utilizó un extensómetro dinámico 2620-601 de la marca Instron, una celda de carga de 100 KN y los dispositivos de sujeción con caras planas, Figura 25.



Figura 25. Dispositivo de sujeción y extensómetro

### 3.3.1.2.3 Geometría de la probeta

La geometría de la probeta cumple con la norma ASTM E8/E8M <sup>[11]</sup> que se refiere a la prueba de tensión, la geometría seleccionada es de tipo plana estándar Figura 26.



Tolerancias no indicadas ±0.2 mm

Figura 26. Geometría de la probeta de tensión

### 3.3.1.3 Pruebas de mecánica de la fractura

Con relación a las prueba de mecánica de la fractura, se realizó la prueba de velocidad de crecimiento de grieta ( $da/dN$ ), que consiste en estimar el crecimiento de grieta expresado como una función del rango del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ) en la punta de la grieta y que caracteriza la resistencia de un material cuando existe el crecimiento estable de la grieta que es sometido a cargas cíclicas. Las pruebas tienen como base las normas ASTM E647 <sup>[12]</sup> y ASTM E399 <sup>[13]</sup>, que especifican la geometría de las probetas y los dispositivos que se pueden utilizar.

A continuación se indica el procedimiento de la prueba y los equipos utilizados.

#### 3.3.1.3.1 Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba para evaluar la velocidad de crecimiento de grieta se indica en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Procedimiento para la prueba de velocidad de crecimiento de grieta**

Paso	Descripción
1	<b>Obtención de la muestra</b>
2	<b>Corte de probetas</b>
3	<b>Rectificado de superficies:</b> Se realiza con la rectificadora de superficies planas.
4	<b>Perfil de la probeta</b> Se realiza con la electroerosionadora
5	<b>Ensayo de la prueba</b>
5.1	<b>Condiciones de prueba:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango del factor de intensidad de esfuerzos (<math>\Delta K</math>) inicial: <math>10 \text{ MPa}\sqrt{m}</math></li> <li>- Criterio de modificación de <math>\Delta K</math>, sí después de 10 000 ciclos no se aprecia avance de la grieta, se sube un dígito al valor del rango del factor de intensidad de esfuerzos.</li> </ul>
6	<b>Mediciones:</b> Se mide durante la prueba la apertura de la grieta con respecto a los ciclos de carga, con un extensómetro y posteriormente se mide la longitud de la grieta final (crítica).
7	<b>Gráficas:</b> Se hace una gráfica de la velocidad de crecimiento de grieta ( $da/dN$ ) con respecto al rango del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ), con el que se determina la funciones de la ecuación de Paris para crecimiento estable ( $m$ y $C$ ).
8	<b>Evaluación:</b> Obtención de las funciones de densidad de probabilidad de los diversos parámetros de la prueba, después de terminar con todos los ensayos (al menos tres), con el software @Risk que es un módulo dentro del software Excel.

### **3.3.1.3.2 Equipo utilizado**

Los equipos utilizados para esta prueba son los siguientes:

- Sierra cinta horizontal
- Electroerosionadora
- Rectificadora de superficies planas
- Máquina Instron modelo 8801
- Celda de carga de 100 KN
- Dispositivos de flexión en tres puntos
- Extensómetro longitudinal con carrera de +/- 5 mm.
- Base magnética
- Calibrador vernier

La configuración de la prueba en la máquina Instron se indica en la Figura 27, en donde se emplea el dispositivo de flexión en tres puntos y un extensómetro para medir la apertura de grieta.

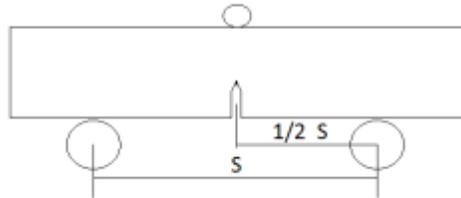


**Figura 27. Configuración de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta**

Los parámetros para la configuración de la prueba se indican en la Tabla 3.6, con base en las referencias de la Figura 28.

**Tabla 3.6 Parámetros para la configuración de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta**

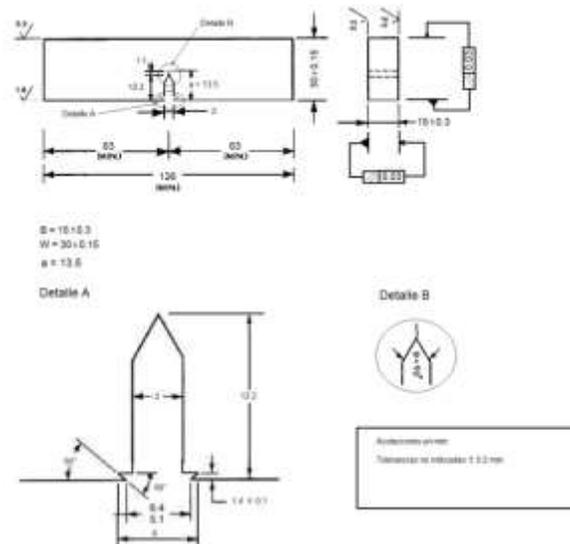
Símbolo	Descripción	Valor nominal
S	Distancia entre rodillos	120 mm
R	Relación de cargas ( $P_{min}/P_{max}$ )	0.1
a/W	Relación de la longitud de entalla (a) entre el ancho (W)	0.3517
f(a/w)	Factor de forma	1.7397



**Figura 28. Dimensiones del dispositivo de prueba**

### 3.3.1.3.3 Geometría de la probeta

La geometría de la probeta cumple con la norma ASTM E399 <sup>[13]</sup>, como se observa en la Figura 29.



**Figura 29. Geometría de la probeta para la prueba de velocidad de crecimiento de grieta**

El corte de la entalla (detalle A y B), se realiza en la electroerosionadora, con el fin de asegurar que el diámetro de la punta de la entalla cumple con las especificaciones indicadas en la norma de referencia.

### 3.3.2 Análisis químico

El análisis químico se hizo con base en la norma ASTM E415 <sup>[14]</sup> y ASTM E1019 <sup>[15]</sup>, con el método de *Espectrometría en Vacío de Emisión Atómica* y de *Combustión*. Las pruebas se realizaron en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), con el equipo Spectrolab y Leco CS200. Con estas pruebas se determinaron el contenido de carbono, silicio, manganeso, fósforo, azufre, cromo, molibdeno, níquel y cobre.

La prueba tiene como objetivo comprobar que el material cumple con la norma ASTM A148/A148M <sup>[16]</sup>, que establece la especificación de los aceros de fundición de alta resistencia, para propósitos estructurales, el cual fue la base del material de diseño para la fabricación de los elementos de anclaje superior <sup>[3]</sup>. Esta norma especifica en el inciso 7 la composición química, en donde únicamente aclara que el acero debe ajustarse a los requisitos máximos de azufre y fósforo (Tabla 3.7), que el contenido de carbono, manganeso, silicio y elementos de aleación pueden ser establecidos de común acuerdo con el comprador. Si no se especifica el contenido, éste puede ser seleccionado por el fabricante para obtener las propiedades mecánicas requeridas. Además también especifica las propiedades mecánicas que debe cumplir el material (Tabla 3.8). Dentro de la variedad de este tipo de aceros, el material de diseño se especificó con grado (Gr.) 80-50, el número 80 se refiere al esfuerzo último a la tensión dado en ksi y el número 50 se refiere al esfuerzo de cedencia también en ksi.

**Tabla 3.7 Requisitos de la composición química nominal del acero estructural ASTM A148/A148M Gr 80-50-93 <sup>[16]</sup>**

Fósforo P Máximo (%)	Azufre S Máximo (%)
0.05	0.06

**Tabla 3.8 Propiedades mecánicas del acero ASTM A148/A148M Gr. 80-50 <sup>[16]</sup>**

Esfuerzo Último de Tensión Mínimo ksi [MPa]	Esfuerzo de Cedencia Mínimo ksi [MPa]	Elongación en 50 mm Mínimo [%]	Reducción de Área Mínimo [%]
80 [550]	50 [345]	22	35

### 3.3.3 Pruebas metalográficas

Con las pruebas metalográficas se estudian las características microestructurales o constitutivos de un material, con los que se pueden relacionar las propiedades físicas, químicas o mecánicas. El objetivo principal de estos análisis para este proyecto es determinar el tamaño de grano y el cambio con respecto a la distancia desde el borde del elemento de anclaje. Se tomó como referencia la norma ASTM E112 <sup>[17]</sup>, la cual establece tres formas para la estimación del tamaño de grano: por comparación, por planimetría y por intercepción. Para este estudio se eligió el método de comparación y a continuación se explica el procedimiento de prueba.

#### 3.3.3.1 Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba para evaluar el tamaño de grano se indica en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9 Procedimiento de la prueba de metalografía**

Paso	Descripción
1	<b>Obtención de la muestra</b>
2	<b>Corte de probetas</b>
3	<b>Montaje en baquelita:</b> Se monta en baquelita a las probetas para un mejor manejo de la muestra en el proceso de lijado y pulido.
4	<b>Lijado:</b> Se realiza pasando por la lijadora DUO, con lijas con tamaño 60 hasta 2000.
5	<b>Pulido a espejo:</b> Se pulió a espejo con alúmina de 0.5 micrómetros.
6	<b>Ataque químico:</b> Se le dio un ataque químico a la superficie pulida con Nital al 2% (Tiempo: 6 segundos).
7	<b>Mediciones:</b> Para la medición se hizo en el microscopio metalográfico por comparación con una plantilla de comparación a 100 X para acero (magnificación del ocular * magnificación del objetivo en este caso 10X * 10X =100 X).
8	<b>Registro:</b> Se tomaron fotografías de las zonas de interés para el análisis de imagen.

##### 3.3.3.1.1 Equipo utilizado

Los equipos utilizados para esta prueba son los que a continuación se indican:

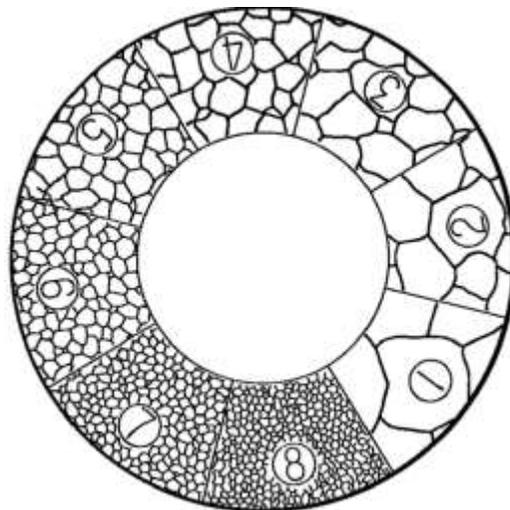
- Equipo para preparación metalográfica: Cortadora para metales, montadora hidroneumática, lijadora de disco doble y pulidora (Figura 30).
- Analizador de imágenes que incluye: Microscopio metalográfico de platina invertida Olympus modelo PMG3, computadora y plantilla para tamaño de grano ASTM (Figuras 31 y 32).



**Figura 30. Equipo para preparación metalográfica**



**Figura 31. Equipo para análisis de imagen**



**Figura 32. Esquema de la plantilla para determinar el tamaño de grano Norma ASTM E112 <sup>[17]</sup>**

## 4 Resultados

---

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas, para determinar las propiedades del material con la metodología presentada en el capítulo anterior. Como se estableció previamente las pruebas se dividieron en dos tipos, pruebas no destructivas (ultrasonido y líquidos penetrantes) y pruebas destructivas (análisis químico, metalografías, dureza, tensión y de mecánica de la fractura), a continuación se presentan los resultados de estas pruebas.

### 4.1 Pruebas No Destructivas (PND)

De las Pruebas No Destructivas (PND) realizadas, se obtuvieron los siguientes resultados:

#### 4.1.1 Líquidos penetrantes

De la inspección por líquidos penetrantes y con base en el registro de inspección PND-LP-13/001, en la Figura 33 se presentan las imágenes del elemento de anclaje EN-20080313-001.



Figura 33. Imágenes del elemento de anclaje EN-20080313-001

En la Figura 34 se presentan las indicaciones encontradas por cada cara de la probeta EN-20080313-001.



**Figura 34. Indicaciones de discontinuidades del elemento de anclaje EN-20080313-001**

Las dimensiones de cada una de las discontinuidades encontradas, se indican en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

**Tabla 4.1 Indicaciones de discontinuidades Cara A, del elemento de anclaje EN-20080313-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Grieta	235.2	420.5	282.8	401.7	47.7
2	Poro	15.5	415.7	21.4	413	6
3	Poro	5.6	411.8	7.5	409.6	2.7
4	Poro	174.3	390.5	177.5	387.1	4.6
5	Poro	319.3	386.2	324.8	381.8	5.9
6	Poro	296.2	385.9	302.8	381	7.2
7	Poro	210.4	384.8	217.8	376.4	8.6
8	Poro	302.1	383.7	309.2	377.7	8.3
9	Poro	316.8	382.4	319.3	380.5	2.7
10	Poro	288.3	378.6	290.9	376	3.7
11	Poro	339.3	374.8	342.5	371.5	3.5
12	Poro	28.4	215	29.8	208.4	6.7
13	Poro	111.9	113.3	115.3	111	3.5
14	Poro	124	108.7	126.2	106.5	2.7
15	Poro	114.8	106.8	119.1	104.5	4.3
16	Poro	231.4	87.7	235.7	83.6	4.6
17	Poro	249.3	29.4	251.4	27.5	2.4
18	Poro	99.8	15	104.2	12.9	4.8
19	Poro	241.6	8	244.8	6.8	3.4
20	Poro	127.1	4.5	129.7	3.1	2.8
21	Poro	129.9	3.3	136.1	1.4	6.4

**Tabla 4.2 Indicaciones de discontinuidades Cara B, del elemento de anclaje EN-20080313-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)	ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Poros	75.8	345.7	79.4	341.5	4.4	36	Poros	115.1	253.9	117	252.4	2
2	Poros	101.3	341	102.9	339.8	1.7	37	Poros	91.3	253.4	93.9	252.2	2.6
3	Poros	89.6	340.8	91	339.1	1.9	38	Poros	87.2	252.9	95.7	243.2	9.8
4	Poros	53.5	337.4	59.8	333	6.4	39	Poros	85.6	249.6	118.7	218.8	36
5	Poros	102.2	335.8	105	333.2	3.5	40	Poros	116.6	248.1	118.2	246.2	1.9
6	Poros	102.4	334.6	105	330.8	4.4	41	Nube de poros	85.4	244	99.3	236.8	14.3
7	Poros	103.6	329.8	105.3	328.2	2.1	42	Poros	96.2	242.2	100.8	240	5
8	Poros	103.9	328.1	105.8	326.4	2	43	Poros	77.9	241.8	81	237	4.9
9	Poros	103.8	325.5	105.7	323.9	2.4	44	Poros	100.9	240.3	108.3	237	7.5
10	Poros	84.3	316.7	87.3	312.9	3.9	45	Poros	61.7	238.9	67.5	236.3	5.9
11	Poros	63.5	315.7	65.7	313.5	2.4	46	Poros	76.6	237	80.4	230.7	6.7
12	Nube de poros	80	314.4	88.8	306.4	10.4	47	Poros	62.2	235.9	65.7	232.3	4.5
13	Poros	102.9	313.6	104.5	312.4	1.8	48	Poros	67.5	235	68.7	233.6	1.5
14	Nube de poros	68.2	313.1	81.8	301.9	13.6	49	Poros	81.3	232.3	84.3	230.3	3.3
15	Poros	50.6	312	52	310.4	1.8	50	Nube de poros	69.6	230	96.7	207.1	29.8
16	Poros	62.4	311.5	66.2	308.5	4.3	51	Nube de poros	34.2	228.6	43.1	199.5	29.5
17	Poros	88.7	310.2	91.2	309	2.6	52	Poros	101	224.2	104.1	223.2	3.1
18	Poros	89.8	309.6	92.8	307.5	3	53	Nube de poros	64	205.9	68.8	187.4	18.6
19	Poros	51	308.6	53	306	3	54	Poros	47.6	198.5	50.3	196.4	2.9
20	Poros	103.5	308.6	106.2	305.4	3.6	55	Poros	32.6	197.2	36.3	189.9	7.8
21	Poros	67.7	305.7	72.4	302.7	5.1	56	Poros	37.4	196.2	39.6	193.6	2.7
22	Poros	86.1	305.6	88.4	304	2.6	57	Poros	66.5	185.4	67.5	182.4	3.1
23	Poros	50.5	304.9	52.6	301.4	3.7	58	Poros	59.3	185.1	60.8	183.6	1.6
24	Poros	97.7	301.2	99.9	299.5	2.6	59	Nube de poros	64.8	182.2	67.4	163.8	18.4
25	Poros	89.9	298.3	92.9	294.7	3.9	60	Poros	60.7	178.5	64.4	175.3	3.7
26	Poros	107.6	296.4	111.8	289.9	6.8	61	Poros	32.6	169.2	34.2	167.2	2.5
27	Poros	104.4	294.1	108.5	293.1	4.1	62	Poros	30.8	163.7	32.4	161.8	2.1
28	Poros	105.7	290.6	107.7	289.4	2	63	Nube de poros	46.8	161.9	54.9	147.6	15.3
29	Poros	110.7	289.8	111.9	287.6	2.2	64	Poros	33.2	160	34.7	158.3	2.2
30	Poros	52.6	268	54.3	266.6	1.8	65	Poros	54.5	156.8	57	153.7	3.2
31	Poros	110.3	262.7	112.5	259.7	3	66	Poros	34.3	147.7	36.5	146.1	2.3
32	Poros	107.8	261.6	109.7	260.1	1.9	67	Poros	63.3	147.7	64.8	146.1	2
33	Poros	107.8	259.6	111.5	258.2	3.8	68	Poros	54.2	144.1	57.2	142	3
34	Poros	114.3	259	116.5	258	2.3	69	Nube de poros	59.2	143.7	64.4	132.3	11.5
35	Poros	108.7	257	110.3	254.5	2.6	70	Nube de poros	36.9	139.1	44.8	126.5	13.7

Sigue...

.... Continua

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)	ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
71	Poro	46.6	104.4	48.3	102.2	2.4	79	Poro	35.4	24.1	53	6.8	18.9
72	Poro	46.1	99.8	47.5	97.7	2.3	80	Poro	18	20.4	20.5	19.4	2.5
73	Poro	46.8	83.8	49	81.7	2.7	81	Poro	54.7	18.1	61.5	11.7	7.6
74	Poro	13.4	81.6	15.6	78.3	3.5	82	Poro	91.2	17.2	94	15.1	2.9
75	Poro	14.2	76.9	15.9	72.7	4.4	83	Poro	1.4	15.1	3	11.3	3.9
76	Nube de poros	3.8	30.1	32.2	11	29.3	84	Poro	119.8	9.4	124.9	4.8	5.4
77	Poro	15.3	28.9	19.6	25.8	5.2	85	Poro	93.5	5.8	100.5	2	7.2
78	Poro	19.7	25.5	21.8	24.4	2.2							

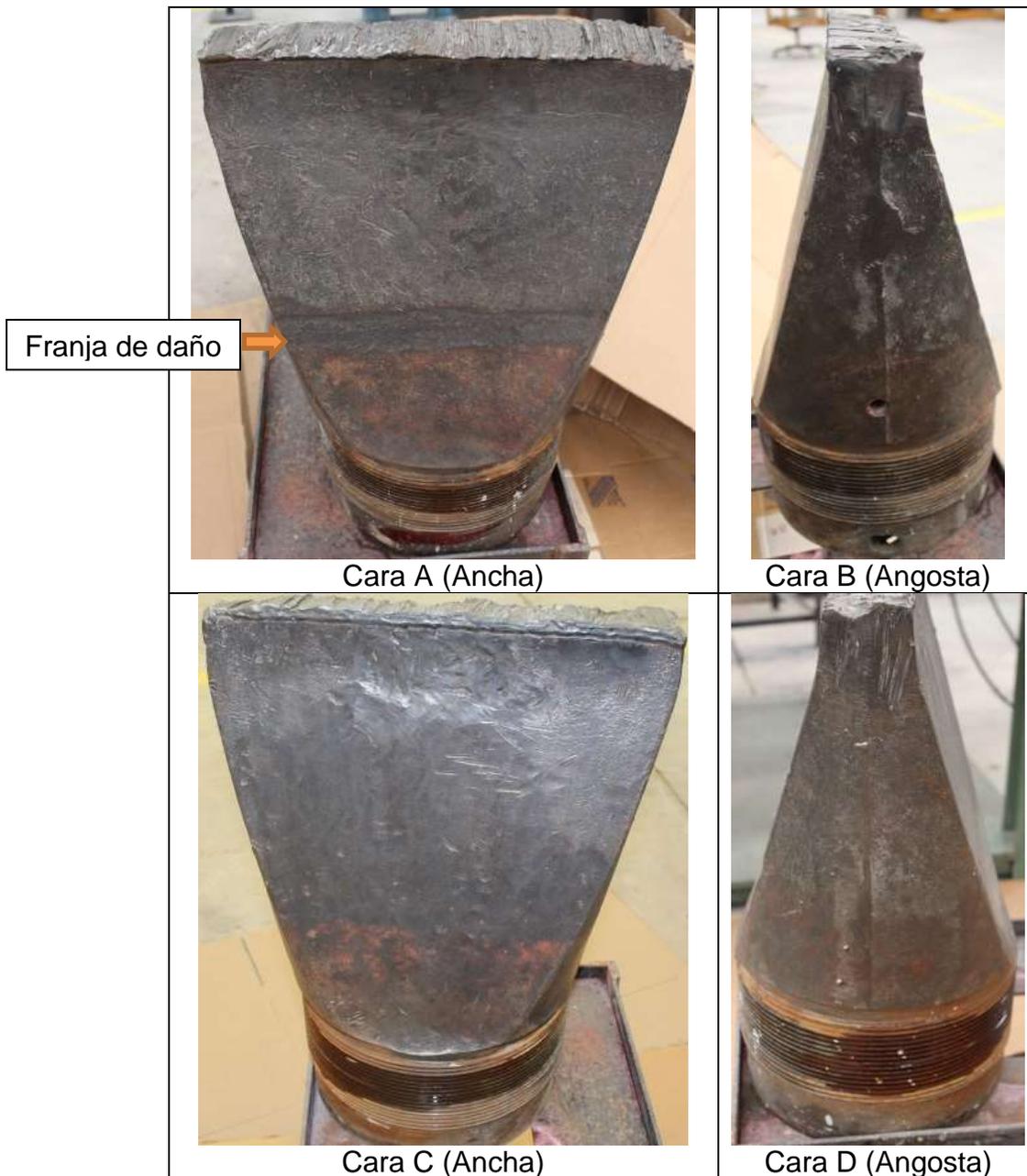
**Tabla 4.3 Indicaciones de discontinuidades Cara C, del elemento de anclaje EN-20080313-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)	ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Poros	3.5	393.9	80.0	337.8	87.8	37	Poros	184.6	354.4	187.5	353.1	3.0
2	Nube de poros	84.7	393.9	96.1	392.2	11.4	38	Nube de poros	166.3	352.8	188.3	341.7	22.1
3	Nube de poros	94.0	393.9	138.2	388.0	44.4	39	Poros	213.0	350.4	214.8	348.7	2.2
4	Nube de poros	138.9	393.9	153.5	390.2	14.6	40	Nube de poros	178.4	347.7	182.6	344.7	4.8
5	Nube de poros	156.5	393.9	207.3	390.5	50.8	41	Poros	216.8	347.2	219.8	344.8	3.0
6	Nube de poros	213.7	393.9	241.0	389.3	27.3	42	Poros	299.6	338.2	302.1	335.7	2.7
7	Poros	244.1	393.9	247.8	392.6	3.8	43	Poros	300.2	335.1	303.5	331.8	3.4
8	Poros	249.4	393.9	256.4	392.6	7.0	44	Poros	26.2	318.7	27.8	317.4	1.6
9	Poros	271.9	393.9	276.8	391.7	4.9	45	Poros	286.3	317.4	298.8	308.6	12.9
10	Grieta	277.4	393.9	298.4	385.1	22.2	46	Poros	191.8	316.4	193.5	315.5	1.8
11	Poros	300.8	393.9	309.3	388.9	9.4	47	Poros	285.7	308.9	287.9	306.8	2.5
12	Grieta	315.9	393.9	337.0	388.8	21.4	48	Poros	229.4	308.4	232.0	305.1	3.6
13	Poros	339.1	393.9	346.2	392.9	7.1	49	Poros	44.3	308.1	46.3	306.4	2.1
14	Poros	347.9	393.9	351.4	393.0	3.6	50	Poros	68.9	297.8	73.4	294.1	4.5
15	Poros	366.4	393.9	373.2	392.1	7.0	51	Poros	354.2	289.9	355.8	287.3	2.7
16	Poros	13.0	391.5	17.5	390.2	4.6	52	Poros	79.8	285.3	86.0	279.3	6.3
17	Poros	312.1	391.5	315.1	389.8	3.1	53	Poros	48.7	285.2	50.5	283.5	2.1
18	Poros	131.4	389.0	145.2	367.5	21.7	54	Poros	354.5	273.7	355.8	271.2	2.6
19	Poros	269.3	388.5	274.7	385.0	5.9	55	Nube de poros	350.4	271.8	354.9	254.6	17.2
20	Poros	68.9	387.7	72.8	381.9	6.1	56	Poros	90.1	269.0	95.7	263.9	6.7
21	Poros	257.7	386.8	263.9	375.5	11.5	57	Grieta	155.2	232.7	170.9	211.5	22.5
22	Poros	49.7	385.9	58.1	382.0	8.4	58	Grieta	146.6	212.0	153.2	208.1	7.5
23	Poros	58.4	385.4	60.2	384.2	2.0	59	Nube de poros	310.2	109.0	315.8	99.0	10.2
24	Poros	109.0	384.7	111.4	383.0	2.6	60	Poros	171.3	96.9	180.4	88.0	9.4
25	Poros	127.1	384.6	130.9	382.2	3.9	61	Poros	96.4	82.5	102.2	74.5	8.7
26	Poros	241.9	380.4	243.7	375.5	4.9	62	Poros	172.0	77.4	178.2	71.2	6.4
27	Poros	362.2	380.4	363.8	378.4	2.4	63	Poros	286.7	74.5	290.2	69.6	5.6
28	Poros	38.0	376.6	40.1	374.8	2.3	64	Poros	114.1	74.4	116.1	72.7	2.2
29	Poros	49.8	373.7	57.9	365.3	8.8	65	Poros	114.1	71.5	116.1	69.8	2.3
30	Poros	22.0	372.8	25.0	371.5	3.0	66	Poros	117.7	69.5	121.5	66.2	4.3
31	Poros	149.4	368.8	154.3	363.7	5.5	67	Poros	265.2	69.4	271.5	61.8	8.4
32	Poros	262.2	367.7	263.4	365.7	2.1	68	Poros	108.3	58.4	111.1	54.6	4.5
33	Poros	249.0	362.5	250.3	361.2	1.6	69	Poros	194.0	37.0	196.8	34.1	3.2
34	Poros	208.3	362.3	209.2	359.7	2.7	70	Poros	218.9	28.7	223.5	25.2	4.7
35	Poros	236.5	357.6	245.3	346.7	11.1	71	Poros	168.9	22.3	171.5	19.9	2.9
36	Grieta	137.7	356.3	149.5	352.4	12.2							

**Tabla 4.4 Indicaciones de discontinuidades Cara D, del elemento de anclaje EN-20080313-001**

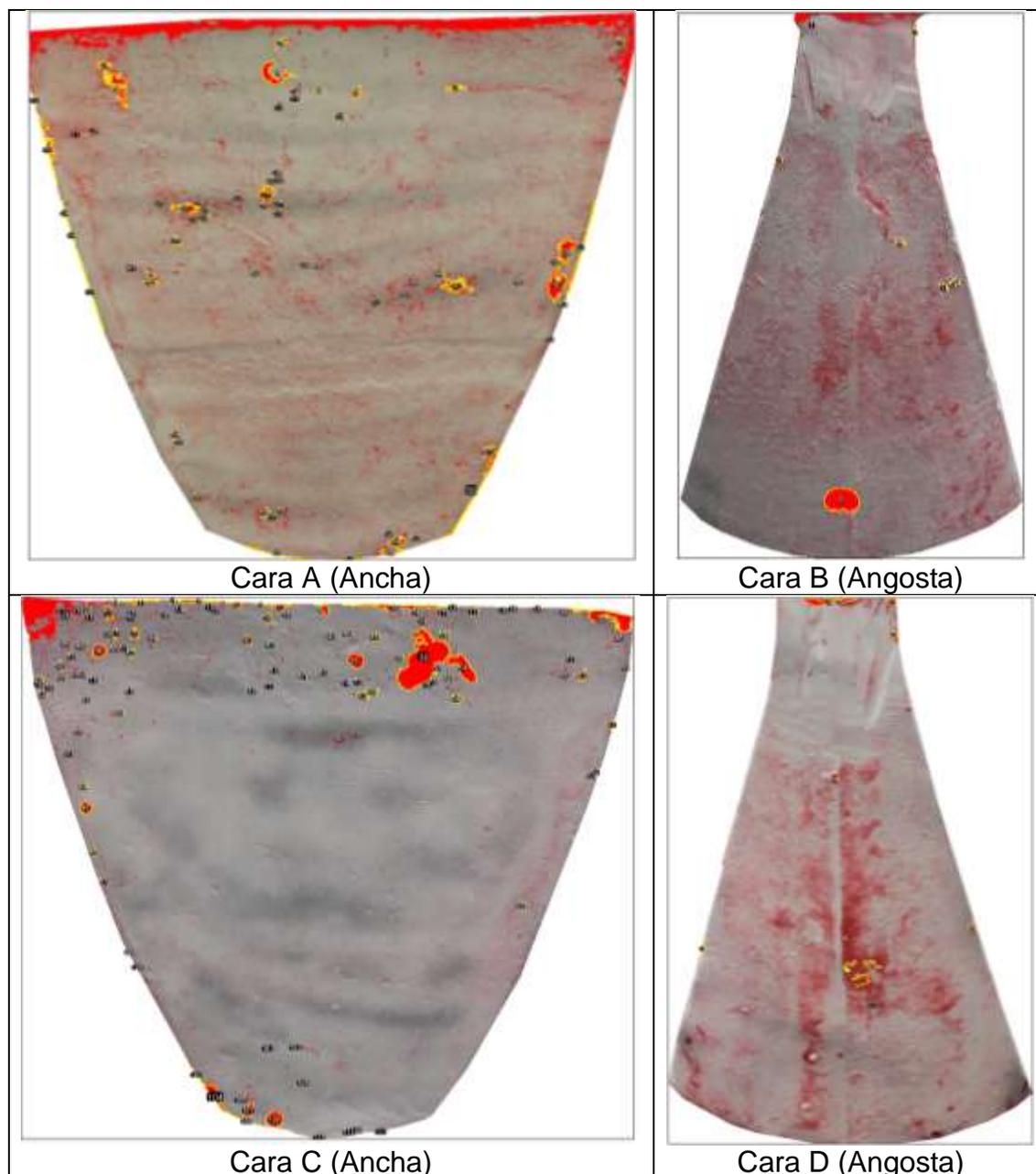
ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Poros	52.5	320.1	55.1	317.2	3.7
2	Poros	63.5	302.9	65.7	301.7	2.4
3	Grieta	75.1	264.6	80.9	258.0	7.2
4	Poros	75.8	246.0	78.0	244.4	2.4
5	Poros	46.2	211.2	48.4	209.8	2.3
6	Poros	75.9	175.6	77.7	172.7	3.0
7	Grieta	87.6	141.4	95.6	131.9	12.3
8	Poros	75.0	45.6	86.6	34.9	12.1
9	Poros	65.7	40.8	72.6	33.6	7.7
10	Poros	133.8	35.6	144.8	24.4	13.3
11	Poros	65.9	32.2	81.6	13.7	18.6
12	Poros	38.7	17.5	40.5	15.9	2.0
13	Poros	40.4	16.8	44.4	14.4	4.4
14	Poros	139.0	16.3	141.1	13.7	2.8
15	Poros	56.8	14.9	80.4	0.3	24.0
16	Poros	45.3	12.9	49.5	11.3	4.5
17	Poros	36.0	11.9	46.5	7.9	10.6
18	Poros	49.4	6.5	52.6	5.7	3.2
19	Poros	120.1	5.9	130.9	3.0	11.0
20	Nube de poros	80.5	1.2	92.1	0.0	11.7

Con base en el registro de inspección PND-LP-13/002, en la Figura 35 se presentan las imágenes del elemento de anclaje EN-20080818-001. Cabe destacar que esta pieza presenta una franja de daño durante su vida en servicio.



**Figura 35. Imágenes del elemento de anclaje EN-20080818-001**

En la Figura 36 se presentan las indicaciones encontradas por cada cara de la probeta EN-20080818-001.



**Figura 36. Indicaciones de discontinuidades del elemento de anclaje EN-20080818-001**

Las dimensiones de cada una de las discontinuidades encontradas, se indican en las Tablas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8.

**Tabla 4.5 Indicaciones de discontinuidades Cara A, del elemento de anclaje EN-20080818-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)	ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Poros	401.8	356	405.9	351.7	5.2	35	Poros	97.04	221.4	103.5	214.2	7.83
2	Poros	166.5	355.7	176.7	348.8	11.77	36	Nube de poros	360.6	218.2	373.7	202.1	16.9
3	Poros	46.64	340.5	55.75	335.4	9.58	37	Nube de poros	32.17	211.8	51.2	154.9	59.93
4	Grieta	159	340.2	182	324.4	23.61	38	Nube de poros	357.1	206.4	362.2	200.5	6.72
5	Nube de poros	50.4	334.3	67.29	309.4	29.08	39	Poros	186.6	204.3	191.7	199.7	6.17
6	Poros	401.6	330.8	406.1	327.1	4.75	40	Poros	197	202.7	200	199.2	3.87
7	Grieta	283.6	324.6	298.4	320.6	14.77	41	Poros	68.63	200.8	71.58	197.3	3.61
8	Grieta	219.3	323.6	226.5	314.5	11.16	42	Nube de poros	353.9	199.7	367	175.9	24.01
9	Grieta	194.4	322.2	200.8	319.3	6.97	43	Grieta	152.3	198.6	156.8	193	7.08
10	Poros	179.6	321.4	184.2	318.2	4.63	44	Poros	277.5	198.1	283.6	192.7	7.04
11	Poros	179.6	317.9	183.6	312.3	5.79	45	Poros	77.74	196.5	86.05	190.6	8.38
12	Poros	2.68	317.7	5.36	309.4	8.65	46	Poros	78.01	192.7	87.93	186.8	10.05
13	Poros	169.7	310.4	171.8	307.5	3.14	47	Nube de poros	281.2	192.5	303.2	182.6	22.26
14	Poros	207	304.3	217.7	301.9	10.94	48	Poros	332.4	191.4	335.6	188.5	3.43
15	Nube de poros	5.9	303.7	19.04	255.7	49.75	49	Poros	261.4	191.1	264.9	187.7	4.36
16	Poros	42.09	294.6	47.99	291.9	5.92	50	Poros	254.4	183.1	257.6	180.4	3.72
17	Poros	29.49	291.9	34.32	289	4.94	51	Poros	235.1	178.5	239.1	173.4	5.89
18	Poros	167.5	267.3	172.4	261.9	6.28	52	Nube de poros	363.5	177.5	366.2	171.6	6.19
19	Poros	169.2	261.1	173.4	258.2	4.61	53	Poros	354.1	152.8	357.3	149.1	4.32
20	Poros	163	260.8	167.5	256.3	5.74	54	Poros	97.84	89.8	102.4	80.95	9.1
21	Nube de poros	155.8	256	168.4	242.1	14.03	55	Poros	100.3	81.76	104.3	78.81	4.24
22	Poros	140.7	248	145.6	245.3	5.39	56	Nube de poros	282	78.28	322.5	14.75	75.33
23	Nube de poros	366.2	247.2	387.4	180.1	70.28	57	Nube de poros	309.4	77.74	317.1	69.43	11.38
24	Nube de poros	21.71	245.6	27.07	228.4	17.97	58	Poros	112.1	46.11	116.3	39.68	6.63
25	Poros	87.12	245.3	91.95	241.5	5.7	59	Poros	170	35.92	174.5	31.63	5.04
26	Poros	114.7	245	119.6	241	5.04	60	Poros	157.4	35.65	164.6	28.14	8.53
27	Poros	169.2	244.8	172.4	239.7	5.52	61	Poros	161.9	31.1	168.6	27.08	7.04
28	Nube de poros	96.77	243.9	116.3	236.4	19.6	62	Poros	243.4	19.03	247.2	16.35	4.2
29	Poros	158.2	243.7	163.8	238.6	7.2	63	Poros	263	16.89	265.4	12.06	5.18
30	Poros	119.3	240.5	124.7	235.9	5.6	64	Nube de poros	244.5	15.82	257.1	8.05	12.64
31	Poros	167	238.3	174	233.8	7.38	65	Nube de poros	146.6	9.38	191.7	0.53	45.9
32	Poros	115	236.7	123.6	230.3	10.35	66	Nube de poros	239.4	7.51	255.2	2.95	15.83
33	Poros	110.4	234	114.5	230.3	4.83	67	Nube de poros	210.4	1.07	227.1	0.27	16.64
34	Nube de poros	26.81	228.1	31.37	214.5	14.41							

**Tabla 4.6 Indicaciones de discontinuidades Cara B, del elemento de anclaje EN-20080818-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Poros	72.59	294.9	74.72	292.7	2.53
2	Nube de poros	129.7	294.6	130.6	285.2	9.44
3	Poros	53.57	221.6	57.37	218.2	4.41
4	Poros	118.9	174.4	125.6	172.7	6.78
5	Poros	150.7	153.6	154.8	151.3	4.7
6	Poros	149	152	153	150.1	4.42
7	Poros	142.9	151	149	147.9	6.81
8	Perforación	80.35	38.65	99.37	25.71	19.34
9	Poros	155.8	25.11	158.6	23.74	2.78

**Tabla 4.7 Indicaciones de discontinuidades Cara C, del elemento de anclaje EN-20080818-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)	ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
1	Grieta	67.7	364.9	93.5	361.6	25.7	36	Poros	254.4	346.6	290.3	304.3	43.7
2	Poros	99.8	364.9	104.2	364.1	4.3	37	Poros	61.9	346.1	65.2	338.2	8.0
3	Grieta	105.9	364.9	134.2	363.1	28.3	38	Poros	57.0	344.0	61.6	340.0	5.0
4	Poros	61.6	364.4	66.5	363.1	4.9	39	Poros	282.7	343.5	289.0	338.2	6.7
5	Grieta	138.3	363.9	150.5	359.8	12.3	40	Poros	218.7	343.0	222.3	341.7	3.7
6	Poros	157.6	362.9	166.0	361.6	8.4	41	Poros	236.3	342.5	241.9	337.1	6.0
7	Grieta	167.3	362.4	182.3	358.0	15.0	42	Poros	150.2	341.7	155.8	334.1	8.8
8	Poros	43.0	362.1	46.9	358.5	4.9	43	Poros	209.1	341.7	211.6	339.2	3.0
9	Poros	197.9	362.1	207.5	354.7	11.6	44	Poros	86.1	340.5	91.7	337.9	5.7
10	Grieta	217.0	362.1	288.0	357.3	71.1	45	Poros	402.8	340.2	406.7	337.9	4.0
11	Poros	126.1	361.6	129.6	359.3	3.8	46	Poros	28.8	337.4	31.3	334.1	3.8
12	Poros	56.5	360.8	62.4	351.1	9.7	47	Poros	166.0	337.1	170.1	332.8	4.8
13	Grieta	288.5	360.8	295.9	359.8	7.4	48	Poros	38.5	335.1	41.5	333.1	3.7
14	Poros	105.2	360.1	110.0	357.8	5.3	49	Poros	47.9	335.1	57.8	326.5	10.1
15	Poros	331.8	360.1	334.6	358.8	2.9	50	Poros	60.6	334.1	63.9	330.0	4.8
16	Poros	347.1	359.8	352.4	358.8	5.4	51	Poros	68.2	334.1	70.0	330.3	4.0
17	Poros	303.3	359.6	309.1	355.0	6.5	52	Poros	71.3	332.1	76.4	326.2	6.5
18	Poros	323.9	359.6	328.2	357.3	4.7	53	Poros	31.6	329.0	35.9	324.9	5.6
19	Poros	38.2	359.3	41.3	355.5	4.6	54	Poros	288.8	328.7	308.1	309.4	24.5
20	Nube de poros	371.0	359.3	413.3	343.3	43.4	55	Poros	220.5	328.5	231.5	318.8	11.4
21	Poros	24.7	359.0	30.1	356.0	5.9	56	Poros	250.6	327.7	258.7	324.2	8.6
22	Poros	29.8	359.0	32.1	356.8	2.9	57	Poros	371.0	326.2	372.8	324.2	2.6
23	Poros	128.9	359.0	132.9	356.2	4.1	58	Poros	25.2	323.7	28.0	317.5	6.6
24	Poros	266.1	358.5	268.4	353.7	4.9	59	Poros	407.4	320.6	411.2	318.0	4.6
25	Poros	73.9	357.8	76.4	354.0	4.4	60	Poros	280.1	319.8	282.1	318.3	2.4
26	Poros	365.4	357.8	369.7	355.7	4.6	61	Poros	169.6	319.1	171.6	316.0	3.2
27	Poros	283.4	357.0	286.7	355.5	3.4	62	Poros	376.9	317.5	382.2	309.7	9.4
28	Poros	178.3	356.5	181.1	352.7	4.3	63	Poros	204.0	316.8	205.8	315.2	2.0
29	Poros	164.5	356.0	169.3	349.6	6.5	64	Poros	39.7	316.5	42.8	312.5	4.3
30	Poros	95.2	355.5	99.3	354.0	4.3	65	Poros	34.1	316.3	38.2	313.2	4.6
31	Poros	44.8	354.7	47.6	351.7	3.5	66	Poros	366.2	316.3	368.7	312.7	4.2
32	Poros	27.8	353.7	32.1	352.2	4.4	67	Poros	188.2	314.7	193.0	312.4	5.0
33	Poros	72.8	353.2	75.6	351.7	3.0	68	Poros	25.5	314.5	28.0	309.9	4.6
34	Poros	270.2	351.9	273.5	349.4	3.8	69	Poros	287.5	314.5	290.6	309.6	5.2
35	Poros	73.1	346.6	80.2	338.4	8.6	70	Poros	8.7	313.0	14.8	308.9	6.6

Sigue ...

Continúa ...

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)	ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
71	Poro	46.9	312.2	49.9	310.2	3.2	91	Poro	30.8	261.5	32.9	260.2	2.1
72	Poro	277.1	311.2	279.9	307.4	4.2	92	Poro	386.3	250.8	391.6	246.5	6.7
73	Poro	226.4	309.9	229.4	308.4	3.2	93	Poro	384.5	247.5	386.3	244.7	2.9
74	Poro	219.0	309.6	220.8	307.9	2.1	94	Poro	40.0	241.4	44.8	236.1	5.5
75	Poro	9.4	308.9	14.0	307.4	4.7	95	Poro	39.2	228.7	47.9	220.5	9.2
76	Poro	273.5	308.6	275.5	307.1	2.1	96	Poro	46.3	197.1	51.2	191.5	6.3
77	Poro	166.5	307.6	168.8	305.8	2.4	97	Poro	52.0	176.0	59.1	172.7	7.9
78	Poro	18.1	306.8	20.9	304.3	3.4	98	Poro	336.1	160.9	340.7	156.6	5.0
79	Poro	155.6	305.1	158.4	303.0	3.0	99	Poro	70.8	129.1	73.9	124.5	5.5
80	Poro	233.0	304.8	241.9	300.0	9.1	100	Poro	77.4	117.4	79.5	115.6	2.7
81	Poro	72.3	304.6	74.1	302.3	2.8	101	Poro	165.5	62.9	168.1	60.9	2.7
82	Poro	10.2	302.5	17.3	300.0	7.6	102	Grieta	183.6	62.9	187.7	61.6	4.1
83	Poro	226.6	302.5	235.3	298.4	9.2	103	Poro	115.6	47.6	121.0	40.0	9.3
84	Poro	290.8	300.7	297.4	295.1	6.8	104	Nube de poros	120.4	39.7	142.3	16.0	32.3
85	Poro	42.3	299.5	45.8	296.2	3.7	105	Poro	189.5	39.5	192.3	37.4	3.3
86	Poro	63.9	291.1	69.5	286.5	6.9	106	Poro	144.6	27.8	152.5	25.2	8.3
87	Poro	397.8	284.9	402.1	276.5	8.9	107	Poro	149.7	24.5	157.6	15.0	10.5
88	Poro	37.4	277.6	40.2	274.3	4.0	108	Poro	165.8	18.3	177.0	8.1	11.6
89	Poro	225.6	275.3	228.2	273.2	2.7	109	Poro	143.1	15.8	162.2	8.9	20.3
90	Poro	214.2	273.0	217.2	270.9	3.4							

**Tabla 4.8 Indicaciones de discontinuidades Cara D, del elemento de anclaje EN-20080818-001**

ID	Tipo	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Longitud o Diámetro (mm)
2	Poros	117.3	294.7	122.6	290.8	6.4
3	Poros	120.6	277.9	123.1	273.3	4.6
4	Poros	89.0	198.4	91.7	195.7	3.5
5	Poros	161.7	118.4	165.3	115.5	3.8
6	Poros	94.3	111.6	96.5	109.4	3.0
7	Poros	16.4	110.4	19.0	100.5	10.2
8	Poros	94.5	99.0	100.8	92.8	7.8
9	Poros	105.1	99.0	114.9	94.6	10.3
10	Poros	99.0	92.3	108.2	84.4	9.8
11	Poros	108.5	76.6	111.6	73.1	3.8

El resumen del número de indicaciones por tipos de cara, se presentan en las Tablas 4.9 y 4.10.

**Tabla 4.9 Resumen de las indicaciones para las caras anchas de los elementos de anclaje**

Tipo de cara	ID	Probeta	Numero de discontinuidades
Ancha	B	EN-20080313-001	85
Ancha	C	EN-20080313-001	71
Ancha	A	EN-20080818-001	67
Ancha	C	EN-20080818-001	109
<b>Total</b>			<b>332</b>
<b>Promedio por cara</b>			<b>83</b>

**Tabla 4.10 Resumen de las indicaciones para las caras angostas de los elementos de anclaje**

Tipo de cara	ID	Probeta	Numero de discontinuidades
Angosta	A	EN-20080313-001	21
Angosta	D	EN-20080313-001	20
Angosta	B	EN-20080818-001	9
Angosta	D	EN-20080818-001	11
<b>Total</b>			<b>60</b>
<b>Promedio por cara</b>			<b>15</b>

### **4.1.2 Ultrasonido**

El elemento de anclaje EN-20080313-001, no se inspeccionó por ultrasonido. Con respecto al elemento de anclaje EN-20080818-001 se obtuvo una sección identificada como EN-20130611-002 que fue la pieza de donde se obtuvieron las muestras para los diversos ensayos de este proyecto. Con base en el registro de inspección PND-US-13/001, a esta sección se le aplicó la inspección de ultrasonido y el reporte indica que no se encontraron discontinuidades internas.

## **4.2 Pruebas Destructivas**

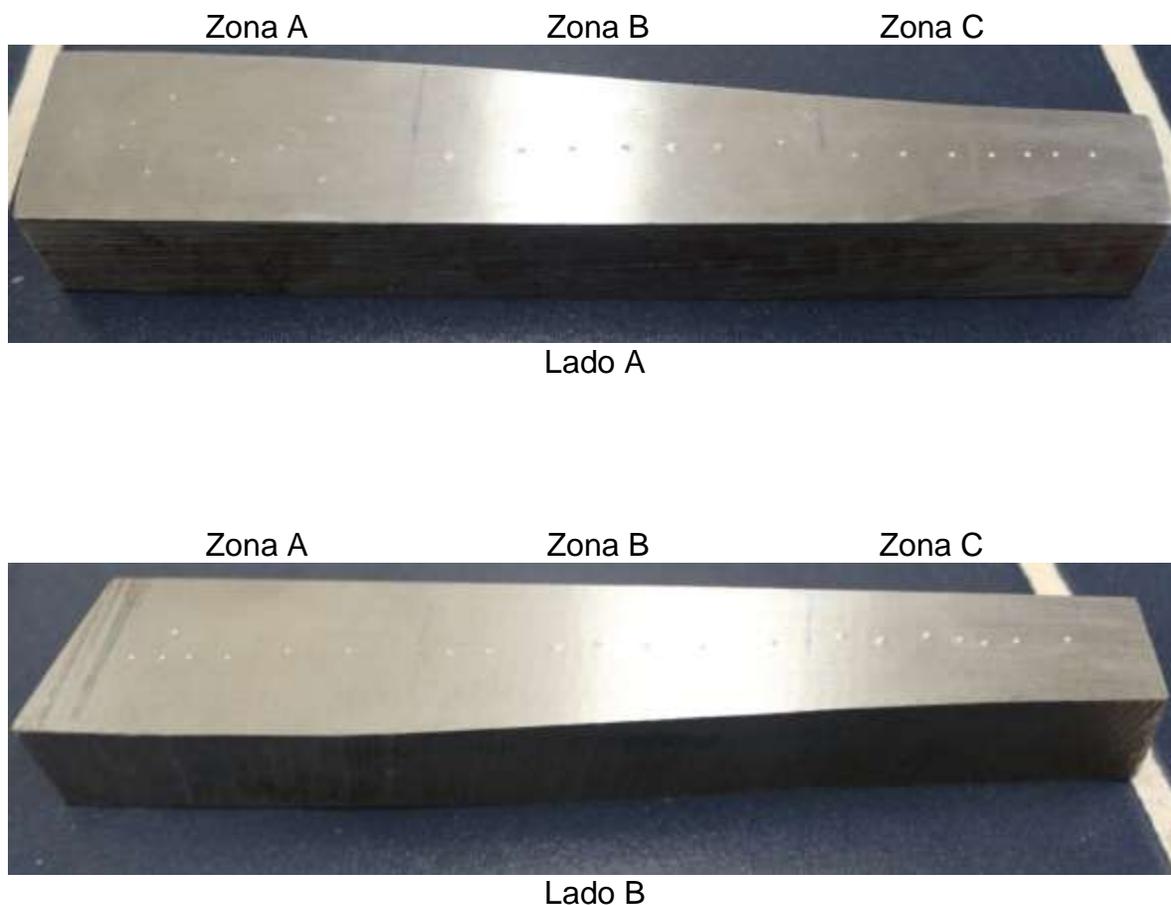
De las Pruebas Destructivas (PND) realizadas, se obtuvieron los siguientes resultados:

### **4.2.1 Propiedades mecánicas**

Dentro de las pruebas mecánicas que se establecieron en la metodología, se consideraron en este trabajo, son: dureza, tensión y mecánica de la fractura (velocidad de crecimiento de grieta). A continuación se presentan los resultados de estas pruebas.

#### **4.2.1.1 Pruebas de dureza**

Las mediciones de dureza se realizaron en la probeta EN-20130409-014, que proviene del elemento de anclaje EN-20080313-001. Esta probeta de ensayo es de sección rectangular (Figura 37), en el cual se midió la dureza a lo largo de la misma, los resultados de la inspección se indican en la Tabla 4.11, las unidades son indicadas con referencia a la escala Rockwell C (HRC).

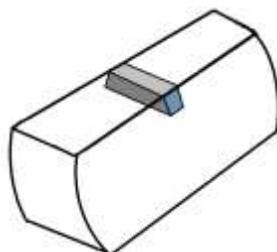


**Figura 37. Probeta EN-20130409-014, mediciones de dureza**

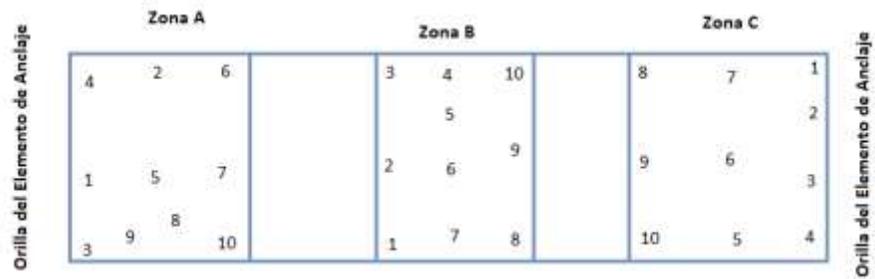
**Tabla 4.11 Dureza (HRC), de la pieza EN-20130409-014**

ID	Lado A	Lado B	Observaciones
1	20.1	20.5	Zona a
2	20.6	21.5	Zona a
3	20.6	21.0	Zona a
4	20.6	20.5	Zona a
5	20.0	21.2	Zona a
6	20.4	20.7	Zona a
7	20.8	21.0	Zona a
8	21.0	20.0	Zona b
9	20.9	21.3	Zona b
10	20.0	20.9	Zona b
11	20.2	20.6	Zona b
12	20.8	20.0	Zona b
13	20.2	20.5	Zona b
14	20.0	20.5	Zona b
15	20.2	20.0	Zona c
16	20.3	20.9	Zona c
17	20.5	20.7	Zona c
18	20.5	20.3	Zona c
19	20.9	21.6	Zona c
20	20.9	20.9	Zona c
21	21.1	20.9	Zona c

Del elemento de anclaje identificado como EN-20080818-001, se obtuvo la muestra identificada como EN-20130611-002 de la cual se obtuvo la probeta identificada como EN-20130905-014 (Figura 38) y en ésta se midió la dureza en diversas posiciones (Figura 39). Las mediciones de dureza, de acuerdo con el registro de inspección de dureza PND-DU-13/002, se indican en la Tabla 4.12.



**Figura 38. Muestra EN-20130611-002, de donde se obtuvo la probeta EN-20130905-014**



**Figura 39. Mediciones de dureza de la probeta EN-20130905-014**

Cabe resaltar que es en las orillas de la probeta, que corresponde a las zonas laterales del elemento de anclaje, se presentaron las mayores durezas.

**Tabla 4.12 Dureza (HRC), de la pieza EN-20130905-014**

ID	Zona A	Zona B	Zona C
1	44.7	24.5	53.0
2	30.5	25.0	44.9
3	26.1	25.5	51.3
4	49.0	24.8	49.0
5	26.2	25.9	29.2
6	26.6	26.1	29.6
7	26.5	26.6	27.5
8	25.4	25.7	26.7
9	26.0	26.7	27.6
10	25.8	26.2	28.3

### 4.2.1.2 Pruebas de tensión

Para la prueba de tensión de acuerdo con la Norma ASTM E8/E8M <sup>[11]</sup>, se deben hacer varias mediciones durante el proceso, éstas comienzan con la medición de las dimensiones de las probetas de acuerdo con las especificaciones mostradas en la Figura 26, en la Tabla 4.13 se indican las dimensiones para definir el área inicial de las probetas.

**Tabla 4.13 Medición del área inicial de las probetas de tensión**

<i>Probeta</i>	<i>T</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>A</i> (m <sup>2</sup> )
EN-20130408-001	5.8416	6.2398	3.64504E-05
EN-20130408-002	5.8446	5.9736	3.49133E-05
EN-20130408-003	5.8518	5.9736	3.49563E-05
EN-20130409-001	5.855	5.9984	3.51206E-05
EN-20130409-002	5.852	6.0384	3.53367E-05
EN-20130409-003	5.852	6.0316	3.52969E-05
EN-20130409-004	5.8296	6.0086	3.50277E-05
EN-20130409-005	5.838	6.043	3.52790E-05
EN-20130409-006	5.8362	6.0246	3.51608E-05
EN-20130409-007	5.8438	6.0026	3.50780E-05
EN-20130409-008	5.8232	6.0108	3.50021E-05
EN-20130409-009	5.8358	5.9144	3.45153E-05
EN-20130409-010	5.8382	6.0144	3.51133E-05
EN-20130409-011	5.8312	6.0136	3.50665E-05

Después de realizar las pruebas de tensión se mide la longitud final de cada probeta como se indica en la Figura 40, con el método de análisis de imagen, auxiliándose de una base magnética y un calibrador vernier, los resultados se indican en la Tabla 4.14.



**Figura 40. Medición de la longitud final**

**Tabla 4.14 Resultados de la medición de la longitud final de las probetas de tensión**

Probeta	Longitud Final (mm)
EN-20130408-001	26.64
EN-20130408-002	26.48
EN-20130408-003	26.74
EN-20130409-001	26.44
EN-20130409-002	26.94
EN-20130409-003	26.62
EN-20130409-004	25.88
EN-20130409-005	26.26
EN-20130409-006	26.12
EN-20130409-007	26.07
EN-20130409-008	25.90
EN-20130409-009	26.40
EN-20130409-010	26.06
EN-20130409-011	27.74

Con respecto al área final, cada probeta, se midió con análisis de imagen (Figura 41), obteniendo las dimensiones de cada sección de la fractura midiendo la altura y el ancho de cada sección (A y B), para lo cual se elaboró una hoja de cálculo como se indica en la Figura 42.



**Figura 41. Medición de la longitud y área final**

Probeta	EN-20130408-001			
	Foto	Escala (Pixel/mm)	Foto	Escala (Pixel/mm)
	IMG_0635.JPG	76	IMG_0636.JPG	85.2
	Sección A Horizontal	Sección A Vertical	Sección B Horizontal	Sección B Vertical
Medición	L (mm)	L (mm)	L (mm)	L (mm)
1	5.95	5.67	5.94	5.54
2	6.01	5.62	5.96	5.56
3	5.88	5.64	5.96	5.56
Promedio	5.947	5.643	5.953	5.553
Área Sección [m <sup>2</sup> ]	3.356E-05		3.306E-05	
Área Promedio [m <sup>2</sup> ]	3.33099E-05			

**Figura 42. Hoja de cálculo para la medición del área final**

Los resultados de la reducción de área se indican en la Tabla 4.15.

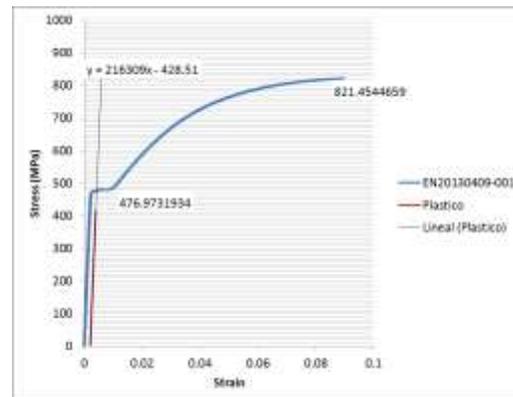
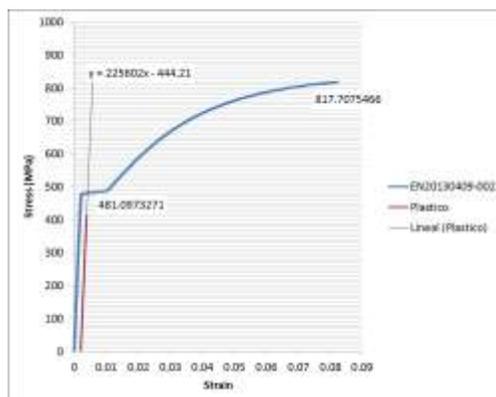
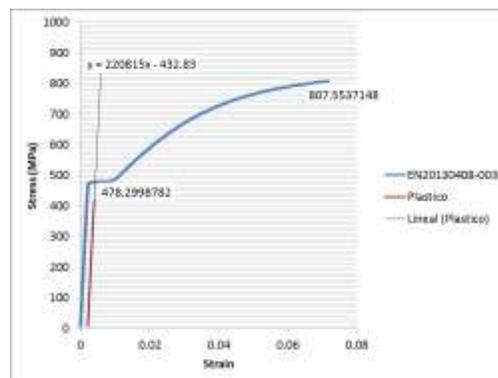
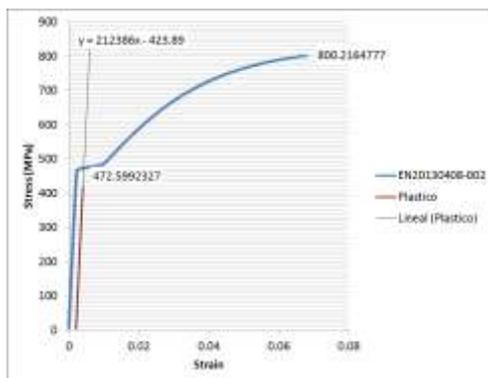
**Tabla 4.15 Resultados de la medición del área final de las probetas de tensión**

Probeta	Área Final [m <sup>2</sup> ]
EN-20130408-001	-
EN-20130408-002	3.177138E-05
EN-20130408-003	3.191118E-05
EN-20130409-001	3.114265E-05
EN-20130409-002	3.192900E-05
EN-20130409-003	-
EN-20130409-004	3.333875E-05
EN-20130409-005	3.261344E-05
EN-20130409-006	3.258883E-05
EN-20130409-007	-
EN-20130409-008	3.202356E-05
EN-20130409-009	3.147268E-05
EN-20130409-010	-
EN-20130409-011	2.976312E-05

Los resultados finales de cada prueba se indican en la Tabla 4.16 y las gráficas típicas de las pruebas de tensión, correspondientes de cada ensayo, se indican en la Figura 43.

**Tabla 4.16 Resultados de la medición del área final de las probetas de tensión**

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					PROPIEDADES DEL MATERIAL			Observaciones
ID	Área Inicial (m <sup>2</sup> )	Longitud Inicial calibrada (mm)	Reducción de área (%)	Elongación (%)	Módulo de elasticidad E (GPa)	Esfuerzo de cedencia $\sigma_o$ (MPa)	Esfuerzo último de tensión $\sigma_{UTS}$ (MPa)	
EN-20130408-001	3.645E-05	25	-	-	-	-	-	Probeta fuera de tolerancias
EN-20130408-002	3.491E-05	25	9.00%	5.92%	212.386	472.599	800.216	-
EN-20130408-003	3.495E-05	25	8.71%	6.96%	220.815	478.299	807.554	-
EN-20130409-001	3.512E-05	25	11.33%	5.76%	216.309	476.973	821.454	-
EN-20130409-002	3.533E-05	25	9.64%	7.76%	225.602	481.097	817.708	-
EN-20130409-003	3.529E-05	25	-	-	-	-	-	Fractura fuera de la zona de medición
EN-20130409-004	3.502E-05	25	4.82%	3.52%	212.521	470.336	754.496	-
EN-20130409-005	3.527E-05	25	7.56%	5.04%	207.674	477.215	801.516	-
EN-20130409-006	3.516E-05	25	7.31%	4.48%	210.663	471.452	793.990	-
EN-20130409-007	3.507E-05	25	-	-	-	-	-	Fractura fuera de la zona de medición
EN-20130409-008	3.500E-05	25	8.51%	3.60%	212.938	486.225	841.490	-
EN-20130409-009	3.451E-05	25	8.82%	5.60%	218.009	477.221	833.182	-
EN-20130409-010	3.511E-05	25	-	-	-	-	-	Fractura fuera de la zona de medición
EN-20130409-011	3.507E-05	25	15.12%	10.96%	196.093	473.825	855.426	-
<b>Promedio</b>	<b>3.50E-05</b>		<b>9.08%</b>	<b>5.96%</b>	<b>213.301</b>	<b>476.5242</b>	<b>812.7032</b>	



Continúa ...

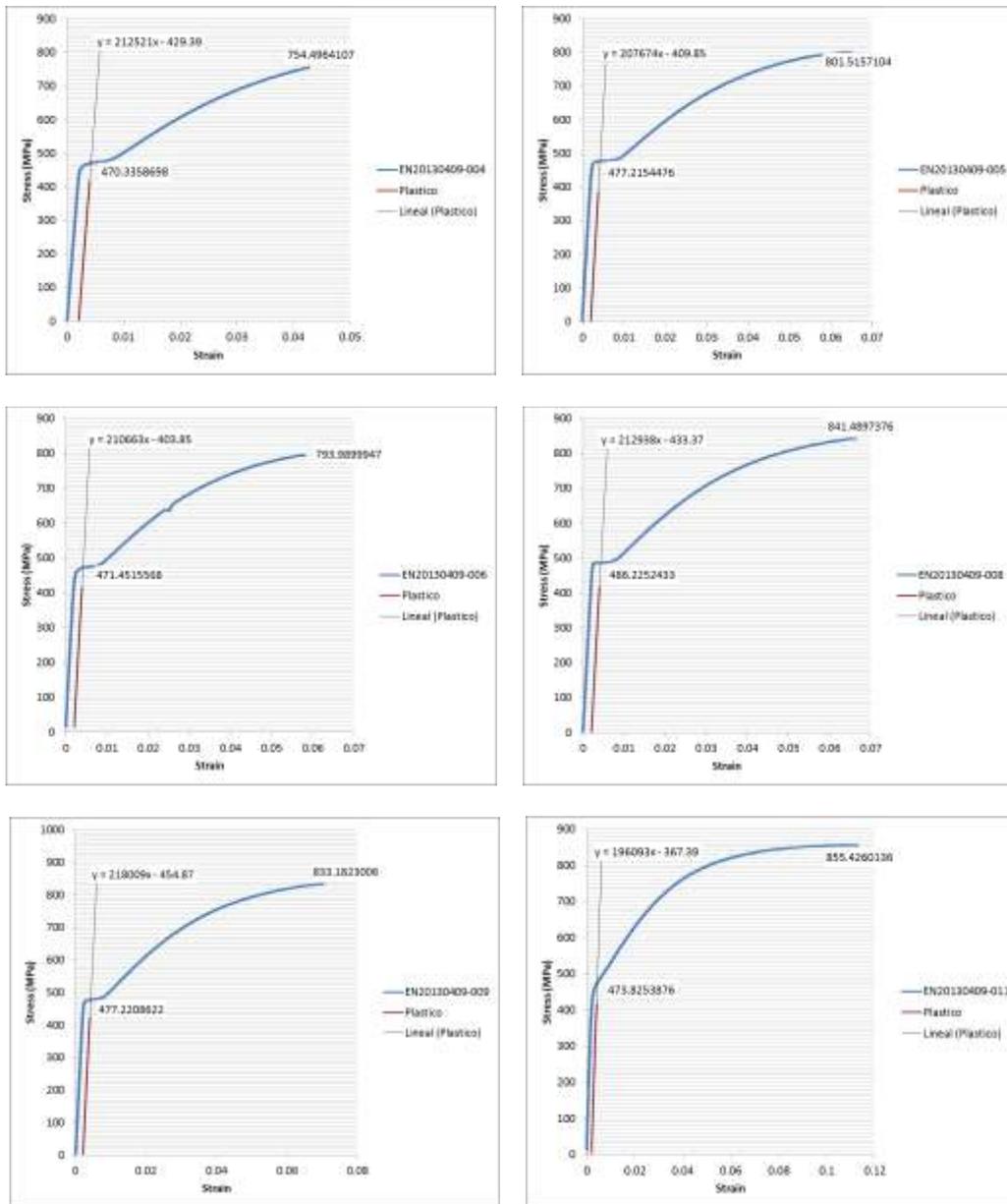


Figura 43. Gráficas de la prueba de tensión

### 4.2.1.3 Mecánica de la fractura, velocidad de crecimiento de grietas (da/dN)

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de velocidad de crecimiento de grieta, de acuerdo con los registros que tienen los folios PND-DA-13/001 al 13/006.

#### Resultados para la probeta EN-20130409-013

Tabla 4.17 Geometría de la probeta EN-20130409-013

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					
MEDICIÓN	B (mm)	W (mm)	L (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	N (mm)
1	15.20	29.88	159.50	10.60	2.0
2	15.20	29.90	159.49	10.60	2.1
3	15.19	29.90	159.46	10.50	2.1
4	15.20	29.88	159.49	10.60	2.1
5	15.21	29.90	159.50	-	2.1
6	15.19	29.91	159.52	-	-
PROMEDIO	15.19	29.895	159.49	10.575	2.08

Tabla 4.18 Resultados de la prueba para la probeta EN-20130409-013

RESULTADOS DE LA PRUEBA da/dN									
m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	a <sub>5</sub> (mm)	a <sub>c</sub> (mm)	ΔK <sub>max</sub> (MPa m <sup>1/2</sup> )	Plano de simetría de la grieta
3.190042	4.029E-09	19.57	19.76	19.76	18.85	19.61	19.69	39.84	Cumple

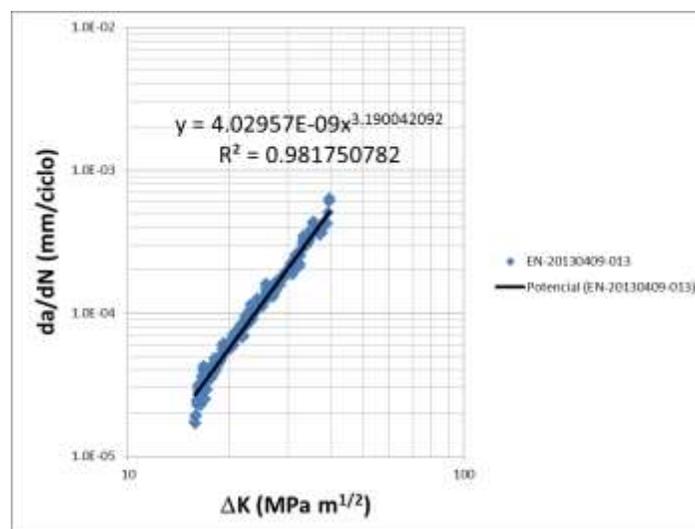


Figura 44. Gráficas de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta para la probeta EN-20130409-013

## Resultados para la probeta EN-20130409-015

Tabla 4.19 Geometría de la probeta EN-20130409-015

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					
MEDICIÓN	B (mm)	W (mm)	L (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	N (mm)
1	15.15	29.93	159.74	10.60	2.1
2	15.18	29.92	159.71	10.50	2.0
3	15.20	29.92	159.70	10.50	2.1
4	15.18	29.92	159.71	10.50	2.1
5	15.20	29.93	159.69		2.1
6	15.19	29.92	159.72		
PROMEDIO	15.18	29.92	159.71	10.525	2.08

Tabla 4.20 Resultados de la prueba para la probeta EN-20130409-015

RESULTADOS DE LA PRUEBA da/dN									
m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	a <sub>5</sub> (mm)	a <sub>c</sub> (mm)	ΔK <sub>max</sub> (MPa m <sup>1/2</sup> )	Plano de simetría de la grieta
2.994852	8.25E-09	20.41	20.45	20.22	19.63	20.15	20.36	45.02	Cumple

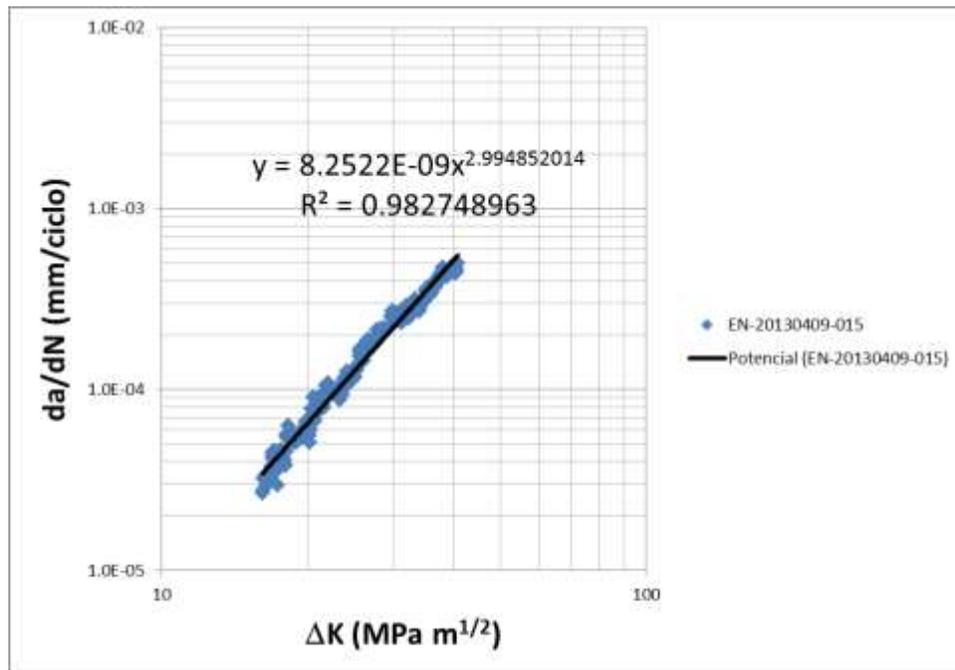


Figura 45. Gráficas de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta para la probeta EN-20130409-015

Resultados para la probeta EN-20130409-017

Tabla 4.21 Geometría de la probeta EN-20130409-017

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					
MEDICIÓN	B (mm)	W (mm)	L (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	N (mm)
1	15.18	29.94	159.71	10.60	2.1
2	15.21	29.95	159.68	10.60	2.1
3	15.21	29.95	159.69	10.60	2.1
4	15.21	29.95	159.68	10.60	2.2
5	15.20	29.94	159.68	10.60	2.1
6	15.21	29.96	159.67		
PROMEDIO	15.20	29.94	159.68	10.6	2.12

Tabla 4.22 Resultados de la prueba para la probeta EN-20130409-017

RESULTADOS DE LA PRUEBA da/dN									
m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	a <sub>5</sub> (mm)	a <sub>c</sub> (mm)	ΔK <sub>max</sub> (MPa m <sup>1/2</sup> )	Plano de simetría de la grieta
3.258398	3.14E-09	20.49	20.06	20.14	19.37	20.03	20.23	43.18	Cumple

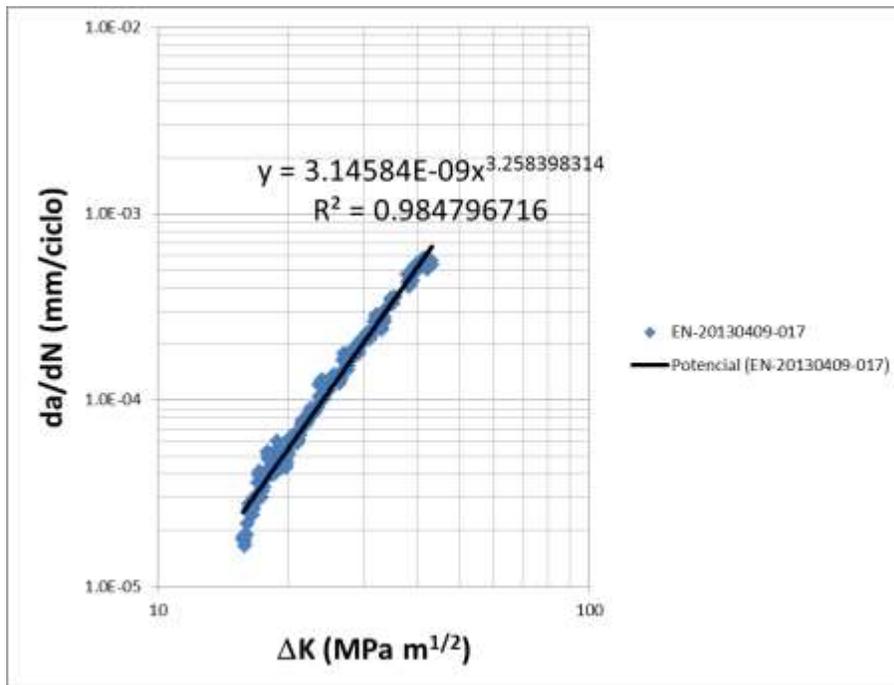


Figura 46. Gráficas de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta para la probeta EN-20130409-017

## Resultados para la probeta EN-20130409-019

Tabla 4.23 Geometría de la probeta EN-20130409-019

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					
MEDICIÓN	B (mm)	W (mm)	L (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	N (mm)
1	15.17	29.91	159.80	10.60	2.1
2	15.16	29.90	159.78	10.50	2.1
3	15.14	29.90	159.76	10.60	2.1
4	15.17	29.90	159.75	10.50	2.1
5	15.17	29.89	159.78		2.1
6	15.17	29.89	159.78		
PROMEDIO	15.16	29.89	159.77	10.55	2.1

Tabla 4.24 Resultados de la prueba para la probeta EN-20130409-019

RESULTADOS DE LA PRUEBA da/dN									
m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	a <sub>5</sub> (mm)	a <sub>c</sub> (mm)	ΔK <sub>max</sub> (MPa m <sup>1/2</sup> )	Plano de simetría de la grieta
3.195916	4.06E-09	19.06	19.21	18.76	18.69	18.87	19.01	39.81	Cumple

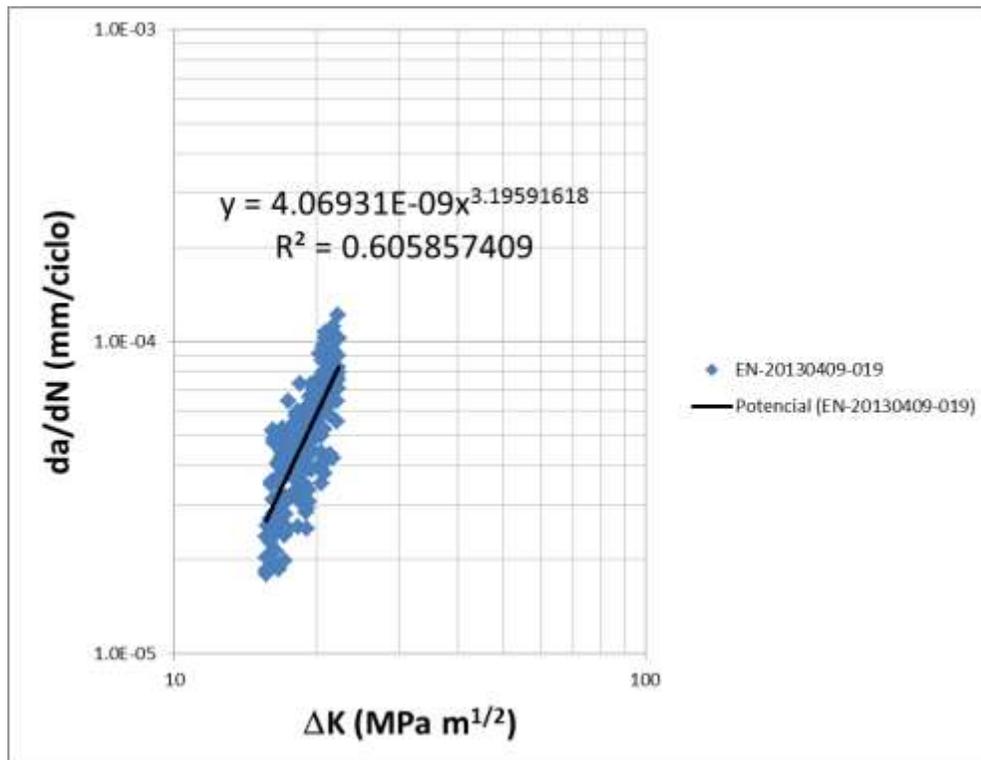


Figura 47. Gráficas de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta para la probeta EN-20130409-019

Resultados para la probeta EN-20130409-017

Tabla 4.25 Geometría de la probeta EN-20130409-021

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					
MEDICIÓN	B (mm)	W (mm)	L (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	N (mm)
1	15.16	29.84	159.80	10.50	2.1
2	15.16	29.85	159.82	10.50	2.1
3	15.18	29.88	159.82	10.50	2.1
4	15.17	29.88	159.80	10.60	2.1
5	15.18	29.88	159.81		2.1
6	15.18	29.88	159.81		
PROMEDIO	15.17	29.86	159.81	10.525	2.1

Tabla 4.26 Resultados de la prueba para la probeta EN-20130409-021

RESULTADOS DE LA PRUEBA da/dN									
m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	a <sub>5</sub> (mm)	a <sub>c</sub> (mm)	ΔK <sub>max</sub> (MPa m <sup>1/2</sup> )	Plano de simetría de la grieta
3.474562	1.59E-09	19.79	19.41	19.41	18.76	19.6	19.53	40.66	Cumple

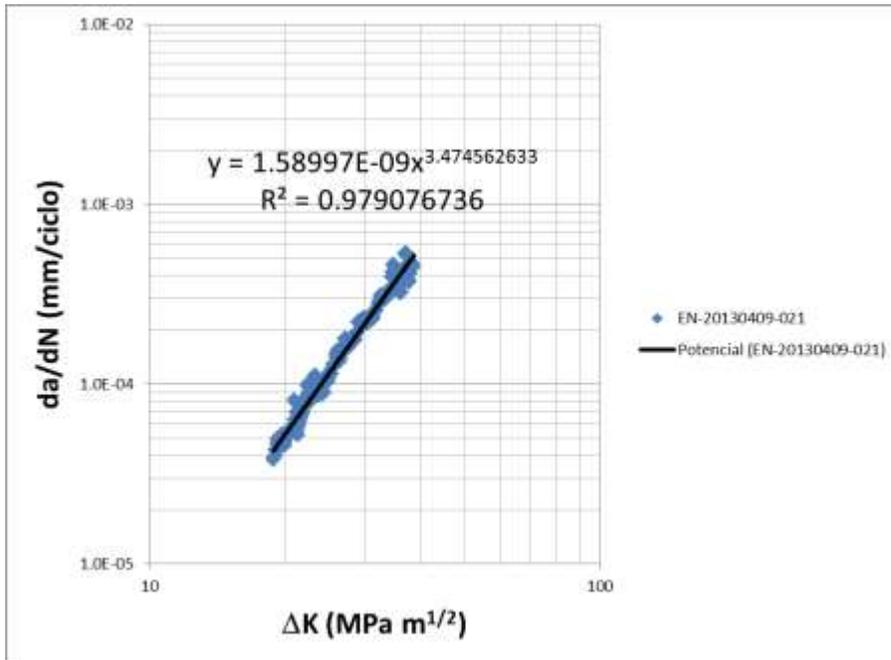


Figura 48. Gráficas de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta para la probeta EN-20130409-021

## Resultados para la probeta EN-20130409-023

Tabla 4.27 Geometría de la probeta EN-20130409-023

GEOMETRÍA DE LA PROBETA					
MEDICIÓN	B (mm)	W (mm)	L (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	N (mm)
1	15.20	29.88	159.50	10.60	2.0
2	15.20	29.90	159.49	10.60	2.1
3	15.19	29.90	159.46	10.50	2.1
4	15.20	29.88	159.49	10.60	2.1
5	15.21	29.90	159.50	-	2.1
6	15.19	29.91	159.52	-	-
PROMEDIO	15.198	29.895	159.493	10.575	2.08

Tabla 4.28 Resultados de la prueba para la probeta EN-20130409-023

RESULTADOS DE LA PRUEBA da/dN									
m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	a <sub>5</sub> (mm)	a <sub>c</sub> (mm)	ΔK <sub>max</sub> (MPa m <sup>1/2</sup> )	Plano de simetría de la grieta
3.2747692	3.865E-09	0.9809	20.01	19.84	19.43	19.52	18.97	36.85	Cumple

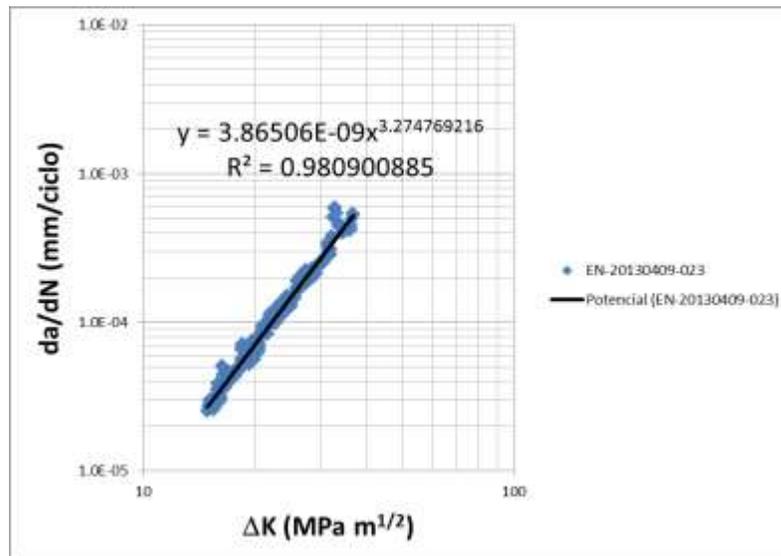


Figura 49. Gráficas de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta para la probeta EN-20130409-023

En la Tabla 4.29, se muestra el resumen de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta.

**Tabla 4.29 Resumen de los resultados de la prueba de velocidad de crecimiento de grieta**

Probeta	m (MPa m <sup>1/2</sup> )	C	$\Delta K_{max}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
EN-20130409-013	3.190042	4.03E-09	39.84
EN-20130409-015	2.994852	8.25E-09	45.02
EN-20130409-017	3.258398	3.14E-09	43.18
EN-20130409-019	3.195916	4.06E-09	39.81
EN-20130409-021	3.474562	1.59E-09	40.66
EN-20130409-023	3.2747692	3.87E-09	36.85
<b>Promedio</b>	<b>3.2314232</b>	<b>4.15E-09</b>	<b>40.89</b>

Cabe aclarar que con el rango del factor de intensidad de esfuerzos máximo ( $\Delta K$ ), es posible estimar el factor de intensidad de esfuerzos máximo ( $K_{max}$ ) a través de la siguiente relación:

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{1-R} \quad (4.1)$$

La correlación de cargas (R), en este caso fue de 0.1 y cuando la fractura ocurre, significa que el factor de intensidad de esfuerzos máximo en un ciclo es igual a la tenacidad a la fractura ( $K_c$ ), esto es  $K_{max} = K_c$ , para el modo uno de falla se escribe como  $K_{Ic}$ , es decir, factor de intensidad de esfuerzos crítico en el modo uno de falla.

## 4.2.2 Pruebas químicas

Las pruebas químicas fueron realizadas en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) y los resultados se indican en la Tabla 4.30.

**Tabla 4.30 Resultados de las pruebas químicas**

Probeta	Carbono C (%)	Silicio Si (%)	Manganeso Mn (%)	Fósforo P (%)	Azufre S (%)	Cromo Cr (%)	Molibdeno Mo (%)	Níquel Ni (%)	Cobre Cu (%)
EN-20080912-001	0.34	0.38	0.71	<b>0.031</b>	<b>0.025</b>	1.25	0.13	0.74	0.33
EN-20130905-017	0.39	0.87	0.93	<b>0.019</b>	<b>0.041</b>	1.41	0.38	0.32	0.32
Muestra 1	0.45	0.81	0.83	<b>0.036</b>	<b>0.022</b>	1.01	0.10	0.54	0.35
Muestra 2	0.38	0.79	0.81	<b>0.033</b>	<b>0.020</b>	1.00	0.09	0.53	0.33
Muestra 3	0.44	0.81	0.82	<b>0.034</b>	<b>0.025</b>	1.01	0.09	0.54	0.35
Muestra 4	0.37	0.3	0.71	<b>0.038</b>	<b>0.037</b>	0.81	0.08	0.61	0.34
Muestra 5	0.37	0.3	0.71	<b>0.035</b>	<b>0.036</b>	0.82	0.08	0.60	0.34
Muestra 6	0.45	0.3	0.70	<b>0.035</b>	<b>0.035</b>	0.81	0.08	0.60	0.34

De acuerdo a la Tabla 3.7 en donde se indican los contenidos químicos para un acero estructural ASTM A148/148M <sup>[16]</sup>, en la Tabla 4.30 se puede observar que todas las muestras ensayadas están dentro de la norma en lo que se refiere al contenido de fósforo y azufre.

### 4.2.3 Pruebas metalográficas

La finalidad de las pruebas metalográficas es estimar el tamaño de grano y la forma en que se distribuyen los granos en la muestra. Los resultados de las pruebas se indican a continuación:

#### **Probeta EN-20130409-012**

De la pieza EN-20130409-012, se obtuvieron 4 muestras identificadas como EN-20130820-001 al 004, los cortes de las muestras se muestran en la Figura 50 y el montaje en baquelita se muestra en la Figura 51.



**Figura 50. Muestras para las pruebas metalográficas**



**Figura 51. Muestras montadas en baquelita**

#### **Probeta EN-20130820-001**

##### **Tamaño de grano**

De las metalografías obtenidas (Figura 52), se observó un tamaño de grano fino entre 7 y 8 de acuerdo a la norma ASTM E112<sup>[17]</sup>, (ver Figura 32).



**Figura 52. Tamaño de grano fino entre 7 y 8 de acuerdo a la norma ASTM E112 <sup>[17]</sup>**

### ***Microestructura***

La microestructura como se indica en la Figura 53, muestra que está formado de ferrita y perlita, típicas de una fundición de acero.



**Figura 53. Microestructura de la probeta EN-20130820-001**

### ***Cambio de tamaño de grano***

Aproximadamente a 500 micrómetros de la orilla del elemento de anclaje se observa un cambio en el tamaño de grano (que corresponde a la zona de enfriamiento rápido), donde se desarrollaron granos finos (7 y 8), posteriormente en una franja de 100 micrómetros se desarrolla grano mixto (3 y 4) y posteriormente se observan zonas con tamaño de grano fino, como se indica en la Figura 54.



**Figura 54. Cambio de la microestructura de la probeta EN-20130820-001**

### **Poros**

Se observaron diversos poros en algunas de las muestras, con un promedio en longitud de 212 micrómetros y área promedio de 90 micrómetros cuadrados (ver Figura 55).



**Figura 55. Poros en la probeta EN-20130820-001**

La Tabla 4.31, muestra los resultados de las mediciones de cada poro de las imágenes obtenidas, se realizaron varias mediciones de cada poro dada su morfología, por lo que se indican solamente los promedios de las mediciones de cada poro y el promedio final de todas las imágenes analizadas.

Tabla 4.31 Mediciones de porosidades

Imagen	Área promedio ( $\mu\text{m}^2$ )	Longitud mínima ( $\mu\text{m}$ )	Longitud máxima ( $\mu\text{m}$ )	Longitud promedio ( $\mu\text{m}$ )
EN-20130820-001-04 Poros.jpg	66.77	18.79	156.33	158.72
EN-20130820-001-04 Poros.jpg	62.01	20.12	221.48	147.41
EN-20130820-001-04 Poros.jpg	77.16	21.27	232.25	183.49
EN-20130820-001-05 Poro.jpg	95.66	10.65	118.62	227.35
EN-20130820-001-05 Poro.jpg	21.67	11.45	99.33	51.06
EN-20130820-001-06 Poro.jpg	142.87	18.73	234.66	339.83
EN-20130820-001-06 Poro.jpg	169.65	19.37	239.47	403.72
EN-20130820-001-A-01.jpg	149.57	10.76	158.66	355.90
EN-20130820-001-A-01.jpg	75.93	12.43	140.12	180.35
EN-20130820-001-A-05.jpg	59.72	13.80	94.24	141.91
EN-20130820-001-A-05.jpg	59.9	22.11	111.98	142.24
<b>Promedio</b>	<b>89.17</b>	<b>16.32</b>	<b>164.29</b>	<b>212.00</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>45.70</b>	<b>4.49</b>	<b>57.55</b>	<b>108.88</b>
<b>Mínimo</b>	<b>21.67</b>	<b>10.65</b>	<b>94.24</b>	<b>51.06</b>
<b>Máximo</b>	<b>169.65</b>	<b>22.11</b>	<b>239.47</b>	<b>403.72</b>

### Probeta EN-20130820-002

#### Tamaño de grano

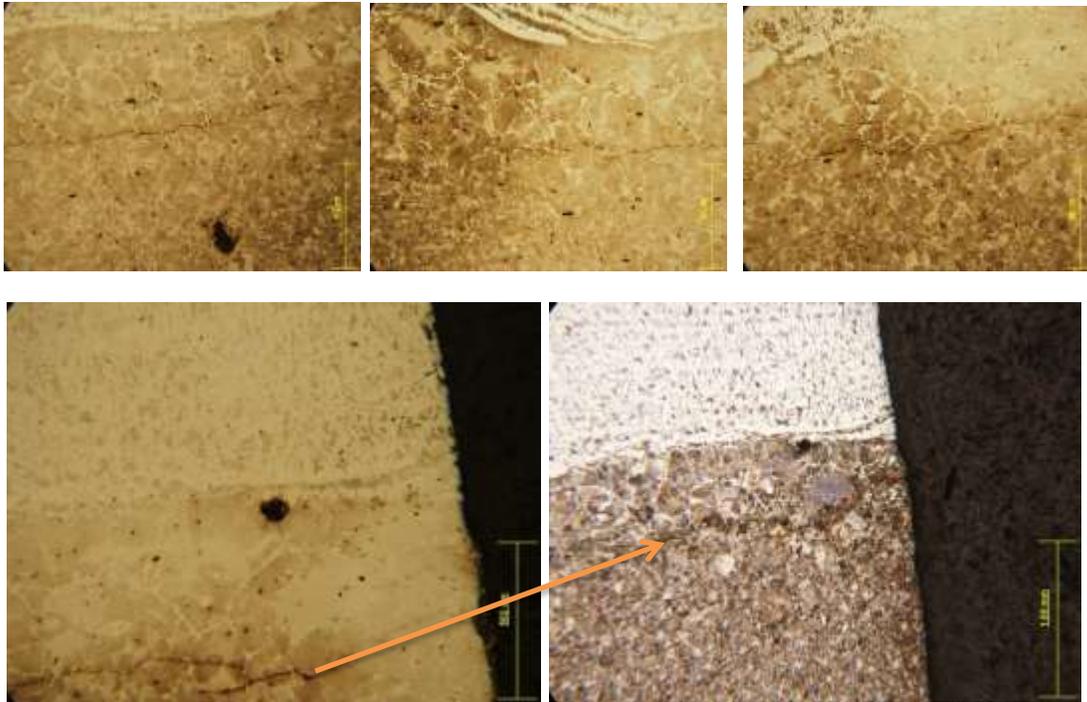
En las imágenes de la Figura 56, se observan tres zonas de grano diferente, esta probeta muestra en plano X-Y, la parte superior de la imagen (clara) pertenece a la orilla de elemento de anclaje y aquí se desarrolla un tamaño de grano mixto (3, 5, 7 y 8) con un espesor de aproximadamente 1.5 mm. A partir de esta zona se desarrolla otra zona con tamaño de grano grande (1 a 5) con un espesor aproximadamente de 1 mm, y después se desarrolla la matriz principal con tamaño de grano fino.



Figura 56. Poros en la probeta EN-20130820-002

#### Grietas cortas y poros

En esta pieza se encontraron grietas cortas (longitudes menores a 1 mm) y poros, como puede observarse en las imágenes de la Figura 57. Las grietas cortas se formaron en la intersección de la zona de tamaño de grano grande con la zona de grano fino.



**Figura 57. Poros y grietas cortas en la probeta EN-20130820-002**

***Probeta EN-20130820-003***

***Tamaño de grano***

La microestructura muestra un tamaño de grano mixto que va de un tamaño de grano medio (5 y 6) hasta un tamaño de grano fino (7 y 8) la mayor parte de ellos, como puede ser observada en la Figura 58.



**Figura 58. Microestructura de la probeta EN-20130820-003**

***Probeta EN-20130820-004***

***Tamaño de grano***

La microestructura muestra un tamaño de grano mixto que va de un tamaño de grano medio (5 y 6) hasta un tamaño de grano fino (7 y 8), el tamaño de grano fino predomina en la mayor parte de la Figura 59.



**Figura 59. Microestructura de la probeta EN-20130820-004**

## 4.3 Funciones de Densidad de Probabilidad

En esta sección se presentan las Funciones de Densidad de Probabilidad (PDF por sus siglas en inglés), así como las Funciones de Densidad de Probabilidad acumulada e inverso, de los principales parámetros de cada una de las pruebas realizadas, así como las ecuaciones de las funciones obtenidas por regresión lineal y que pueden incluirse en los modelos de simulación para calcular la confiabilidad estructural.

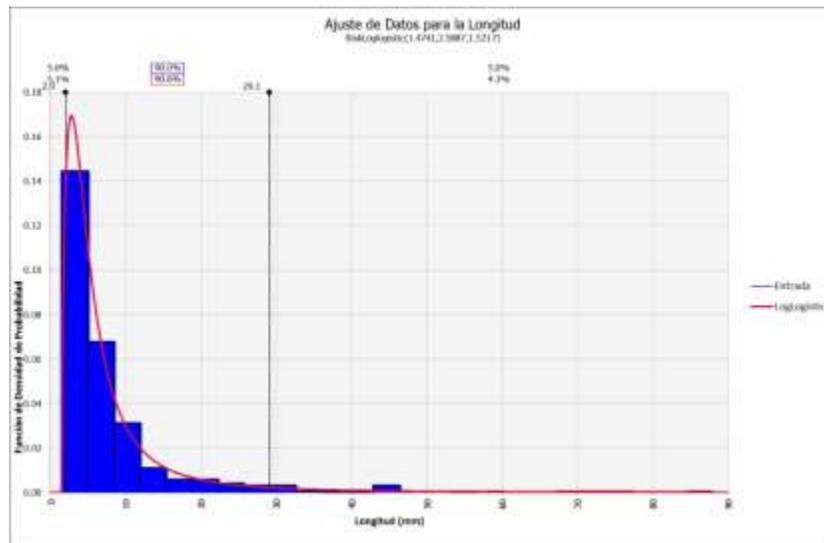
### 4.3.1 Pruebas no destructivas

Como se recordará, las pruebas no destructivas realizadas comprendían dos pruebas, líquidos penetrantes y ultrasonido. De las pruebas realizadas con ultrasonido no se encontraron indicaciones de discontinuidad, pero sí se encontraron discontinuidades superficiales con la técnica de líquidos penetrantes. A continuación se presentan las funciones de densidad de probabilidad por tipo de cara.

#### 4.3.1.1 Líquidos penetrantes

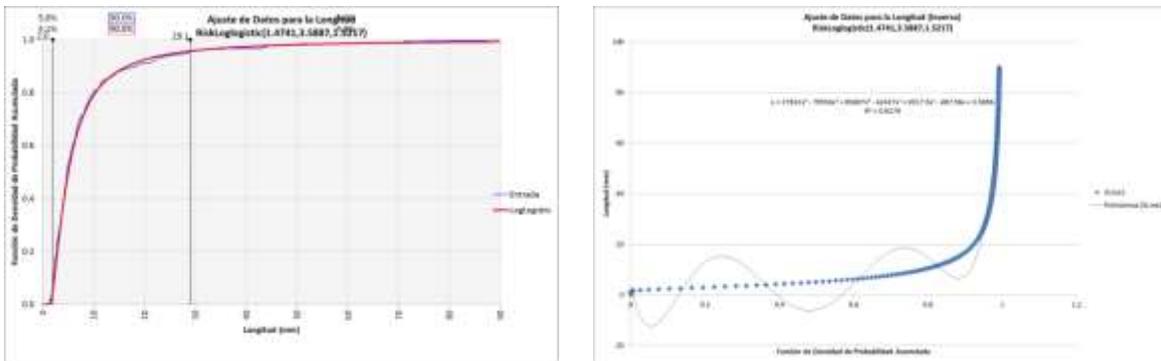
##### *Longitud Cara Ancha*

La función de densidad de probabilidad para la cara ancha de los elementos de anclaje es del tipo LogLogistic. La Figura 60 muestra la gráfica de esta distribución. Como puede observarse más del 90% de las mediciones tienen menos de 30 mm de longitud.



**Figura 60. Función de densidad de probabilidad para la longitud de discontinuidades para la cara ancha de los elementos de anclaje superior**

La función de densidad de probabilidad acumulada se indica en la Figura 61, con ella se puede obtener la función matemática para fines de simulación.

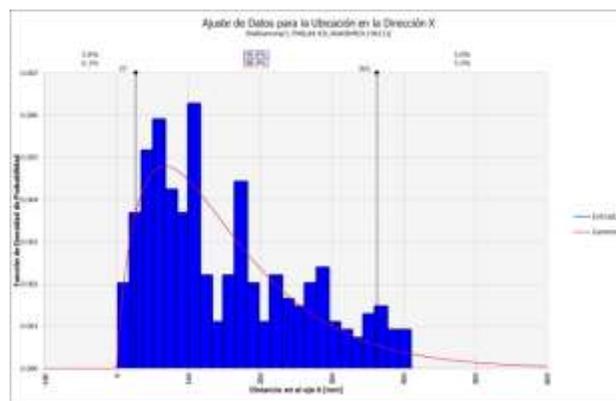


**Figura 61. Función de densidad de probabilidad acumulada para la longitud de discontinuidades para la cara ancha de los elementos de anclaje superior**

### ***Posición Cara Ancha***

Con respecto a la obtención de la posición de las discontinuidades en la cara ancha, se obtuvieron las coordenadas centrales de cada discontinuidad, con el fin de ubicar las discontinuidades en las direcciones X y Y. El origen en la dirección X es el extremo izquierdo y el origen en Y es el extremo inferior izquierdo de las imágenes mostradas en la sección 4.1.1.

Las Figuras 62, 63, 64 y 65 se indican las distribuciones de las discontinuidades para la dirección en X y en Y.



**Figura 62. Función de densidad de probabilidad para la ubicación en la dirección X de las discontinuidades para la cara ancha de los elementos de anclaje superior**

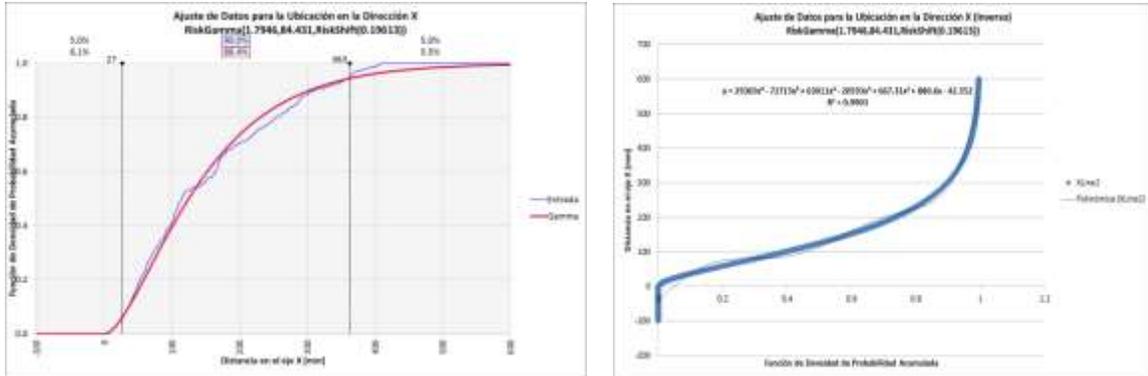


Figura 63. Función de densidad de probabilidad acumulada para la ubicación en la dirección X de las discontinuidades para la cara ancha de los elementos de anclaje superior

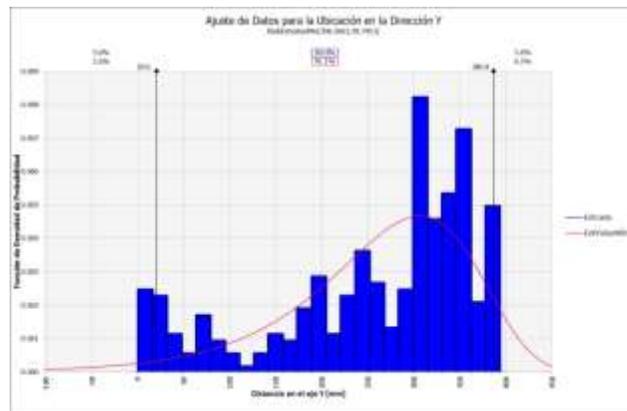


Figura 64. Función de densidad de probabilidad para la ubicación en la dirección Y de las discontinuidades para la cara ancha de los elementos de anclaje superior

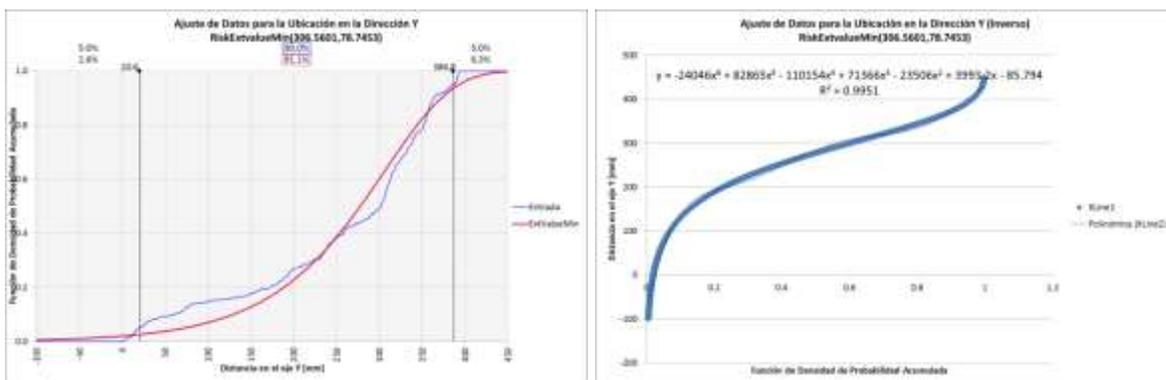
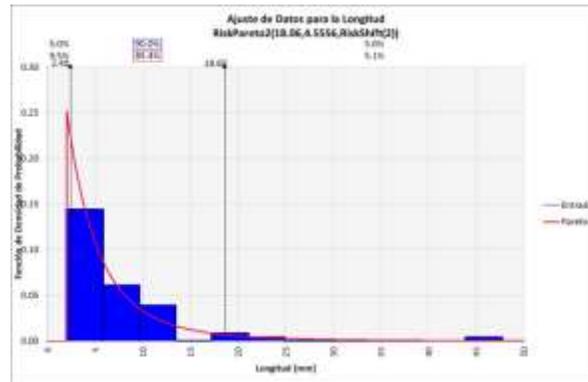


Figura 65. Función de densidad de probabilidad acumulada para la ubicación en la dirección Y de las discontinuidades para la cara ancha de los elementos de anclaje superior

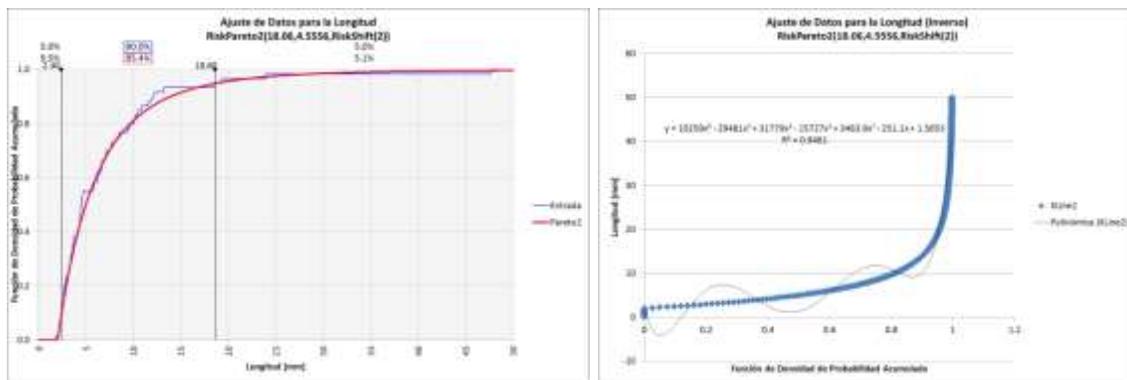
### Longitud Cara angosta

La función de densidad de probabilidad para la cara angosta de los elementos de anclaje es del tipo Pareto 2, en la Figura 66 se muestra la gráfica de esta distribución. Como puede observarse más del 90% de las mediciones tienen menos de 20 mm de longitud.



**Figura 66. Función de densidad de probabilidad para la longitud de discontinuidades para la cara angosta de los elementos de anclaje superior**

La función de densidad de probabilidad acumulada se indica en la Figura 67, con ella se puede obtener la función matemática para fines de simulación.



**Figura 67. Función de densidad de probabilidad acumulada para la longitud de discontinuidades para la cara angosta de los elementos de anclaje superior**

### Posición Cara Angosta

Con respecto a la obtención de la posición de las discontinuidades en la cara angosta, se obtuvieron las coordenadas centrales de cada discontinuidad, con el fin de ubicar las discontinuidades en las direcciones X y Y. El origen en la dirección X es el extremo izquierdo y el origen en Y es el extremo inferior izquierdo de las imágenes mostradas en la sección 4.1.1.

En las Figuras 68, 69, 70 y 71 se indican las distribuciones de las discontinuidades para la dirección en X y en Y.

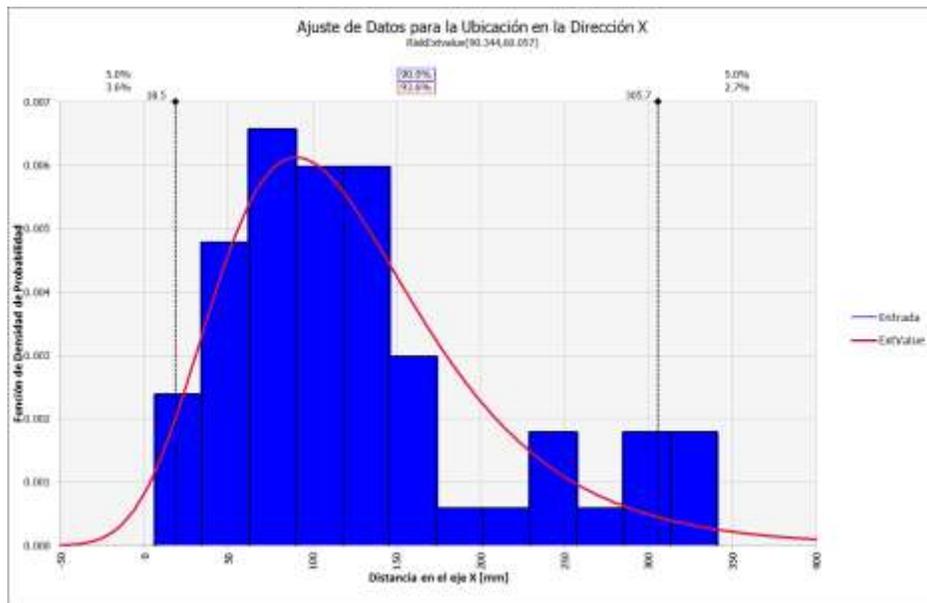


Figura 68. Función de densidad de probabilidad para la ubicación en la dirección X de las discontinuidades para la cara angosta de los elementos de anclaje superior

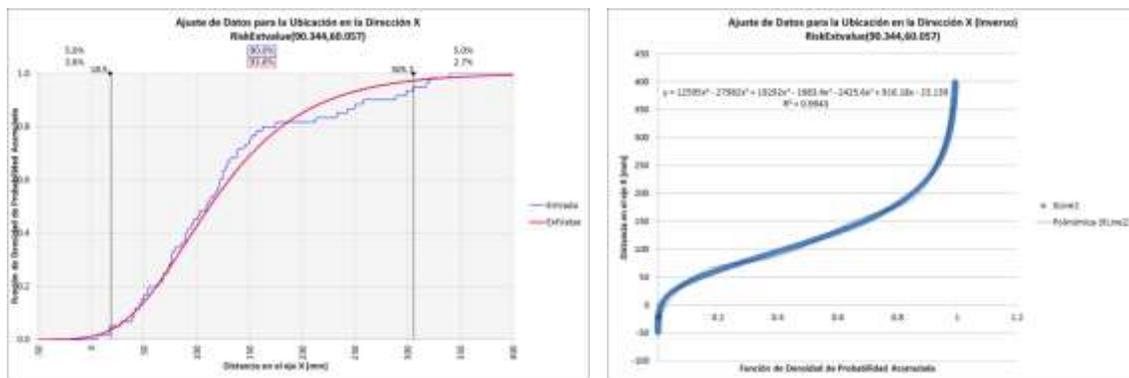
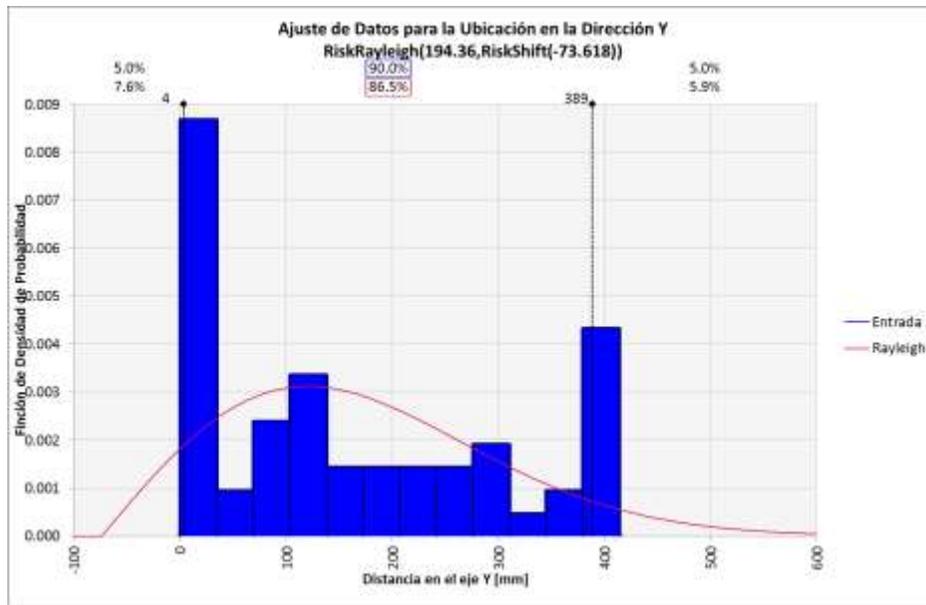
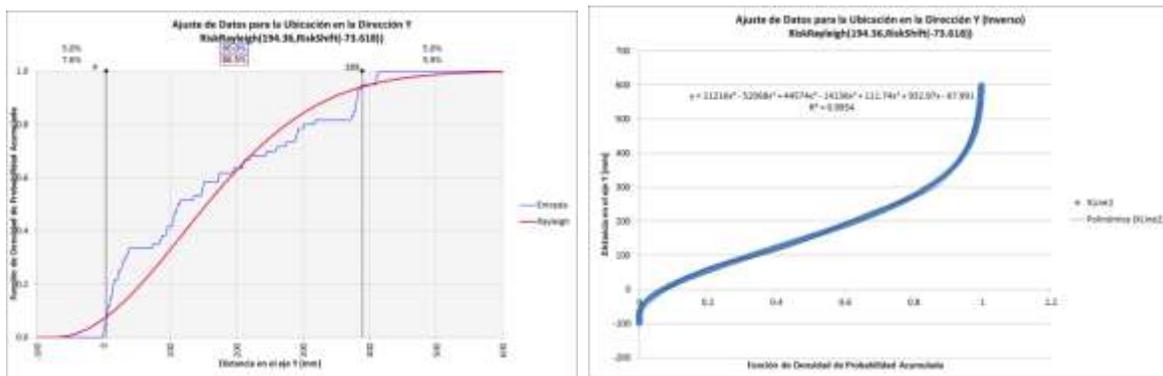


Figura 69. Función de densidad de probabilidad acumulada para la ubicación en la dirección X de las discontinuidades para la cara angosta de los elementos de anclaje superior



**Figura 70. Función de densidad de probabilidad para la ubicación en la dirección Y de las discontinuidades para la cara angosta de los elementos de anclaje superior**



**Figura 71. Función de densidad de probabilidad acumulada para la ubicación en la dirección Y de las discontinuidades para la cara angosta de los elementos de anclaje superior**

El resumen de las ecuaciones para estimar los parámetros para ubicar discontinuidades superficiales a partir de las pruebas con líquidos penetrantes, se indican en la Tabla 4.32.

**Tabla 4.32 Resumen de las ecuaciones para estimar la ubicación y longitud o área de discontinuidades**

Parámetro	Ecuación	Unidades
<b>Cara Ancha</b>		
<b>Longitud o diámetro*</b>	$L = ABS [27631x^6 - 79556x^5 + 85807x^4 - 42427x^3 + 9317.5x^2 - 687.96x + 3.5896]$	mm
<b>Posición eje x</b>	$x = 29365x^6 - 72715x^5 + 63011x^4 - 20593x^3 + 667.31x^2 + 880.6x - 42.552$	mm
<b>Posición eje y</b>	$y = -24046x^6 + 82865x^5 - 110154x^4 + 71366x^3 - 23506x^2 + 3993.2x - 85.794$	mm
<b>Cara Angosta</b>		
<b>Longitud o diámetro*</b>	$L = ABS[10259x^6 - 29481x^5 + 31779x^4 - 15727x^3 + 3463.9x^2 - 251.1x + 1.5653]$	mm
<b>Posición eje x</b>	$x = 12595x^6 - 27982x^5 + 19292x^4 - 1983.4x^3 - 2425.6x^2 + 916.18x - 23.139$	mm
<b>Posición eje y</b>	$y = 21216x^6 - 52068x^5 + 44574x^4 - 14136x^3 + 111.74x^2 + 932.97x - 67.991$	mm

*Para  $0 \leq x \leq 1$*

\* Como los números generados para la longitud o el diámetro pueden ser negativos, esto se corrige al considerar la estimación con un valor absoluto (ABS).

## 4.3.2 Pruebas destructivas

### 4.3.2.1 Prueba de dureza

La función de densidad de probabilidad para la prueba de dureza de los elementos de anclaje es del tipo Pearson 5, como se aprecian en las Figuras 72 y 73.

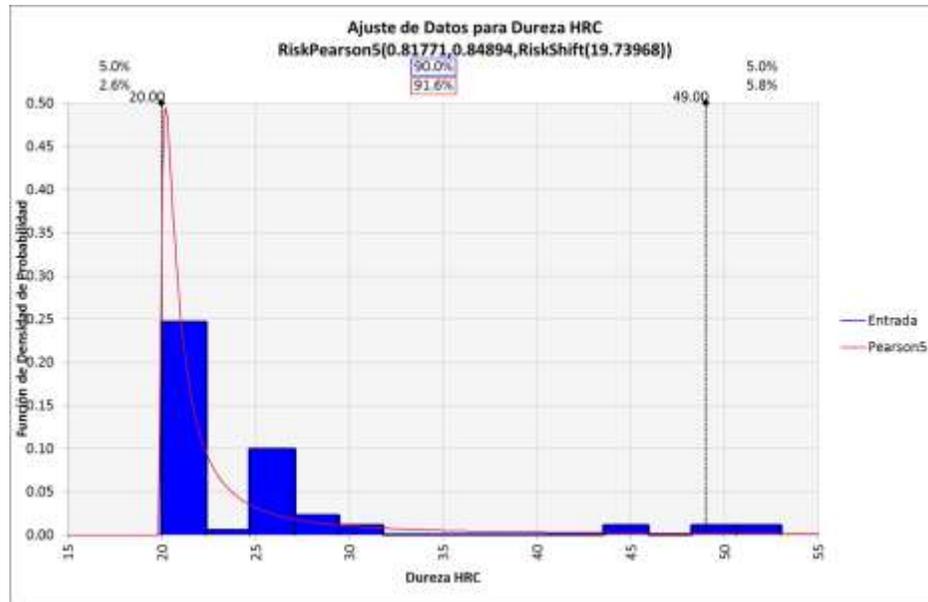


Figura 72. Función de densidad de probabilidad para la dureza de los elementos de anclaje superior

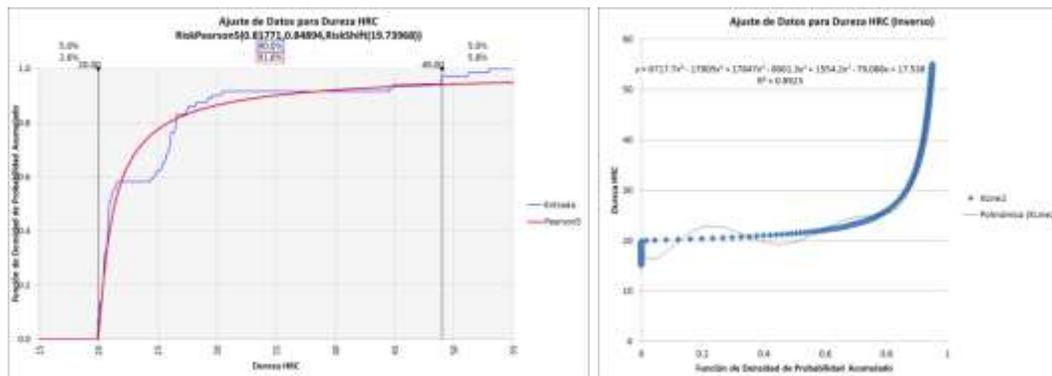


Figura 73. Función de densidad de probabilidad acumulada para la dureza de los elementos de anclaje superior

### 4.3.2.2 Prueba de tensión

#### Elongación

La función de densidad de probabilidad para la elongación de los elementos de anclaje es del tipo Logistic, ver Figuras 74 y 75.

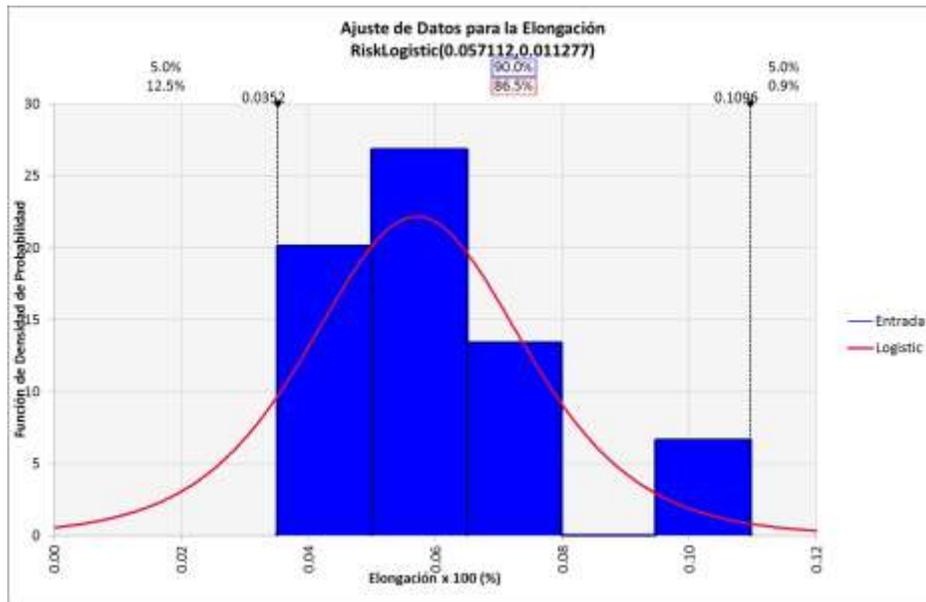


Figura 74. Función de densidad de probabilidad para la elongación de los elementos de anclaje superior

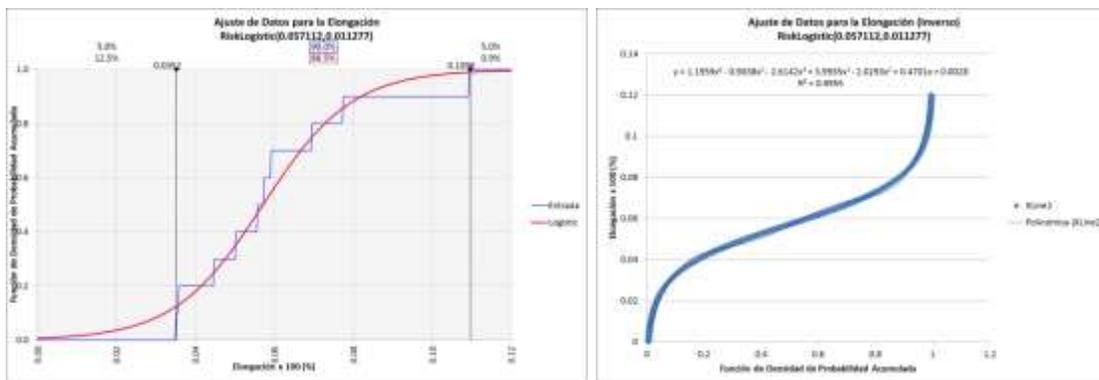


Figura 75. Función de densidad de probabilidad acumulada para la elongación de los elementos de anclaje superior

### Esfuerzo de cedencia

La función de densidad de probabilidad para el esfuerzo de cedencia de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value, mostradas en las Figura 76 y 77.

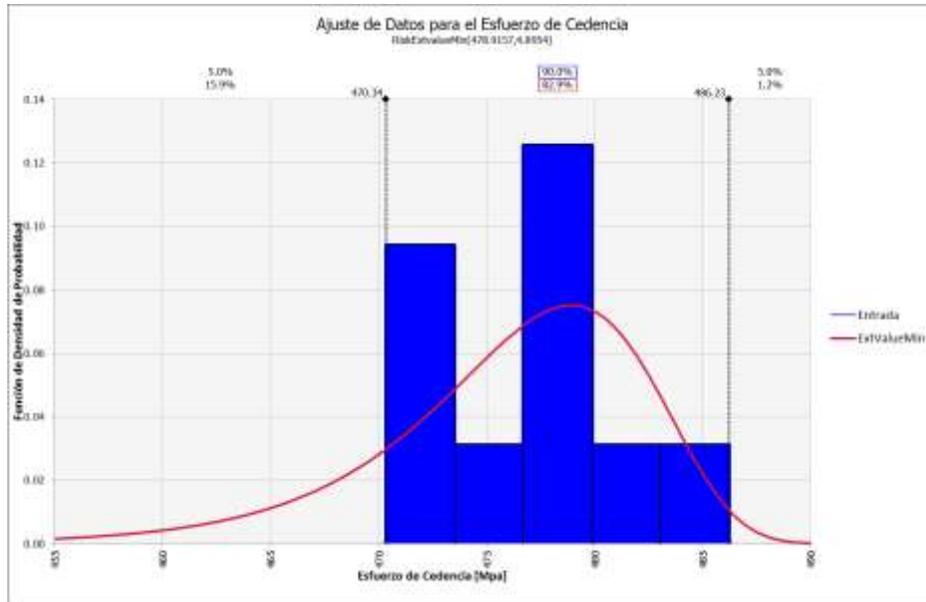


Figura 76. Función de densidad de probabilidad para el esfuerzo de cedencia de los elementos de anclaje superior

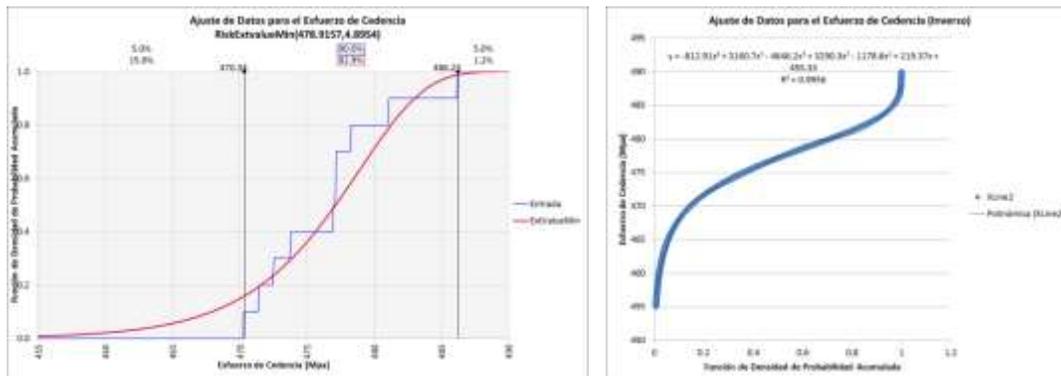


Figura 77. Función de densidad de probabilidad acumulada para el esfuerzo de cedencia de los elementos de anclaje superior

### Esfuerzo último a la tensión

La función de densidad de probabilidad para el esfuerzo último a la tensión de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value, (ver Figuras 78 y 79).

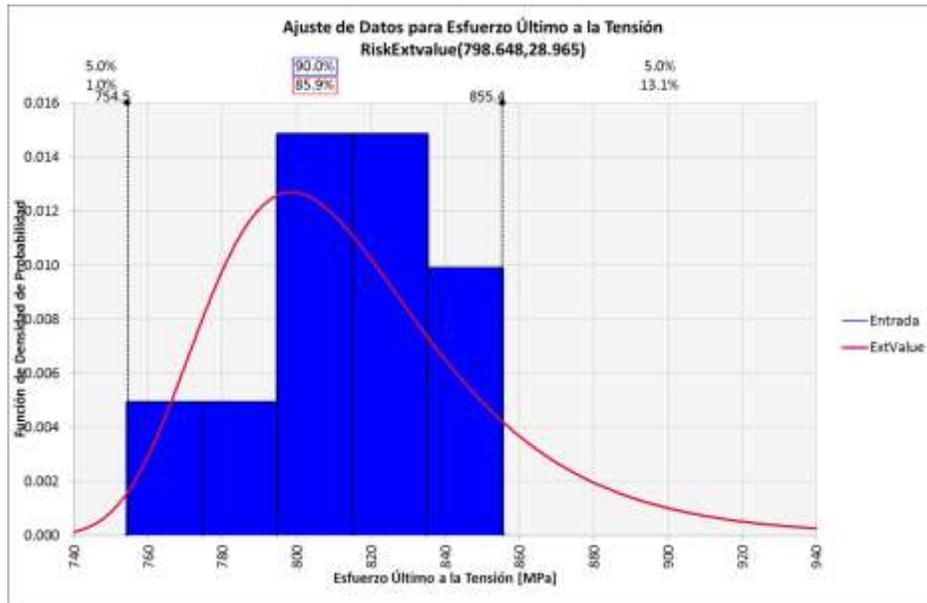


Figura 78. Función de densidad de probabilidad para el esfuerzo último a la tensión de los elementos de anclaje superior

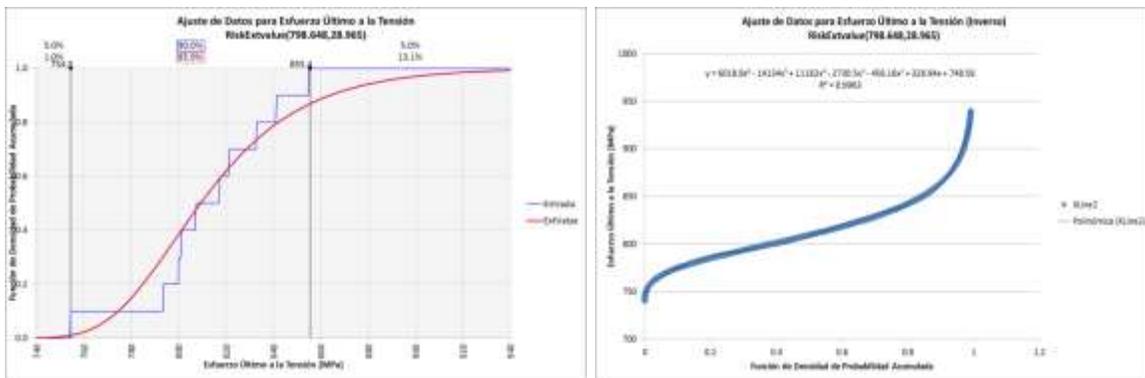


Figura 79. Función de densidad de probabilidad acumulada para el esfuerzo último a la tensión de los elementos de anclaje superior

### Módulo de elasticidad (E)

La función de densidad de probabilidad para módulo de elasticidad de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value, (ver Figuras 80 y 81).

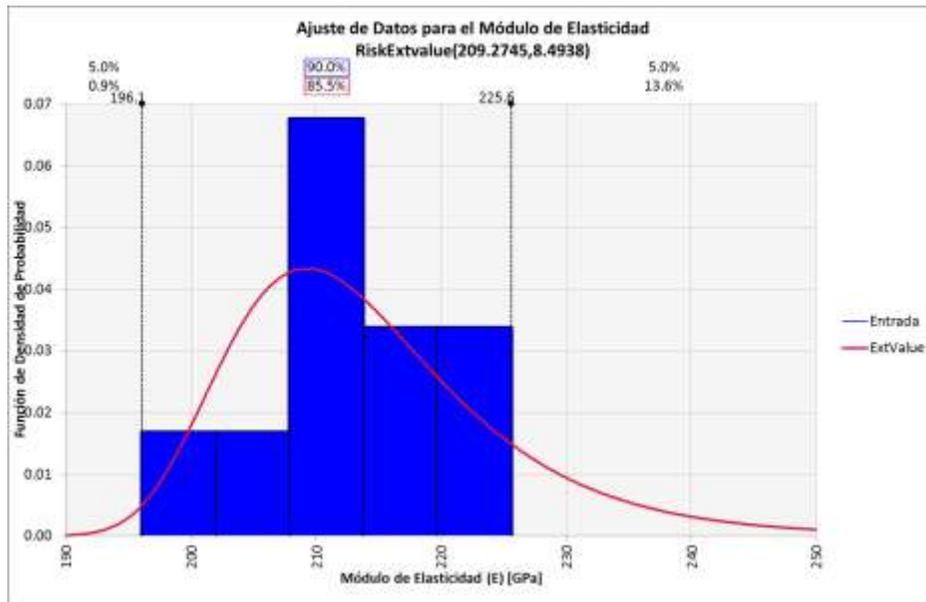


Figura 80. Función de densidad de probabilidad para el módulo de elasticidad de los elementos de anclaje superior

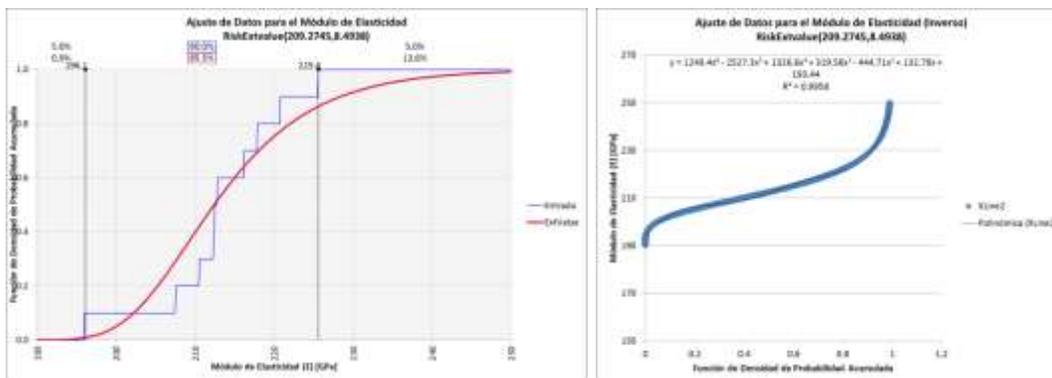


Figura 81. Función de densidad de probabilidad acumulada para el módulo de elasticidad de los elementos de anclaje superior

### 4.3.2.3 Mecánica de la fractura

#### Constante C

La función de densidad de probabilidad para la constante C de los elementos de anclaje es del tipo Logistic (Figuras 82 y 83).

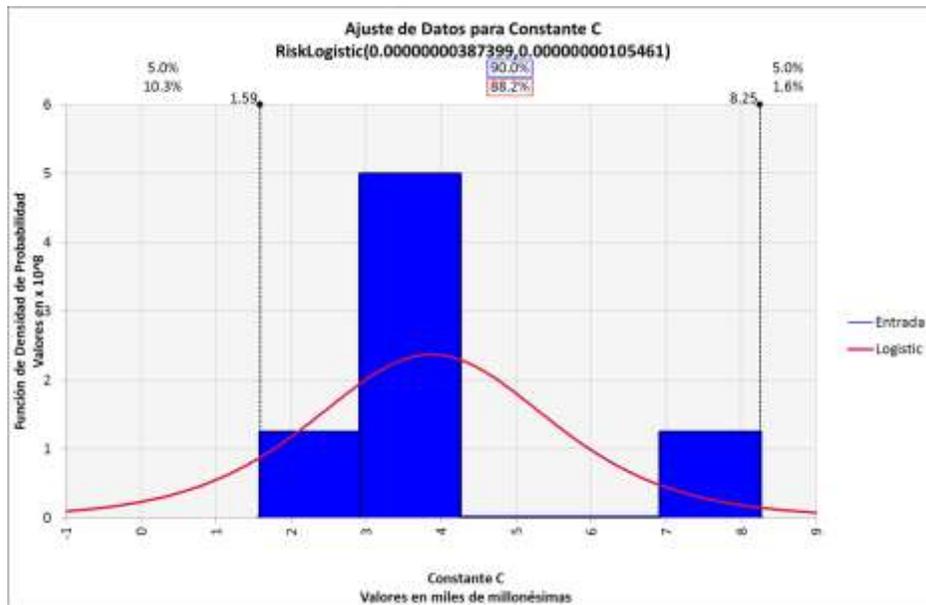


Figura 82. Función de densidad de probabilidad para la constante C de los elementos de anclaje superior

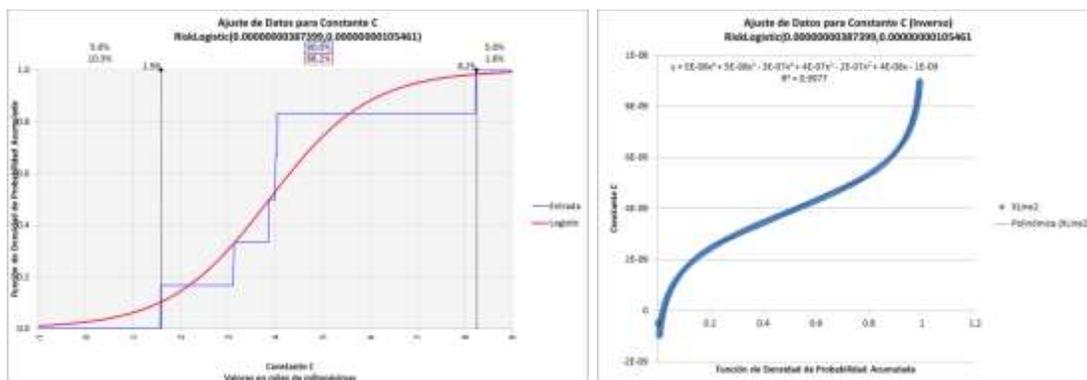


Figura 83. Función de densidad de probabilidad acumulada para la constante C de los elementos de anclaje superior

### Pendiente $m$

La función de densidad de probabilidad para pendiente  $m$  de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value (Figuras 84 y 85).

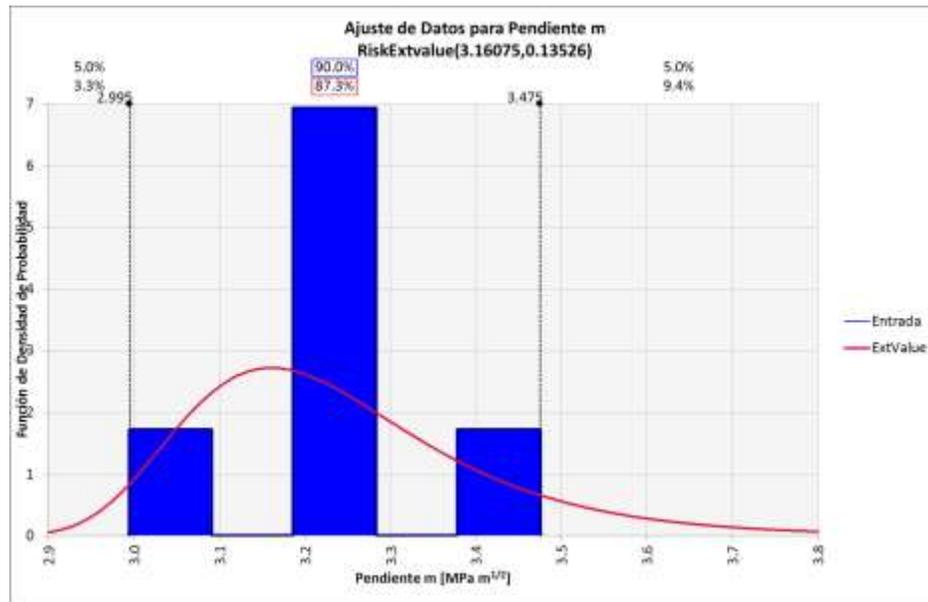


Figura 84. Función de densidad de probabilidad para la pendiente  $m$  de los elementos de anclaje superior

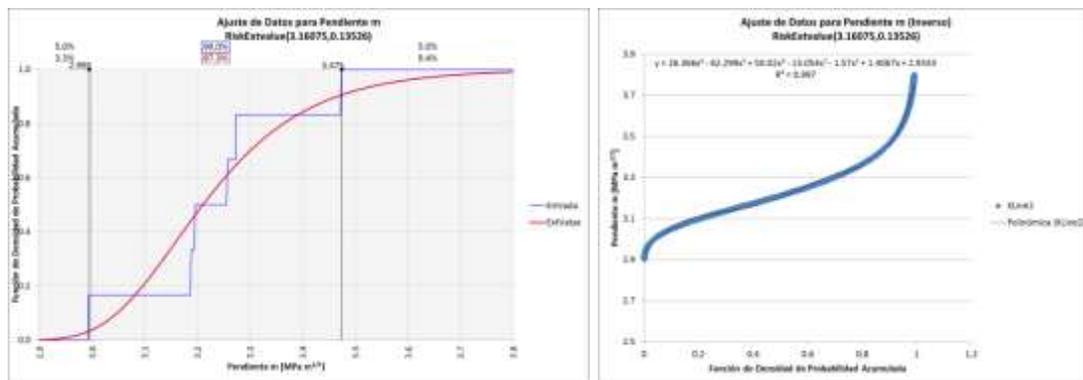
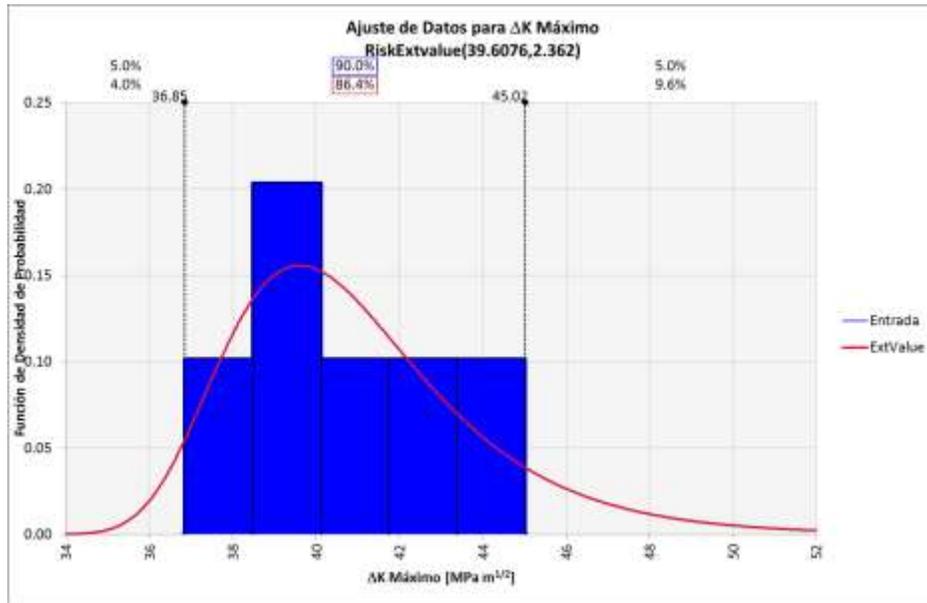


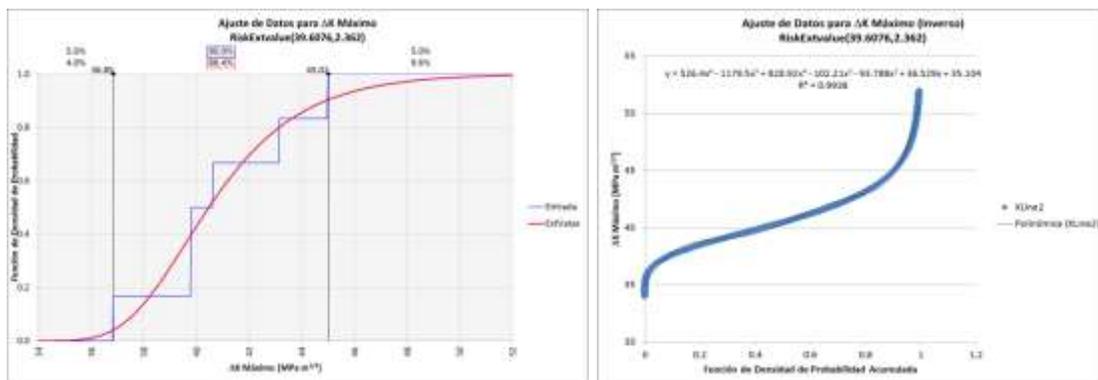
Figura 85. Función de densidad de probabilidad acumulada para la pendiente  $m$  de los elementos de anclaje superior

**Rango del factor de intensidad de esfuerzos máximo ( $\Delta K$  Máximo)**

La función de densidad de probabilidad para el rango del factor de intensidad de esfuerzos máximo de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value (Figuras 86 y 87).



**Figura 86. Función de densidad de probabilidad para el rango del factor de intensidad de esfuerzos máximo de los elementos de anclaje superior**



**Figura 87. Función de densidad de probabilidad acumulada para el rango del factor de intensidad de esfuerzos máximo de los elementos de anclaje superior**

### 4.3.2.4 Micro poros

#### Longitud

La función de densidad de probabilidad para la longitud de las micro-porosidades de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value (Figuras 88 y 89).

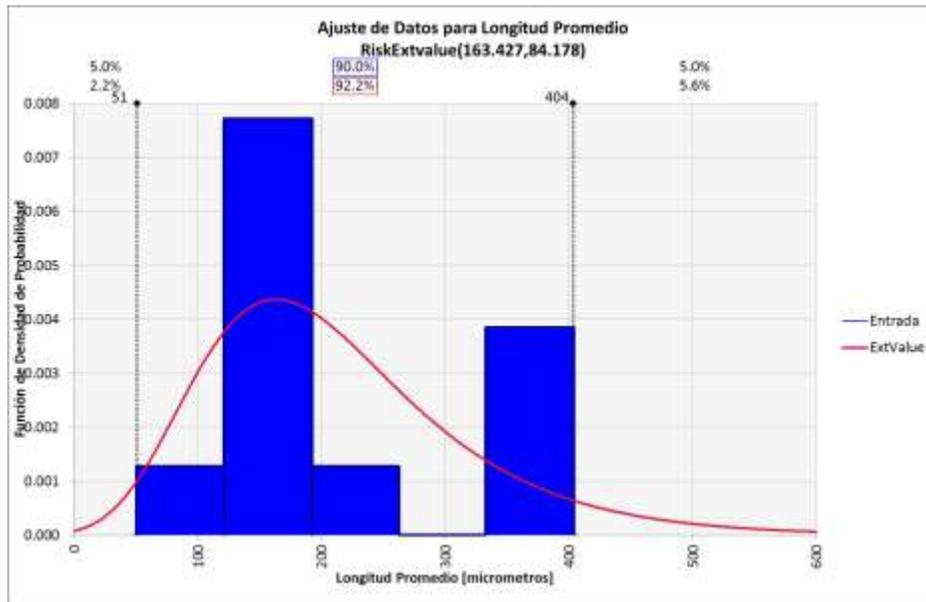


Figura 88. Función de densidad de probabilidad para la longitud de micro porosidades de los elementos de anclaje superior

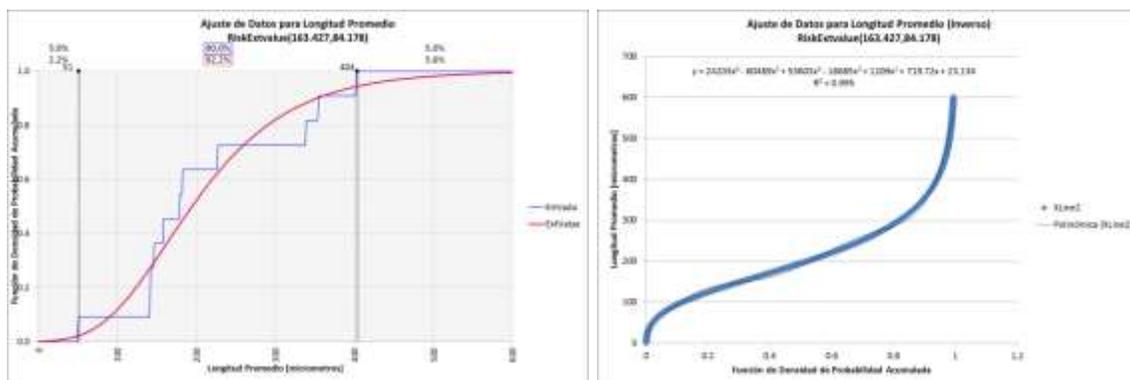


Figura 89. Función de densidad de probabilidad acumulada para la longitud de micro porosidades de los elementos de anclaje superior

## Área

La función de densidad de probabilidad para el área de las micro-porosidades de los elementos de anclaje es del tipo Extreme Value (Figuras 90 y 91).

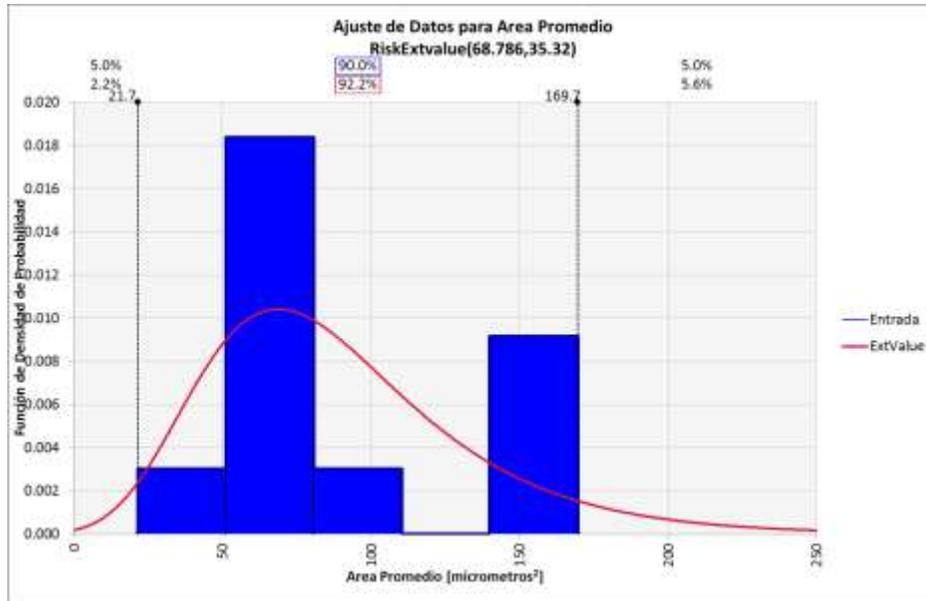


Figura 90. Función de densidad de probabilidad para el área de micro porosidades de los elementos de anclaje superior

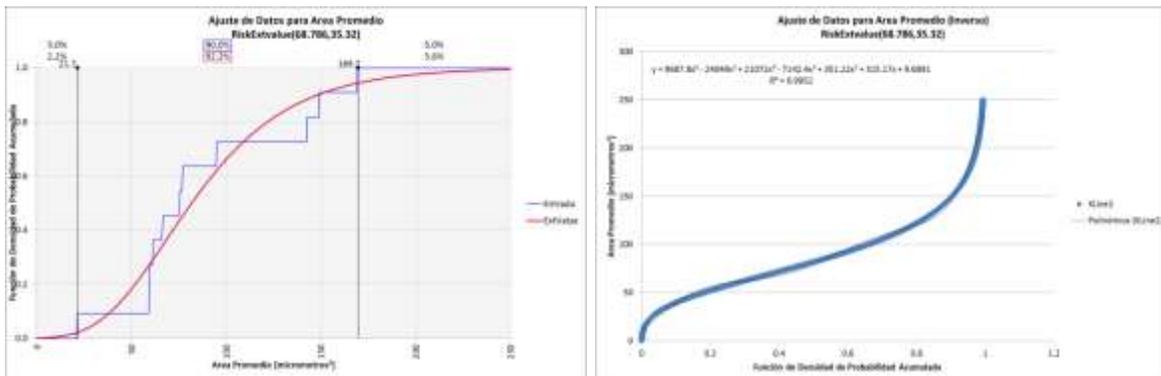


Figura 91. Función de densidad de probabilidad acumulada para el área de micro porosidades de los elementos de anclaje superior

El resumen de las ecuaciones para estimar los parámetros con respecto a las pruebas destructivas, se indica en la Tabla 4.33.

**Tabla 4.33 Resumen de las ecuaciones de las pruebas destructivas**

Parámetro	Ecuación	Unidades
<b>Dureza</b>	$y = 6717.7x^6 - 17905x^5 + 17847x^4 - 8061.3x^3 + 1554.2x^2 - 79.086x + 17.538$	HRC
<b>Tensión</b>		
<b>Elongación</b>	$y = 1.1959x^6 - 0.9038x^5 - 2.6142x^4 + 3.9935x^3 - 2.0293x^2 + 0.4701x + 0.0028$	%
<b>Esfuerzo de cedencia</b>	$y = -812.91x^6 + 3160.7x^5 - 4646.2x^4 + 3290.3x^3 - 1178.6x^2 + 219.37x + 455.33$	MPa
<b>Esfuerzo último a la tensión</b>	$y = 6018.8x^6 - 14134x^5 + 11162x^4 - 2730.5x^3 - 456.16x^2 + 328.94x + 748.56$	MPa
<b>Módulo de elasticidad</b>	$y = 1249.4x^6 - 2527.3x^5 + 1326.6x^4 + 319.58x^3 - 444.71x^2 + 132.78x + 193.44$	GPa
<b>Mecánica de la fractura</b>		
<b>Constante C</b>	$y = 5E-08x^6 + 5E-08x^5 - 3E-07x^4 + 4E-07x^3 - 2E-07x^2 + 4E-08x - 1E-09$	Adimensional
<b>Pendiente m</b>	$y = 26.366x^6 - 62.299x^5 + 50.02x^4 - 13.054x^3 - 1.57x^2 + 1.4067x + 2.9333$	MPa (m) <sup>1/2</sup>
<b>ΔK Máximo</b>	$y = 526.4x^6 - 1179.5x^5 + 828.92x^4 - 102.21x^3 - 93.788x^2 + 36.529x + 35.104$	MPa (m) <sup>1/2</sup>
<b>Micro poros</b>		
<b>Longitud</b>	$y = 24203x^6 - 60489x^5 + 53603x^4 - 18685x^3 + 1209x^2 + 719.72x + 23.134$	Micrómetros
<b>Área</b>	$y = 9687.8x^6 - 24049x^5 + 21072x^4 - 7142.4x^3 + 351.22x^2 + 315.17x + 9.6891$	Micrómetros <sup>2</sup>

*Para  $0 \leq x \leq 1$*



## 5 Conclusiones

---

En este trabajo se estableció la metodología para determinar el comportamiento estadístico de los parámetros que definen las propiedades mecánicas de los elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan, los cuales fueron fabricados con un acero estructural, los resultados que se presentan en este trabajo pueden ser utilizados en estudios de confiabilidad o en otro tipo de investigaciones, como por ejemplo simulaciones de vida residual, calibración de modelos o evaluación de la probabilidad de falla en estos tipos de elementos.

Dentro de la metodología del estudio, en lo que respecta a las pruebas de laboratorio, éstas se dividieron en dos tipos de ensayos: a) pruebas no destructivas y b) pruebas destructivas.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, concuerdan con las pruebas llevadas a cabo en el año 2000 cuando se registró la falla de un elemento de anclaje del puente Río Papaloapan, y al igual que en esos estudios, el material cumple con los requisitos químicos que indica la norma ASTM A148/A148M <sup>[16]</sup> (norma de diseño de estos elementos estructurales), en lo que se refiere al contenido máximo de fósforo y azufre, así como en las propiedades mecánicas del esfuerzo último a la tensión y el esfuerzo de cedencia. Pero no cumple, en lo que respecta a la elongación mínima (22%) y la reducción de área (35%), ya que en la elongación las probetas ensayadas éstas alcanzaron en promedio 5.96% y en la reducción de área el 9.08%, lo que significa que el material tiene baja ductilidad. Esta baja ductilidad se manifestó en las probetas fracturadas, tanto en las pruebas de tensión como en las de mecánica de la fractura, las cuales presentaron fracturas frágiles, lo cual significa que en procesos de acumulación de falla no existirá en este material deformaciones evidentes a simple vista.

Como resultado de las pruebas no destructivas, se encontraron discontinuidades en la superficie de los elementos de anclaje con el empleo de líquidos penetrantes (poros, grietas y rechupes), también se realizaron pruebas de ultrasonido, sin embargo, no se detectaron discontinuidades internas con esta prueba.

Al realizar la prueba de velocidad de crecimiento de grieta  $da/dN$  (mecánica de la fractura), se observa que la pendiente  $m$  tiene un promedio de  $3.23 \text{ MPa m}^{1/2}$ , y una constante  $C$  del orden de  $10^{-9}$ , como referencia <sup>[18]</sup>, en materiales de este tipo por ejemplo acero al carbón o aceros forjados tienen valores entre 2 y  $3 \text{ MPa m}^{1/2}$ , con un valor de la constante  $C$  del orden de  $10^{-11}$ . Lo cual significa que el material del caso estudiado tiene una velocidad de crecimiento de grietas mayor con respecto a estos materiales. Con respecto a la tenacidad a la fractura, se indica cómo se estima a partir del rango del factor de intensidad de esfuerzo máximo y a

partir de esta ecuación, se obtiene un valor promedio de  $K_{Ic}=45.43 \text{ MPa m}^{1/2}$  para el material bajo estudio, con este valor se puede determinar el tamaño de grieta crítico y, por lo tanto, también se puede estimar la vida residual ante la presencia de grietas en los elementos de anclaje superior aplicando las ecuaciones de mecánica de la fractura.

Con respecto a las pruebas de dureza, se observó que el valor promedio de las mediciones es de 24.95 HRC, con un máximo de 53 HRC y un valor mínimo de 20 HRC. Se observa que en la mitad del elemento de anclaje superior presenta una dureza menor que en las orillas, en donde se registraron las mayores durezas. Lo cual significa que estas áreas con mayor dureza incrementan las propiedades de resistencia mecánica pero baja la ductilidad, lo cual no es deseable para este tipo de elementos mecánicos ya que están sujetos a procesos de acumulación de daño por fatiga.

Con las pruebas de metalografía, se observó que existe un cambio de tamaño de grano en la orilla del elemento de anclaje, en donde se encontraron tres zonas con tamaño de grano diferente, la primera zona con un espesor promedio de 500 micrómetros con tamaños de grano fino (7 y 8), en la segunda zona se midieron tamaños de grano mixto (3, 4 y 7) con un espesor de 100 micrómetros y posteriormente se presenta la tercera zona con tamaño de grano fino (7 y 8). En estas zonas se encontraron 10 micro poros, así como, la presencia de grietas cortas (con longitudes menores de 1 milímetro), éstas aparecieron en la transición entre la segunda y tercera zona.

Con los datos de todas las pruebas, se generaron las gráficas de las funciones de densidad de probabilidad, con las cuales se obtuvieron las ecuaciones para poder definir el valor de cada parámetro en los procesos de simulación numérica.

Finalmente con estos estudios se corroboran los resultados obtenidos en el año 2000, y se amplió el estudio con otras pruebas, que confirman que el material presenta buenas propiedades mecánicas de resistencia, sin embargo en la parte de ductilidad es deficiente. Con los resultados metalográficos y de dureza, se confirma que el material no es homogéneo y es susceptible al daño por fatiga, debido a la generación de concentradores de esfuerzos por la presencia de poros y grietas cortas, por lo que la evaluación de la confiabilidad estructural u otro tipo de estudios de simulación son importantes de realizar, así como ampliar la cantidad de datos para mejorar las estimaciones.

# Referencias

---

- [1] Palisade Corporation, *@Risk*, Versión 6.0
- [2] Arias Romero Roberto, ***“Trazabilidad e incertidumbres en las mediciones de flujo de hidrocarburos”***, 1er Seminario Latinoamericano de Medición de Flujo de Hidrocarburos, Centro Nacional de Metrología, México, (2002)
- [3] Informe de proyecto 001, Instituto Mexicano del Transporte, México, (2000)
- [4] Informe final de investigación EE 05/03, ***“Estudio para la evaluación de los dispositivos de soporte superior (botellas) de los anclajes de los tirantes del puente Río Papaloapan”***, Instituto Mexicano del Transporte, México, (2003)
- [5] Carrión Francisco, López José Alfredo and Balankin Alexander, ***“Probabilistic model for bridge structural evaluation using nondestructive inspection data”***, Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV, Proc. of SPIE Vol. 5767, (2005), pp. 400-407
- [6] Carrión V. F. J., López J. A. and Balankin A., ***“Reliability analysis of the upper anchorage of a cable-stayed bridge using a probabilistic structural model”***, Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites and Civil Infrastructure V, Conference **6176-32**, USA, 26 February - 2 March, 2006
- [7] Informe de investigación EE 01/04, ***“Asesoría para la rehabilitación y estudio de integridad de los elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan”***, Instituto Mexicano del Transporte, México, (2009)
- [8] ASTM International, ***“ASTM E165 Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination”***, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [9] ASTM International, ***“ASTM E1417 Standard practice for Liquid Penetrant Examination”***, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [10] ASTM International, ***“ASTM E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”***, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [11] ASTM International, ***“ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”***, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA

- [12] ASTM International, “**ASTM E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates**”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [13] ASTM International, “**ASTM E399 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials**”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [14] ASTM International, “**ASTM E415 Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel**”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [15] ASTM International, “**ASTM E1019 Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques**”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [16] ASTM International, “**ASTM A148/A148M Standard specification for steel castings, high strength, for structural purposes**”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [17] ASTM International, “**ASTM E112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
- [18] Jorge Luis González, “**Metalurgia Mecánica**”, Colección Textos Politécnicos, Serie Tecnologías Mecánicas, Limusa Noriega Editores, Editorial Limusa, México, 1999, pp. 213



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](mailto:publicaciones@imt.mx)

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