



Certificación ISO 9001:2008 ‡

ANÁLISIS DE DETERIORO POR FATIGA EN TORONES DE PRESFUERZO UTILIZADOS EN PUENTES

Ricardo Alonso García Salas
José Alfredo López López
Francisco Javier Carrión Viramontes
Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Andrés Hernández Guzmán
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Saúl Enrique Crespo Sánchez
Mario Alberto Montes Zea

Publicación Técnica No. 385
Sanfandila, Qro, 2013

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis de deterioro por fatiga en torones
de presfuerzo utilizados en puentes**

Publicación Técnica No. 385
Sanfandila, Qro, 2013

Esta investigación es el resultado de un trabajo de vinculación con la Universidad Autónoma de Querétaro, la empresa Mexicana de Presfuerzo S. A. de C. V., el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte.

En este proyecto participaron por parte del Instituto Mexicano del Transporte el Dr. José Alfredo López López, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el Ing. Andrés Hernández Guzmán, el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el M. en C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, el Dr. Jorge Terán Guillen y el Técnico Mario Alberto Montes Zea.

Por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro, participaron el M. en C. Ricardo Alonso García Salas y el Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández de la Facultad de Ingeniería.

Por la empresa Mexicana de Presfuerzo S. A. de C. V., se agradece el suministro del material de estudio y de los elementos del sistema de anclaje, así como en especial se reconoce la participación del Ing. José Luis Quintana Ruiz por sus comentarios y sugerencias.

También se contó con la valiosa aportación de la M. en I. Q. Alicia del Real López del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la Universidad Nacional Autónoma de México, por los estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los autores reconocen la participación, y agradecen el apoyo y comentarios del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del IMT.

Índice

Resumen.....	v
Abstract	vii
Resumen ejecutivo.....	ix
Capítulo 1 Introducción.....	1
Capítulo 2 Antecedentes	5
2.1 Los puentes en México.....	5
2.1.1 Tendencias de la construcción de puentes en México.....	6
2.1.2 Clasificación de los puentes especiales en México	7
2.2 Puentes atirantados.....	12
2.3 Evolución de la utilización de cables de acero en puentes.....	15
2.4 Sistemas de anclaje.....	17
2.4.1 Torones de acero.....	17
2.5 Principales causas de fractura en torones.....	23
2.5.1 Sobrecarga	23
2.5.2 Daño por fatiga	24
2.6 Teoría de esfuerzos en torones.....	25
2.7 Mecánica de la fractura	31
2.7.1 Modos de carga	32
2.7.2 Fractura dúctil	32
2.7.3 Fractura frágil.....	33
2.8 Modos de fractura.....	34
2.8.1 Coalescencia de micro-huecos.....	34
2.8.2 Clivaje	36
2.8.3 Fatiga.....	36
2.8.4 Crecimiento de grieta (Ley de Paris).....	37
2.9 Análisis de falla.....	40
2.9.1 Fractura por tensión.....	40
2.9.2 Fractura por fatiga.....	42

Capítulo 3	Desarrollo experimental	45
3.1	Diseño experimental	46
3.2	Pruebas de tensión.....	50
3.3	Pruebas de fatiga.....	55
3.4	Pruebas de dureza Vickers.....	57
3.5	Análisis fractográfico.....	60
3.5.1	Inspección visual con el microscopio estereoscópico	62
3.5.2	Inspección visual con el microscopio metalográfico.....	64
3.5.3	Inspección visual con el microscopio electrónico de barrido (SEM)	65
3.6	Análisis de imagen.....	68
3.7	Análisis probabilístico de datos	69
Capítulo 4	Resultados y discusión.....	71
4.1	Identificación de las probetas	71
4.2	Pruebas de tensión.....	71
4.3	Pruebas de fatiga - tensión.....	73
4.4	Comparativa entre las pruebas de tensión y de fatiga tensión	75
4.5	Pruebas de dureza Vickers.....	77
4.6	Análisis fractográfico.....	79
4.6.1	Análisis de la fractura del tipo copa-cono.....	81
4.6.2	Análisis de la fractura del tipo diagonal.....	83
4.7	Análisis del deterioro por fatiga	88
4.8	Análisis de la secuencia de ruptura	95
4.9	Modelo de deterioro.....	97
Capítulo 5	Conclusiones.....	99
Bibliografía	101
Anexo 1	Gráficos de la prueba de tensión.....	105
Anexo 2	Funciones de densidad de probabilidad (PDF) de dureza.....	107
Anexo 3	Selección de las funciones de densidad de probabilidad	109
Anexo 4	Diferencias de medias	115

Resumen

En este trabajo se aborda el deterioro por fatiga en torones de presfuerzo de siete alambres sin recubrimiento, los cuales son utilizados en puentes de concreto presforzado y en puentes atirantados. La importancia del estudio de la fatiga en torones, es que éstos son componentes estructurales vulnerables al deterioro por estar sometidos a cargas fluctuantes debidas al tránsito de vehículos, los vientos, los sismos, etc. En esta investigación se estudiaron siete torones: cinco fueron sometidos a una prueba de tensión y dos fueron sometidos a una prueba de fatiga-tensión. El propósito de las pruebas de fatiga fue investigar si, ante las condiciones de carga dadas, se formaban y desarrollaban grietas y, en caso afirmativo, determinar el origen de las mismas. Todos los torones (con y sin fatiga), fueron sometidos a una prueba de tensión hasta la ruptura; posteriormente, se realizaron análisis fractográficos a los alambres y todos los estudios se complementaron con pruebas de dureza. Finalmente, la secuencia de rompimiento de los torones y sus modos de ruptura fueron definidos mediante el análisis de imagen y un modelo matemático para el análisis de esfuerzos.

A partir de las pruebas de tensión, se encontró que los torones fatigados presentaron niveles de deterioro acumulado relativamente bajos, pero suficientes para disminuir su resistencia; así también, con los estudios de microscopía electrónica de barrido, se encontró evidencia del deterioro por fatiga que se inició en el área de presión de las uñas de sujeción del anclaje, aunque en un caso, la falla se inició en el alambre central motivado por un defecto interno. Aunque los resultados mostrados no son totalmente concluyentes y requieren de mayor investigación, muestran evidencia clara de los mecanismos de falla que pueden ser utilizados en estudios futuros para definir modelos de deterioro, los cuales servirán para formular los análisis de confiabilidad y para tomar decisiones apropiadas para evitar fallas en este tipo de componentes estructurales.

Palabras Clave: puentes, fatiga, torón, daño por fatiga.

Abstract

This work addresses the fatigue deterioration of seven prestressed strands wires without coating, which are used in prestressed concrete bridges and cable-stayed bridges. The importance of this study lies on the fact that they are structural components vulnerable to deterioration due to fluctuating loads caused by vehicular traffic, winds, earthquakes, and environment factors. In this research seven strands were studied: five were subjected to a tension test and two were subjected to a fatigue-tension test. The purpose of the fatigue tests was to investigate if, to a given loads, if cracks were generated and developed and to determine their origin. All strands (with and without fatigue) were subject to a tension test rupture; then, fractographic studies were also done on the wires and complemented with hardness studies. Finally, the break sequence of the strands and their modes was classified using image analysis and a mathematical rupture model for stress analysis.

From the tension tests, the strands with fatigue show an accumulated deterioration low, but sufficient to diminish their resistance; at the same time, with the scanning electronic microscope studies, evidence for fatigue deterioration was found, that was initiated at the tension stress area of the clamping wedge, but in one case, failure was initiated in the central part of the wire due to an internal defect. Although the results are not conclusive and more research is needed, they show clear evidence of the failure mechanism that can be used in future studies to define deterioration models, which will serve to shape the reliability analysis and to make appropriate decisions to prevent failures in this type of structural components.

Key Words: bridges, fatigue, strand, fatigue, damage.

Resumen ejecutivo

Esta investigación tiene como objetivo principal el estudio del deterioro por fatiga de torones de presfuerzo de siete alambres sin recubrimiento, los cuales son utilizados en la construcción de puentes de concreto postensados y atirantados.

La importancia del estudio del deterioro por fatiga en torones se debe a que éstos son uno de los elementos estructurales vulnerables a este tipo de deterioro, dado que los puentes, por su naturaleza, están sometidos a cargas fluctuantes provocados por tránsito de vehículos, las cargas por vientos, sismos, etc.

En esta investigación se estudiaron siete torones de 1 m de longitud, cinco fueron sometidos a una prueba de tensión, para caracterizar los parámetros de resistencia mecánica, los cuales se definieron por las pruebas de fatiga. Una vez concluido lo anterior, se realizaron dos pruebas de fatiga a 100 000 ciclos de carga con el propósito de evaluar el comportamiento por la fatiga de los torones y determinar si se generaban y propagaban grietas; así como, establecer su origen ya sea por defectos de los alambres debido al proceso de fabricación o por indentaciones producidas por el sistema de anclaje empleado. Después de la prueba de fatiga, a estos torones se les sometió a la prueba de tensión con el fin de observar un cambio en las propiedades mecánicas, como consecuencia del deterioro acumulado por fatiga.

De las comparativas entre los torones sometidos a la prueba de fatiga y los que no fueron sometidos a fatiga, se observó una disminución del 5% de los primeros, en su carga máxima de tensión.

Como parte de esta investigación, posterior a la fractura debida a la prueba de tensión, se realizaron estudios de dureza, prueba en la cual se aplicó a los torones sin deformación mecánica, los torones sometidos únicamente a la prueba de tensión y también a los torones sometidos a la prueba de fatiga-tensión. Por otra parte, también se evaluó la dureza de las cuñas utilizadas en el sistema de anclaje. De los resultados obtenidos no se observaron diferencias en dureza en los tres tipos de condiciones de los torones, y con respecto a las cuñas la dureza es parecida a la que tienen los alambres de los torones de presfuerzo.

También se realizaron estudios fractográficos a los alambres fracturados de todos los torones estudiados, los cuales se llevaron a cabo utilizando técnicas de inspección con microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB). El propósito de estas inspecciones fue el de conocer las características fractográficas de cada alambre, los ángulos de fractura y las características geométricas de las indentaciones provocadas por las cuñas del sistema de anclaje. El objetivo más importante de esta inspección fue determinar la existencia de marcas por fatiga y

se logró obtener la evidencia suficiente para afirmar que este tipo de daño se presenta en los torones, dadas las condiciones de carga propuestas.

Finalmente, mediante el análisis de imagen, la grabación en video de las pruebas de tensión y un modelo matemático de esfuerzos, se pudo definir la secuencia de fractura de los alambres de cada torón, así como, los modos de ruptura. Se pudo establecer que los alambres con el tipo de fractura diagonal, fueron los alambres que primero fracturan, siguiendo los alambres con fractura mixta y finalmente se registra la fractura tipo copa-cono. Este proceso dura menos de 3 segundos, pero en este lapso, al fracturar el primer alambre, existe un reacomodo de los alambres con lo cual se va modificando el ángulo de fractura.

Los torones que fueron sometidos a la prueba de fatiga registraron los mayores ángulos de fractura en el tipo diagonal, esto debido a la existencia de dos zonas de iniciación de grieta, una ubicada en la zona de anclaje provocado por la indentación de las cuñas y otra en la zona de fricción con el alma del torón. También se identificó que un torón registró daño por fatiga en el alambre alma, en donde se encontraron dos zonas de acumulación de daño, provocado en este caso por discontinuidades en el material y por el efecto del rozamiento y la aplicación de cargas combinadas de tensión – compresión – torsión.

Para estudios futuros, los datos de este proyecto pueden ser utilizados en modelos de deterioro, los cuales servirán para formular modelos para el análisis de confiabilidad, que ayudarán a tomar decisiones apropiadas para evitar fallas prematuras en puentes.

1 Introducción

La construcción de puentes en México y en el mundo ha evolucionado fuertemente en las últimas décadas, aunado a nuevos diseños se encuentra el empleo de nuevos materiales y procesos constructivos. La normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), define a un puente como una estructura con longitud mayor de seis metros, que se construye sobre corrientes o cuerpos de agua y cuyas dimensiones quedan definidas por razones hidráulicas. La misma norma define viaducto como una estructura que se construye sobre barrancas, zonas urbanas u otros obstáculos, y cuyas dimensiones quedan definidas por razones geométricas, dependiendo principalmente de la rasante de la vialidad y del tipo de obstáculo que cruce.

En México, en los últimos años, se ha registrado un aumento en la construcción de puentes presforzados, lo cual se explica por qué presenta varias ventajas técnicas y económicas.

En el caso de puentes y viaductos pequeños (con claros menores de 40 m) el uso del concreto presforzado ha tenido una tendencia a la alza desde hace aproximadamente 30 años; uno de los principales componentes de este tipo de puentes son los torones de acero, por lo que también el uso de éstos va en aumento, mientras que las estructuras de concreto reforzado cada vez son construidas en menor medida.

En la actualidad se tiene estimado que existen aproximadamente más de 6 854 puentes en la red federal de carreteras, de los cuales más del 57% de ellos (3 700) tendrán en el año 2020 más de 50 años de operación, por lo tanto, estos puentes estarán rebasando la edad de servicio para la que fueron originalmente diseñados, por lo que se prevé una renovación importante de puentes en los próximos años y, de acuerdo con las tendencias de observadas en este mercado, es muy probable que estos nuevos puentes estén constituidos por algún tipo de sistema de presfuerzo.

Existe otro tipo de puentes en México, que de acuerdo a la normatividad de la SCT, se consideran como estructuras especiales, y caen en esta categoría el 2% de los puentes de la red federal. Pese a que los puentes de estructuras especiales no representan gran importancia en cuanto a su número, sí los son debido al ancho (número de carriles), la longitud (claro del puente), altura y al servicio que prestan a la comunidad. En los puentes de estructura especial, es común que se utilicen torones de acero para el presfuerzo longitudinal en el tablero o que el tablero de la superestructura sea soportado por tirantes (conjunto formado por varios torones), que se anclan a uno o varios mástiles o torres, comúnmente conocidos como puentes atirantados.

Dentro de las soluciones utilizadas en México, para cubrir grandes claros (mayores de 100 metros), se utilizan por lo general los puentes atirantados, que además del uso, llaman la atención por la estética, por lo cual son considerados como puentes espectaculares.

Esta investigación tiene como objetivo principal el estudio del deterioro por fatiga de torones de presfuerzo de siete alambres sin recubrimiento, los cuales son utilizados en la construcción de puentes de concreto postensados y atirantados.

La importancia del estudio del deterioro por fatiga en torones, se debe a que éstos son uno de los elementos estructurales vulnerables a este tipo de deterioro, dado que los puentes, por su naturaleza, están sometidos a cargas fluctuantes provocados por tránsito de vehículos, cargas por vientos, sismos, entre otros.

En esta investigación se estudiaron siete torones de 1 m de longitud, cinco fueron sometidos a una prueba de tensión, para caracterizar los parámetros de resistencia mecánica, datos con los cuales se definieron las pruebas de fatiga.

Posteriormente, se realizaron dos pruebas de fatiga a 100 000 ciclos de carga, el propósito de estas pruebas fue la generación y propagación de grietas, los cuales tienen su origen ya sea, por defectos de los alambres debido al proceso de fabricación o bien, por indentaciones producidas por el sistema de anclaje empleado. Después de la prueba de fatiga, a estos torones se les sometió a la prueba de tensión con el fin de observar un cambio en las propiedades mecánicas, como respuesta al deterioro acumulado por fatiga.

De las comparativas entre los torones sometidos a la prueba de fatiga y los que no fueron sometidos a fatiga, se observó una disminución del 5% de los primeros, en lo que se refiere a la carga máxima de tensión.

El objetivo más importante de este estudio fue determinar la existencia de deterioro por fatiga, el cual puede explicar la disminución en la resistencia de los torones de presfuerzo en la prueba de tensión.

Otro objetivo fue tratar de identificar la secuencia de fractura de cada alambre de cada torón ensayado en la prueba de tensión, con el fin de tipificar la superficie de fractura por secuencia de fractura y tipo de daño.

Durante las pruebas se observó que un elemento clave en el deterioro es el sistema de anclaje, debido a las entallas que se hacen en los alambres, por lo que se definió realizar análisis de imagen para tipificar este daño y poder correlacionarlo con las dimensiones entre las pruebas de tensión y de fatiga-tensión. También se realizaron pruebas de dureza para observar cambio de dureza entre cada tipo de prueba, y realizar comparaciones entre la dureza de los alambres y las cuñas de apriete del sistema de anclaje.

Este trabajo se ha dividido en 5 capítulos, el primer capítulo que es esta introducción; en el segundo capítulo se describen los antecedentes del estudio, en donde el principal objetivo es hacer un marco de referencia del tema, por lo que se describen los tipos de puentes que existen en México, los puentes presforzados y atirantados, la evolución de la utilización de cables de acero en puentes, los tipos de sistemas de anclajes, las principales causas de fractura en torones; también se

explica brevemente la teoría de esfuerzos en torones, de mecánica de la fractura y se describe los análisis de falla que se realizan en torones, con el fin de poder identificar los daños por fatiga.

En el capítulo 3 se describe el desarrollo experimental del proyecto, en donde se explica cómo se definieron los ciclos de carga de fatiga, considerando las recomendaciones internacionales para este tipo de pruebas. Se detallan las pruebas realizadas en donde se indica el equipo y material utilizado, la preparación de probetas de ensayo, el procedimiento de montaje, los parámetros de prueba, el procedimiento de ejecución y los criterios de falla, así como los programas de cómputo empleados. Al final de este capítulo, se explica la forma como se realiza el análisis de datos para obtener las funciones de densidad de probabilidad de los parámetros más importantes de cada experimento.

En el capítulo 4, se muestran los resultados de las pruebas realizadas, así como algunas correlaciones entre éstas, con el fin de obtener las evidencias de daño por fatiga en torones y cómo se presentan desde un punto de vista fractográfico.

Las conclusiones del trabajo se presentan en el capítulo 5 y en la sección de anexos se muestran los gráficos de la prueba de tensión, las funciones de densidad de probabilidad para la prueba de dureza, las tablas para seleccionar las funciones de densidad de probabilidad de cada prueba y la forma en que se realizó el análisis para obtener las diferencias de medias.

2 Antecedentes

Este capítulo corresponde a la parte teórica de la investigación, donde se describen los conceptos básicos sin recurrir a deducciones analíticas extensas, con el fin de que puedan ser aplicados directamente en el análisis de deterioro así como en trabajos futuros para la elaboración de modelos. En el primer apartado se describen los tipos de puentes que existen en México tomando como principal fuente de información los datos publicados por la SCT, en el segundo se hace una descripción general de los sistemas de anclaje que son utilizados tanto en puentes atirantados como en los postensados; en el tercero se incluye información sobre los cables de presfuerzo y se describe cómo están constituidos así como los requerimientos mínimos que deben cumplir por norma. Posteriormente se presenta una breve introducción a la mecánica de la fractura y finalmente se describen las diferentes formas de fractura que, mediante un estudio de fractografía, pueden presentarse en los alambres de un torón. En este mismo capítulo se incluyen algunos criterios de interpretación de la apariencia de las fracturas con el fin de establecer el mecanismo de falla y se describe el modo de falla de los torones.

2.1 Los puentes en México

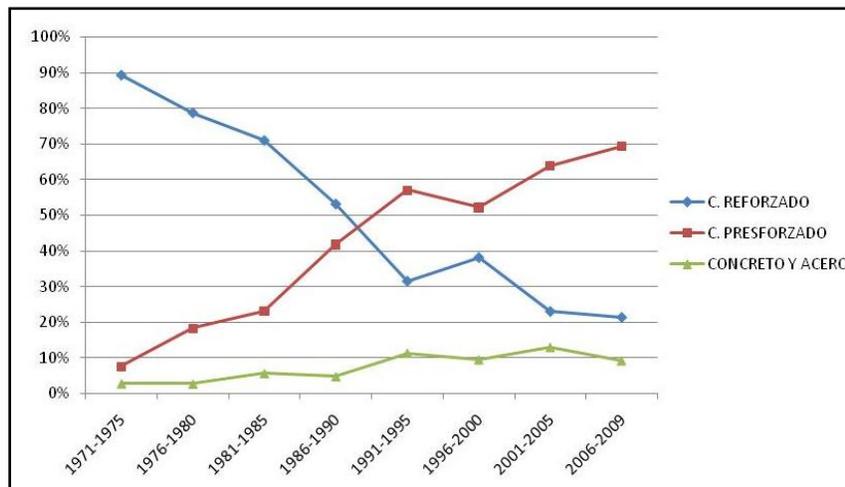
La construcción de puentes en México y en el mundo ha evolucionado fuertemente en las últimas décadas, aunado a nuevos diseños, se encuentra el empleo de nuevos materiales y procesos constructivos. Básicamente un puente es una estructura que salva obstáculos, como puede ser un río, un foso, un barranco o una vía de comunicación, y permite el paso de peatones, animales o vehículos. La normativa de la SCT define a un puente como “una estructura con longitud mayor de seis metros, que se construye sobre corrientes o cuerpos de agua y cuyas dimensiones quedan definidas por razones hidráulicas.” La misma norma define viaducto como “una estructura que se construye sobre barrancas, zonas urbanas u otros obstáculos, y cuyas dimensiones quedan definidas por razones geométricas, dependiendo principalmente de la rasante de la vialidad y del tipo de obstáculo que cruce.”

Históricamente los puentes se han construido por la necesidad de comunicación, debido al ahorro en cuanto al costo y tiempo de trayecto, que se ven reflejados en una mayor productividad de la comunidad, al disminuir el costo de combustible y las emisiones contaminantes y, en otros casos, proveen seguridad a los usuarios al salvar cañadas, ríos o accidentes geográficos. Por tal motivo, en la mayoría de los países desarrollados se invierte en la construcción de puentes de grandes claros, que permitan tener una infraestructura carretera más eficiente y segura.

2.1.1 Tendencias de la construcción de puentes en México

En México, en los últimos años, aumentó la construcción de puentes presforzados, lo cual se explica por qué presenta varias ventajas que más adelante se detallan, en esta sección se explican las tendencias de la construcción de puentes en México y su perspectiva de desarrollo.

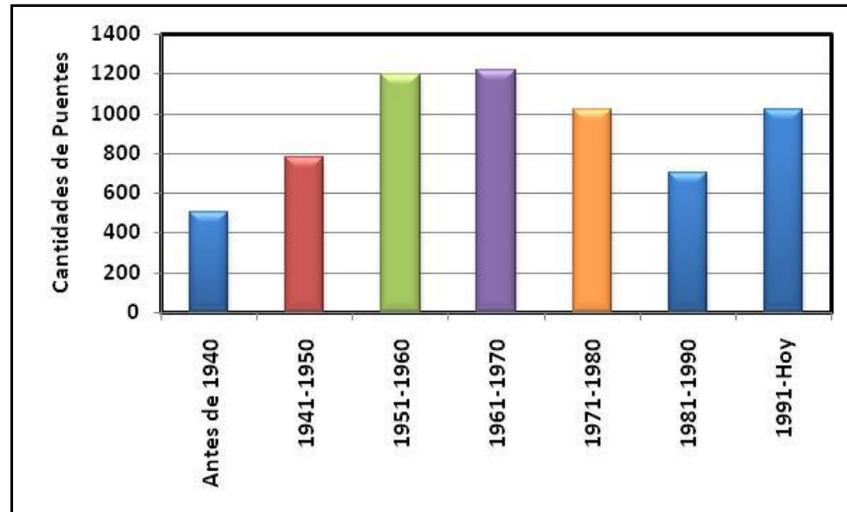
En el caso de puentes y viaductos pequeños en México (con claros menores de 40 m) el uso del concreto presforzado ha tenido una tendencia a la alza desde hace aproximadamente 30 años, uno de los principales componentes de este tipo de puentes son los torones de acero, por lo que también el uso de éstos va en aumento, mientras que las estructuras de concreto reforzado cada vez son construidas en menor medida (figura 2.1).



Fuente: Base de Datos del Sistema de Puentes Mexicano SIPUMEX 2010

Figura 2.1 Tendencias en la construcción de puentes en México por tipo de superestructura

En la actualidad se tiene estimado que existen aproximadamente más de 6 854 puentes en la red federal de carreteras, de los cuales más del 57% de ellos (3 700) tendrán en el año 2020 más de 50 años de operación, estos puentes estarán rebasando la edad de servicio para la que fueron originalmente diseñados (figura 2.2), por lo que se prevé una renovación importante de puentes en los próximos años y, de acuerdo con la tendencia mostrada en la figura 2.2, es muy probable que estos nuevos puentes estén constituidos por algún tipo de sistema de presfuerzo. (Carrión, López y Balankin, Samayoa 2 006).



Fuente: Base de Datos del Sistema de Puentes Mexicano SIPUMEX 2010

Figura 2.1 Número de puentes según su año de construcción

2.1.2 Clasificación de los puentes especiales en México

De acuerdo con el manual sobre consideraciones de puentes especiales de la SCT, los puentes especiales son estructuras cuya topología es diferente a la común y consiste en superestructuras de tramos libremente apoyados o continuos, colados in situ o prefabricados, de concreto reforzado, presforzado o de vigas metálicas, así como, también en arco.

Según la base de datos del Sistema de Puentes Mexicanos (SIPUMEX), donde los puentes se clasifican de acuerdo al tipo de estructura empleada, el 2% son de estructura especial (de acuerdo a la normativa de la SCT). Pese a que los puentes de estructuras especiales no representan una importancia en cuanto a su número, son de gran importancia debido al ancho (número de carriles), longitud (claro del puente), altura, y al servicio que prestan a la comunidad; como un ejemplo se puede mencionar el Puente Baluarte. En los puentes de estructura especial, es común que se utilicen torones de acero para el presfuerzo longitudinal en el tablero o que el tablero de la superestructura sea soportado por tirantes (conjunto formado por varios torones) que se anclan a uno o varios mástiles o torres (Manual M-PRY-CAR-6-01-008/04 de la SCT). Los puentes especiales quedan clasificados según las normas de la SCT como:

2.1.2.1 Puentes contruidos en voladizo

Puentes cuya superestructura está constituida por segmentos o dovelas prefabricados o colados in situ mediante cimbra móvil, que se colocan sucesivamente a partir de un elemento de subestructura, formando un voladizo de longitud creciente, hasta encontrarse con el extremo de otro voladizo que parte de un elemento de subestructura adyacente, o hasta apoyarse en un estribo o en un apoyo provisional.

Estos puentes pueden ser en doble voladizo cuando se construyen a partir de una pila y el avance se realiza en forma simétrica respecto a ese elemento; o en voladizo sencillo cuando se construyen a partir de un estribo y se dispone de un elemento de anclaje o de un contrapeso para que el equilibrio de momentos en torno a ese estribo no se rompa (figura 2.3)



Fuente: http://www.flotaps.com/galeria_puentes.asp

Figura 2.2 Fotografía de un puente en voladizo

Los puentes construidos por este procedimiento utilizan generalmente cables de presfuerzo longitudinal, en tanto que el uso de presfuerzo transversal se puede utilizar o no. El concreto que forma las dovelas puede ser de masa normal o aligerado.

2.1.2.2 Puentes empujados

Son aquellos cuya superestructura está formada por dovelas o segmentos que se fabrican en el sitio o en planta. Cada dovela se ensambla a la dovela anterior, en una plataforma localizada por detrás del estribo de una margen o una ladera. Una vez que la nueva dovela queda unida a la anterior, el conjunto se empuja hacia adelante para liberar el sitio que ocupará la siguiente dovela. El empujado se realiza por etapas sucesivas hasta alcanzar el estribo en la margen o ladera opuesta.

El empuje puede realizarse también desde ambas márgenes, en tal caso los conjuntos de dovelas se encuentran en un punto intermedio de la longitud del puente.



Fuente: http://www.flotaps.com/galeria_puentes.asp

Figura 2.3 Fotografía de un puente empujado

2.1.2.3 Puentes en arco

Los puentes de arco son estructuras cuya directriz tiene una configuración curva o poligonal. En este tipo de puentes la carga muerta genera fuerzas axiales con respecto a la directriz de carga o fuerzas excéntricas nulas o pequeñas, en tanto que la carga viva en solo una parte del claro, o las cargas accidentales, generan esfuerzos axiales mayores que la carga muerta y, por lo tanto, aumentan las fuerzas excéntricas, lo cual genera esfuerzos de flexión. Por su forma, los puentes de arco pueden ser circulares, circulares compuestos, parabólicos o poligonales (figura 2.5).



Fuente: http://www.flotaps.com/galeria_puentes.asp

Figura 2.4 Puente La Venta, San Juan del Río, Querétaro, México

Dentro de los puentes especiales también se encuentran los del tipo presforzado y los atirantados; debido a que son parte esencial de este trabajo éstos se describen en los siguientes apartados con mayor detalle.

2.1.2.4 Puentes de concreto presforzado

Los puentes de concreto presforzado se consideran dentro de la clasificación de la SCT como especiales y son utilizados para cubrir claros medianos de 15 a 40 metros comúnmente.

El presfuerzo en una estructura es la aplicación de precargas de tal forma que mejore su comportamiento general, esto da como resultado que los esfuerzos inducidos previamente se equilibren con los producidos por las cargas externas (Navarro, 2009).

Los elementos de concreto presforzado engloban dos tipos de sistemas, los pretensados y los postensados.

Pretensado

El término pretensado se usa para describir cualquier método de presforzado en el cual los torones se tensan antes de colocar el concreto. Para el control del pretensado se mide el alargamiento de los torones, así como la fuerza de tensión aplicada por los gatos hidráulicos. Con la cimbra en su lugar, se vacía el concreto sobre el torón tensado y después de haberse logrado una adecuada resistencia en el concreto, se quita la tensión que ejercen los gatos hidráulicos. Los torones tienden a recuperar la forma original (ya que se trabaja en la zona elástica del acero), pero no lo hacen por estar embebidos en el concreto, de esta manera los esfuerzos son transferidos al concreto por adherencia (presfuerzo). En este sistema no se utiliza ningún tipo de anclaje.

Postensado

El postensado es un método en el cual el torón de acero se introduce dentro de ductos, y es tensado después de que el concreto ha fraguado. Por lo que el presfuerzo es siempre ejecutado externamente una vez que el concreto se ha endurecido, y los torones son anclados contra el concreto después de ser tensados; para este método sí se requiere de un sistema de anclaje (figura 2.6). Este método puede aplicarse tanto para elementos prefabricados como colados en sitio.



Fuente: MEXPRESA, 2009

Figura 2.5 Sistemas de anclaje utilizados en el postensado

El concreto presforzado ha demostrado ser técnica y económicamente competitivo tanto para puentes de claros medios donde se emplean elementos pretensados

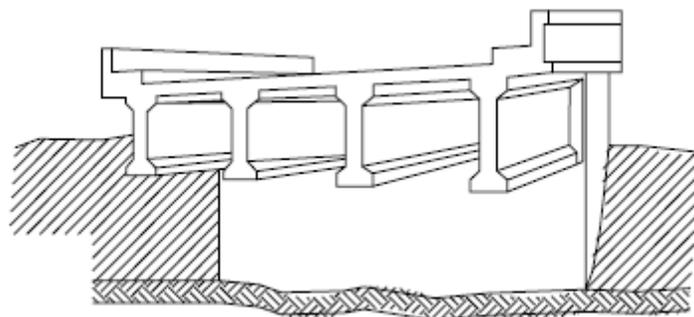
estándar producidos en serie, así como para puentes de grandes claros de más de 40 metros. En la actualidad, una gran cantidad de los puentes se construyen con esta técnica, en donde la rapidez de construcción, la eficiencia de los elementos y el menor peralte, obtenido con respecto a otras soluciones, son algunas de las ventajas que justifican esta tecnología (ANIPPAC).

Entre los sistemas que se utilizan para puentes de concreto presforzado tenemos: Trabes postensadas con losa (figura 2.7), traves T, AASHTO (figura 2.8), cajón con losa colada en sitio (figura 2.9) y losas extruidas (figura 2.10) y traves de sección de cajón de una sola pieza o en dovelas, pretensadas o postensadas.



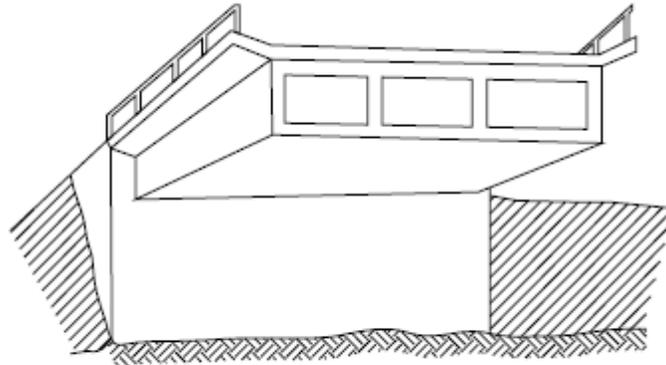
Fuente: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=558663&page=34>

Figura 2.6 Fotografía de un puente en presforzado, en Querétaro



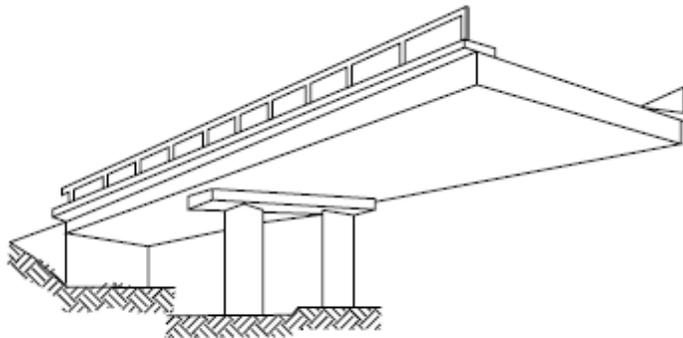
Fuente: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2006

Figura 2.7 Puente losa con traves pretensadas



Fuente: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2006

Figura 2.8 Puente presforzado de sección cajón de una sola pieza



Fuente: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2006

Figura 2.9 Puente de losa presforzada extruida

2.2 Puentes atirantados

Dentro de las soluciones utilizadas en México, para cubrir grandes claros (mayores de 100 metros), se utilizan por lo general los puentes atirantados que, además del uso, llaman la atención por la estética por lo cual son considerados puentes espectaculares.

Se denomina puente atirantado a aquel cuyo tablero se encuentra suspendido de una o varias torres, mediante un sistema de tirantes o cables (figura 2.11). Se distinguen de los puentes colgantes porque en éstos los cables principales se disponen sosteniendo directamente el tablero (Herrera Ceballos, 2007).



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2008

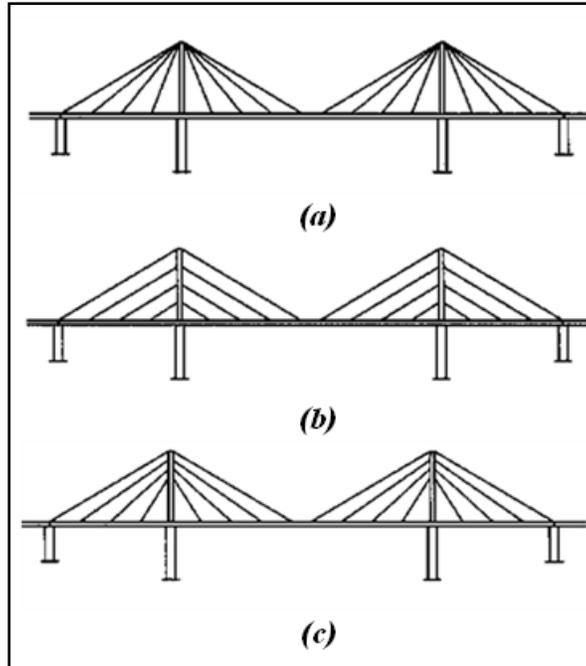
Figura 2.10 Puente Atirantado, Río Papaloapan

Las partes principales de un puente atirantado son: los tirantes, las torres y el tablero, los cuales se describen a continuación:

Tirantes

Son elementos flexibles que soportan al tablero y se conectan en diferentes puntos a lo largo del mismo así como en los extremos opuestos a diferentes alturas en las torres y que, dependiendo de la distribución de los tirantes, pueden clasificarse como: Arpa (tirantes paralelos), semi-arpa (tirantes semi-paralelos) y en abanico (tirantes radiales). La clasificación de los tirantes se muestra en la figura 2.12.

Los tirantes normalmente están constituidos por torones de acero de alta resistencia, similares a los empleados en el presfuerzo, la sección transversal del tirante puede tener diferentes configuraciones en lo que se refiere al número de torones empleados, el tipo de torón y el sistema de protección anticorrosivo, entre otros (figura 2.13).



Fuente: Samayoa, 2005

Figura 2.11 Tipo de arreglo de los tirantes. (a) Sistema de abanico, (b) Sistema de arpa y (c) Sistema de semi-arpa



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2003

Figura 2.12 Tirantes del puente Río Papaloapan

Torres

También conocidos como mástiles o pilones, son el elemento del puente en que se anclan los tirantes que soportan al tablero.

Tablero

Es la porción de superestructura formada por el sistema de piso que soporta la superficie de rodamiento de las cargas móviles y que está integrado por losas, largueros, diafragmas o piezas de puente y elementos portantes que son soportados por los tirantes.

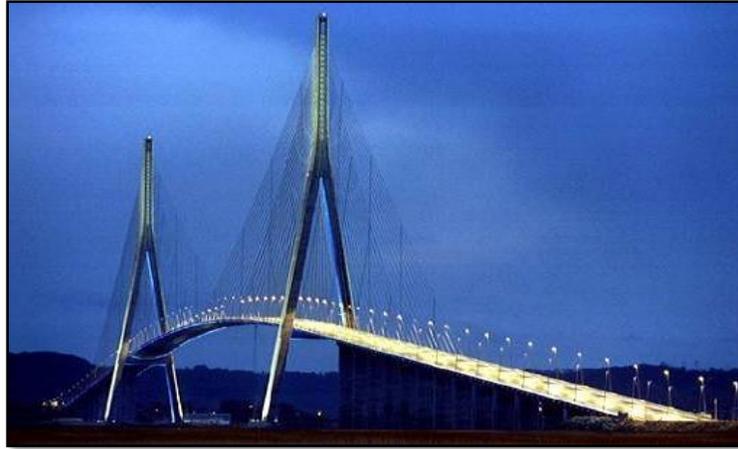
Los principios en los que se basa el diseño de los puentes atirantados han estado en uso desde hace más de mil años (los egipcios usaban el principio de la suspensión en la construcción de sus barcos, donde un mástil principal soportaba el peso de varias vigas por medio de cuerdas conectadas directamente al mástil), pero es dentro de los últimos cincuenta años que el desarrollo económico y tecnológico ha permitido su construcción, actualmente existen más de 300 puentes atirantados en todo el mundo.

2.3 Evolución de la utilización de cables de acero en puentes

Históricamente, el primer puente suspendido que se construyó data del año de 1784, cuando un carpintero alemán, C.T. Loescher, diseñó una estructura de madera de 32 metros de largo con brazos de madera; el uso de la madera para la construcción de puentes evolucionó al substituir la madera por barras de hierro. Se considera como el primer puente moderno suspendido por cables, al construido en Estados Unidos en el siglo XVIII por el ingeniero John R. Roebling, y utilizó un sistema basado en cables para remplazar los soportes de barras de hierro con el que comúnmente se sostenían los puentes. En el año de 1855 construyó una estructura vanguardista, el Puente Trunk, del tipo colgante en las cataratas del Niágara, con un claro de 290 m y dos tableros soportados por cables parabólicos. Luego, diseñó el puente de Ohio en Cincinnati, inaugurado en 1867; y el más impresionante, el Puente de Brooklyn, en Nueva York, puesto en operación en 1883, que fue diseñado utilizando los mismos principios que en el puente Trunk, siendo la primera estructura importante en la cual se utilizó acero en lugar del hierro.

Los puentes atirantados hoy en día

Los puentes atirantados, tradicionalmente se han empleado para cubrir claros entre 100 y 500 m de longitud, sin embargo en la actualidad y gracias a los avances tecnológicos, se ha llegado a cubrir claros mayores de 800 m como el puente Tatara en Japón de 890 m y el puente de Normandía en Francia de 856 m (figura 2.14).



Fuente: <http://www.city-data.com/articles/Arthur-Ravenel-Jr-Bridge-Charleston-SC.html>

Figura 2.13 Fotografía del puente de Normandía en Francia

En México, la topografía ha exigido la construcción de varios puentes con estructura suspendida por tirantes, por lo que en la red nacional de carreteras existen nueve puentes atirantados con grandes claros. El primer puente atirantado mexicano es el Dovalí Jaime, puesto en operación en el año de 1948 y el más reciente es el Baluarte, actualmente en construcción y está ubicado en los límites de Durango y Sinaloa, que tendrá el mayor claro cubierto y mayor altura entre el tablero y el fondo de la cañada en Latinoamérica, en la tabla 2.1 se muestran los puentes atirantados de grandes claros que existen en México.

Tabla 2.1 Puentes atirantados de grandes claros en México.

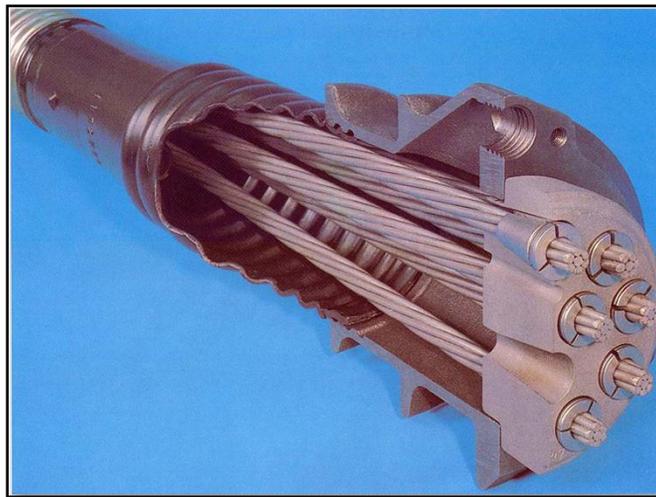
Puente	Estado	Longitud (m)	Inicio de operación
Dovalí Jaime	Veracruz	288	1984
Tampico	Tamaulipas	360	1988
Mezcala	Guerrero	311	1993
Quetzala	Guerrero	213	1993
Barranca el Zapote	Guerrero	176	1993
Barranca el Cañón	Guerrero	166	1993
Río Papaloapan	Veracruz	203	1995
Grijalva	Tabasco	116	2001
Baluarte	Durango-Sinaloa	520	Próximamente

Fuente: Didier Samayoa, IPN 2005

2.4 Sistemas de anclaje

En el caso de los puentes atirantados y de los puentes postensados, los cables requieren de un sistema de anclaje para ser sujetados. Los sistemas de anclaje están diseñados para restringir el movimiento de los torones y así evitar que el torón pierda la fuerza de tensión para la cual fue diseñado. Generalmente el sistema de anclaje consta de un tubo cónico de acero en el cual se apoya una placa de acuñado, en donde los torones son anclados mediante cuñas de acero (figura 2.15).

La fuerza existente en las cuñas ocasiona que a los alambres de los torones se les incruste el moleteado de éstas, lo que ocasiona un daño y provoca una zona de concentración de esfuerzos que puede disminuir la vida útil de los cables.

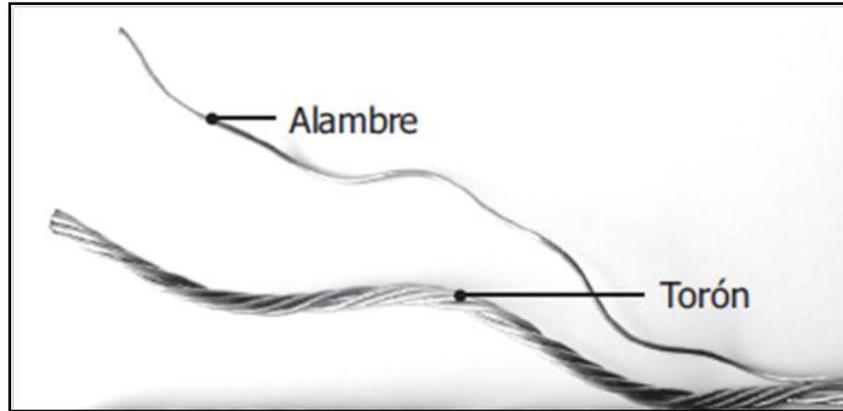


Fuente: Stacy Johnson, 2006

Figura 2.14 Dispositivo de anclaje

2.4.1 Torones de acero

Uno de los elementos importantes en la construcción de puentes presforzados, así como en los puentes atirantados, son los torones, los cuales están diseñados para comportarse flexiblemente, mientras transmiten o soportan cargas axiales. Comúnmente un torón se construye al enrollar helicoidalmente varios alambres de acero de alta resistencia alrededor de un alma o núcleo (Gómez y Wilches 2003), como se muestra en la figura 2.16. Éstos están diseñados para soportar esfuerzos de tensión, que tienden a enderezar los alambres que se encuentran deformados helicoidalmente, lo cual da como resultado la aparición de fuerzas de tensión, torsión y compresión entre ellos.



Fuente: Manual de Emcocables

Figura 2.15 Constitución de los torones de acero

El alambre de un torón se fabrica por estiramiento al reducir el diámetro del alambroón, haciéndolo pasar por dados o matrices mediante la aplicación de una fuerza axial. Las propiedades del alambre dependen básicamente de su composición química, microestructura, nivel de inclusiones, tamaño de grano, segregaciones y condiciones del proceso. Todos los alambres deben cumplir con los requisitos establecidos en alguna de las siguientes normas:

- American Society For Testing & Materials (ASTM A 1007)
- Japanese Industrial Standards (JIS G 3525)
- American Petroleum Institute (API Standard 9A)
- American Federal Specification (RRW-410-F)
- International Organization for Standardization (ISO 2232).

Los alambres para torones de acero son de sección circular, con un diámetro que varía de 0.19 mm hasta 5 mm (dependiendo del fabricante), se fabrican en aceros de alto carbono y su elevada resistencia se deriva del proceso de trefilado y de un tratamiento térmico posterior.

Para el control de calidad de los alambres para cables de acero, éstos son sometidos a varios ensayos entre los que se encuentran los de: tensión, torsión, doblado, determinación de la adherencia del recubrimiento de zinc, ensayo de uniformidad del recubrimiento de zinc, etc.

2.4.1.1 Tipo de torones

Como se ha señalado anteriormente, los tirantes están formados por varios torones, los cuales se clasifican según el diámetro, número de alambres, tipo de alma y construcción. La resistencia a la fatiga o la resistencia a la abrasión son el resultado del diseño de los torones (Manual Unión).

Todos los torones del mismo tamaño, grado y alma tienen la misma resistencia a la ruptura y peso por metro. Las diferentes construcciones dentro de cada clasificación difieren en las características de trabajo (Manual Unión). Como regla general, un torón fabricado con pocos alambres será más resistente a la abrasión y menos resistente a la fatiga que un torón del mismo tamaño hecho con muchos alambres y que utiliza la misma cantidad de acero. Las construcciones de torones básicas se describen a continuación.

Torón común de capa simple

El ejemplo más común de construcción de capa simple es el torón de siete alambres. Tiene un alambre central y seis alambres del mismo diámetro que lo rodean (figura 2.17 a).

Torón Seale

Esta construcción tiene dos capas de alambres alrededor de un alma con la misma cantidad de alambres en cada capa. El torón está diseñado de manera que los alambres exteriores de mayor diámetro descansan en los valles entre los alambres interiores de menor diámetro, dándole al torón mayor resistencia a la abrasión. La composición más común es $1+9+9= 19$ (figura 2.17 b).

Torón Filler

Se distingue por tener entre dos capas de alambres, otros hilos más finos que rellenan los espacios existentes entre las mismas. La capa interior tiene la mitad de alambres que la capa exterior. Este tipo de torón se utiliza cuando se requieren cables de mayor sección metálica y con buena resistencia al aplastamiento. La composición más común es $1+6/6+12= 25$ (figura 2.17 c).

Torón Warrington

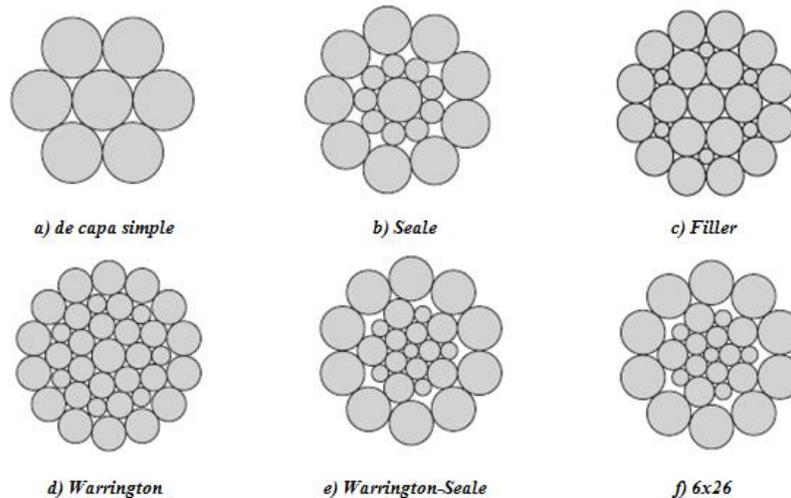
Se caracteriza por tener una capa exterior formada por alambres de dos diámetros diferentes, alternando su posición entre mayor y menor en la capa exterior. Los alambres más grandes de la capa exterior descansan en los valles de la capa interior y los más pequeños en sus coronas. El tipo de torón más usado es $1+6+6/6= 19$ (figura 2.17 d).

Torón Warrington-Seale

Cuando un torón se forma en una sola operación utilizando dos o más de las construcciones ya mencionadas, se la denomina "patrón combinado". Es una combinación de las mencionadas anteriormente y conjuga las mejores características de ambas: la conjunción de alambres finos interiores aporta flexibilidad, mientras que la última capa de alambres relativamente gruesos, aportan resistencia a la abrasión. La construcción más usual es $1+7+7/7+14 = 36$ (figura 2.17 e).

Torón 6x26

Combina la resistencia a la flexión y a la abrasión, dando un buen comportamiento en uso: $1+5+(5+5)+10 = 26$ (figura 2.17 f).



Fuente: Manual Unión y Manual Emcocables, 2008

Figura 2.16 Construcciones comunes de torones

2.4.1.2 Tipos básicos de alambres usados para la fabricación de torones

Existen diversos tipos de alambres de acero que se utilizan para la fabricación de los torones, la selección de su tipo depende de las características que el torón requiera en servicio, los cuales pueden tener una cubierta galvanizada o no, el galvanizado se utiliza para mejorar la resistencia a la corrosión de los torones. A continuación se describen los tipos básicos de alambre utilizados en la fabricación de torones:

Alambre de acero negro brillante

La mayoría de los torones están hechos con alambre sin recubrir que se fabrica de acero con alto contenido de carbono (llamado acero negro). Los procesos químicos del acero usado y la práctica empleada para trefilar el alambre son variados para suministrar al torón terminado la mejor combinación de resistencia a la tensión, resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste.

Alambre de acero inoxidable

Es una aleación especial que contiene 18% de cromo y 8% de níquel, aproximadamente. Posee alta resistencia ante condiciones donde existe alta probabilidad de corrosión. Su resistencia a la tensión y a la fatiga es variable.

Alambre galvanizado antes del trefilado

Este alambre se hace pasar por la línea de galvanización y el revestimiento de cinc resultante incrementa el diámetro del alambre, por lo que el alambre galvanizado antes del trefilado tiene una resistencia 10% menor que el alambre de acero negro del mismo tamaño y tipo, debido a que el diámetro del acero disminuye y se obtiene el tamaño final del producto con la capa de galvanizado.

Alambre trefilado antes del galvanizado

El alambre es galvanizado después del proceso de trefilado. Como el revestimiento de galvanización se hace después del proceso de trefilado, la capa de recubrimiento tiene un mayor espesor que en el caso anterior. Los alambres trefilados galvanizados tienen igual resistencia que el alambre de acero negro del mismo tamaño y tipo.

2.4.1.3 Especificaciones para la fabricación de torones

El material para la fabricación de los torones es de acero al carbono de alta resistencia, fundido en horno básico de oxígeno de corazón abierto o por un proceso con horno eléctrico. Una vez obtenidos los lingotes de acero, éstos son estirados en frío para que cumplan con las propiedades mecánicas deseadas. A continuación se indican las especificaciones que por norma deben cumplir los torones de presfuerzo.

Composición química

Las especificaciones mecánicas y de la composición química requerida se fijan de acuerdo a la norma ASTM A 648-94, que se muestra en la tabla 2.2.

Debido a que los torones se especifican para el cumplimiento de propiedades mecánicas, las normas no especifican la composición química de los alambres, por lo que se deja a consideración del fabricante y, por consiguiente, mencionan que no es necesario identificar la colada, ya que es posible que se requieran alambres provenientes de diferentes coladas para fabricar el paquete o rollo.

Tabla 2.2 Requerimientos químicos del acero

Elemento Químico	Contenido en %
Carbono	0.50-0.85
Magnesio	0.5-1.10
Fosforo	0.030
Azufre	0.035
Silicio	0.10-0.35

Fuente: ASTM 648-94

Resistencia a la rotura

En la norma ASTM A416 se indica, como un parámetro del control de calidad, la resistencia a la rotura de los torones, ésta se refiere a una prueba de tensión en un dispositivo de prueba en donde el torón debe romperse con un valor igual o mayor a la resistencia mínima especificada. En la misma normativa se especifica que existen dos tipos de resistencia para torones de acero de siete alambres sin recubrimiento (comúnmente indicado como grado), como se observa en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Requisitos de resistencia a la rotura

Designación del torón N°	Diámetro del torón [mm]	Resistencia a la rotura mínima [kN]	Área de acero del torón [mm ²]	Peso del torón [kg/100 m]
Grado 1860 [270]				
9	9.53	102.3	54.8	432
11	11.11	137.9	74.2	582
13	12.70	183.7	98.7	775
13a	13.20	200.2	107.7	844
14	14.29	230.0	123.9	970
15	15.24	260.7	140.0	1102
18	17.78	353.2	189.7	1487

Fuente: ASTM A416

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga es la capacidad de un material para soportar el daño acumulado por ciclos de carga, en donde los esfuerzos inducidos son menores al esfuerzo de cedencia. Las normas especifican el rango de esfuerzos con relación a un número de ciclos de carga que el torón debe resistir en un ensayo de fatiga, como lo establecido en las recomendaciones del PTI especificadas en el inciso 3.2.1 sobre control de calidad y que se resumen en la tabla 2.4 que se muestran a continuación.

Tabla 2.4 Resumen de rangos de esfuerzos para la prueba de fatiga

Tipo de elemento	Número de ciclos	Rango de esfuerzos en la prueba de fatiga [MPa]
Torón	2×10^6	213
	2×10^6	288
	1×10^5	302
	1×10^5	443

Fuente: PTI Guide Specification

2.5 Principales causas de fractura en torones

Los torones, por el tipo de servicio que desempeñan, normalmente se encuentran sometidos a esfuerzos que tienen como consecuencia el desgaste, por lo que perderán gradualmente la capacidad de trabajo a lo largo de su vida útil. Durante su desempeño se encuentran sometidos a tres tipos de cargas: las de tensión, que tratan de enderezar los helicoides de los alambres; las de fricción, o rozamiento entre alambres y entre torones, como consecuencia de su inevitable tendencia al enderezamiento bajo cargas de tensión. También existe una zona de acumulación de esfuerzos, la cual se produce en la zona de anclaje del torón, en estas zonas se hacen marcas en el torón debido al perfil de la cuña de anclaje. Este modo de trabajar le permite al torón tolerar la ruptura de algunos alambres antes de que se presente la falla final, dado que las fuerzas de rozamiento contribuyen a que en los tramos resultantes se sigan transmitiendo las cargas de tensión.

Entre las causas de fractura más comunes que se encuentran en los torones de presfuerzo se identifican la sobrecarga, el daño acumulado por fatiga, el daño por corrosión, el daño por deformación y el desgaste. A continuación se describen los daños por sobrecarga y por fatiga.

2.5.1 Sobrecarga

Se ha establecido que un torón ha fallado por sobrecarga cuando los alambres han colapsado por sobrepasar la resistencia última. Los alambres se fracturan en este modo de falla, con la formación de un cuello cuya topología depende de la ductilidad del acero, obteniéndose así fracturas de tipo copa-cono o con desgarre a 45° aproximadamente (Espejo y Martínez, 2007). En la figura 2.18 se pueden observar fracturas características por sobrecarga, donde se muestra un alambre con fractura del tipo copa-cono (a); en (b) se muestra un alambre con formación de cuello y fractura a 45° y en (c) se observa un alambre con formación de cuello y fractura tipo copa-cono, por microscopía electrónica de barrido a 33X.

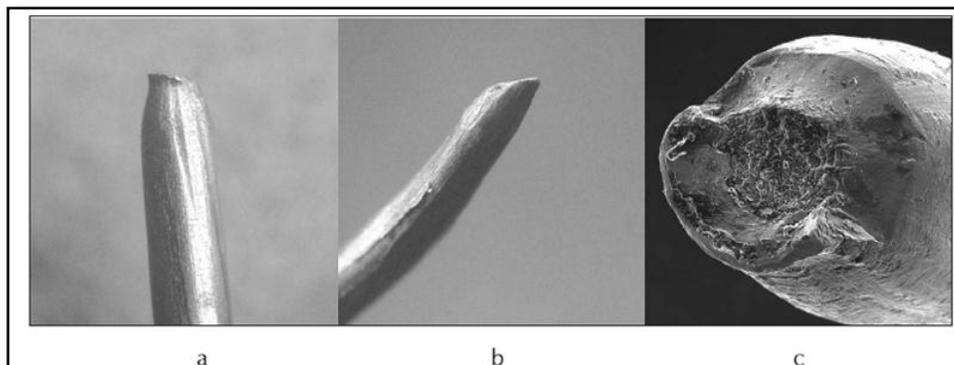


Figura 2.17 Fallas en alambres de torones por sobrecarga. (a) Copa y cono, (b) Diagonal y (c) Mixto

2.5.2 Daño por fatiga

En este modo de falla los alambres se van fracturando progresivamente en la medida en que se carga y descarga el cable durante su vida útil, por esta situación las grietas crecen y se unen hasta que los alambres fallan de manera súbita. Los alambres fatigados rompen sin cuello, es decir, sin deformación plástica a gran escala, pudiendo darse la fractura perpendicular al eje del alambre o formando 45° con respecto a este (figura 2.19, figura 2.20 y figura 2.21).

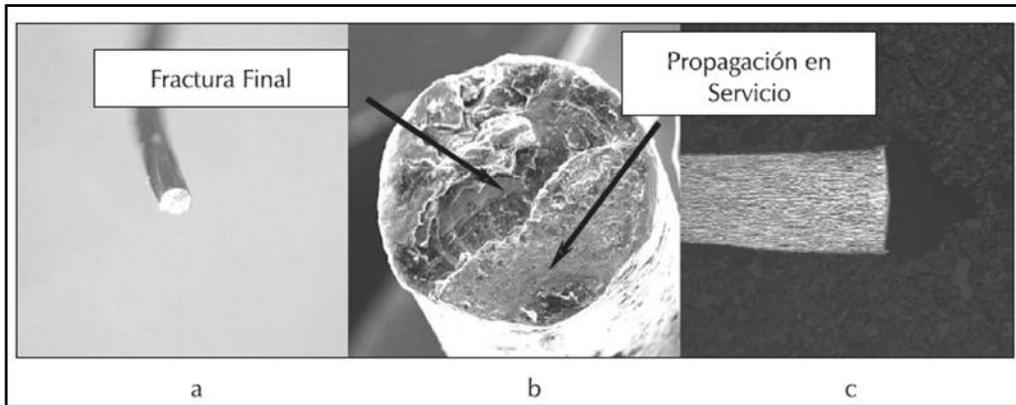


Figura 2.18 Fractura perpendicular al eje por fatiga en un alambre. a) Vista frontal, b) vista con el microscopio electrónico de barrido (SEM) y c) Patrón de deformación por el proceso de manufactura

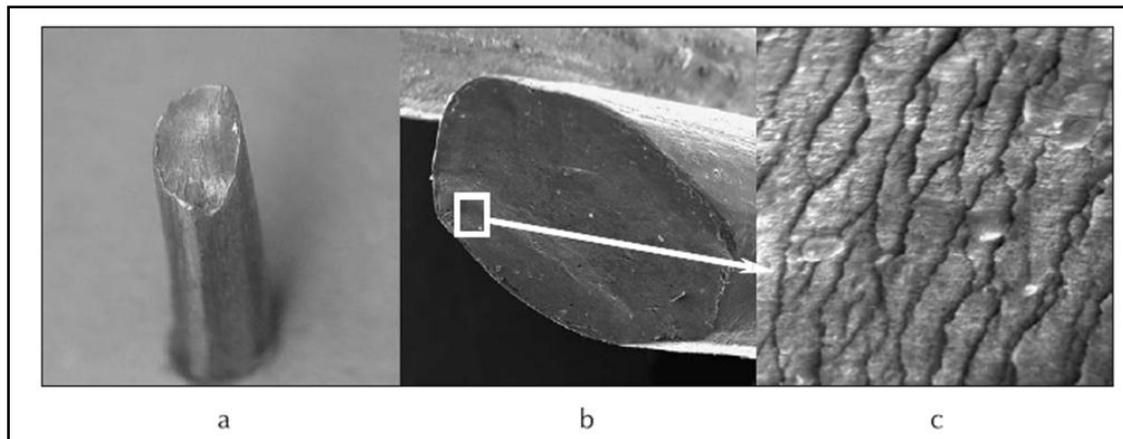


Figura 2.19 Fractura a 45° por fatiga en un alambre. a) Vista frontal, b) detalle del patrón de fractura y c) acercamiento de las estrías por fatiga

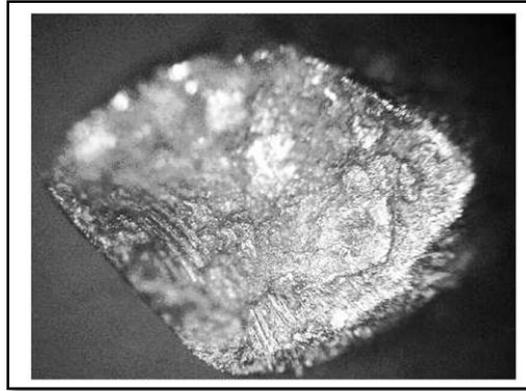


Figura 2.20 Estriaciones formadas por fatiga en un alambre de un torón

2.6 Teoría de esfuerzos en torones

El complejo mecanismo de interacción entre los alambres que conforman un torón ha dificultado el cálculo de los esfuerzos en forma aproximada a los esfuerzos reales, de tal manera que es difícil poder predecirlos. Diferentes autores han realizado estimaciones más próximas a los esfuerzos reales entre los que destaca George A. Costello (2003). En este apartado se describen las ecuaciones del modelo matemático para el cálculo de esfuerzos en torones propuesto por Costello.

La configuración básica de un torón trenzado se presenta en la figura 2.22; donde (R_1) es el radio del alma, (R_2) el radio de un alambre helicoidal, (r_2) es la distancia del centro del alma al centro de un alambre de la segunda capa y (α_2) es el ángulo de los alambres helicoidales.

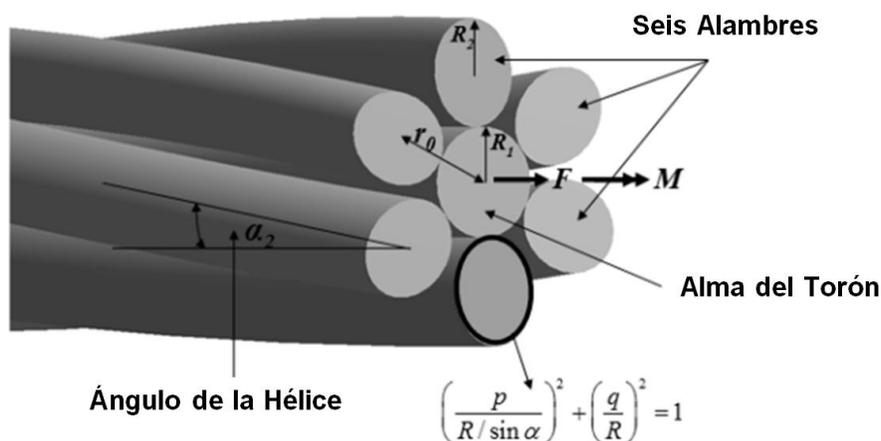


Figura 2.21 Topología de un torón de capa simple

Para que las ecuaciones propuestas para el cálculo de fuerzas y momentos sean válidas, el torón debe cumplir con la condición de que los alambres helicoidales de

la segunda capa no se toquen unos con otros y el único contacto sea exclusivamente con el alma (figura 2.23).

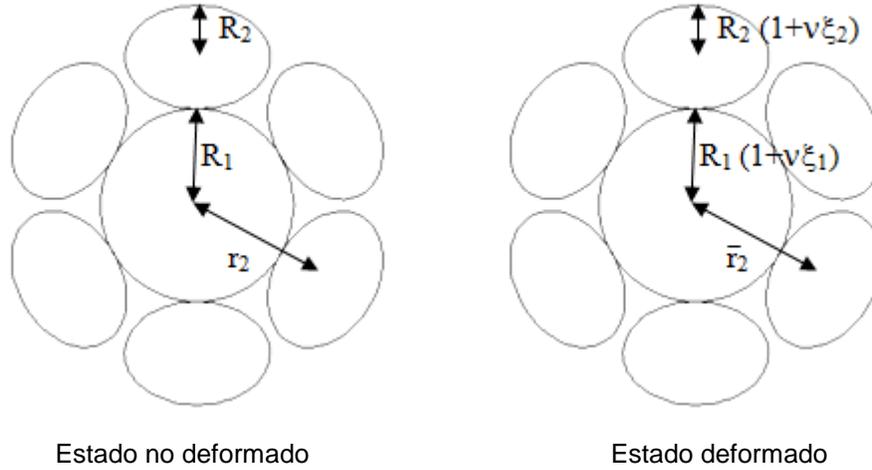


Figura 2.22 Sección transversal de un torón de capa simple

Para que no exista contacto entre los alambres helicoidales el torón deberá cumplir con la siguiente condición geométrica, donde (m_2) es el número de alambres de la segunda capa:

$$R_2 \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m_2} \right)}{\sin^2 \alpha_2}} < R_2 + R_2 \quad (2.1)$$

De acuerdo con la figura 2.23 en el estado no deformado (r_2) y en el estado deformado (\bar{r}_2), el radio de la hélice está dado por las ecuación 2.2 y la ecuación 2.3 respectivamente; en las cuales (ν) es el módulo de Poisson del material y (ξ_1) y (ξ_2) son las deformaciones unitarias de la primera y segunda capa.

$$r_2 = R_1 + R_2 \quad (2.2)$$

$$\bar{r}_2 = R_1(1 + \nu\xi_1) + R_2(1 + \nu\xi_2) \quad (2.3)$$

Los alambres helicoidales de la segunda capa pueden representarse analíticamente como un triángulo rectángulo cuya hipotenusa será la longitud del alambre en una determinada altura (h). Como el torón es estirado por medio de una fuerza (F_T), las helicoidales se estiran de una posición (h) a una posición (\bar{h}) y de un ángulo (α_2) a uno ($\bar{\alpha}_2$). Producto de la fuerza (F_T) se presentará un momento (M_T) que es ocasionado por el estiramiento de las helicoidales (figura 2.24)

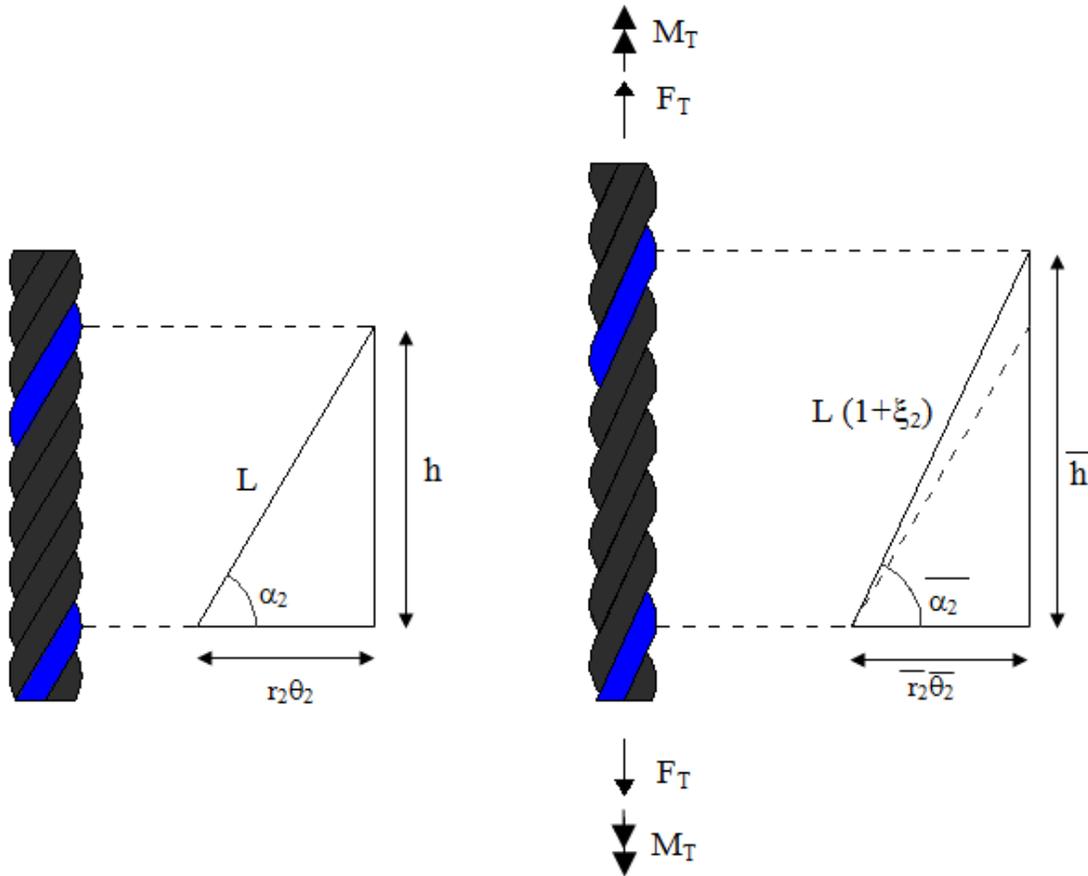


Figura 2.23 Torón sujeto a fuerza axial

En la figura 2.24 se pueden encontrar diversas relaciones geométricas que sirven para el cálculo de las fuerzas en cada uno de los alambres. El ángulo de hélice para los alambres se calcula mediante la ecuación 2.4, donde (p_2) es el paso y (r_2) el radio.

$$\tan \alpha_2 = \frac{p_2}{2\pi r_2} \quad (2.4)$$

La deformación unitaria queda definida como se muestra en la ecuación 2.5.

$$\varepsilon = \frac{\bar{h} - h}{h} \quad (2.5)$$

Otra relación geométrica importante es la deformación rotacional de cualquiera de los alambres helicoidales, la cual es expresada conforme la ecuación 2.6, Donde es el τ_s torcimiento por unidad de longitud.

$$\beta_2 = r_2 \tau_s = r_2 \frac{(\bar{\theta}_2 - \theta_2)}{h} \quad (2.6)$$

Si se considera que el torón se comporta en conjunto como un todo, se puede asumir que la deformación unitaria del torón será igual a la deformación unitaria del alma, $\varepsilon = \xi_1$. La relación entre la deformación unitaria del alma y los alambres helicoidales se calcula mediante la ecuación 2.7.

$$\xi_2 = \xi_1 - \frac{\Delta\alpha_2}{\tan \alpha_2} \quad (2.7)$$

Donde $\Delta\alpha$ es el cambio en el ángulo de inclinación y se calcula mediante la ecuación 2.8.

$$\Delta\alpha = |\bar{\alpha}_2 - \alpha_2| \quad (2.8)$$

La deformación rotacional se puede calcular a su vez por medio de la ecuación 2.9

$$\beta_2 = \frac{\xi_2}{\tan \alpha_2} - \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1 \xi_1 + R_2 \xi_2)}{r_2 \tan \alpha_2} \quad (2.9)$$

Los alambres helicoidales estarán sometidos a las fuerzas y momentos que muestra la figura 2.25, donde (T_2) es la fuerza de tensión en sentido del eje helicoidal del alambre, (H_2) es el momento torsional en la misma dirección y sentido, (N_2) y (N'_2) son las fuerzas cortantes que se presentan en el alambre. (G_2) y (G'_2) son las componentes del momento torsionante y (X_2) es una carga por unidad de longitud, producto del contacto con el alma.

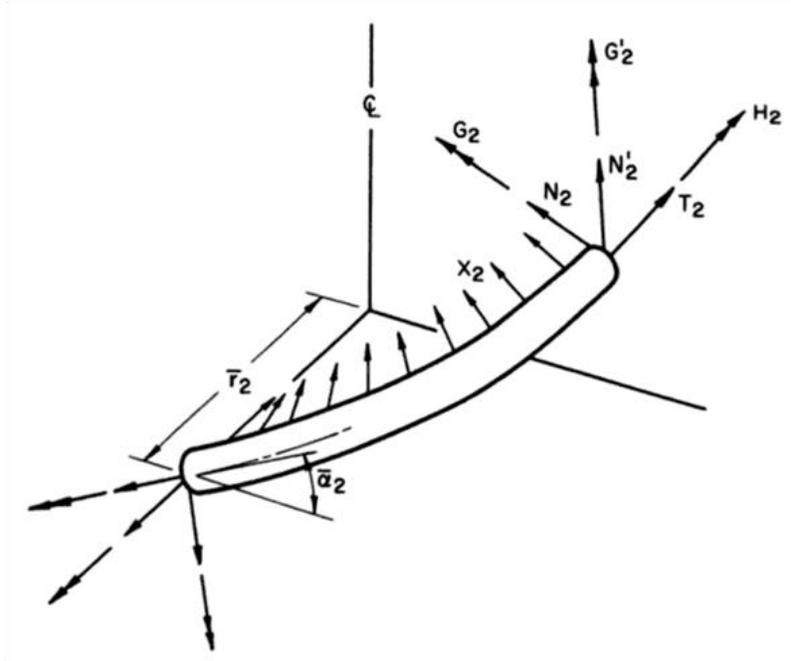


Figura 2.24 Fuerzas que actúan en un alambre helicoidal

Cada alambre helicoidal presenta tres componentes de curvatura, las componentes de curvatura se encuentran al descomponer una velocidad angular dirigida a lo largo del eje del cable en tres direcciones. Cuando el cable es cargado, los alambres sufren deformaciones y se tienen otras componentes de curvatura en estado deformado. El cambio de curvatura y el cambio en el torcimiento por unidad de longitud se pueden calcular por la ecuación 2.10 y la ecuación 2.11 respectivamente.

$$R_2 \Delta k'_2 = -\frac{2 \operatorname{sen} \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2} \Delta \alpha_2 + v \frac{(R_1 \xi_1 + R_2 \xi_2) \cos^2 \alpha_2}{r_2 \frac{r_2}{R_2}} \quad (2.10)$$

$$R_2 \Delta \tau_2 = \frac{(1 - 2 \operatorname{sen}^2 \alpha_2)}{r_2 / R_2} \Delta \alpha_2 + v \frac{(R_1 \xi_1 + R_2 \xi_2) \operatorname{sen} \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 \frac{r_2}{R_2}} \quad (2.11)$$

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden calcular las fuerzas y momentos actuantes en los alambres helicoidales de la segunda capa del torón:

$$\frac{G'}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4} R_2 \Delta k'_2 \quad (2.12)$$

$$\frac{H_2}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4(1+v)} R_2 \Delta \tau_2 \quad (2.13)$$

$$\frac{N'}{ER_2^2} = \frac{H_2}{ER_2^3} \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2/R_2} - \frac{G'}{ER_2^3} \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2/R_2} \quad (2.14)$$

$$\frac{T_2}{ER_2^2} = \pi \xi_2 \quad (2.15)$$

$$\frac{X_2}{ER_2} = \frac{N'}{ER_2^2} \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2/R_2} - \frac{T_2}{ER_2^2} \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2/R_2} \quad (2.16)$$

La proyección de las fuerzas y momentos que actúan en los alambres helicoidales en la dirección axial del eje del torón se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{F_2}{ER_2^2} = m_2 \left[\frac{T_2}{ER_2^2} \sin \alpha_2 + \frac{N'}{ER_2^2} \cos \alpha_2 \right] \quad (2.17)$$

$$\frac{M_2}{ER_2^3} = m_2 \left[\frac{H_2}{ER_2^3} \sin \alpha_2 + \frac{G'}{ER_2^3} \cos \alpha_2 + \frac{T_2}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \cos \alpha_2 - \frac{N'}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \sin \alpha_2 \right] \quad (2.18)$$

Mediante las siguientes ecuaciones se puede calcular las fuerzas y momentos actuantes en el alma del torón:

$$\frac{F_1}{ER_1^2} = \pi \xi_1 \quad (2.19)$$

$$\frac{M_1}{ER_1^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_1 \tau_s \quad (2.20)$$

Las fuerzas y momentos totales que actúan el sentido del eje del torón se calculan como se muestra a continuación:

$$F_T = F_1 + F_2 \quad (2.21)$$

$$M_T = M_1 + M_2 \quad (2.22)$$

Una vez que se calculan individualmente las fuerzas que actúan en cada uno de los alambres que conforman el torón, se pueden calcular los esfuerzos producidos por estas fuerzas. Para el caso del alma los esfuerzos se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$${}_F\sigma_1 = \frac{F_1}{\pi R_1^2} \quad (2.23)$$

$${}_M\sigma_1 = \frac{2M_1}{\pi R_1^3} \quad (2.24)$$

Para los alambres helicoidales los esfuerzos se calculan con las ecuaciones 2.25 hasta 2.29. Cabe señalar que el esfuerzo cortante (N'_2) en general resulta muy pequeño, por lo que puede ser despreciado.

$${}_T\sigma_2 = \frac{T_2}{\pi R_2^2} \quad (2.25)$$

$${}_G\sigma_2 = \frac{4G'_2}{\pi R_2^3} \quad (2.26)$$

$${}_H\sigma_2 = \frac{2H_2}{\pi R_2^3} \quad (2.27)$$

$${}_{N'}\sigma_2 = \frac{N'_2}{\pi R_2^2} \quad (2.28)$$

$${}_T\sigma_2 = \frac{T_2}{\pi R_2^2} \quad (2.29)$$

2.7 Mecánica de la fractura

Una fractura se puede definir como la formación de dos superficies en un sólido que ha sido sometido a una carga externa. En términos generales, un material se fractura cuando existe suficiente energía para romper los enlaces atómicos, es decir, una fuerza de tensión es requerida para incrementar la distancia de separación de los átomos con respecto al valor de equilibrio; esta fuerza debe exceder la fuerza cohesiva para romper los enlaces atómicos (Blaschke, 2006).

Para que se fragmente un sólido, se requiere que la carga se incremente progresivamente hasta que se forme una fisura; la mecánica de la fractura se dedica al análisis de las condiciones de carga a la que es sometida una estructura, el tamaño de grieta y la geometría de la misma, que conducen después de un tiempo a la falla de uno o varios componentes. Dentro de los campos de estudio se encuentran: determinar el umbral de crecimiento de grietas, la velocidad de propagación de grietas y la resistencia del material para soportar procesos de acumulación de daño, conocido comúnmente como tenacidad a la fractura (González, 1999).

2.7.1 Modos de carga

En el estudio de un material con comportamiento elástico se distinguen tres modos básicos de carga, que dependen de la dirección de aplicación de la misma con respecto a su plano de fractura, son denominados como modo I, modo II y modo III, que se representan en la figura 2.26.

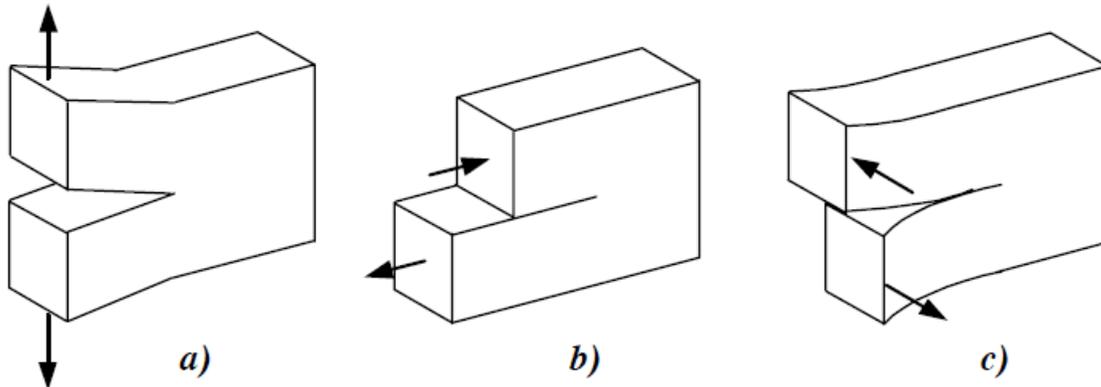


Figura 2.25 Diferentes modos de carga. a) Modo I en tensión, b) Modo II en cortante y c) Modo III en desgarramiento

En el modo I las caras de la fisura se separan paralelamente entre sí y sólo se desarrollan fuerzas de tensión. En el modo II las caras de la fisura se deslizan una sobre otra; bajo este modo sólo se generan esfuerzos cortantes en el plano. En el modo III las superficies de la fisura se deslizan lateralmente resultando así esfuerzos de corte fuera del plano. Un cuerpo fracturado puede tener uno de estos modos de carga, o una combinación de dos o tres modos de carga.

Los casos de fracturas producidos por los modos de carga II y III, son relativamente poco frecuentes, siendo generalmente el modo I el que produce la mayoría de las fracturas, particularmente en fenómenos de fatiga (Moreno Morales, 2002).

Las fracturas que presentan los metales se clasifican en dos tipos: fracturas dúctiles y fracturas frágiles.

2.7.2 Fractura dúctil

La fractura dúctil se presenta después de una intensa deformación plástica y corresponde a la falla que tienen la mayoría de los materiales poli-cristalinos. Generalmente, ésta se puede observar en las pruebas de tensión cuando ocurre una fractura tipo copa y cono, que se asocia con la formación de un cuello, como se observa en la figura 2.27

En algunas ocasiones la fractura dúctil empieza con la formación de micro-huecos en el centro de la región con forma de cuello. Bajo esfuerzo continuos, los huecos

crecen y coalescen para formar una grieta en la probeta. La grieta avanza hacia la superficie de la probeta en una dirección perpendicular al esfuerzo aplicado.

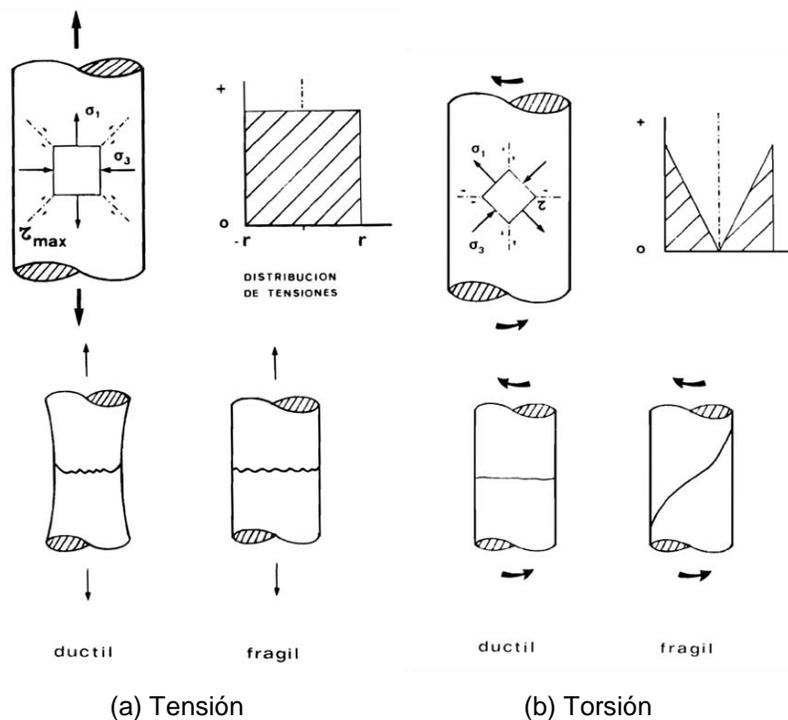


Figura 2.26 Fractura dúctil y frágil por tensión (a) y por torsión (b).

2.7.3 Fractura frágil

La fractura frágil se caracteriza por una rápida propagación de grietas con mínima absorción de energía y poca deformación plástica. En la figura 2.27 (a) se puede observar una fractura frágil, para un material sometido a tensión.

En metales poli-cristalinos, la mayoría de las fracturas frágiles son transgranulares; es decir las grietas se propagan a lo largo de la matriz de los granos. Cabe agregar que la fractura frágil intergranular se presenta si los límites de grano han sido afectados por algún tipo de segregación.

Por lo general, la fractura frágil se presenta en tres fases:

- i. Deformación plástica, que concentra las dislocaciones o defectos en los planos de deslizamiento.
- ii. Aumento de los esfuerzos de cizallamiento o de corte en lugares donde las dislocaciones (defectos) están bloqueadas y, por consiguiente, se generan micro-grietas.

- iii. Generación de nuevos patrones de esfuerzos que facilitan la propagación de las grietas, hasta un tamaño crítico que ocasiona la falla (Anderson, 1991)

2.8 Modos de fractura

Los modos de fractura son los mecanismos responsables de la condición de falla de un material, existen esencialmente cuatro modos de fractura los cuales son:

2.8.1 Coalescencia de micro-huecos

Este mecanismo se observa en la iniciación de una fractura dúctil por sobrecarga.

Este tipo de fractura está compuesta por pequeñas depresiones o cavidades, que son las resultantes de la coalescencia de micro-huecos. A medida que avanza el proceso de deformación, las microcavidades existentes crecen bajo la aplicación de cargas en el extremo de la fisura. Finalmente, las paredes las separan y se rompen, resultando una superficie de fractura caracterizada por depresiones semiesféricas o semi-elipsoidales que se denominan cavidades o “dimples” (figuras 2.26 y 2.27).

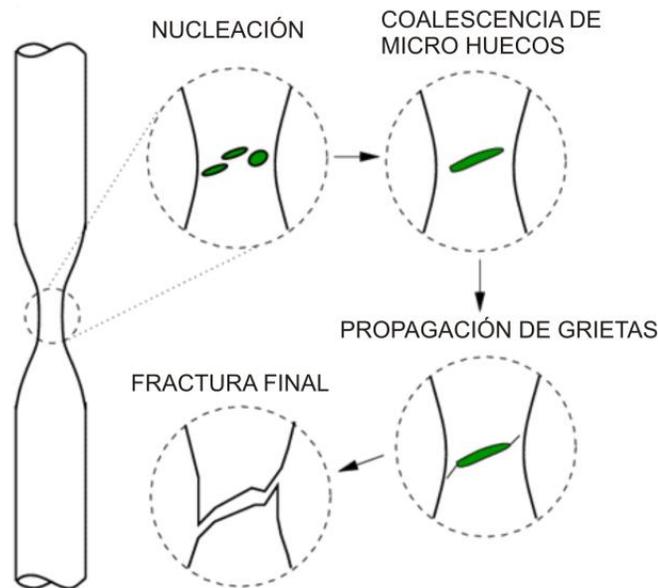
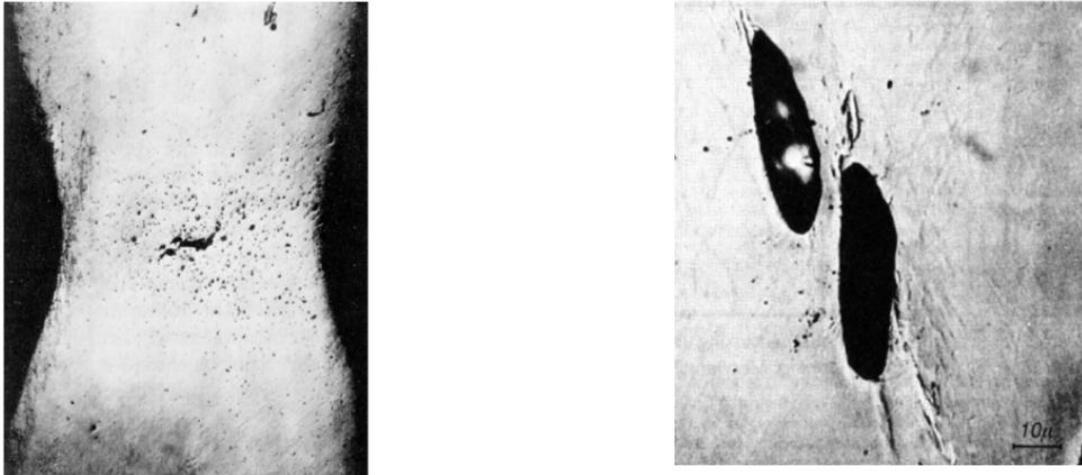


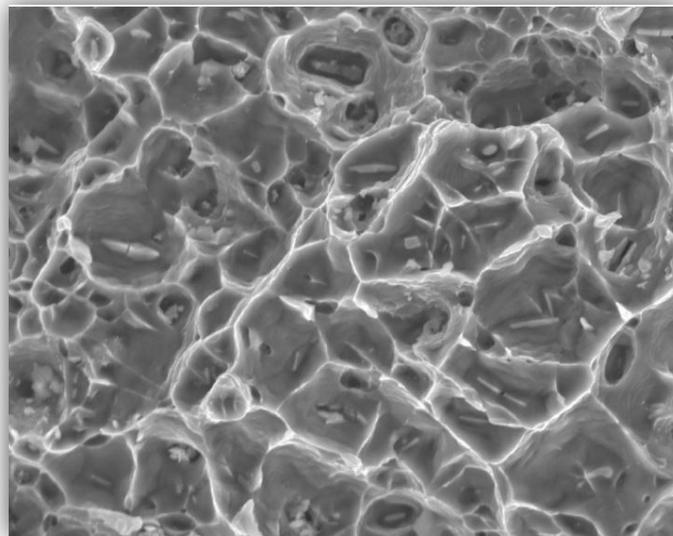
Figura 2.27 Proceso de ruptura dúctil



Fuente: K.E. Puttick, *Phil. Mag.* Vol. 4, pp. 964, 1959 y H.C. Rogers, *Trans. AIME*, Vol. 218, pp. 498, 1966

Figura 2.28 Coalescencia de micro- huecos

La forma y profundidad de estas cavidades está relacionada con el tamaño y distribución de las partículas que las originaron, las características de la carga aplicada (tensión normal, fuerza cortante, desgarramiento, etc.) y de la tenacidad a la fractura de la muestra.



Fuente: L. Caballero, Dpto. de Ciencia de Materiales ETSIC UPM

Figura 2.29 Formación de cavidades de acuerdo al modo de carga

Así, cuando la fractura se produce por carga simple, las cavidades son homogéneamente distribuidas; cuando la fractura es debido a fuerzas cortantes,

las cavidades son más bien parabólicas y tienen sentidos opuestos en las dos superficies; en un desgarramiento por tensión, las cavidades también son elongadas pero tienen el mismo sentido en ambas superficies.

2.8.2 Clivaje

El clivaje es un mecanismo de fractura rápida, de baja energía que se produce por la separación de planos cristalográficos bien definidos, característicos de la estructura. El mecanismo de fractura por clivaje no indica necesariamente fragilidad del material. La fractura frágil de un componente puede ocurrir por mecanismos distintos del clivaje, así como ciertos materiales dúctiles pueden presentar superficies de clivaje en ensayos de tensión.

Las condiciones necesarias para que ocurra el clivaje dependen del material particular y del tipo de carga a la que está sometido. En general, el clivaje puede ocurrir bajo las condiciones siguientes:

- i. Tensiones triaxiales altas.
- ii. Altas velocidades de deformación.
- iii. Bajas temperaturas.

Cuasiclivaje

Muchos materiales de alta resistencia fracturan por un mecanismo mixto de clivaje y coalescencia de micro-cavidades denominado cuasiclivaje. Las facetas de cuasiclivaje están limitadas por bordes de desgarramiento y cavidades no muy profundas.

2.8.3 Fatiga

Es conocido que prácticamente todos los materiales sufren degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo por la aplicación de cargas cíclicas.

La degradación de las propiedades mecánicas bajo cargas repetitivas o fluctuantes, que son de orden inferior al esfuerzo de cedencia del material, se le conoce como fatiga.

Las fallas por fatiga en los últimos años han adquirido mayor importancia, ya que se presentan en el momento menos oportuno, causando pérdidas económicas devastadoras para empresas e inclusive en algunos casos pérdidas humanas.

En la siguiente sección, se explica más en detalle el proceso de una falla por fatiga, en particular a lo que se refiere al crecimiento de grietas por fatiga.

2.8.4 Crecimiento de grieta (Ley de Paris)

En la década de los 60's, Paris demostró que se puede caracterizar el crecimiento de grieta por fatiga y que puede ser descrito por el factor de intensidad de esfuerzos (K), considerando al crecimiento de grieta como una función del rango y la amplitud de los esfuerzos cíclicos aplicados, el tamaño de la grieta, así como, del factor de forma del objeto estudiado. Cuando un material está bajo cargas cíclicas de amplitud constante se forma una zona plástica en la punta de la grieta y el crecimiento de grieta deja una franja plástica. Si la zona plástica es suficientemente pequeña que esté embebida entre una zona elástica singular, las condiciones en la punta de grieta está definido únicamente por el valor de K , y la velocidad de crecimiento de ésta; es decir, del incremento del tamaño de la grieta (a) por ciclo de carga (N), esto es da/dN .

Paris fue uno de los primeros investigadores en notar que el incremento de longitud de grieta por ciclo depende de la amplitud del factor de la intensidad de esfuerzos aplicados (ΔK). Paris graficó los datos de da/dN contra ΔK en una gráfica logarítmica, como la mostrada en la figura 2.31 y encontró que la rapidez de propagación de grietas por fatiga presenta tres regiones bien definidas que corresponden a las etapas de crecimiento de grietas por fatiga. La duración de cada etapa varía considerablemente en función del tipo de material, carga, geometría, temperatura, irregularidades, entre otras.

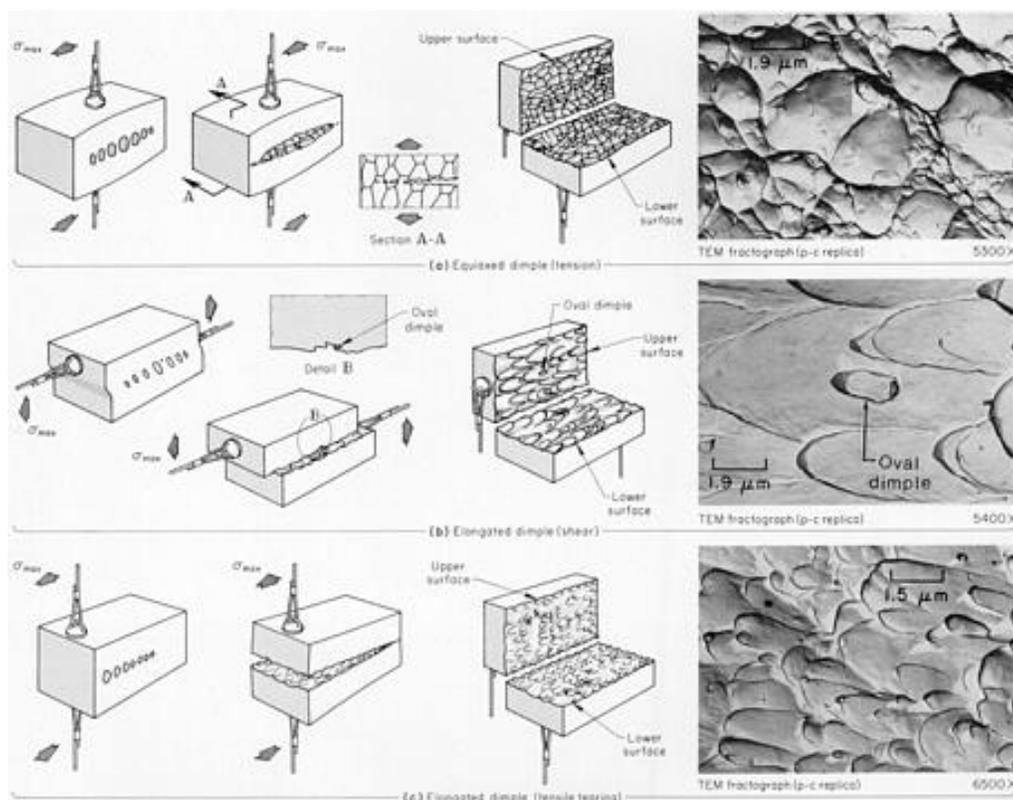


Figura 2.30 Formación de cavidades de acuerdo al modo de carga

A continuación se explica estas tres etapas:

Etapa I

Esta etapa corresponde a la formación de grietas en la microestructura, es en donde se producen los primeros cambios micro estructurales, debido a que se presentan zonas con fluencia plástica, lo que producen distorsiones en el material y se crean posteriormente bandas de deslizamiento a lo largo de los bordes del material, favoreciendo el aumento de la densidad de dislocaciones y, por consiguiente, la formación de microgrietas que producen zonas con daños irreversibles. En esta zona, se encuentra el umbral de agrietamiento (límite ΔK_{lim}), en donde abajo de este punto no se registran procesos de agrietamiento en el material.

Etapa II

También conocido como de crecimiento estable, y donde pasa más del 90 % de la vida útil un elemento o material, en esta etapa las grietas crecen lo suficiente para poder ser observados a simple vista, y se registran fenómenos como la coalescencia de grietas (unión de dos o más grietas) y bifurcaciones en el patrón de crecimiento de grietas. Paris observó que en esta etapa se puede describir con una relación empírica en donde está relacionada la velocidad de crecimiento de grieta con la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, el factor de forma (constante) y la pendiente de la recta (m), ver figura 2.32.

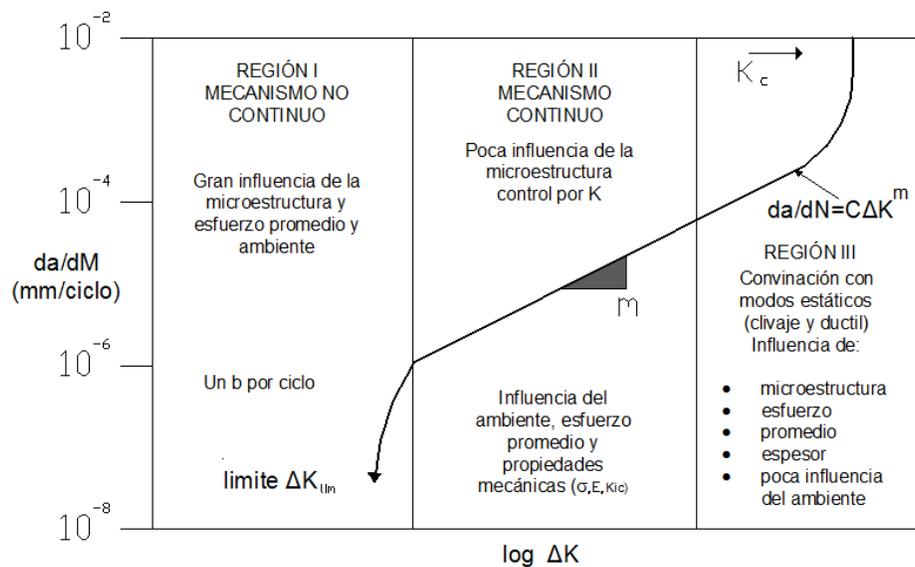


Figura 2.31 Curva de propagación de grieta por fatiga

Etapa III

Es conocida como la zona de fractura o de falla final, debido a que la grieta crece rápidamente y alcanza el punto donde se encuentra la tenacidad a la fractura, que

en otras palabras significa que la grieta alcanza el tamaño crítico y se supera la resistencia del material. En los análisis fractográficos se puede apreciar el cambio del crecimiento de la zona estable con la zona de fractura final, ya que se aprecia un cambio en la superficie de fractura, la zona estable tiene una superficie plana, con baja rugosidad y brillante; mientras que la zona de falla final presenta una superficie con alta rugosidad y de color opaco.

Modelo matemático

En las tres etapas la rapidez de la extensión de la grieta está en función del número de ciclos y depende de la magnitud de la variación de los esfuerzos aplicados en la punta de la grieta, los cuales, en condiciones lineal-elásticas, son descritos por el factor de intensidad de esfuerzos (K), el cual se define por la ecuación (2.30).

$$K = \sigma\beta\sqrt{\pi a} \quad (2.30)$$

En donde a es el tamaño de grieta, β es una constante del factor de forma y σ es el esfuerzo aplicado, en donde el esfuerzo se define por la ecuación (2.31) como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.31)$$

En donde P es la carga aplicada y A es el área transversal a la dirección normal de aplicación de la carga en el elemento.

Durante un ciclo de carga, K varía sobre un intervalo de amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ΔK , definido como:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2.32)$$

Si la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos (ΔK) es constante, el ciclo de carga queda completamente definido con la relación de cargas (R):

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2.33)$$

El cual puede ser expresado en términos de la carga aplicada como:

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (2.34)$$

Al aplicar una amplitud de carga constante en una placa agrietada, a medida que la grieta se propaga el factor de intensidad de esfuerzos se incrementa y la

rapidez de propagación de la grieta aumenta. Este proceso transcurre hasta que el factor de intensidad de esfuerzos iguala a la tenacidad del material (K_c) y la placa se fractura. La figura 2.32 muestra este comportamiento.

Finalmente, la velocidad de crecimiento de grieta (da/dN) en la zona estable (región II) está determinado por la relación de Paris (ecuación 2.35).

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (2.35)$$

En donde, C es el factor de forma del elemento y m es la pendiente de la recta.

2.9 Análisis de falla

El objetivo de un análisis de falla es la determinación de las causas de rotura de un componente en servicio. La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre el mecanismo de propagación de la fisura, la tenacidad del material, la configuración de tensiones, el origen de la fractura, etc. La determinación del sitio donde se originó la fractura es una de las contribuciones principales a un análisis de fallas.

El análisis fractográfico comienza con una observación visual de las características macroscópicas de la superficie de fractura, de la cual pueden obtenerse los primeros indicios acerca de las causas de nucleación de la fisura, mecanismo y dirección de propagación y magnitud de las cargas actuantes.

El posterior análisis, a través de una microscopía óptica de bajo aumento, permite la confirmación de las observaciones realizadas en primera instancia, mediante el análisis cuidadoso de las distintas zonas delimitadas en la primera observación. El análisis a mayores aumentos, mediante un microscopio electrónico de barrido, permite la caracterización del proceso microscópico de propagación de fractura identificando así facetas de clivaje, cavidades de fractura transgranular, zonas facetadas de fractura intergranular, morfología de los límites de grano, estrías de fatiga, superficies de corrosión bajo tensiones o imágenes características como cavidades o porosidades de solidificación.

Es necesario tener en cuenta que, aunque las técnicas fotográficas son muy válidas en todo análisis de fallas, no siempre son suficientes para determinar las causas de una rotura y deben complementarse con otros métodos de análisis.

2.9.1 Fracturas por tensión

La superficie de fractura de un elemento sometido a tensión contiene una serie de marcas características, fácilmente identificables. Es posible distinguir así la extensión de rotura de alta energía (dúctil) y la parte correspondiente a baja energía (frágil) durante la propagación de la fisura. En muestras de sección circular sometidas a tracción pueden aparecer tres tipos de zonas diferenciadas: zona fibrosa, zona radial y zona de bordes dúctiles.

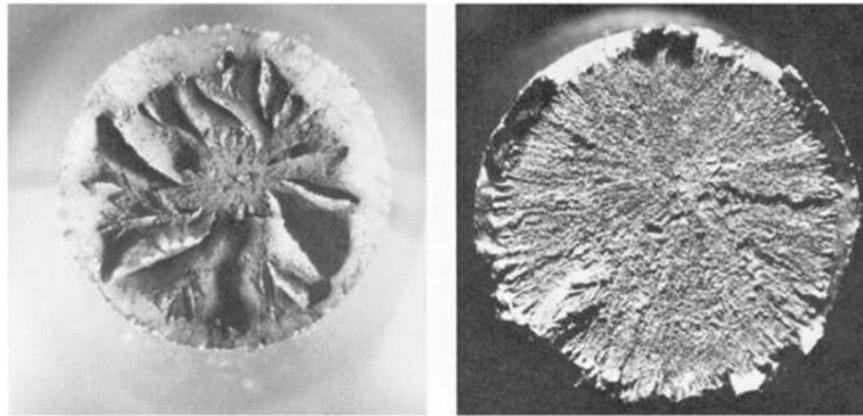


Figura 2.32 Elemento fracturado por sobrecarga de tensión

Zona fibrosa

Es la región que se forma alrededor del punto de origen de propagación de la fisura. En el caso de elementos de sección circular sin entallas, el origen corresponde a una inclusión o imperfección próxima al eje de tracción. Esta zona puede presentar un aspecto fibroso o puede estar compuesto por pequeños anillos concéntricos perpendiculares a la dirección de propagación de la fisura. Las zonas fibrosas aparecen en componentes de acero al carbono o hierro puro. En cambio, la superficie de fractura de aceros de baja aleación, o metales puros, muestra las marcas circunferenciales concéntricas.

La zona fibrosa central corresponde a un mecanismo de nucleación y propagación de la fisura por formación y coalescencia de microcavidades. En un proceso de alta energía y gran deformación plástica, el centro de la zona contiene al origen de la fractura, que es generalmente alguna imperfección del material.

Zona radial

Corresponde a la etapa de propagación rápida de la fractura, bajo condiciones de inestabilidad. Las marcas radiales coinciden con la dirección de propagación de la fisura. Se originan en la periferia de la zona fibrosa central o, en su ausencia, en el mismo origen de la fractura.

Según la microestructura del componente y la temperatura de trabajo, las marcas pueden ser finas o más gruesas. Marcas radiales finas son características de aceros de alta resistencia, estructuras martensíticas, y bajas temperaturas. Mientras que marcas radiales gruesas son características de aceros de mediana resistencia, temperaturas de ruptura iguales o superiores a las del ambiente.

Normalmente las marcas radiales son rectas, pero si en el origen de la fractura se unifica a una cierta distancia del centro de la muestra, pueden desviarse de la linealidad y curvarse apreciablemente. Lo mismo puede ocurrir si la zona fibrosa central es pequeña.

En algunos casos también se puede observar una fractura intergranular. En casos extremos las líneas radiales constituyen el único rasgo fractográfico y ocupan toda la sección del componente fracturado.

Zona de bordes dúctiles

Corresponde a la última etapa de la fractura en elementos de sección circular sin entallar. Esta región es anular; su extensión (desde la superficie exterior) depende del estado de tensiones y de las propiedades mecánicas del material. La extensión del borde dúctil no varía en general con el cambio de diámetro de la sección transversal; solamente varía la fracción del área que ocupa en el total de la superficie de fractura. La ausencia total de bordes dúctiles en un componente cilíndrico sin entallar puede ocurrir como un caso límite de la fractura radial – borde dúctil cuando el material se encuentra en condiciones de suma fragilidad.

2.9.2 Fracturas por fatiga

Una superficie de fractura por fatiga presenta una serie de marcas características, como las marcas de playa, conjuntos repetidos de marcas de nivel y estrías. Las dos primeras son normalmente identificadas en microscopía óptica, pero las estrías son solamente visibles con altos aumentos como por ejemplo los que se pueden obtener en un microscopio electrónico. Las marcas de playa son el primer indicio en un análisis de falla al buscar un daño acumulado por fatiga, y se observan comúnmente en elementos en servicio, pero son más difíciles de encontrar en probetas de laboratorio dados los cortos tiempos de los ensayos y la uniformidad de las pruebas. Sin embargo, la ausencia de marcas de playa no es indicativa de la falta de un daño por fatiga.

Marcas de playa

El espaciado entre sucesivas marcas de playa permite evaluar la velocidad de propagación de la fisura. Por ejemplo, un espaciado fino entre marcas indica una propagación más bien lenta, bajo cargas cíclicas uniformes (figura 2.34).

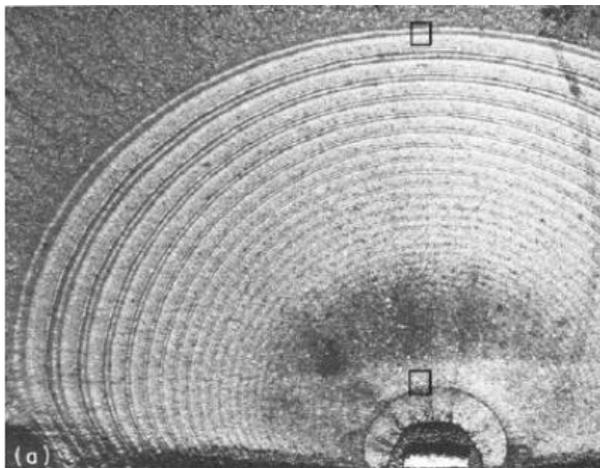


Figura 2.33 Marcas de playa en un elemento fracturado, ASM

Conjuntos repetidos de marcas de nivel

Se observan en los bordes de las superficies de fractura y corresponden a distintos orígenes de iniciación del proceso de rotura por fatiga. Cada marca corresponde a la propagación de una fisura y la superposición de dos marcas adyacentes da origen, generalmente, a un escalón claramente visible en una observación con bajos aumentos, estos escalones son características generales de fallas propagadas desde varios orígenes, sea por fatiga o por otro mecanismo.

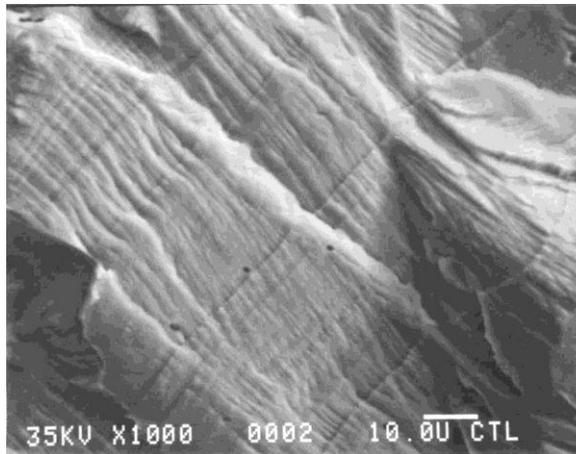
Con mayores cargas de tensión se favorecen la propagación simultánea de fisuras a partir de varios orígenes, ya que se incrementan los sitios de iniciación de fisuras. Por lo tanto, para grandes tensiones de servicio, o en el caso de fuertes concentraciones de esfuerzos de tensión, se observa un mayor número de sitios donde se originan fisuras. Pero como las microfisuras individuales se propagan en planos ligeramente distintos, se van uniendo por pequeños escalones perpendiculares a los planos de propagación. Estos escalones son los que dan origen a las marcas de serrucho o crique (*rachetmarks*) características de la rotura a partir de varios sitios simultáneos de iniciación de fisuras.

En el caso de tensiones bajas, pero siempre superiores al límite de fatiga, la fractura se origina en un único punto y desde allí se propaga. Con la ausencia de concentradores de esfuerzos, es más probable que una fisura se origine en zonas cercanas al centro del elemento. De acuerdo a las condiciones de contorno, los esfuerzos son más intensos en el centro de la sección de un componente o probeta, donde además la distribución es triaxial (deformación plana).

Si existe una concentración de tensiones sobre la superficie, como es el caso de entallas o filetes de rosca, los esfuerzos en las zonas cercanas pueden llegar a ser mucho mayores que en el interior del componente, en estos casos es más probable que las fisuras comiencen en los vértices agudos de las entallas y que desde allí se propaguen hacia el interior.

Estrías

Las estrías son características de la propagación de fisuras por fatiga y se observan con grandes aumentos, en donde se aprecian elevaciones y depresiones paralelas entre sí, normalmente forman una estructura fina a un nivel dado, o también pueden encontrarse entre dos marcas de nivel consecutivas (figura 2.35). La observación de estrías es una prueba evidente de la propagación de fisuras por fatiga, pueden tomar distintas formas, rectas o curvas y pueden estar bien o pobremente definidas. Analógicamente al caso de las marcas de playa, su ausencia no necesariamente indica otro mecanismo de fractura.



Fuente: <http://www.corrosionlab.com/papers/technical-brief-fatigue-failure.htm>

Figura 2.34 Marcas de estrías por fatiga

3 Desarrollo experimental

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental utilizado para el análisis de daño en pruebas de fatiga en torones de presfuerzo de siete alambres sin recubrimiento, los cuales son utilizados en puentes de concreto presforzados y atirantados. Este estudio tiene como origen las pruebas de aceptación de calidad de los torones que serán utilizados en la construcción de un puente atirantado. Las pruebas de calidad consistieron en someter a los torones de presfuerzo a una prueba de cargas cíclicas (prueba de fatiga). Una vez terminada la prueba de fatiga, se buscaba evidencia de daño. Si se determinaba que uno o varios alambres presentaban fractura total, la probeta no cumplía con la calidad necesaria y se calificaba como rechazada; en caso contrario, la probeta se calificaba como aceptada (prueba tipo pasa/no pasa).

Se diseñó un procedimiento experimental para poder evaluar la calidad de los torones de presfuerzo mediante una prueba de aceptación y rechazo. Para esto se realizaron cinco pruebas de tensión hasta llegar a la ruptura del torón, el propósito de éstas fue establecer los parámetros de control para las pruebas de fatiga.

Este estudio inicia con la evaluación del grado de daño provocado por la fatiga; para ello, después de la prueba de fatiga (sólo si el torón pasaba la prueba) a cada torón se le sometió a una prueba de tensión hasta la ruptura final y se comparó el resultado con la pruebas iniciales de tensión.

A partir de las pruebas realizadas, y de acuerdo al análisis de los resultados obtenidos, se definió un procedimiento con el propósito de analizar el deterioro por fatiga que se presenta en los torones de presfuerzo utilizados en la construcción de puentes atirantados.

En esta sección se describen las diversas pruebas aplicadas para el análisis del deterioro, se incluyen la descripción y los equipos utilizados, así como los parámetros de prueba de los ensayos realizados (tensión, fatiga-tensión, microdureza, fractografías, análisis de imagen y análisis analíticos de esfuerzos y de crecimiento de grieta). En la figura 3.1 se indica en forma cronológica la secuencia de los ensayos realizados.

El estudio inicia con las pruebas de tensión, estas pruebas se realizan para establecer un punto de comparación con las pruebas de fatiga; además, de las pruebas de tensión se obtienen los parámetros que se utilizan para el diseño experimental de las pruebas de fatiga. Concluidas las pruebas de tensión, se realizan las pruebas de fatiga y, si durante la prueba el torón probado no llega a la falla, se ejecuta una prueba de tensión hasta la ruptura. En este estudio, este tipo de pruebas se denominan como pruebas de Fatiga-Tensión.

Posteriormente se realizan pruebas de microdureza con el objetivo de establecer si existe un cambio de dureza en el material producto de los ciclos de carga inducidos en las pruebas de fatiga.

Se realiza un análisis fractográfico, cuyo objetivo es la determinación del lugar de inicio de la grieta, así como estudiar el mecanismo de fractura. Para este fin se utilizan diversas técnicas, como lo es la fotografía digital, la microscopía óptica y la microscopía electrónica.

Como herramientas auxiliares, se utiliza el análisis de imagen mediante el software *ImageJ*; así como también análisis estadísticos y de correlación de variables de los resultados que se obtienen en cada una de las pruebas y mediciones del análisis de imagen.

Por último, se realiza un análisis matemático de fuerzas y esfuerzos en los torones, dichos esfuerzos servirán para hacer correlación de resultados y poder tener un panorama amplio de la forma de trabajar de los torones de presfuerzo y de cómo la fatiga inducida afecta mecánicamente el desempeño de los torones.

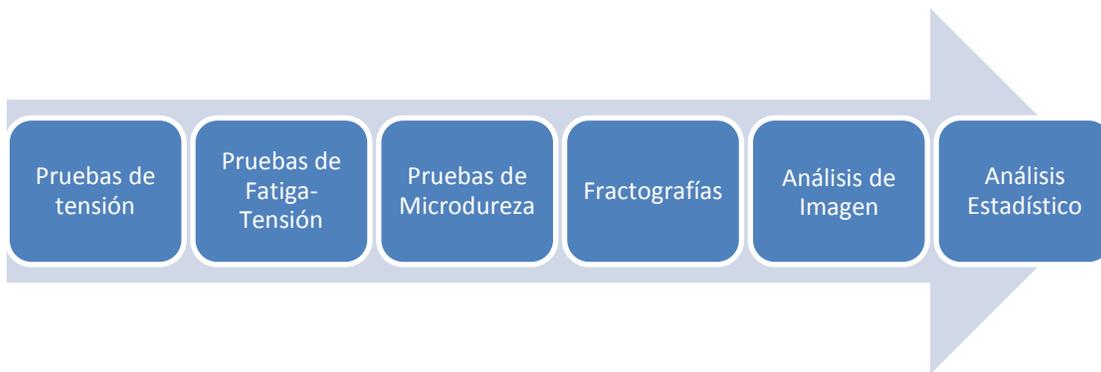


Figura 3.1 Secuencia de las pruebas en orden cronológico

3.1 Diseño experimental

Para el diseño experimental se toman en cuenta las recomendaciones del PTI, estas recomendaciones se resumen en la figura 3.2, donde en el eje de las abscisas se indica el número de ciclos de la prueba de fatiga y en el eje de las ordenadas se indica el rango de esfuerzos en MPa. La curva graficada indica el límite de ruptura de un torón bajo una prueba de fatiga; es decir, el torón romperá si se elige una combinación de número de ciclos y rango de esfuerzos que quede sobre esta curva (región de falla), si la combinación elegida queda debajo de la curva (región segura) el torón no romperá en la prueba de fatiga.

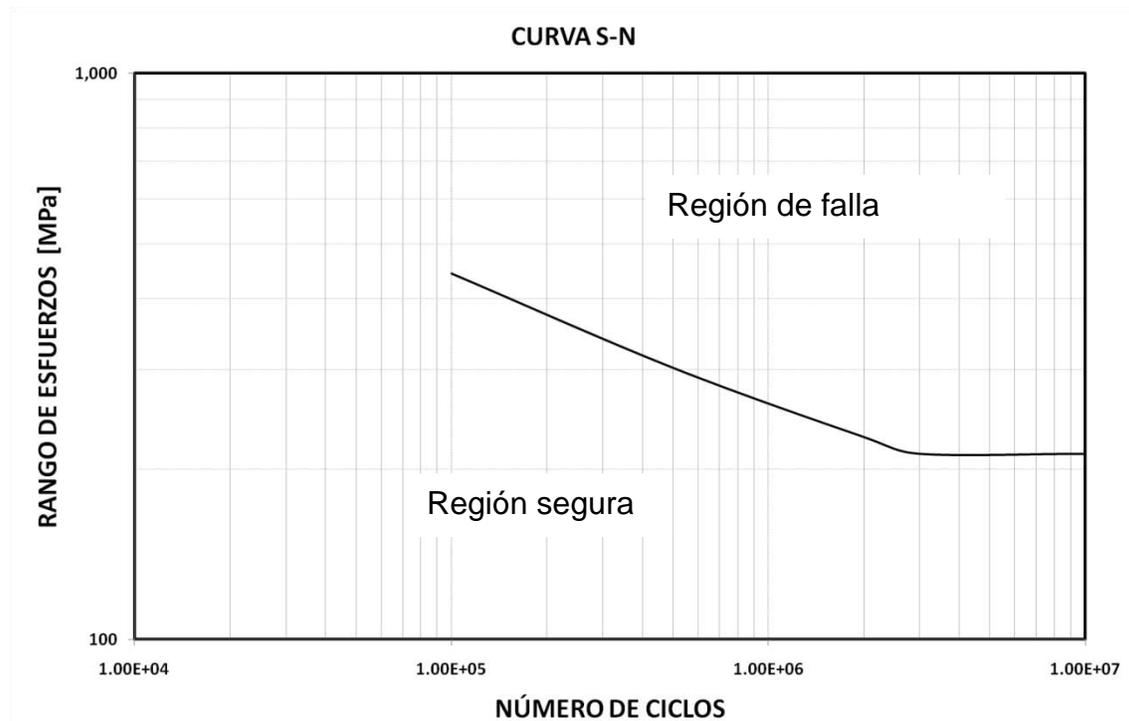


Figura 3.2 Recomendaciones del PTI para las pruebas de calidad a la fatiga

El PTI recomienda que para que los torones cumplan con la prueba de fatiga deben ser sometidos a 2 000 000 de ciclos de carga. En el experimento lo que se busca es que se asegure que al estar sometido a una prueba de 100 000 ciclos con diferente rango de cargas, el torón sufrirá un daño importante por fatiga similar al producido por 2 000 000 ciclos.

En la figura 3.3 se muestra una curva en color rojo la cual indica los ciclos de carga y rango de esfuerzos que deberán tomarse en cuenta para las pruebas de fatiga. Se debe hacer notar que la curva en color rojo se encuentra sobre la curva recomendada por el PTI, es decir, se encuentra en la región de falla del elemento.

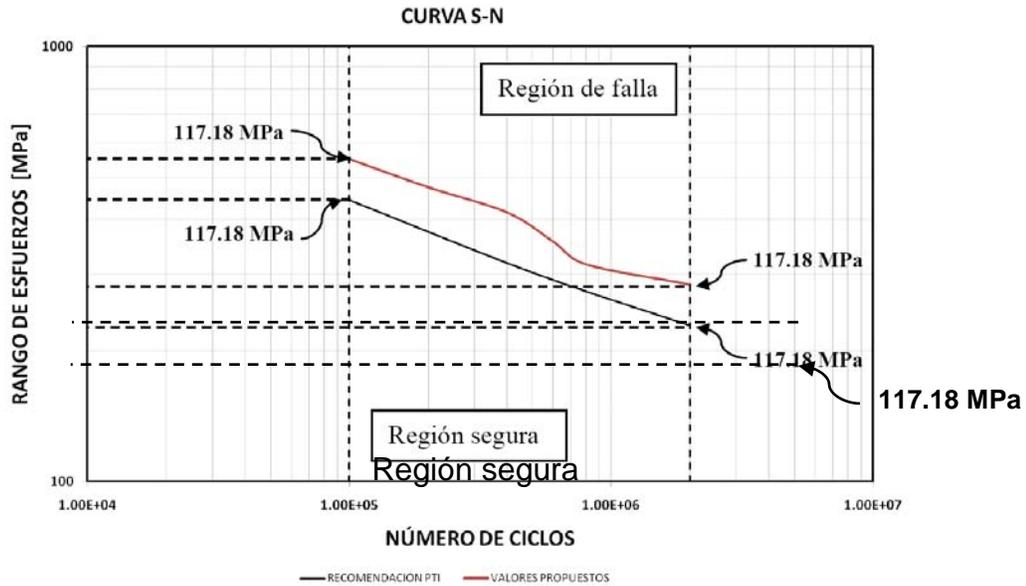


Figura 3.3 Curva propuesta para las pruebas de fatiga

El PTI recomienda que la carga máxima a la que se deberán probar las muestras sea el 45% de la carga de fluencia. Para asegurarse que verdaderamente exista un daño acumulado por fatiga se elegirá el valor máximo de carga como el del 45% de la carga de ruptura (figura 3.4).

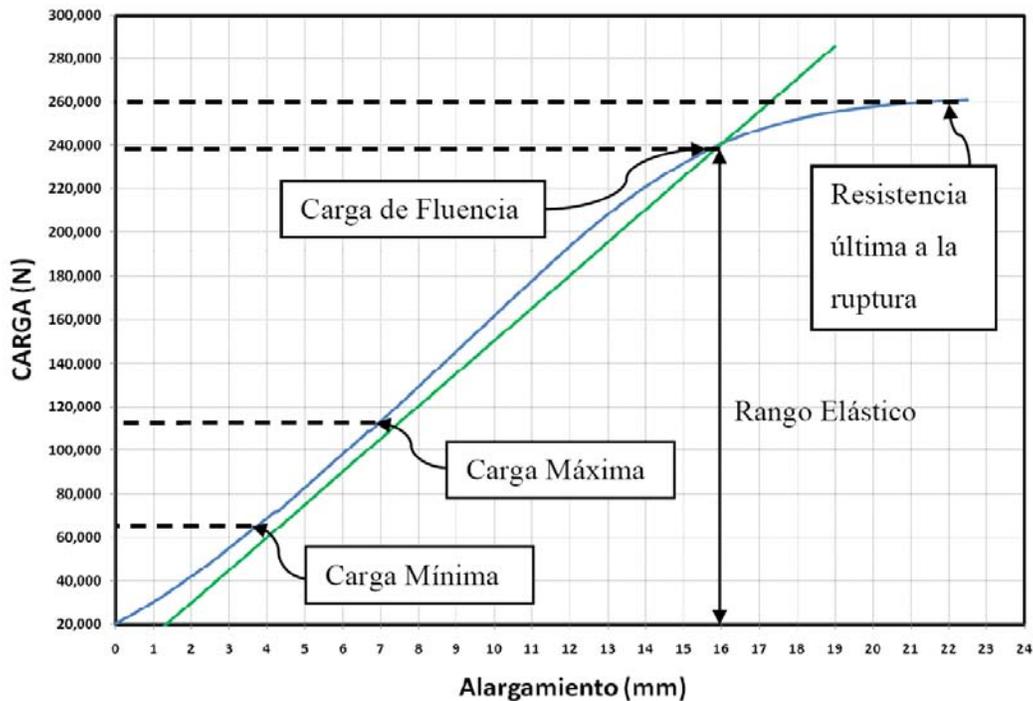


Figura 3.4 Comportamiento típico de un torón en la prueba de carga

La figura 3.5 muestra las cargas máxima y mínima que se deberán de considerar de acuerdo con diferentes ciclos de carga; en color negro se presentan las recomendadas por el PTI y en color rojo se muestran las cargas propuestas para las pruebas.

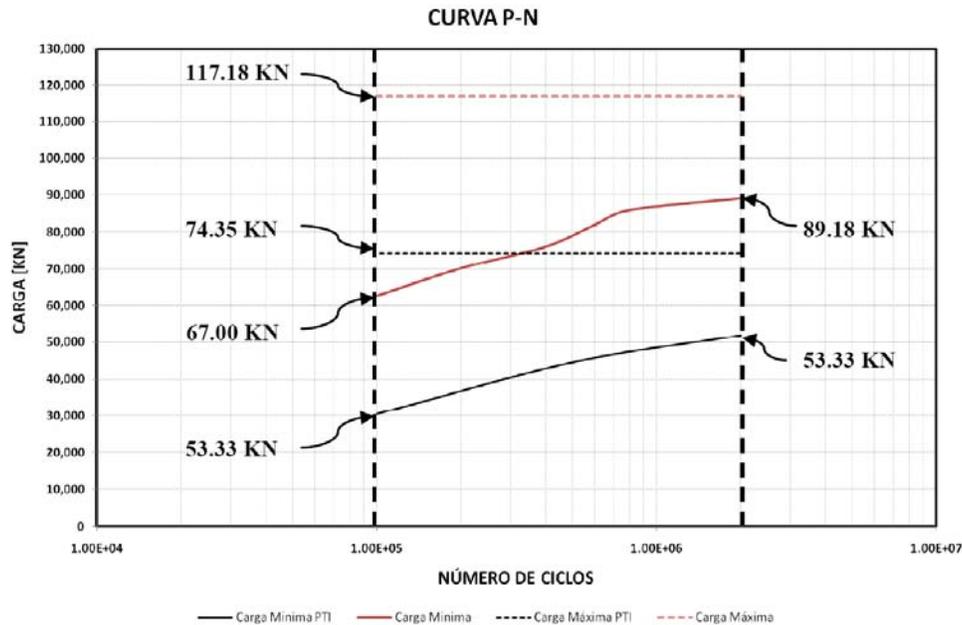


Figura 3.5 Carga contra número de ciclos propuesta para las pruebas

Estos valores de cargas se encuentran dentro del rango elástico del torón como bien lo ilustra la figura 3.4. La propuesta completa de las características que deberán tener las pruebas de fatiga se indica en la tabla 3.1. Para esta investigación las pruebas de fatiga se realizaron a 100 000 ciclos de carga. Los parámetros para esas pruebas se muestran sombreados en la tabla.

Tabla 3.1 Rangos y cargas para las pruebas de fatiga a distintos números de ciclos

No. de Ciclos	P_{max}	P_{min}	ΔP	σ_{max}	σ_{min}	$\Delta \sigma$
100 ,000	117,180	62 780	54 400	1 187.23	636.07	551.17
200 000	117,180	70 310	46 870	1 187.23	712.36	474.87
400 000	117,180	76 170	41 010	1 187.23	771.73	415.50
600 000	117,180	82 030	35 150	1 187.23	831.10	356.13
800 000	117,180	86 000	31 180	1 187.23	871.33	315.91
2 000 000	117,180	89 180	28 000	1 187.23	903.55	283.69

3.2 Pruebas de tensión

Las pruebas de tensión se aplicaron a torones de siete alambres sin recubrimiento con diámetro (ϕ) de 12.7 mm y en lo que respecta a las condiciones de prueba se aplicó la norma ASTM E8. Estas pruebas se aplicaron a torones sin daño, así como a torones que han sido sometidos a la prueba de fatiga.

Equipo y material

Para la ejecución de las pruebas de tensión se empleó el siguiente equipo y material:

- Máquina Servo Hidráulica, marca Instron, modelo 8503
- Cuña de sujeción de acero con 0.7 mm de paso (sujeción superior)
- Cuña de sujeción de acero con 0.5 mm de paso (sujeción inferior)
- Cilindro porta cuña (2)
- Cilindro de apriete (2)
- Cilindro de acoplamiento (2)
- Grasa
- Película de plástico
- Cámara fotográfica digital de 10 MP

Preparación de las probetas

Se cortaron las probetas de los torones de presfuerzo con una longitud de 100 cm para que cada una de las pruebas. Los torones utilizados fueron considerados como nuevos, por lo que se asume que no han sido sometidos a ningún tipo de esfuerzos adicionales al del proceso de fabricación, la selección de cada probeta para cada prueba se realizó al azar de un lote de 10 probetas.

Montaje

Para realizar el montaje es necesario aclarar que existen dos tipos de cuñas, las cuales son diferentes únicamente por el paso del ranurado (0.7 y 0.5 mm), las cuales se colocan de la siguiente forma: la cuña de 0.7 mm se coloca en la parte pasiva de la máquina Instron, que en este caso es en donde se encuentra la celda de carga (sujeción superior) y la cuña de 0.5 mm se coloca en la parte activa (sujeción inferior), es decir, en la parte que transmite el movimiento que en este caso es en donde se encuentra el pistón de la máquina Instron. Las cuñas se desechan una vez que la prueba concluye por lo que cada ensayo se realiza con cuñas nuevas.

Para realizar el montaje de los torones en la máquina Instron, éste se realiza de acuerdo a la siguiente secuencia (tabla 3.2)

Tabla 3.2 Proceso para el montaje de torones

Paso	Actividad
1	Instalar los cilindros de acoplamiento en la celda de carga y en el pistón de la máquina servo hidráulica, de acuerdo a los procedimientos de instalación de dispositivos de la máquina Instron (figura 3.7).
2	A las probetas se les coloca las cuñas de sujeción en cada extremo, en el cual se les deja un espacio libre en cada punta del torón de 1 cm (figura 3.6)
3	Una vez colocada la cuña, ésta se engrasa para que no exista adherencia con el cilindro de acuñado.
4	Las cuñas se introducen dentro de los cilindros porta cuñas, colocando la película de plástico entre la cuña engrasada y en cilindro porta cuña.
5	Se coloca el cilindro porta cuña dentro del cilindro de apriete (Figura 3.5).
6	Se enrosca el cilindro de apriete en el cilindro de acoplamiento respectivo (figura 3.3)

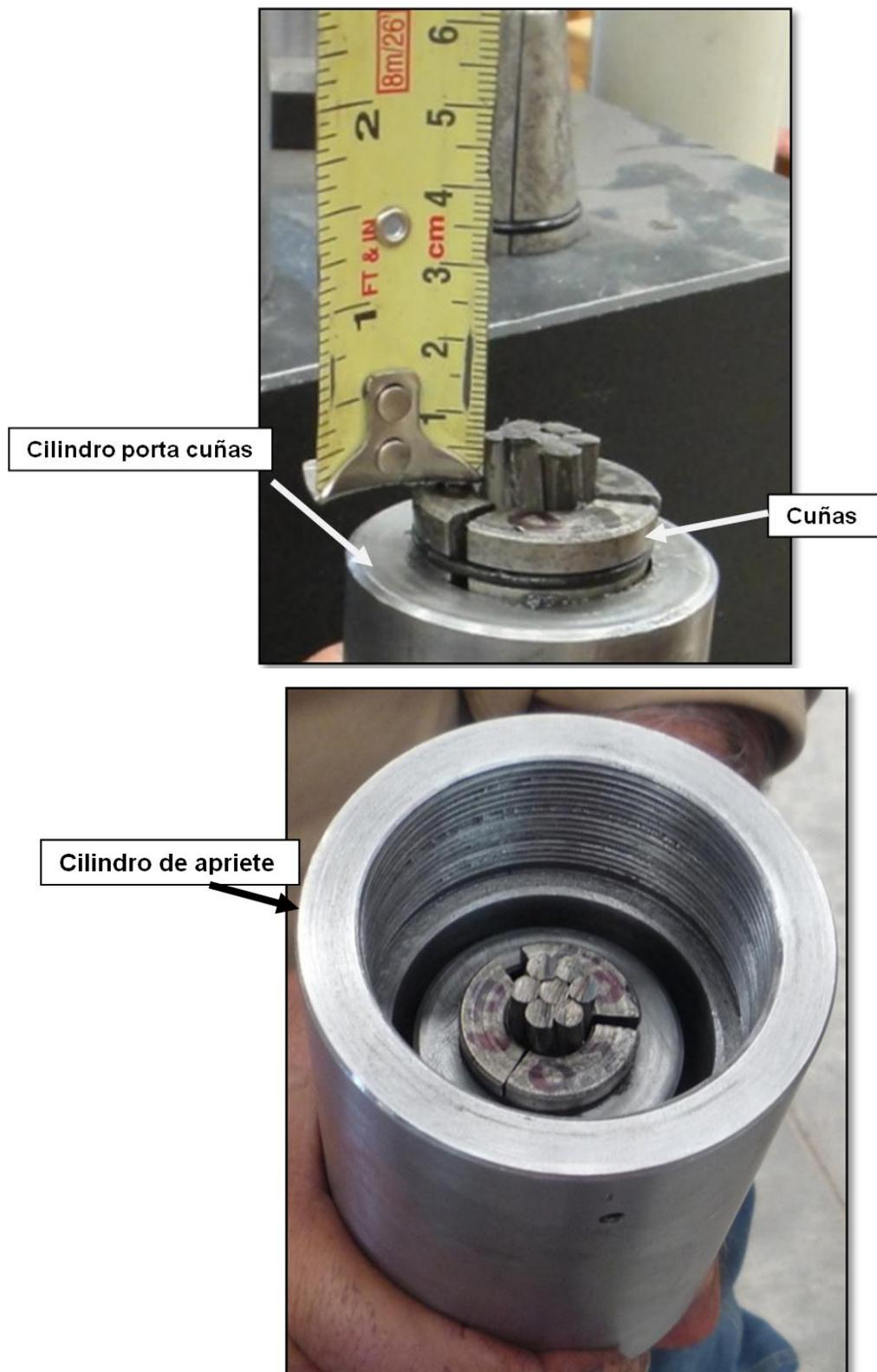


Figura 3.4 Montaje del torón en el sistema de anclaje.

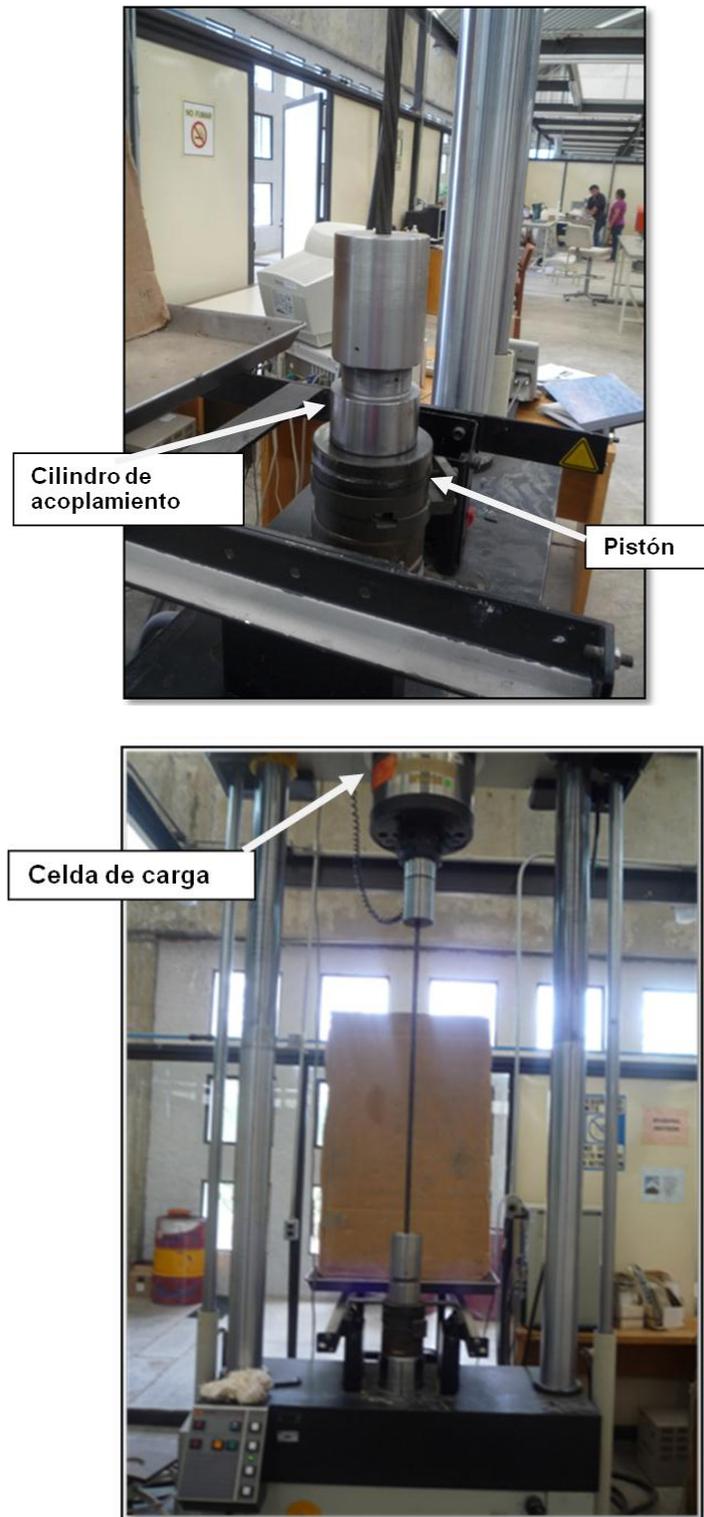


Figura 3.5 Montaje del dispositivo en la máquina servo hidráulica Instron

Parámetros de prueba

Las pruebas de tensión se realizaron en una máquina servo hidráulica (Instron), y se realizaron las pruebas de tensión con los parámetros de prueba que se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros de la prueba de tensión

Parámetro	Valor
Modo de control	Carga
Velocidad de carga	696.51 N/s
Celda de carga	500 000 N
Registro	4 datos/seg
Carga Máxima	392 400 N

La aplicación de la carga se realizó conforme lo mostrado en la gráfica aplicación de carga que se muestra en la figura 3.8.

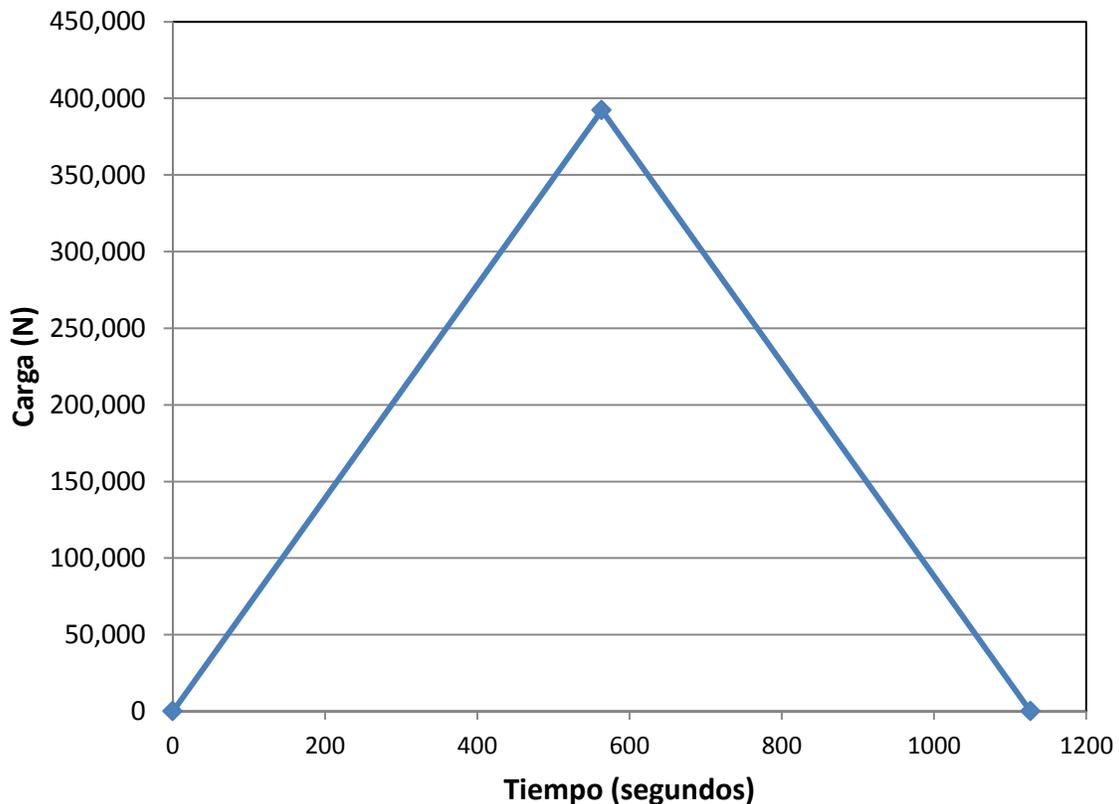


Figura 3.6 Curva de aplicación de carga

Ejecución

Durante el ensayo se midió el desplazamiento del pistón, el tiempo y la carga aplicada. Con esos datos se trazó la curva correspondiente de alargamiento total vs carga. De la curva se obtuvo el módulo elástico (estimado), el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo y desplazamiento máximo. Los datos se graficaron en una curva de carga/desplazamiento, como la mostrada en la figura 3.9.

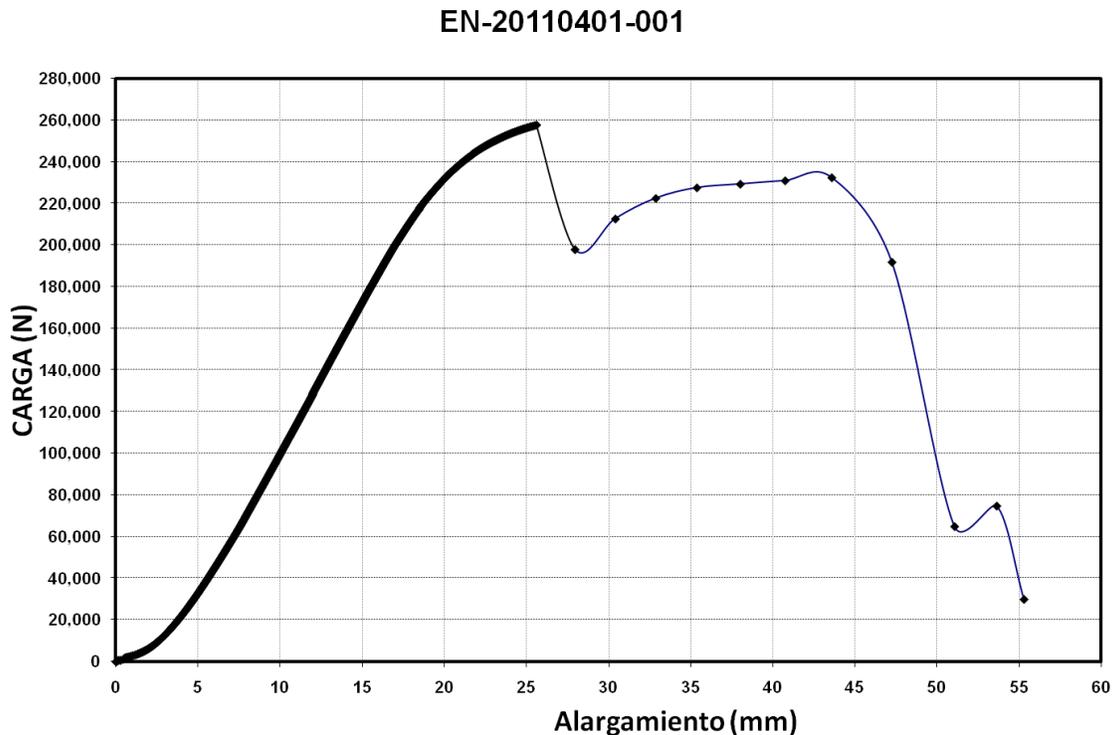


Figura 3.7 Curva típica de carga vs alargamiento

Después de la fractura, se estima la reducción de área porcentual, que indica la ductilidad del material y también se obtienen los datos directamente del panel de control como la carga máxima registrada y el tiempo total de la prueba.

Durante la prueba se toma video con una cámara digital con el fin de tener el registro de la secuencia de falla, y se toman fotografías de los torones fracturados.

3.3 Pruebas de fatiga

El diseño de las pruebas de fatiga se realizó conforme lo descrito en la sección 3.1 tomando en cuenta las recomendaciones del *PTI Guide Specification* y el manual de procedimientos EN-E-001. Las pruebas de fatiga contempladas en este estudio se realizaron a 100 000 ciclos.

Equipo y material

Para la ejecución de las pruebas de fatiga se empleó el mismo equipo que se describe en la sección 3.2.1 utilizado en la prueba de tensión.

Preparación y montaje

La preparación y montaje se realizó conforme al procedimiento descrito en el inciso anterior ya que el sistema de anclaje y sujeción es el mismo para los dos tipos de pruebas.

Parámetros de prueba

Los parámetros de la prueba de fatiga están descritos en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Variables en la prueba de fatiga.

Parámetro	Valor
Número de ciclos	100 000
Carga Máxima	117.1 KN
Carga Mínima	62.78 KN
Carga Media	89.88 KN
Rango	54.4 KN
Amplitud de carga	27.2 KN
Relación de carga (R)	0.5357
Frecuencia	2 Hz
Tipo de Onda	Senoidal

La forma de onda de la carga aplicada se muestra en la figura 3.10.

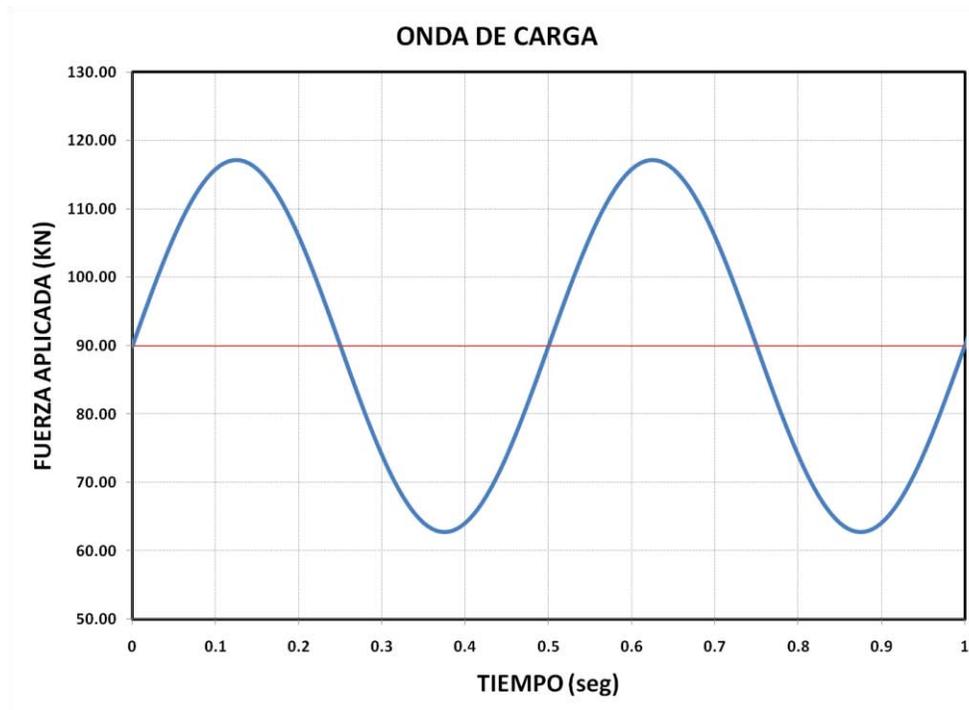


Figura 3.8 Onda de carga de la prueba de fatiga

Criterio de falla

Para esta prueba se estableció un criterio de falla, ya que el ensayo fue una prueba de control de calidad del tipo aceptación y rechazo. El criterio de falla establecido fue: sí durante el transcurso de la prueba la probeta llega a la ruptura por fatiga en alguno de los alambres, se registra el número de ciclos en los cuales se presentó la falla y se califica a la prueba como rechazada; pero sí la probeta no llegó a la ruptura, se califica la prueba como aceptada.

3.4 Pruebas de dureza Vickers

Esta prueba tiene la finalidad de conocer si se registra un endurecimiento por deformación debido a las pruebas de tensión y de fatiga-tensión, así como para conocer la dureza de las cuñas de sujeción, para esta prueba se utiliza la metodología que se establece en la norma ASTM E92-82 y la norma NMX-B118-1974-SCFI.

Equipo y material

Para la ejecución de las pruebas de dureza se empleó el siguiente material y equipo (figura 3.11, tabla 3.5)

Tabla 3.5 Equipo y material para las pruebas de microdureza

Nombre	Marca	Modelo
Montadora Hidráulica	Jean Wirtz	Hidropress M
Lijadora de disco	Jean Wirtz	
Pulidora	Jean Wirtz	TG 250
Durómetro	Buehler	1 600-6 000M
Bakelita en polvo		
Alumina en polvo		1.0, 0.3 y 0.5 μm



Figura 3.9 Equipo utilizado para las pruebas de dureza

Preparación de las probetas

Se obtuvieron muestras de torones sometidos a pruebas de tensión y de fatiga-tensión, así como de torones sin esfuerzos inducidos, a continuación se explica el proceso de preparación de este tipo de muestras (tabla 3.6).

Tabla 3.6 Proceso para la preparación de muestras para la medición de dureza Vickers

Paso	Actividad
1	Se realiza un corte en una zona intermedia del torón, para garantizar que las mediciones de dureza se realicen en una zona donde hubo esfuerzos inducidos en las pruebas de tensión y de fatiga.
2	Se identifica a cada uno de los alambres de los torones.
3	Los trozos de alambre son montados en Bakelita (figura 3.12).
4	Las probetas se lijan en la lijadora de disco y se pulen a espejo con alúmina (tamaño de grano de 1, 0.3 y 0.5 μm).

**Figura 3.10 Probetas para medir la dureza Vickers**

Parámetros de prueba

Una vez preparadas las probetas, inicia el proceso de medición de la dureza Vickers con la indentación en el durómetro, para ello se realizan cinco indentaciones, una en el centro y cuatro más alrededor, en la secuencia que se muestra en la figura 3.13. Las indentaciones se realizan conforme a los parámetros de prueba indicados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Parámetros de prueba para la medición de dureza Vickers

Parámetro	Valor
Tiempo de aplicación	15 s
Carga	300 g
Tipo de indentador	punta de diamante

Una vez realizadas las indentaciones, se miden las longitudes de las diagonales de la huella resultante después de retirar la carga. La medición de la dureza Vickers (HV) se realiza de acuerdo con la siguiente expresión:

$$HV = 1.854 \times 10^6 \frac{g}{d^2} \quad (3.1)$$

Donde:

g es la carga aplicada en Kg.

d es el promedio de las diagonales medidas de la huella.

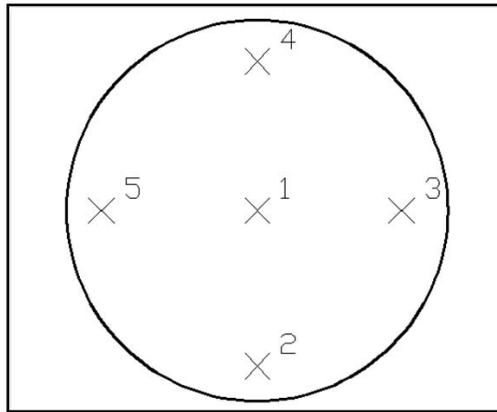


Figura 3.11 Secuencia y posición de las indentaciones

3.5 Análisis fractográfico

El objetivo fundamental del análisis fractográfico es la determinación del lugar de inicio de la grieta, así como estudiar el mecanismo de fractura; para este fin se utilizan diversas técnicas y cada una de ellas con objetivos específicos, éstas son:

- Inspección visual (cámara digital).
- Microscopía óptica (microscopio estereoscópico y microscopio metalográfico).
- Microscopía electrónica de barrido.

Inspección visual con cámara digital

La inspección visual comienza con la observación de las características macroscópicas de la superficie de fractura, en la cual pueden obtenerse los primeros indicios de la fractura. Para este fin se obtienen imágenes de las superficies de fractura con una cámara digital, con las cuales posteriormente se

pueden medir los ángulos de fracturas frágiles, la reducción de área en el caso de fracturas dúctiles, así como la determinación de la secuencia de fractura de los alambres. También proveen la información del modo de falla, ya que permite establecer inicialmente si existen daños por fatiga y, en su caso, puede brindar la información de la zona de inicio de ésta, o bien si son daños por sobrecarga, corrosión, etc.

Equipo y material

Para la captura de imágenes con cámara digital se empleó equipo que se describe en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Equipo y material para la inspección visual con cámara digital

Nombre	Marca	Modelo
Cámara digital	Canon	EOS Rebel
Lente zoom	Canon	EF 28-80 mm 1:3.5-5.6 II ϕ 58mm
Lentes Close Up	Kenko	No. 1, 2 y 4 para 58 mm
Lente polarizado	Kenko	PL de 58 mm
Tripie	-----	-----
Base magnética	Mitutoyo	71 010S
Escala metálica	Office Depot	38 395
Cinta adherible	-----	-----

Preparación de las probetas

De los torones ensayados se cortaron los alambres fracturados en la zona cercana a la falla para poder tener una mejor manipulación de las probetas. Para evitar el movimiento de los trozos de alambre, por un lado, y poder tener una referencia de distancia, por el otro, los alambres se montaron en una base magnética a la cual se le fijó una escala metálica con cinta adhesiva (figura 3.14).



Figura 3.12 Preparación de la probeta para la obtención de la imagen

Parámetros de prueba

Las imágenes se capturan con la cámara digital utilizando los parámetros de prueba que se indican en la tabla 3.9

Tabla 3.9 Parámetros para captura de imagen digital

Parámetro	Valor
Tiempo de apertura	13 s
Resolución	10 MP
Zoom	28 mm
Distancia al objetivo	36 cm
Flash	Apagado
Tipo de luz	Artificial

3.5.1 Inspección visual con el microscopio estereoscópico

La inspección visual con el microscopio estereoscópico de bajo aumento (figura 3.15), permite realizar observaciones tridimensionales de las zonas de interés, en este caso, de las zonas de iniciación de grieta o de aspectos relevantes que surgieron de las observaciones realizadas en primera instancia mediante el

análisis visual, analizando a mayor detalle la superficie de fractura. Cabe aclarar que el equipo provee imágenes visuales tridimensionales, las fotografías obtenidas con este equipo son planas, por lo que en ocasiones sólo sirve para confirmar algunos indicios que surgieron de la inspección previa.

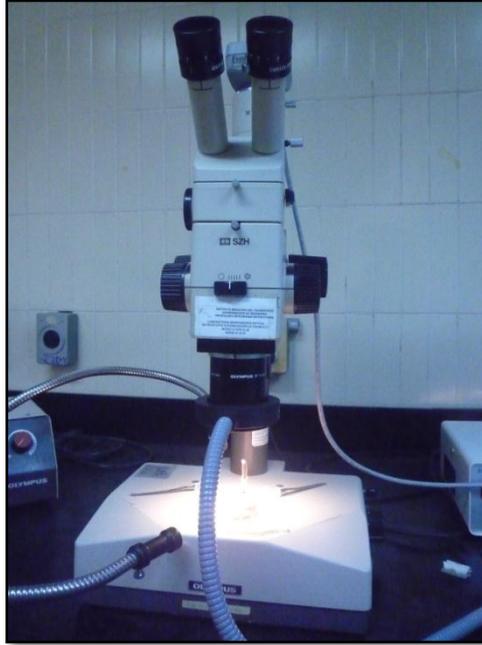


Figura 3.13 Microscopio estereoscópico

Equipo y material

Para la inspección visual con microscopía se utilizó el siguiente equipo (tabla 3.10):

Tabla 3.10 Equipo y material para las pruebas de microscopía

Nombre	Marca	Modelo
Microscopio estereoscópico	Olympus	SZH
Base magnética	Mitutoyo	71 010S
Escala metálica	Office Depot	38 395
Analizador de imagen	Media Cybernetics	ImageProPlus

Preparación de las probetas

Las muestras que se utilizan para la inspección visual con microscopio estereoscópico son las mismas que han sido preparados para las imágenes tomadas con la cámara digital.

Ejecución

En la tabla 3.11 se muestra el proceso para la inspección visual con el microscopio estereoscópico.

Tabla 3.11 Proceso para la inspección visual con el microscopio estereoscópico

Paso	Actividad
1	Se montan los alambres en la base magnética de tal modo que la superficie de fractura pueda ser correctamente enfocada en el microscopio.
2	Se selecciona la zona de interés y se enfoca la probeta.
3	Se analiza la superficie de falla en busca de patrones de ruptura que puedan dar el indicio de la causa de la fractura de cada alambre, el equipo permite ampliaciones desde 5 hasta 70 aumentos en pasos continuos.
4	Se toman las imágenes con el analizador de imágenes.

3.5.2 Inspección visual con el microscopio metalográfico

El microscopio metalográfico se utiliza para inspeccionar la microestructura en zonas específicas donde hay vestigios de daño y deterioro por fatiga, este microscopio tiene mayor capacidad de aumentos que el microscopio estereoscópico, por lo que se pueden realizar observaciones con mayor detalle de las superficies de fractura; sin embargo, se pierde la profundidad de foto del estereoscopio. No obstante, con esta inspección se determina las zonas que son de particular interés para realizar una inspección con el microscopio electrónico de barrido.

Equipo y material

Para este análisis se emplea el material y equipo que se muestra en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Equipo y material para la inspección con microscopio metalográfico

Nombre	Marca	Modelo
Microscopio metalográfico de platina invertida	Olympus	PMG3-F
Base magnética	Mitutoyo	71010S
Analizador de imagen	Media Cybernetics	ImageProPlus
Extensión flexible	-----	-----

Preparación de las probetas

Las probetas no necesitan ninguna preparación previa debido a que son las mismas que se utilizaron en las pruebas de inspección visual.

Ejecución

En la tabla 3.13 se presenta el proceso para este tipo de inspección.

Tabla 3.13 Proceso para la inspección visual con el microscopio metalográfico

Paso	Actividad
1	Se montan los alambres en la base magnética de tal modo que la superficie de fractura pueda ser correctamente enfocada en el microscopio.
2	Se selecciona la zona de interés y se enfoca la probeta
3	Se analiza la superficie de falla en busca de patrones de ruptura que puedan dar el indicio de la causa de la fractura de cada alambre, el equipo tiene objetivos de 5X, 10X, 20X, 50X y 100X, que al paso de las diversas lentes permite aumentos hasta de 1000 aumentos con el objetivo de 100X.

3.5.3 Inspección visual con el microscopio electrónico de barrido (SEM)

La observación de detalles de una superficie de fractura a mayores aumentos que los alcanzados por microscopía óptica es el paso siguiente del análisis fractográfico. Las observaciones con el microscopio electrónico de barrido son importantes ya que el poder de amplificación y el grado de nitidez de las imágenes, permiten establecer el modo de fractura, el proceso de daño, las causas por las que se definieron las zonas con alto grado de concentración de esfuerzos, etc.

Equipo y material

Para esta etapa del análisis, el material y equipo empleado se muestra en la tabla 3.14:

Tabla 3.14 Equipo y material para el análisis con microscopio electrónico de barrido

Nombre	Marca	Modelo
Microscopio electrónico de barrido (figura 3.16)	Jeol	JSM-6060 LV
Porta-probetas verticales	-----	-----
Porta-probetas horizontales	-----	-----
Base para pota-probetas	-----	-----
Electro-Erosionadora	AgieCharmilles	ActSpark SW1



Figura 3.14 Microscopio electrónico de barrido

Preparación de las probetas

El proceso para la inspección visual con el microscopio estereoscópico se presenta en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Proceso para el montaje de probetas para la inspección en el microscopio electrónico de barrido

Paso	Actividad
1	Corte en la electro-erosionadora. Debido a que el espacio en el microscopio electrónico es muy reducido, los alambres seleccionados para la prueba deben de ser cortados para que tengan una longitud de 20 mm, la base del alambre debe estar plana y perpendicular con respecto al eje del alambre.
2	Montaje en el porta-probetas. Los alambres son montados en los porta-probetas que están hechos de cobre y son fijados mediante un perno roscado. Una vez montadas se colocan en una base en grupos de cuatro para poder ser introducidas en el microscopio electrónico de barrido (figura 3.17).



Figura 3.15 probetas montadas en la base y portaprobetas

Ejecución

El proceso de ejecución para obtener imágenes en el microscopio electrónico de barrido se presenta en la tabla 3.16

Tabla 3.16 Proceso para la inspección visual con el microscopio electrónico de barrido

Paso	Actividad
1	Se monta el porta-probetas en la base de tal modo que la superficie de fractura pueda ser correctamente enfocada en el microscopio electrónico de barrido.
2	Se selecciona la zona de interés y se enfoca la probeta.
3	Se analiza la superficie de falla en busca de patrones de ruptura que puedan dar el indicio de la causa de la fractura de cada alambre, el equipo tiene ampliaciones continuas desde 2X hasta más de 10000X. Para este caso de estudio se seleccionaron aumentos de 22X, 50X, 100X, 250X, 500X, 1000X, 2500X y 5000X.
4	Se toman las imágenes con el software del equipo en formato TIFF de alta resolución.

3.6 Análisis de imagen

El análisis de imagen tiene como finalidad caracterizar el daño de los alambres fracturados y consiste, básicamente, en la medición de diversos parámetros de interés por medio de las imágenes digitales y el uso de algunos programas de cómputo para tal fin.

Programas de cómputo utilizado

Para este análisis se utilizan diversos programas de cómputo como son:

- Photoshop (edición de imagen)
- ImageJ (análisis de imagen)
- Excel (base de datos de las mediciones realizadas)

Ejecución

El proceso de ejecución para realizar el análisis de imagen se muestra en la tabla 3.17

Tabla 3.17 Proceso para el análisis de imagen

Paso	Actividad
1	Se selecciona las imágenes de interés para el análisis.
2	Se recorta la imagen para eliminar zonas sin información relevante (software Photoshop).
3	Se ejecuta el software ImageJ.
4	Con la escala de la imagen, se calibra el software para obtener el número de píxeles por unidad de longitud.
5	Se inicia el proceso de medición de la imagen, realizar al menos 3 mediciones por cada parámetro medido.
6	Guardar las mediciones en un archivo de Excel.

3.7 Análisis probabilístico de datos

Con los datos obtenidos de las pruebas de tensión, microdureza y del análisis de imagen, se realizan los análisis probabilísticos para obtener las funciones de densidad de probabilidad de cada parámetro.

Programas de cómputo utilizado

Para este análisis se utiliza los siguientes programas de cómputo:

- @Risk (determinar las funciones de densidad de probabilidad)
- Excel (base de datos de las mediciones realizadas)

Ejecución

El proceso de ejecución para este proceso se indica en la tabla 3.18.

Tabla 3.18 Proceso para obtener las correlaciones probabilísticas

Paso	Actividad
1	Se ejecuta el programa Excel y se abre la base de datos del parámetro en estudio.
2	Se ejecuta el módulo @Risk que es un programa ejecutable en Excel.
3	Se seleccionan los valores de la variable en estudio.
4	Se ejecuta el análisis probabilístico de datos.
5	Se selecciona la función de densidad de probabilidad, con la opción del mínimo error de la función de densidad de probabilidad con respecto a los datos.
6	Guardar las gráficas de la función de densidad de probabilidad en el archivo de Excel.

4 Resultados y discusión

En este capítulo se muestran, se analizan y se discuten los resultados obtenidos de las pruebas descritas en el capítulo 3. Resulta conveniente resaltar que las tablas, figuras y datos expuestos en esta sección han sido tratados para poder ser discutidos de manera clara. De acuerdo a lo expuesto, se discutirán: las pruebas de tensión, tensión-fatiga, el análisis de microdureza y el análisis fractográfico por medio de microscopía óptica. Se explicará el cambio en los ángulos de ruptura de los alambres y se presentarán las evidencias del daño por fatiga en los torones EN-20110401-007 y 008. Posteriormente, se presentará la secuencia de ruptura en estos torones, cuando son sometidos a la prueba de tensión.

4.1 Identificación de las probetas

En la investigación se aborda el estudio de siete torones, cinco de los cuales fueron sometidos a una prueba de tensión y dos fueron sometidos a una prueba de fatiga-tensión. Las probetas que fueron sometidas exclusivamente a tensión se les asignó la siguiente nomenclatura: EN-20110401-001, EN-20110401-002, EN-20110401-003, EN-20110401-004, EN-20110401-005. Mientras que las probetas que fueron sometidas a 100 000 ciclos de carga se identificaron como: EN-20110401-007 y EN-20110401-008. Cada uno de los alambres de los torones se identificó con las letras de la A a la F. La identificación de los alambres de los torones es aleatoria por lo que no tiene ninguna correspondencia con el orden ni con el modo de fractura.

4.2 Pruebas de tensión

Durante la prueba se registraron los datos con una frecuencia de muestreo de 3 Hz de las variables: tiempo (segundos), carga (Newton) y posición del pistón (milímetros). Los datos obtenidos para estas pruebas se graficaron en curvas de Posición/Carga y de Tiempo/Carga.

La gráfica de posición/carga para la probeta EN-20110401-001 se muestra en la figura 4.1. En ésta se aprecia que existe una zona al comienzo de la aplicación de la carga en la cual el torón no tiene un comportamiento elástico-lineal, esto es porque los alambres del torón sufren un reacomodo debido a su configuración helicoidal. A la par de estas gráficas se muestran una gráfica de Tiempo/Carga (figura 4.2). En esta gráfica se aprecia que el periodo de ruptura entre cada uno de los alambres, sucede en muy pocos segundos, también se observa que en ocasiones la ruptura se presenta en grupos de alambres y no individualmente. El Resto de estas gráficas se incluyen en el Anexo I.

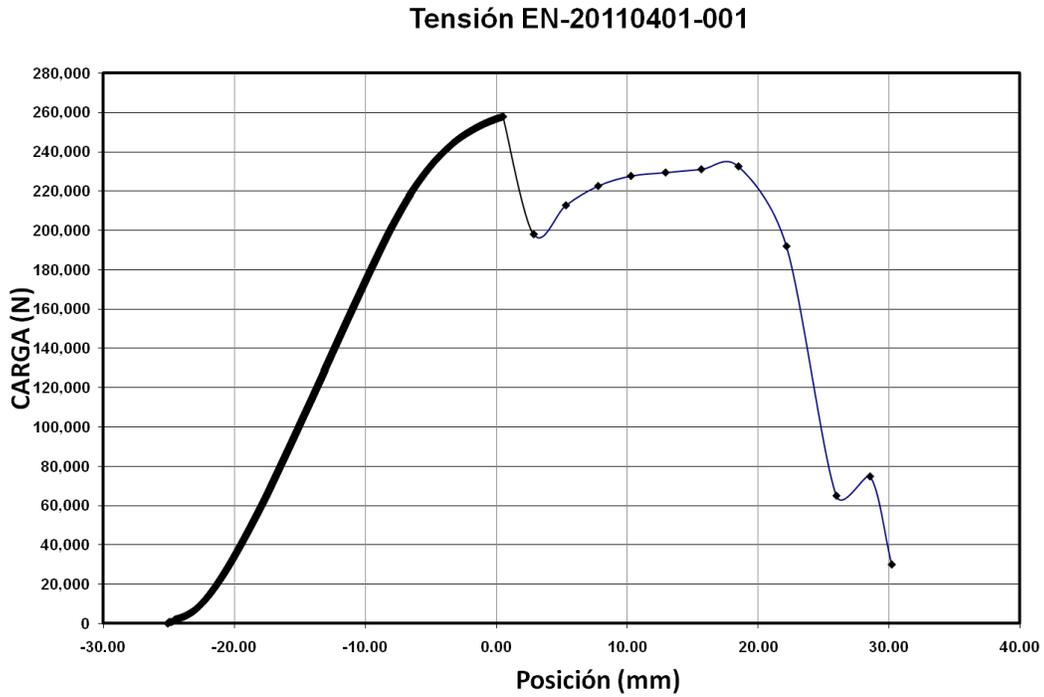


Figura 4.1 Gráfico de Posición/Carga para la probeta EN-20110401-001

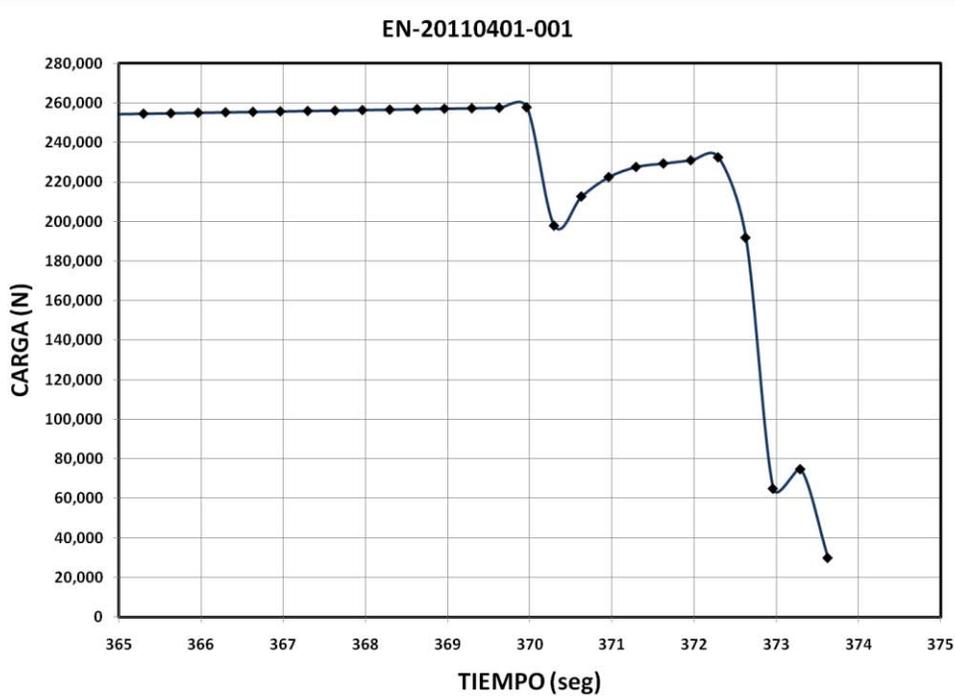


Figura 4.2 Gráfico de Tiempo/Carga para la probeta EN-20110401-001

4.3 Pruebas de fatiga-tensión

Se realizaron dos pruebas de fatiga a torones a 100 000 ciclos de carga con los parámetros descritos en el capítulo anterior. Los torones están identificados como EN-20110401-007 y EN-20110401-008. Cabe señalar que antes de las pruebas la probeta identificada como EN-20110401-006 se dañó en una prueba preliminar, por lo que no se reportan los resultados correspondientes a ésta.

De las dos probetas que se sometieron a fatiga a 100 000 ciclos de carga con los parámetros descritos en la metodología, ninguna de las dos falló durante el transcurso de la prueba, por lo que ambas probetas al terminar los ciclos de carga fueron sometidas a la prueba de tensión.

Los datos obtenidos que se registraron durante el transcurso de la prueba de tensión son, al igual que las pruebas anteriores: tiempo (segundos), carga (Newton) y posición del pistón (milímetros). De la misma manera, con los datos obtenidos se graficaron en curvas de Posición/Carga y de Tiempo/Carga.

La gráfica de Posición/Carga corresponde a la figura 4.3. En comparativa con las gráficas de las pruebas de tensión pura, en éstas probetas no se presenta el reacomodo de los alambres del torón, este hecho se debe a que durante los ciclos de carga previos a la prueba de tensión los alambres se reacomodan, una vez que se realiza la prueba de tensión el torón tendrá un comportamiento más regular desde el inicio.

La figura 4.4 corresponde a las gráficas de Tiempo/Carga; en estas probetas la ruptura en los torones se va presentando tanto en grupos de alambres como por ruptura individual, el periodo de ruptura de un alambre a otro se da en muy pocos segundos, como ocurrió con las pruebas de tensión pura.

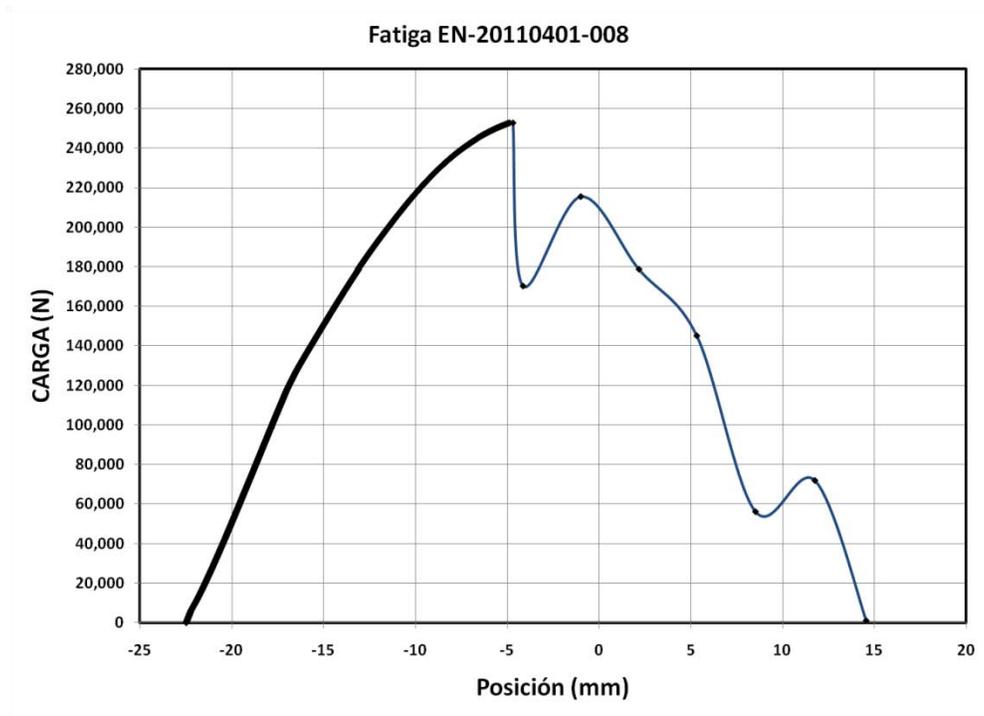


Figura 4.3 Gráfico de Posición/Carga para la probeta EN-20110401-008

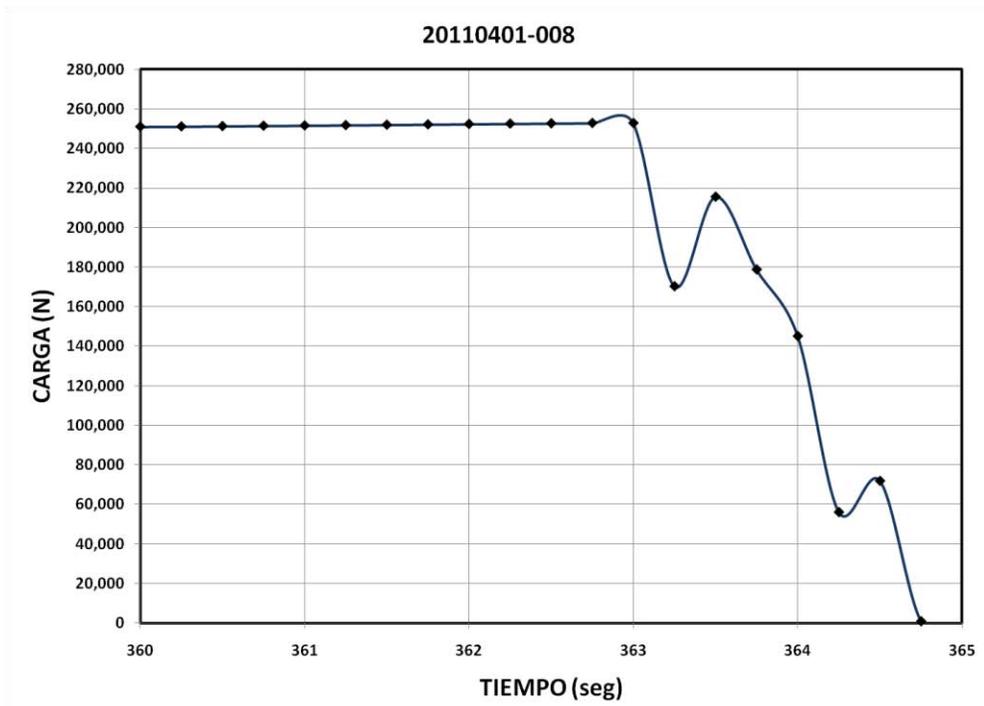


Figura 4.4 Gráfico de Tiempo/Carga para la probeta EN-20110401-008

4.4 Comparativa entre las pruebas de tensión y fatiga-tensión

Al juntar las gráficas de los resultados de tensión de los siete torones se obtiene el comparativo mostrado en la figura 4.5. Para poder realizar una comparativa de las pruebas se determinó como punto de inicio de la gráfica la zona donde el material comienza a comportarse como linealmente elástico (lo cual se estableció con una carga estimada de 20 toneladas). En esta figura se observa que los torones que fueron sometidos a fatiga (EN-20110401-007 y EN-20110401-008) presentan menor resistencia a la ruptura que los que fueron sometidos solo a tensión. También observamos que los torones de la prueba de fatiga presentan menor deformación, esto se debe a que los torones sufren un reacomodo al iniciar la prueba de tensión y por lo tanto llegan a tener un mayor estiramiento, pero los torones que fueron sometidos a fatiga lograron su reacomodo durante esta prueba, por lo que este estiramiento excedente no se presenta. También se puede observar que las curvas correspondientes a las probetas EN-20110401-007 y EN-20110401-008 no presentan comportamiento completamente lineal en su etapa elástica, como en el caso de las otras probetas.

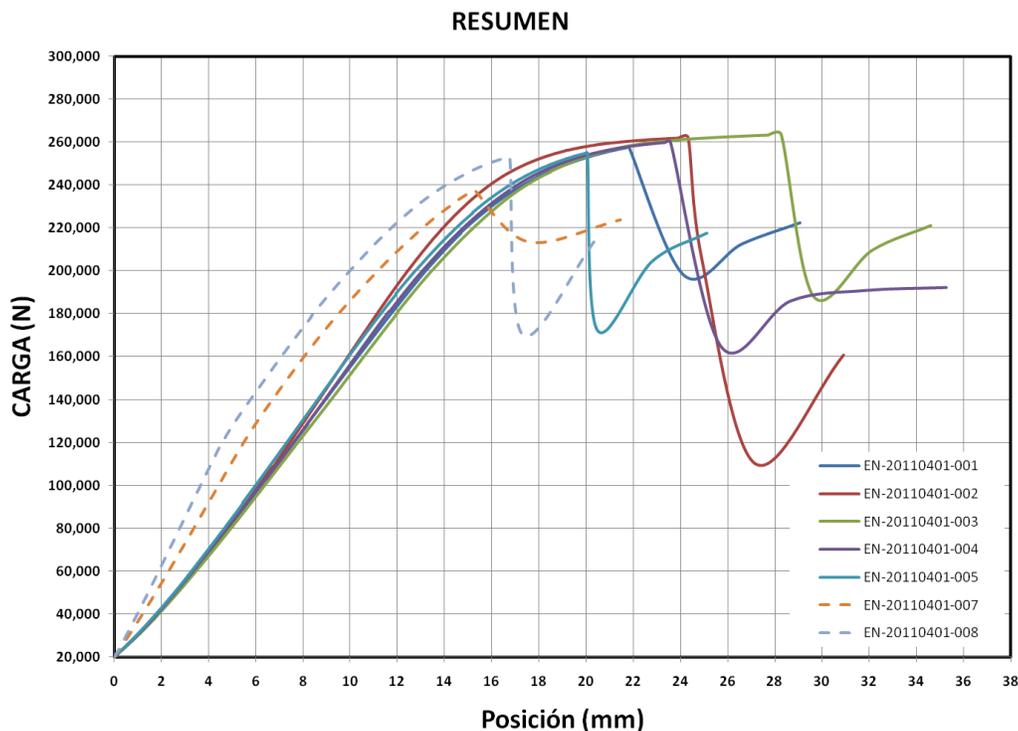


Figura 4.5 Resumen de las pruebas de tensión y fatiga-tensión.

En promedio las probetas que fueron sometidas a la prueba de fatiga presentan una reducción en la carga máxima de ruptura del 13.06% (figura 4.6). En tabla 4.1

se presenta las cargas y deformaciones máximas alcanzadas durante la prueba de tensión para cada probeta.

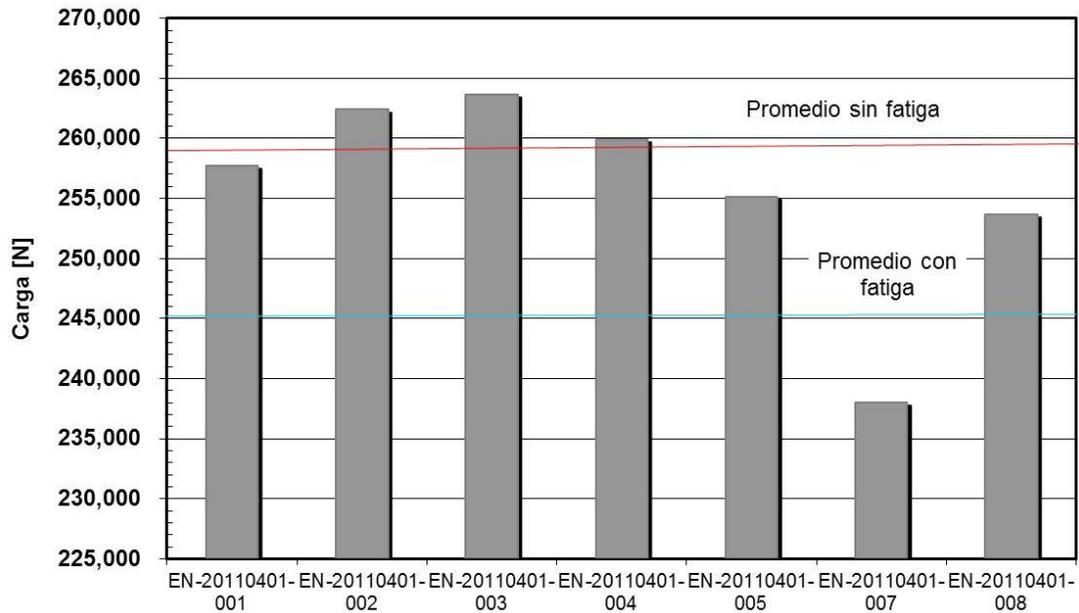


Figura 4.6 Comparativa de las cargas máximas a la ruptura por tipo de prueba

Tabla 4.1 Tabla Resumen de resultados de las pruebas de tensión y fatiga-tensión

Tipo de prueba	Probeta	Carga Máxima [N]	Desplazamiento Ruptura del 1er Cable [mm]
Tensión	EN-20110401-001	257 746	25.60
Tensión	EN-20110401-002	262 424	28.96
Tensión	EN-20110401-003	263 699	35.26
Tensión	EN-20110401-004	259 973	32.19
Tensión	EN-20110401-005	255 167	25.04
Fatiga- Tensión	EN-20110401-007	238 006	17.79
Fatiga- Tensión	EN-20110401-008	253 696	17.36

Se observa que existe una diferencia entre los resultados de las pruebas de tensión de los torones sometidos a la prueba de fatiga y los que no fueron sometidos a fatiga, por lo que se plantearon dos posibles causas: que el comportamiento observado en las probetas sometidos a fatiga sufrieron un endurecimiento por deformación o bien que exista un daño acumulado por fatiga.

Por lo que a continuación se exploran estas dos hipótesis con el fin de explicar el cambio en el comportamiento en la prueba de tensión.

4.5 Pruebas de dureza Vickers

Para cuantificar los cambios en la dureza por deformación de los torones, debido a los ciclos de carga y descarga, se realizaron pruebas de dureza Vickers a cada uno de los alambres de los siete torones. Adicional a estos torones se realizó pruebas de dureza Vickers a un torón nuevo como referencia, este torón fue identificado como EN-20110401-000.

Los resultados para cada probeta se presentan en gráficos de distribución de probabilidad y se incluyen en el Anexo II. Las distribuciones se obtuvieron con las cinco mediciones realizadas por alambre y, con estos datos, mediante el uso del software @Risk se elaboró su curva de distribución de probabilidad. Dado que existen diversas distribuciones estadísticas, para poder elegir cuál de ellas es la que se ajusta con mayor precisión, se escogió la distribución que presenta el menor valor del error estadístico de Chi-Cuadrada (χ^2), el cual queda como criterio de selección. Las tablas de selección de distribución se incluyen en el Anexo III.

Al conjuntar las distribuciones por tipo de prueba en un gráfico se observó que la distribuciones son muy parecidas para los torones sometidos a tensión y fatiga-tensión y el torón al cual no se le indujo esfuerzos. Mediante un análisis de medias se determina que: la media de las pruebas de tensión cae en la misma zona que las de fatiga-tensión (figura 4.7), por lo que se concluye que no existe un endurecimiento por deformación del acero de los torones en una prueba de fatiga a 100 000 ciclos y con las condiciones de carga anteriormente descritas. El análisis de medias se incluye en el Anexo IV.

En la figura 4.8 se compara la dureza Vickers de los torones con la dureza de las cuñas que se utilizaron en el sistema de anclaje para las pruebas de laboratorio. En esta figura también se observa que la dureza para los torones y para las cuñas es prácticamente la misma.

Bajo las condiciones de carga en que se realizaron las pruebas de fatiga no existe evidencia de un cambio en la dureza por deformación; sin embargo, se aprecia una mayor dispersión de datos en las muestras sometidas a tensión en comparación con las que fueron sometidas a la prueba de fatiga-tensión y a la muestra sin trabajo mecánico.

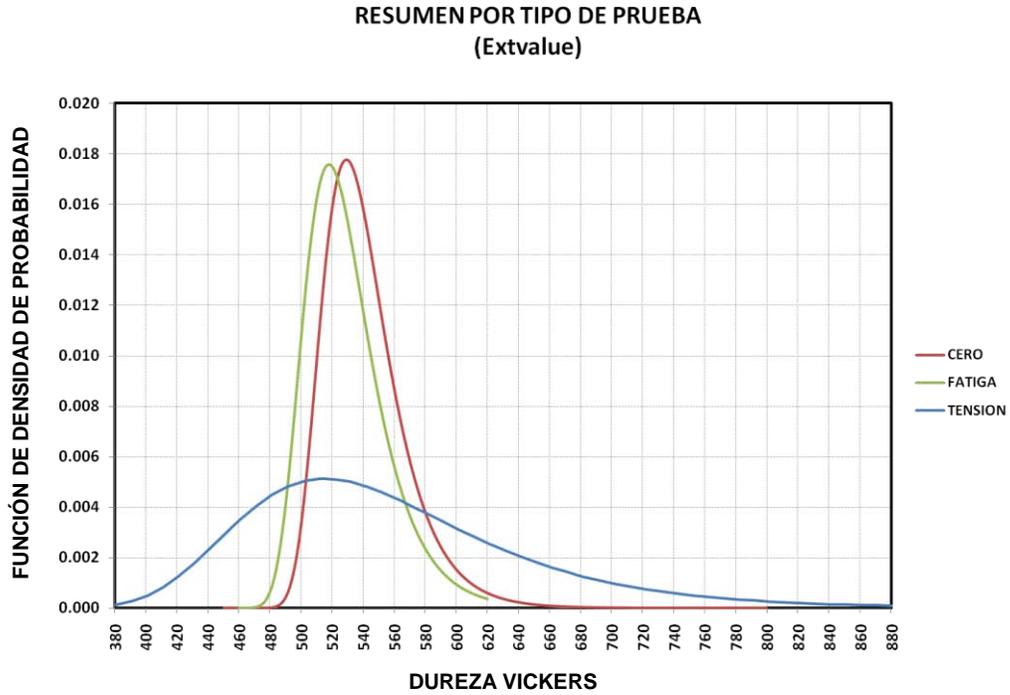


Figura 4.7 Comparativa de distribuciones de dureza Vickers por tipo de prueba

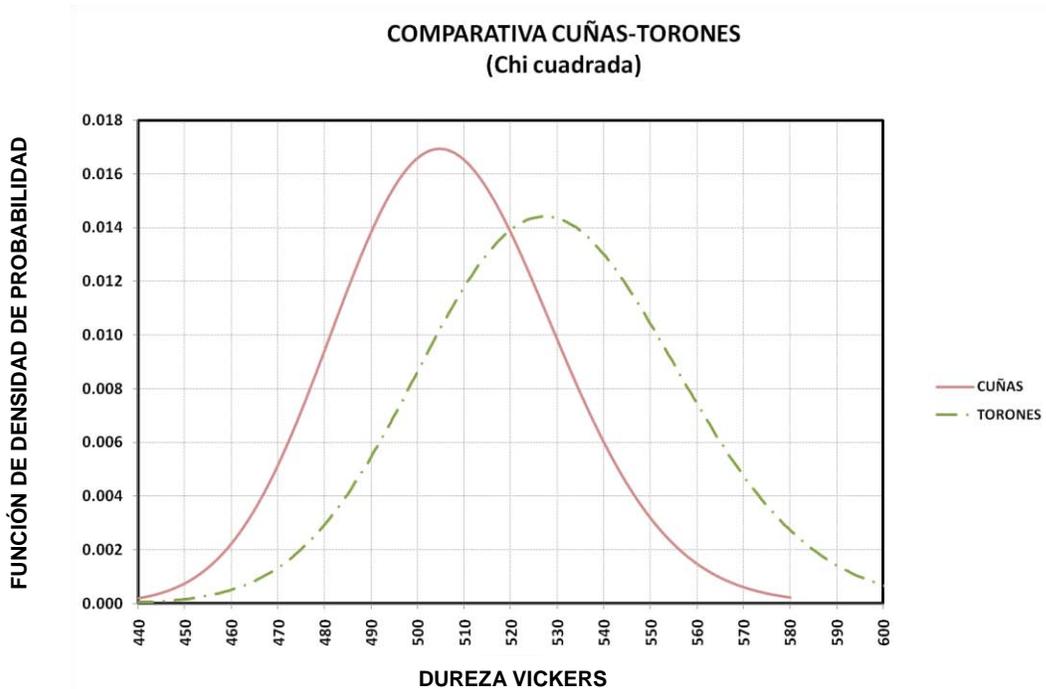


Figura 4.8 Comparativa de distribuciones de dureza Vickers entre el torón y las cuñas de anclaje

4.6 Análisis fractográfico

Una vez que en la prueba de tensión los torones fracturaron, se identificaron los alambres y se clasificaron con respecto a la morfología que presenta su superficie de fractura (esta clasificación es independiente de la nomenclatura asignada a cada alambre del torón). En general, se identificaron tres tipos diferentes de fractura:

- Fractura diagonal.
- Fractura de cono-copa.
- Fractura mixta.

Cada tipo de fractura cuenta con características diferentes, dependiendo del orden en el que los alambres fueron rompiendo y de acuerdo a los esfuerzos a los que estaban siendo sujetos. En la figura 4.9 se muestran las superficies de fractura que se presentan en el toron EN-20110401-001. Un análisis igual al descrito se realizó para los demás torones, los resultados se incluyen en la tabla 4.2.

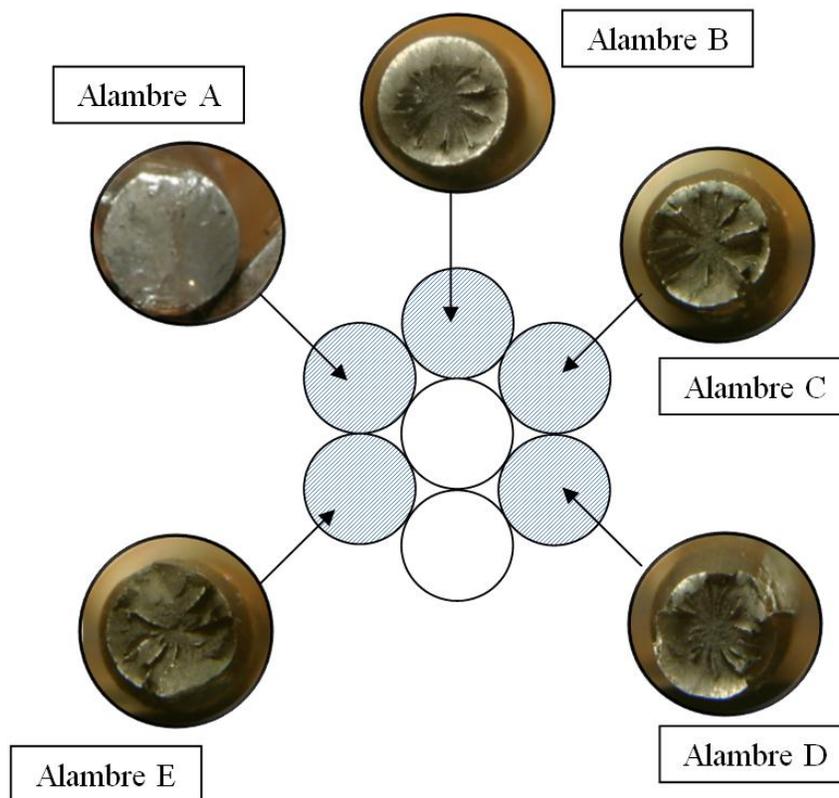


Figura 4.9 Identificación de la fractura de los alambres del torón EN-20110401-001, empleando el microscopio estereoscópico

En la tabla 4.2 se presenta de manera resumida los alambres fracturados por cada torón así como el tipo de fractura que presentan. Como se puede apreciar en la tabla, el alma del torón EN-20110401-007 rompió durante la prueba de tensión, siendo la única alma que falló, el análisis de la causa se expondrá en la sección de análisis de deterioro por fatiga.

Tabla 4.2 Identificación de las rupturas de los alambres para cada torón

Tipo de prueba	Probeta	Alambres fracturados	Tipo de fractura
Tensión	EN-20110401-001	A	Diagonal
		B	Copa-Cono
		C	Copa-Cono
		D	Copa-Cono
		E	Copa-Cono
Tensión	EN-20110401-002	A	Mixta
		B	Diagonal
		C	Diagonal
Tensión	EN-20110401-003	A	Mixta
		B	Diagonal
		C	Copa-Cono
		D	Copa-Cono
		E	Copa-Cono
Tensión	EN-20110401-004	F	Copa-Cono
		A	Mixta
		B	Diagonal
Tensión	EN-20110401-005	C	Diagonal
		A	Diagonal
		B	Diagonal
		C	Copa-Cono
		D	Copa-Cono
Fatiga-Tensión	EN-20110401-007	E	Copa-Cono
		E*	Diagonal
		F	Diagonal
		A	Mixta
		B	Mixta
		C	Copa-Cono
Fatiga-Tensión	EN-20110401-008	D	Mixta
		E	Diagonal
		F	Diagonal
		A	Copa-Cono
		B	Copa-Cono

*Este alambre corresponde al alma del torón.

4.6.1 Análisis de la fractura del tipo copa–cono

La ruptura de copa-cono es típica de los aceros que rompen a tensión pura, esta fractura se presenta cuando la resultante de las fuerzas de tensión se encuentra muy cercana al eje longitudinal del alambre. Por este motivo se puede determinar que los torones que rompen con esta superficie de fractura (figura 4.10) fueron los últimos en romper; es decir, conforme los alambres iban rompiendo los restantes se iban enderezando hasta casi coincidir la dirección de las fuerzas de tensión con en eje del alambre, dando a lugar a la superficie de fractura mencionada.

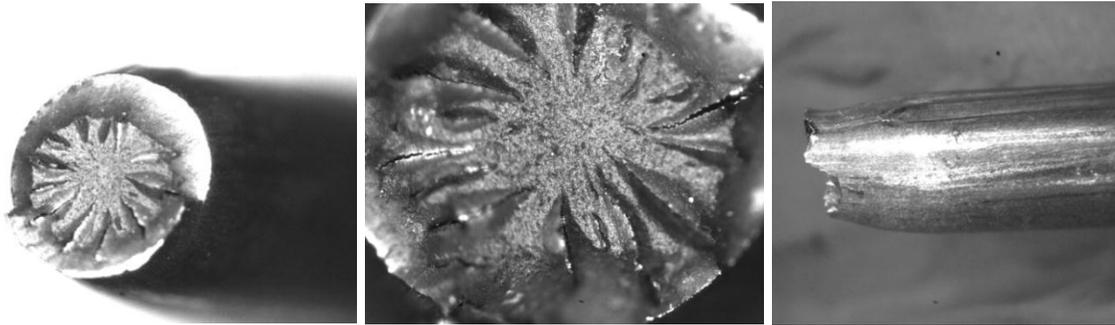


Figura 4.10 Fractografías del alambre EN-20110401-001-D tomadas con el microscopio estereoscópico

Es posible establecer la secuencia de daño para los alambres de los torones que rompen con este tipo de fractura debido a que, cerca de los bordes, existe una zona de deformación dúctil. Esto quiere decir que entre mayor sea esta zona el alambre sufre una mayor deformación, en contra parte se presenta una zona fibrosa correspondiente a la fractura súbita del alambre (figura 4.11), concluyendo que entre mayor sea esta zona el alambre menor oportunidad de sufrir una deformación producto de la carga.

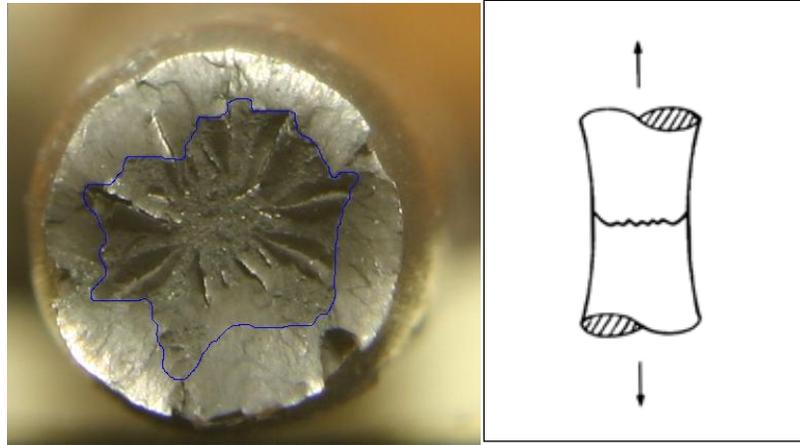


Figura 4.11 Medición de la zona fibrosa en un alambre con ruptura de copa-cono, tomada con el microscopio estereoscópico

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de la reducción de diámetro por causa de la deformación plástica que sufrieron los alambres antes de la ruptura. En la figura 4.12 se muestra una comparativa de las mediciones del diámetro reducido por deformación plástica, se hace notar que el comportamiento es similar tanto en pruebas de tensión pura como de fatiga-tensión.

Tabla 4.3 Resultados promedio para la ruptura de tipo Copa-Cono

Tipo de prueba	Probeta	Alambre fracturado	Diámetro de estricción [mm]	Área reducida [mm ²]	% de reducción
Tensión	EN-20110401-001	B	4.1	13.2	15.9
		C	3.9	12.0	19.6
		D	3.9	12.1	19.3
		E	3.8	11.9	20.1
Tensión	EN-20110401-002	A	4.1	13.3	15.5
		C	3.9	12.4	18.4
		D	3.9	12.0	19.8
Tensión	EN-20110401-003	E	4.0	12.7	17.3
		F	4.3	15.1	9.9
		A	4.3	14.5	11.7
Tensión	EN-20110401-004	C	4.3	14.5	11.7
		D	3.9	12.2	19.2
		E	4.3	15.1	9.9
Fatiga-Tensión	EN-20110401-007	C	4.0	12.6	17.8
Fatiga-Tensión	EN-20110401-008	A	4.0	12.8	17.1
		B	4.0	12.7	17.4

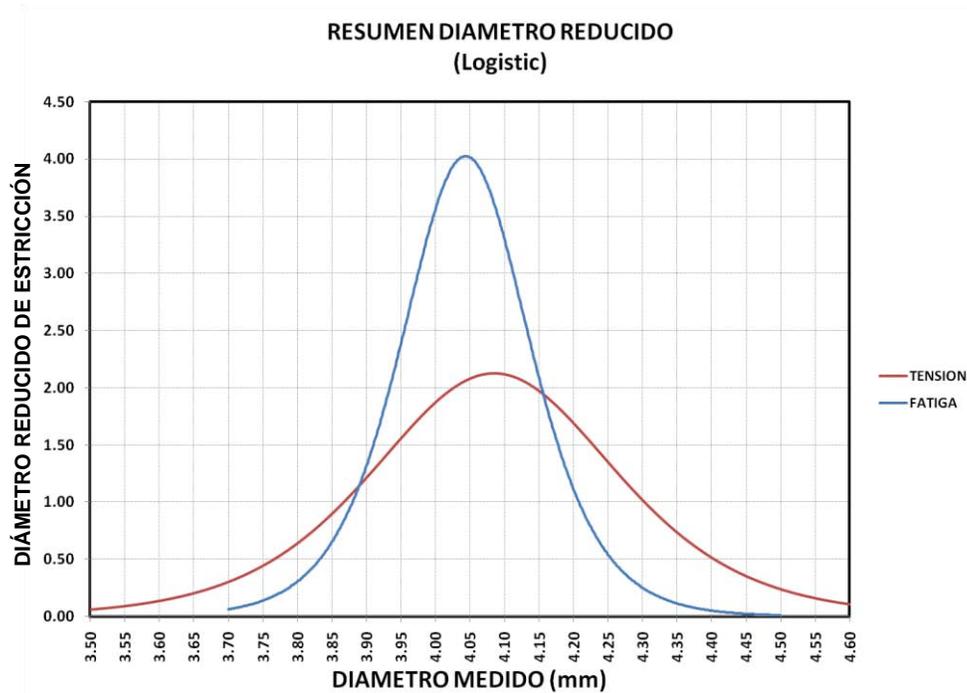
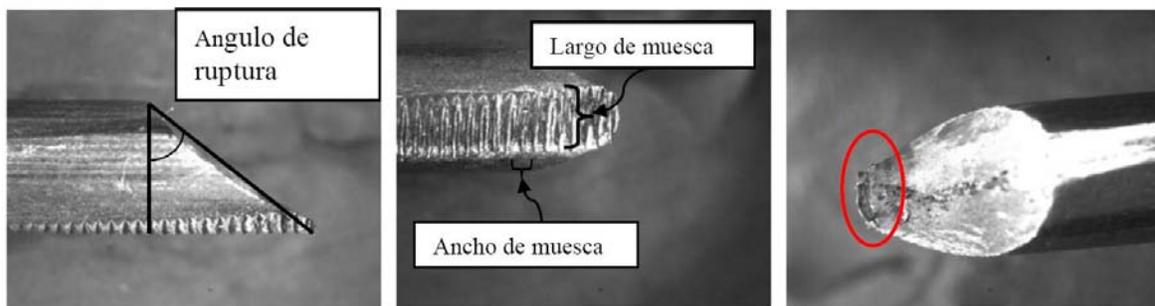


Figura 4.12 Comparativa del diámetro reducido por estricción

4.6.2 Análisis de la fractura del tipo diagonal

La fractura diagonal (figura 4.13), se presenta al finalizar la última indentación de las cuñas, el ángulo que presenta este tipo de fractura es variable y, al igual que en la fractura de tipo copa-cono, existe una relación entre su variabilidad y la secuencia de ruptura de los alambres del torón.

La existencia de una fractura diagonal tiene su origen en la topología del torón, donde los alambres helicoidales presentan un ángulo de inclinación con respecto al eje longitudinal del propio torón.



**Figura 4.13 Comparativa de distribuciones de dureza por tipo de prueba.
Fotografía tomada con el microscopio estereoscópico**

Al analizar la superficie de ruptura mediante microscopía óptica, se perciben ciertos patrones en forma de lengüetas en la superficie del torón. Estos patrones son típicos de rupturas a tensión donde las grietas van creciendo de un extremo hacia otro por motivo de una excentricidad en la aplicación de la fuerza de tensión (figura 4.14). La deformación en la punta que presenta en alambre EN-20110401-001-A refuerza la hipótesis

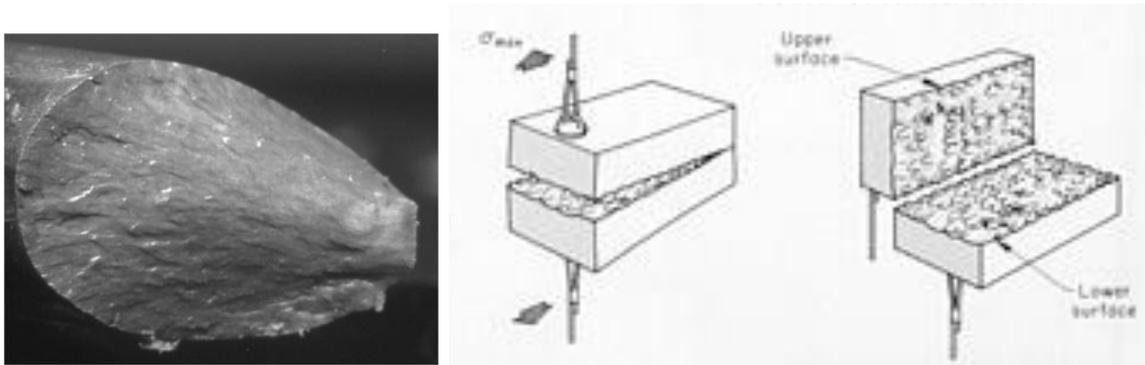


Figura 4.14 Ruptura de un elemento a tensión ante carga excéntrica

Para determinar la secuencia de ruptura que tuvieron los alambres que rompen con una fractura de tipo diagonal, se recurrió la siguiente deducción analítica: a medida que los alambres van rompiendo, los alambres restantes se reacomodan, cambiando así el ángulo de inclinación con respecto al eje del torón (figura 4.15) este ángulo se denominó como ángulo de ruptura (s). Como se puede observar en la figura, los primeros alambres en romper tendrán un ángulo de ruptura mayor, mientras que en los últimos alambres al romper el ángulo de ruptura será menor debido al propio estiramiento de los alambres. De acuerdo con este análisis cuando el ángulo de ruptura sea igual a cero el eje del alambre se encontrará en la misma dirección que el eje del torón por lo que se tendrá una superficie de ruptura del tipo cono-copa.

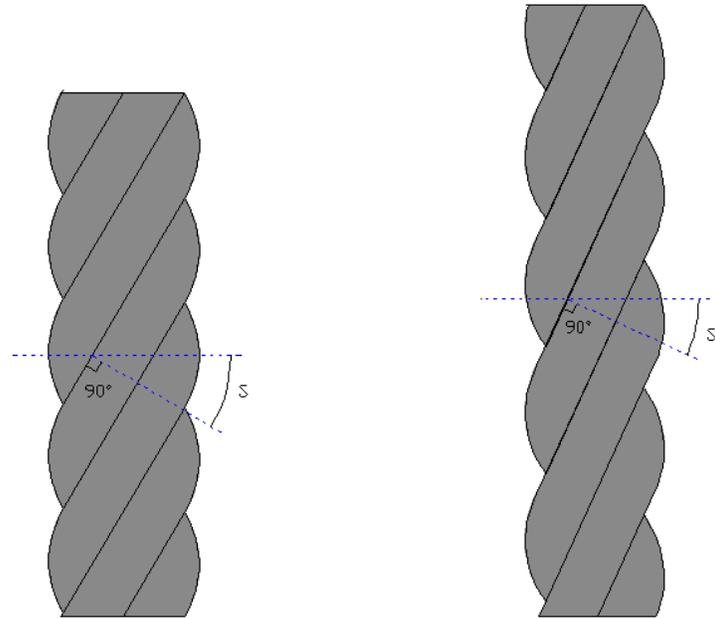


Figura 4.15 Variación del ángulo de ruptura

Para la fractura diagonal se analizó el ángulo de inclinación de la fractura, así como el ancho y largo de las muescas que se generaron por la penetración de las mordazas de las cuñas durante las pruebas de tensión y fatiga-tensión.

En la tabla 4.4 se muestra las variables medidas con análisis de imagen de la ruptura de tipo diagonal. En la figura 4.16 se muestran las distribuciones de las mediciones realizadas a los ángulos de ruptura, donde se hace notar que los mayores ángulos de ruptura se presentan en alambres de torones que fueron sometidos a cargas cíclicas. En las figuras 4.17 y 4.18 se muestran las distribuciones para las mediciones de las indentaciones o muescas causadas por las cuñas.

Tabla 4.4 Resultados para ruptura de tipo Diagonal

Tipo de prueba	Probeta	Alambre fracturado	Largo muesca [mm]	Ancho muesca [mm]	Ángulo fractura
Tensión	EN-20110401-001	A	2.489	0.386	40.953
Tensión	EN-20110401-002	B	2.286	0.454	42.638
		C	2.771	0.449	44.191
Tensión	EN-20110401-003	B	2.438	0.370	42.385
Tensión	EN-20110401-004	B	2.307	0.286	46.463
		C	2.418	0.303	46.493
Tensión	EN-20110401-005	A	2.569	0.382	40.378
		B	2.270	0.377	46.635
Fatiga-Tensión	EN-20110401-007	E*	-----	-----	42.685
		F	2.364	0.681	50.342
Fatiga-Tensión	EN-20110401-008	C	2.736	0.774	38.417
		D	2.778	0.777	43.100
		E	2.588	0.723	46.325
		F	2.785	0.688	54.971

Al observar la figura 4.16, se puede apreciar que existe una zona de fractura con media de 42 grados y alta dispersión (grupo 1); el grupo 2 corresponde a fracturas con ángulos entre 46 y 47 grados, y un tercer grupo con fracturas con ángulo mayores de 49 grados, estos últimos se registran únicamente en las probetas sometidas a la prueba de fatiga-tensión.

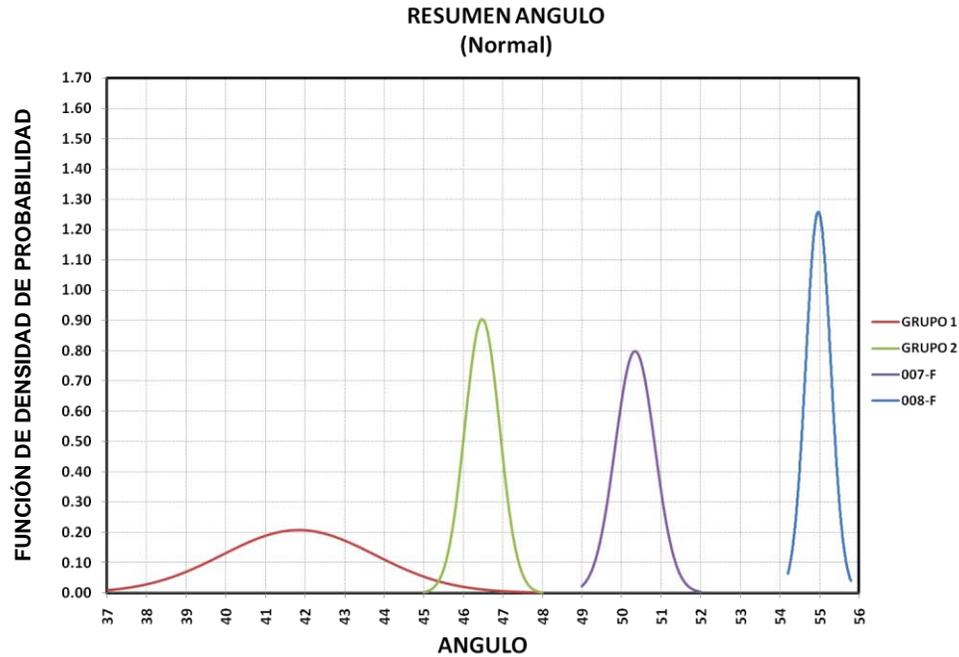


Figura 4.16 Comparativa del ángulo de ruptura por falla diagonal

En la figura 4.17 y 4.18, se observa que existe diferencia en la huella de la muesca (producto del trabajo mecánico del sistema de anclaje), en el cual se aprecia que las marcas producidas en las pruebas de fatiga-tensión son mayores a las que se producen en la prueba de tensión.

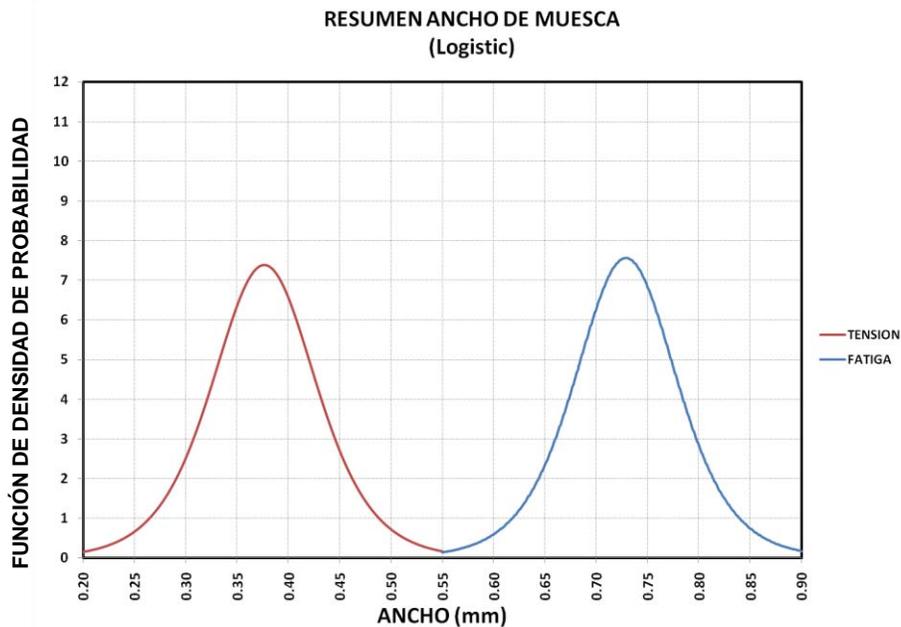


Figura 4.17 Comparativa del daño causado por la incrustación de la mordaza a lo ancho

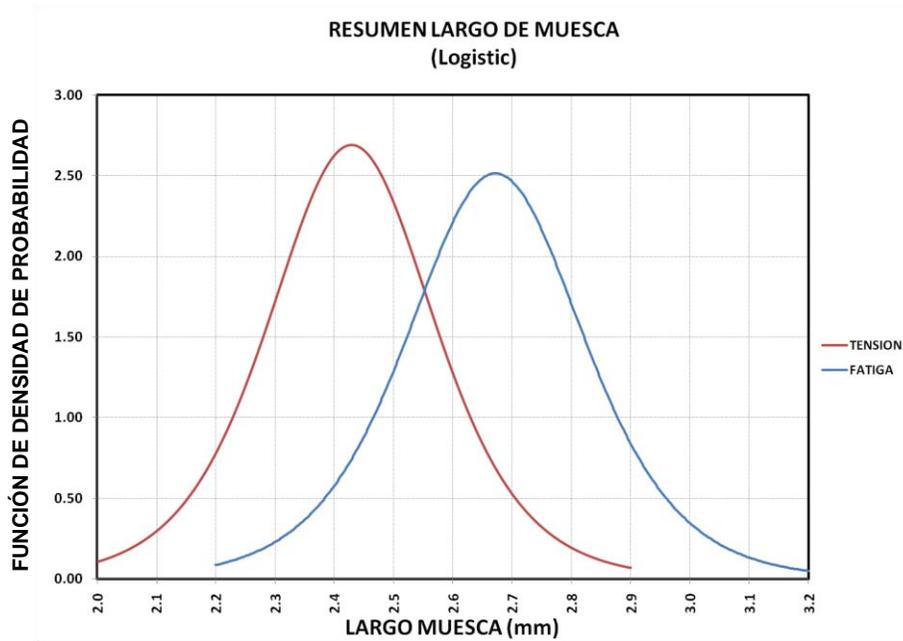


Figura 4.18 Comparativa del daño causado por la incrustación de la mordaza a lo largo

4.7 Análisis del deterioro por fatiga

La existencia de daño por fatiga se demostró analizando la superficie de ruptura de los torones mediante microscopio electrónico de barrido. Los alambres de los torones que se analizaron por microscopio electrónico son los que en la inspección visual presentaron algún indicio de daño. Cabe señalar que no en todos los alambres se encontró evidencia de daño, los alambres en los cuales se encontró daño se muestran y describen a continuación.

En las fractografías obtenidas tras la fatiga y posterior fractura de los alambres, se observaron las superficies de fractura, en éstas se determinó que el deterioro se encontró cercano a los bordes del alambre, mismos que presentó en repetidas ocasiones desgarramiento del material (figura 4.19). Debido al número de ciclos y al rango de cargas en las que se realizaron las pruebas no fue posible la formación de las típicas marcas de playa en la superficie de fractura, pero se presentan estrías las cuales son indicaciones de daño por fatiga.

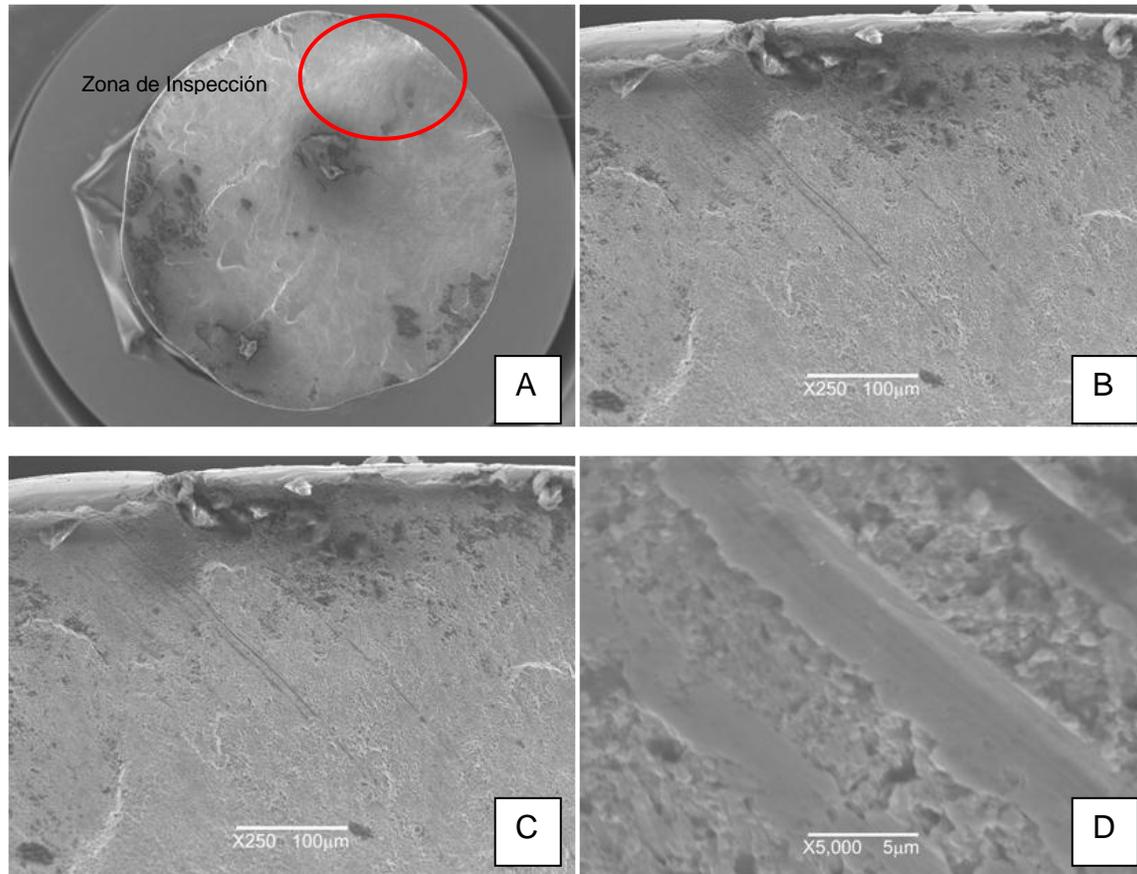


Figura 4.19 Fractografías del alambre EN-20110401-007-E1 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

La figura 4.20 muestra la contraparte del alambre EN-20110401-007-E1 en la cual se pueden apreciar estrías por fatiga en dos zonas diferentes, por lo que se determina que existen diversas zonas de iniciación de grietas, las cuales pueden ser un defecto de fabricación durante el proceso de colado o del trefilado del alambre. Se puede observar en la figura 4.20 (b) y figura 4.20 (c) que la textura de la superficie cambia notablemente en la zona donde se presentó el deterioro la cual es más lisa. La figura 4.20 (e) y la figura 4.20 (f) muestra un patrón de estrías diferente pero que deja en claro la evidencia de fatiga.

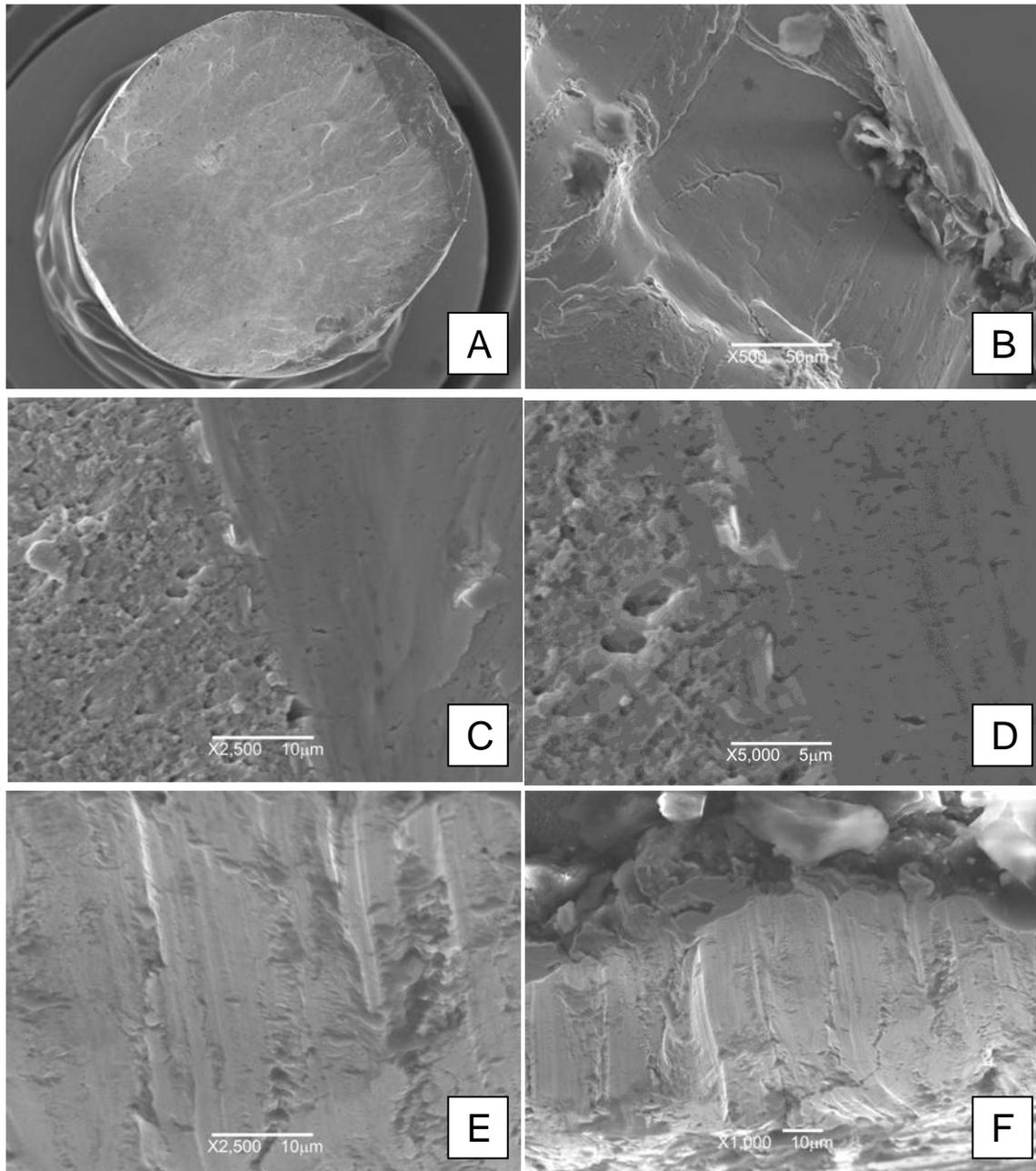


Figura 4.20 Fractografías del alambre EN-20110401-007-E2 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

Cabe aclarar que en este caso el alambre EN-20110401-007-E, es un alambre llamado alma el cual se encuentra al centro del torón, muestra que los concentradores de esfuerzos, debidos a defectos en el proceso de manufactura del alambre o del torón, juegan un papel importante en el deterioro de los torones por fatiga en este tipo de alambres. Sin embargo, no es lo único, para el caso de los alambres exteriores del torón, un concentrador importante de esfuerzos son las muescas provocadas por el sistema de anclaje, el cual provoca zonas en donde

inician o terminan las fallas, ya que en todos los casos (salvo en el alma), la fractura involucra la entalla provocada por las cuñas.

En el torón EN-20110401-008 se registró la fractura de varios alambres los cuales se describen a continuación. Para el alambre EN-20110401-008-C1 se puede apreciar una grieta corta en la zona la marca de indentación del sistema de anclaje, como se muestra en la figura 4.21, la cual crece en dirección axial al alambre con una longitud de 500 micrómetros.

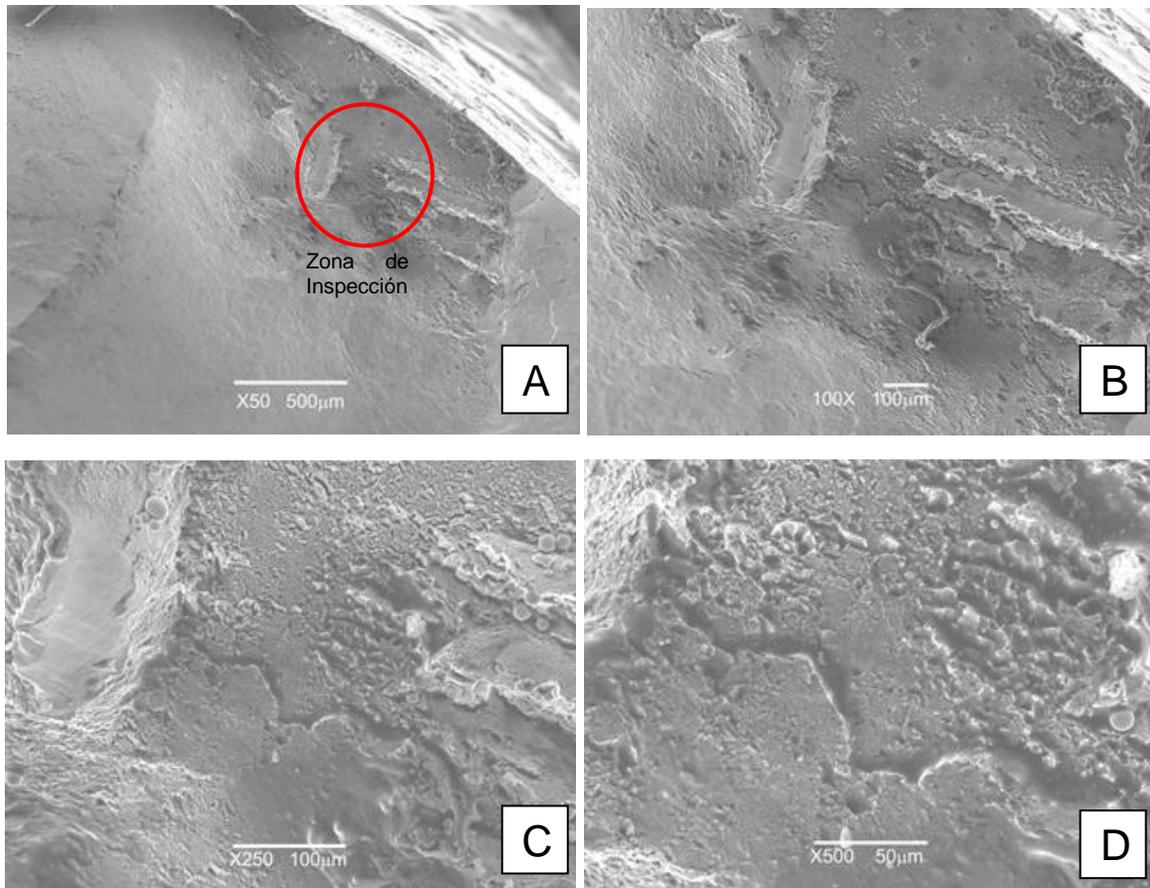


Figura 4.21 Fractografías del alambre EN-20110401-008-C1 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

En este alambre se presentaron estrías por fatiga en la misma zona como muestra la figura 4.22 (a) mientras que en la figura (b) se aprecia que las estrías aparecen en zonas muy pequeñas y no de manera continua.

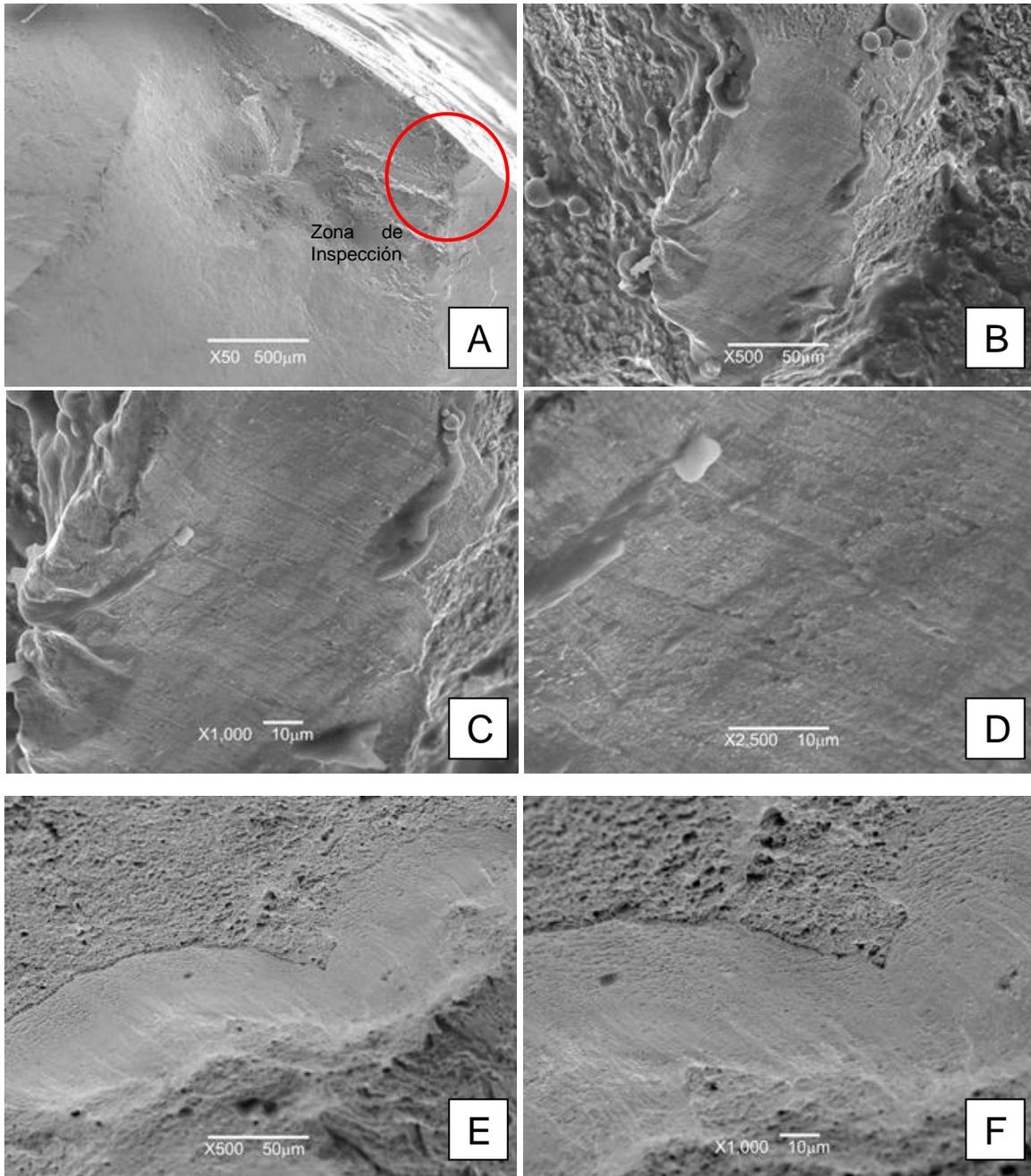


Figura 4.22 Fractografías del alambre EN-20110401-008-C1 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

Para el alambre EN-20110401-008-D1, se ubicaron estrías así como la presencia de una grieta en la zona que indica la figura 4.23 (a), la cual corresponde a las cercanías de las indentaciones. La superficie de fatiga presenta en este caso una textura más porosa que la encontrada en la figura 4.22, como puede apreciarse en la figura 4.23 (c) y la figura 4.23 (d).

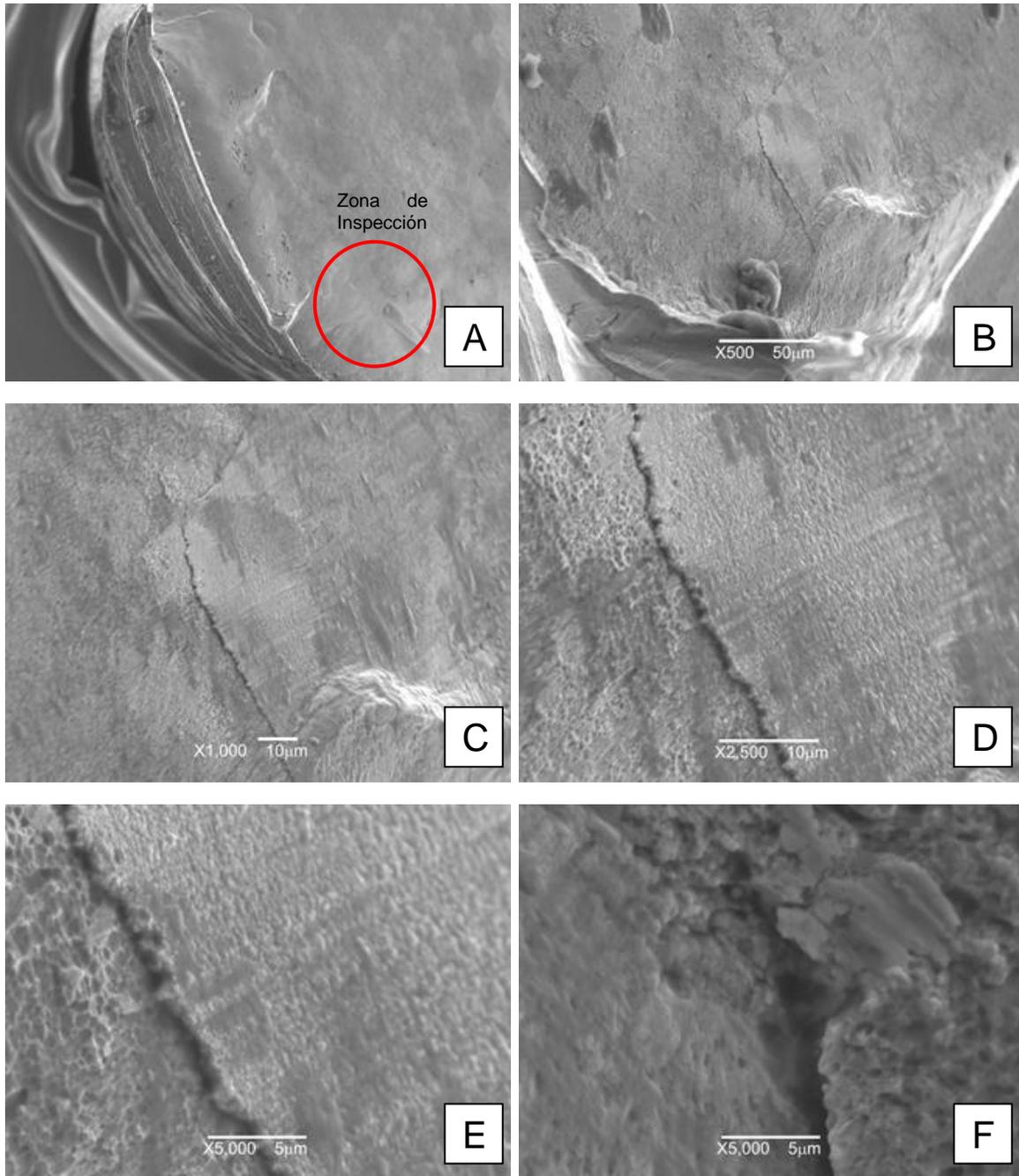


Figura 4.23 Fractografías del alambre EN-20110401-008-D1 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

En la figura 4.24 se muestra la contraparte de la muestra EN-20110401-008-D1, en estas fractografías se puede apreciar que existe un cambio de tonalidad en la zona afectada por fatiga (figura 4.24 a). Acercamientos realizados a 250 y 500 aumentos muestran que en la superficie de ruptura se encuentran las estrías características que evidencian el daño por fatiga en este alambre (figuras 4.24 c, 4.24 d, 4.24 e y 4.24 f).

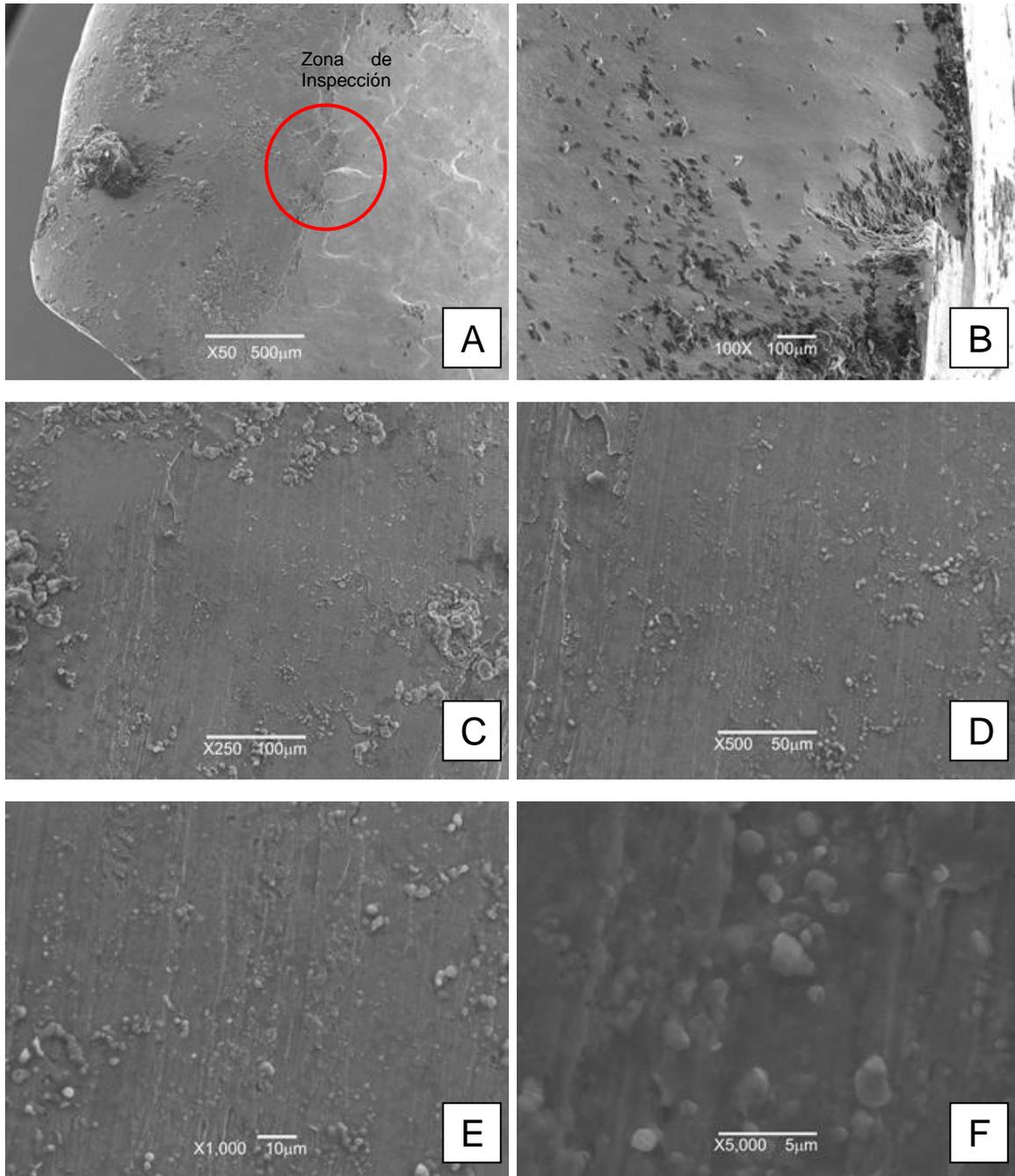


Figura 4.24 Fractografías del alambre EN-20110401-008-D2 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

Otro alambre en el que se identificaron estrías fue el EN-20110401-008-F2, en este alambre, que se muestra en la figura 4.25, se encontraron las marcas en la zona cercana al borde como lo muestra la figura 4.25 (a), la superficie lisa que típicamente se presentó en los demás alambres se repite en esta zona. Amplificaciones a 2 500 y 5 000 aumentos se muestran en las figuras 4.25 (e) y 4.25 (f) respectivamente.

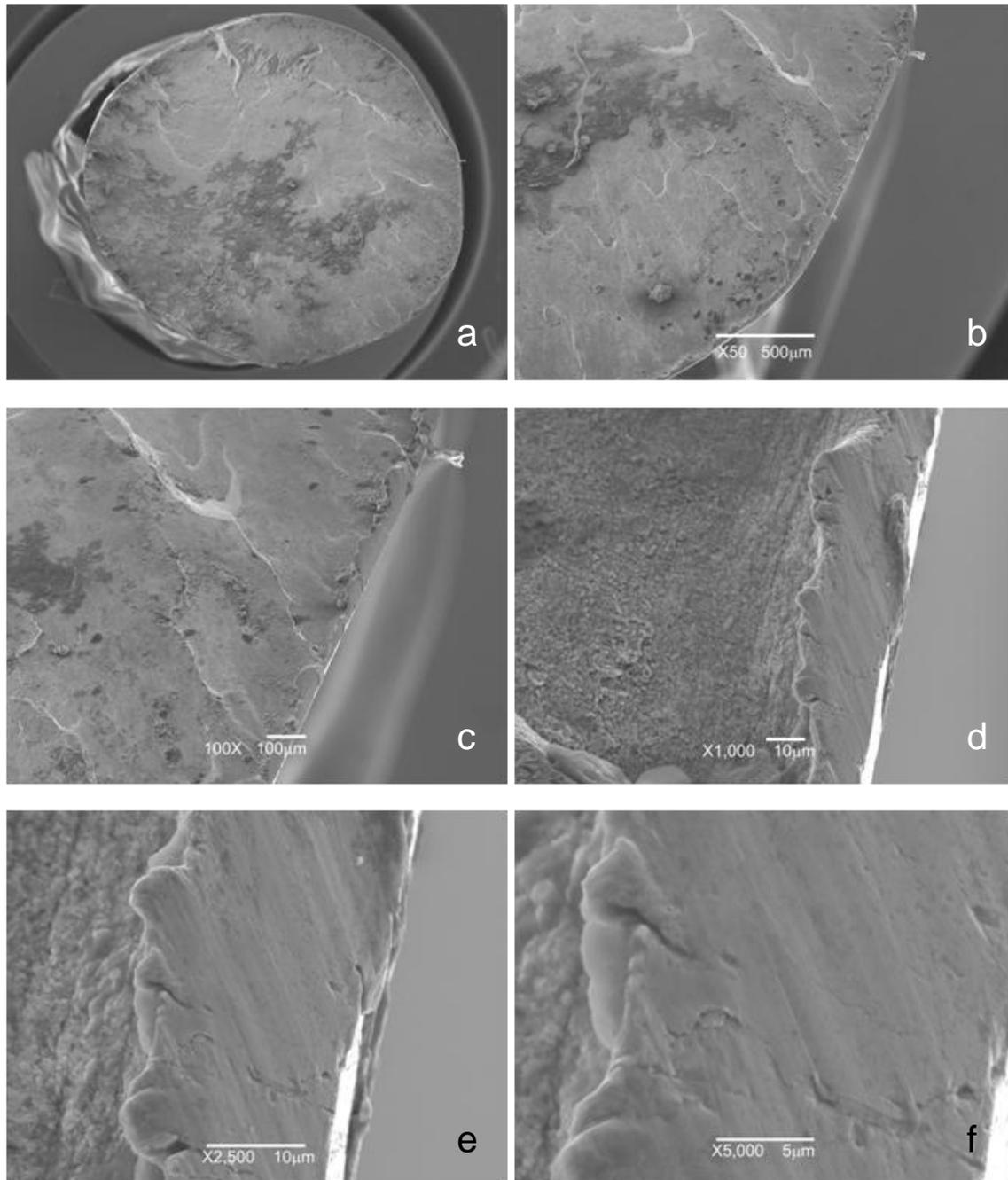


Figura 4.25 Fractografías del alambre EN-20110401-008-F2 tomadas con el microscopio electrónico de barrido

4.8 Análisis de la secuencia de ruptura

Cuando se les aplica una carga, los alambres helicoidales del torón se comienzan a enderezar y una vez que se acomodan, el torón comienza a trabajar de una manera elástica lineal. Debido a la topología del cable y al ángulo de enrollamiento de los alambres, los esfuerzos principales de tensión se encuentran desviados con

respecto a su eje, estos esfuerzos de tensión serán perpendiculares a la superficie de ruptura de los alambres que presentan ruptura diagonal. Por medio del microscopio metalográfico, se comprueba que la ruptura a tensión ocurrió por este tipo de esfuerzos.

Una vez que rompe el primer alambre, éste lo hace con una fractura del tipo diagonal, inmediatamente se da un reacomodo de los alambres y debido a esto las siguientes fracturas podrán ser, además del tipo diagonal, mixtas o de Cono-Copa. Si la siguiente fractura es de tipo diagonal, el ángulo de inclinación será menor al ángulo de la primera ruptura. Cada vez que exista una ruptura, los alambres se reacomodan hasta que ocurran las rupturas finales, las cuales siempre son del tipo Cono-Copa ya que este tipo de rupturas se da por sobrecarga debido a que existe un incremento repentino del esfuerzo de tensión en dichos alambres. En este tipo de fracturas existe una deformación plástica antes de que se dé la ruptura final. El mecanismo de la ruptura tipo mixta se da por que el incremento de esfuerzos súbito ocurre cuando la fractura diagonal está en proceso, este tipo de alambres presentan fracturas diagonales y zonas perfectamente identificables como zonas de fractura por tensión, la secuencia de ruptura para el torón EN-20110401-001 se ilustra en las figuras 4.26 y 4.27.

Este mecanismo de falla es válido para los dos tipos de pruebas realizadas, por lo tanto se puede afirmar que los cables que reciben mayor daño por fatiga son los cables que presentan ruptura diagonal. Los resultados obtenidos indican que incluso el ángulo de ruptura se ve afectado por la acumulación de daño en el alambre.

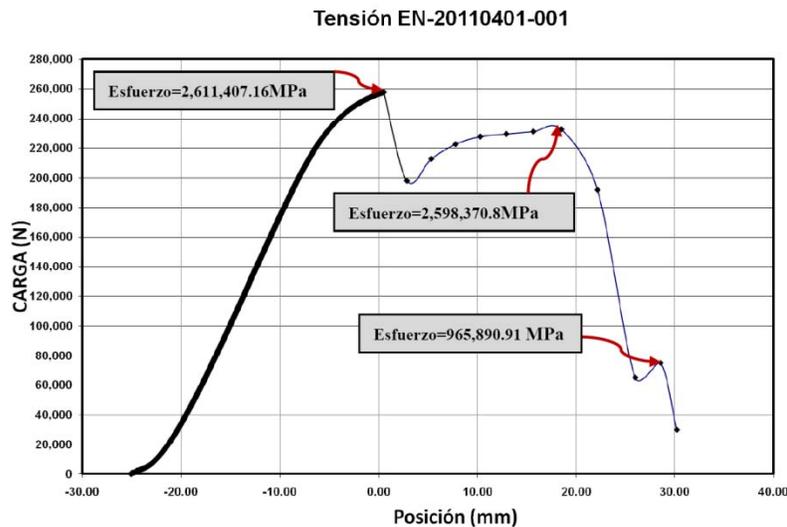


Figura 4.26 Curva de Posición/Carga con esfuerzos de la probeta EN-20110401-001

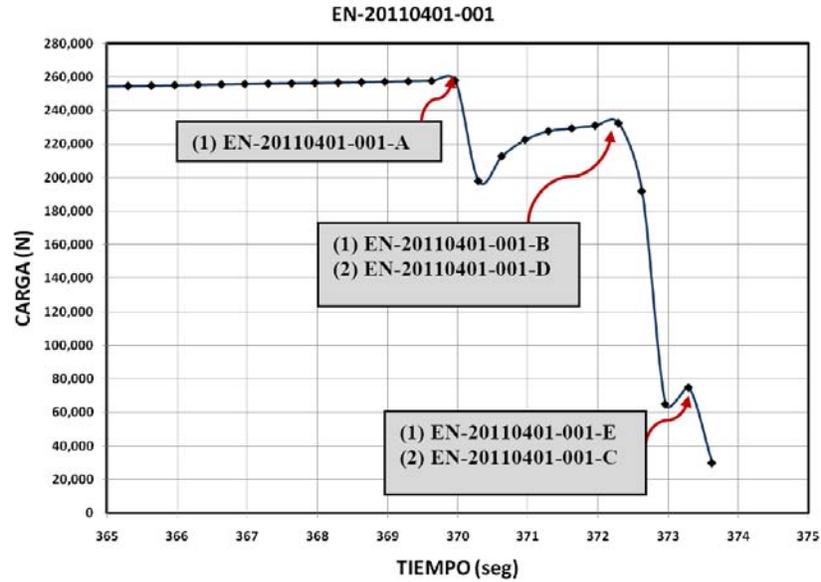


Figura 4.27 Curva de Tiempo/Carga con secuencia de ruptura de la probeta EN-20110401-001

4.9 Modelo de deterioro

Como parte de este estudio se plantea un modelo de deterioro acumulado para cables de presfuerzo. Los procedimientos más comunes están basados únicamente en el concepto de las curvas del esfuerzo aplicado (S) y el número de ciclos (N), denominadas normalmente como curvas S-N. Un modelo de daño necesita, además de definir la variable o variables de daño, una ley de evolución de daño.

En nuestro caso se ha elegido una estrategia al nivel de la sección fisurada para definir el umbral de daño (figura 4.28). De acuerdo con la regla de Palmgren y Miler, la falla se produce sí:

$$\Sigma(n/N_c) = 1 \quad (4.1)$$

En donde n es el número de ciclos aplicados en una condición particular de tensión y N_c es el número de ciclos críticos que causarían la falla en fatiga en esa misma condición de tensión.

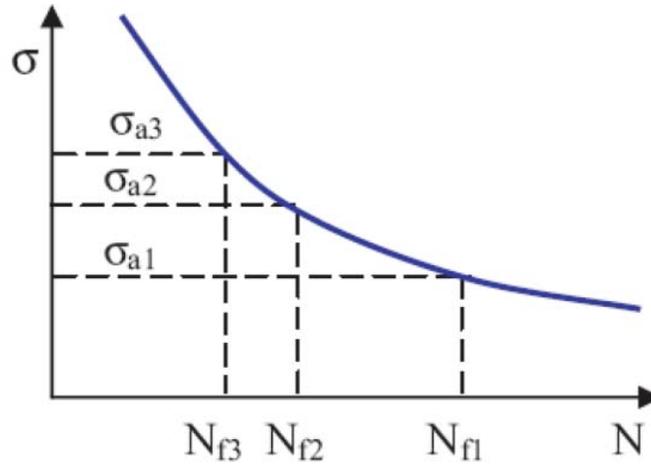


Figura 0.28 Curva del umbral de daño por fatiga

Con un razonamiento análogo, se plantea modificar la ecuación de Palgrem y Miler por la siguiente:

$$\Sigma(a/A_c)=1 \dots\dots\dots(4.2)$$

En donde a es el área dañada de la sección transversal de un alambre de un torón y A_c es el área crítica en el cual se presenta la falla por fatiga en esa misma condición de tensión.

La ruptura se produce cuando el daño alcanza un valor de 1. En el modelo numérico se evalúa el daño de acuerdo al incremento del área perjudicada.

5 Conclusiones

A través de la realización de este proyecto de investigación se observó que existe una diferencia en las propiedades mecánicas de tensión entre los torones de siete hilos sin recubrimiento que fueron sometidos a una prueba de tensión y los que fueron sometidos a una prueba de fatiga-tensión. Los torones que fueron sometidos a una prueba de fatiga a 100 000 ciclos a carga constante mostraron una reducción del 13.06% del esfuerzo último a la tensión y 40.24% de menor desplazamiento de ruptura del primer cable con respecto a los torones que no fueron sometidos a esta prueba.

En la prueba de tensión para los dos tipos de probetas, se observó que la ruptura de los alambres de los torones no es simultáneo y se pudo establecer la secuencia de ruptura de los torones por medio del análisis de la superficie de fractura de cada uno de los alambres y mediante al análisis de los videos de las pruebas. De estos análisis, se determinó que existen tres tipos de fractura en los alambres: fractura diagonal, fractura de cono y copa y fractura mixta (la cual es una mezcla de los dos tipos principales, es decir, presentan una superficie de fractura diagonal y otra de copa y cono).

Analíticamente, se determinó que los torones con tipo de fractura diagonal son los primeros alambres en fracturar; además, se observó que los alambres que presentan un mayor ángulo de fractura rompen en primer lugar, esto debido a que presentan menor área transversal a la carga de tensión, a medida que los alambres remanentes se reacomodan en ángulo de ruptura es menor. Los siguientes alambres en fracturarse son los que presentan una fractura mixta. La fractura de tipo cono y copa es una fractura súbita producto de la sobrecarga por tensión que experimentan los alambres después de fracturarse los primeros alambres, ya sea por fracturas diagonal o por fractura mixta, este comportamiento se observó en los dos tipos de pruebas. Se puede observar que este proceso de reacomodo sucede en un periodo relativamente corto de tiempo de máximo 3 segundos, desde que sucede la primera fractura.

Tanto en la pruebas de tensión como en las de fatiga-tensión, se observó que el principal punto de iniciación de daño es el causado por las mordazas de las cuñas del sistema de anclaje, y otro punto de iniciación son las provocadas por discontinuidades en el alambre provocado en el proceso de trefilado como pueden ser porosidades, constricciones, inclusiones, entre otros. En el caso de fatiga, estos puntos determinan las zonas de iniciación de grietas, que conforme avanza la propagación pueden alcanzar el tamaño de área crítica que llevará a la falla del alambre.

En las pruebas de fatiga-tensión y por medio del microscopio electrónico de barrido, se encontró como principal evidencia de daño cambios de rugosidad en la superficie de fractura (cambios de tonalidad) y al observar estas zonas a 500 aumentos se encontraron marcas de estrías.

El daño causado por el trabajo mecánico de las cuñas de apriete sobre el torón es el principal concentrador de esfuerzos, esto es de destacar debido a que en todos los casos las fracturas se registraron en esta zona (salvo el caso de un alambre central), también se observó una diferencia en las marcas (ancho y largo) de las cuñas de apriete, en el caso de los torones sometidos a fatiga-tensión, las marcas presentan una mayor longitud que las que presentan los torones sometidos únicamente a tensión y se encontraron zonas de daño acumulado por el proceso de fatiga.

En el caso del alambre central de un torón, se observaron dos zonas con discontinuidades (en este caso porosidades), lo cual originó dos zonas de propagación de grieta, por este motivo al aplicarle la carga de tensión se fracturó con un tipo de fractura diagonal a 42 grados.

Como trabajo futuro se propone realizar las pruebas de fatiga a en este tipo de torones hasta la falla bajo las mismas condiciones de prueba que se utilizaron en este estudio, con la finalidad de analizar la superficie de fractura y determinar el área crítico de grieta, con lo cual se puede hacer un modelo de predicción de vida del torón.

Bibliografía

American Society For Testing & Materials ASTM A1007, ASTM 2006.

American Society For Testing & Materials ASTM A416, “Especificación Normalizada para torón de acero, de siete alambres sin recubrimiento para concreto presforzado”, ASTM 2006.

American Society For Testing & Materials ASTM E92-82, “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”, ASTM 2003.

Bleidys Cecilia y Blaschke Collado. “Evaluación Experimental de dos métodos para retardar el crecimiento de grietas en la fatiga Axial”, Universidad del Norte, Barranquilla 2006.

Carrión, Francisco Javier, Jaime Hernández Rivera y Miguel Antonio Acosta Esqueda, “Estudios de Corrosión en Puentes de Concreto Pre-esforzado”. IMT 1999.

Carrión, Francisco Javier, Juan Antonio Quintana, José Alfredo López, Alexander Balankin y Didier Samayoa, “Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados”. IMT 2006.

Carrión, Francisco Javier; Juan Antonio Quintana; José Alfredo López, Alexander Balankin y Didier Samayoa. “Metodologías de Inspección no Destructiva Aplicables a Sistemas de Gestión de Puentes”. IMT 2006.

Costello, George A. “Mechanics of Wire Rope”. Wire Association International Atlanta, Georgia, 2003.

Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. “Guía para Inspección de Puentes”, Ministerio de Transportes y Comunicaciones de la República del Perú 2006.

Espejo, Edgar y Juan Carlos Martínez. “Caracterización de los modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica”. Ingeniería e Investigación vol. 27 No. 001. Universidad de Colombia 2007.

Espejo, Edgar y Martínez Juan Carlos. “Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica”, Universidad Nacional de Colombia. 2007 pp. 77-83

Fabián Navarro, Rafael Manuel. “Diseño y análisis de Presupuestos para elementos de concreto Pretensado”. Instituto Politécnico Nacional 2009.

Gómez V., Humberto y Wilches B., José, “Mecanismos y modos de falla en cables metálicos estructurales”. Ingeniería y Desarrollo, No.014 2003, pp 125-140.

González, B., J.C. Matos y J. Toribio, “Fisuración por fatiga en alambres de acero de pretensado”, Universidad de Salamanca, 2005.

González, Jorge Luis. “Metalúrgica Mecánica”. Editorial Limusa. México D.F. 1999.

Herrera Cevallos, Marlon. “Diseño general de puentes atirantados”. CEINCI. 2007.

Iphorski, Miguel y R.J. Acuña. “Fractografía, Aplicación al Análisis de Fallas”, Comisión Nacional de Energía Atómica. República de Argentina, 1988.

J., Venegas Colin; J. J. Razo García et. al., “Aplicación de la Teoría de Esfuerzos en cables Trenzados en conductores Eléctricos”, Universidad de Guanajuato, 2009.

Johnson, Stacy, “Analytical model of fiber reinforced post-tensioned concrete anchorage zones”. The Florida State University. 2006.

Manual ANIPPAC e Instituto de Ingeniería de la UNAM “Capítulo 4: Diseño de puentes con elementos prefabricados y presforzados”.

Manual Emcocables. “Manual de Usos y Recomendaciones”. Emcocables 2008.

Manual M-PRY-CAR-6-01-008/04, “Consideraciones para puentes especiales”, SCT 2004.

Manual Unión. “Manual del Usuario de Cables”. WireCoWorkGroup 2008.

Metals Handbook Vol. 12, “Fractography”, ASM International 1987.

Metals Handbook Vol. 9, “Metalography and Microstructures”, ASM International 1987.

Montgomery, Douglas C. “Diseño y Análisis de Experimentos”. Grupo editorial Iberoamericana. Estados Unidos de América 1991.

Moreno Morales, Ma. Belén. “Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias”. Universidad de Málaga 2002.

Norma M-PRY-CAR-6-01-008/04, “Consideraciones para Puentes Especiales”, SCT 2004.

Norma N-PRY-CAR-6-01-001/01, “Ejecución de Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares”, SCT 2001.

Ossa, E.A. y M.A. Paniagua. “Análisis de falla en cable de acero”. Ingeniería y Ciencia 2005. ISSN 1794-9165 Vol. 1 No. 2 pp. 97-103.

Popov, Egor, E. "Mecánica de Sólidos". Prentice Hall, 1999.

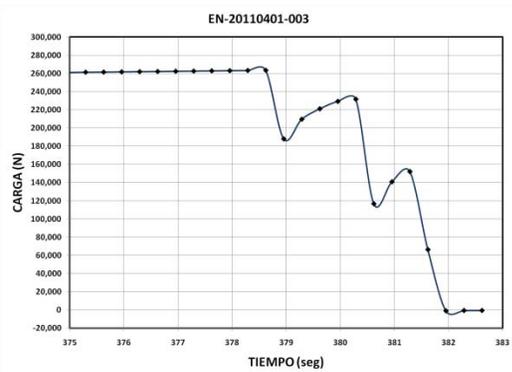
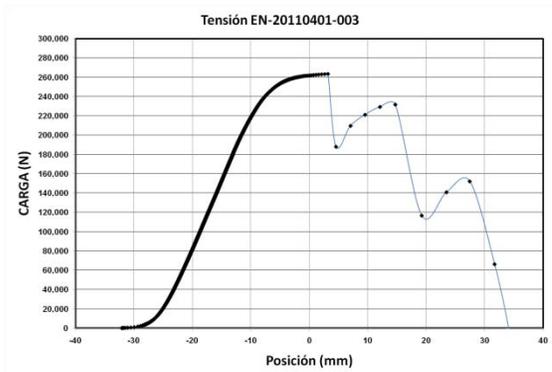
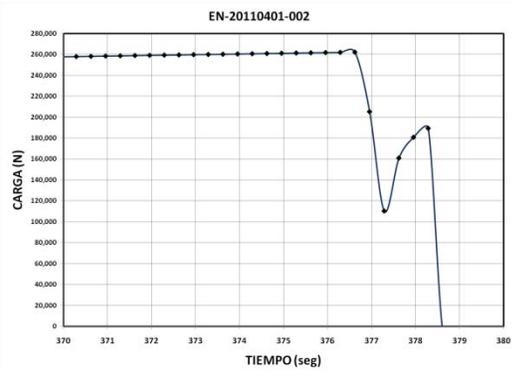
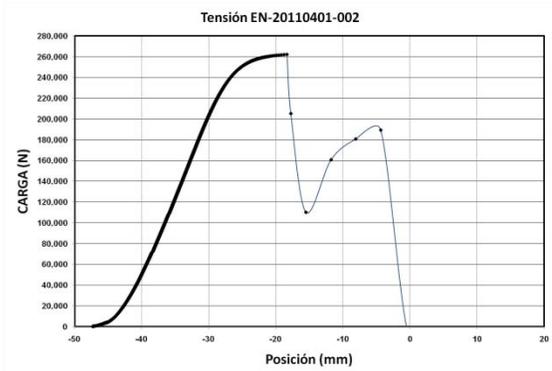
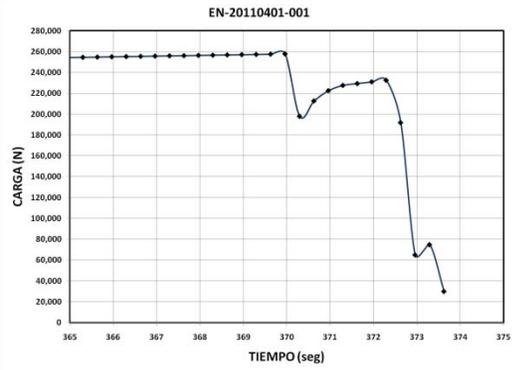
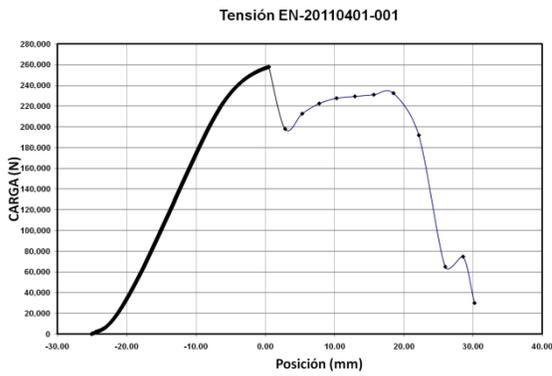
Post-tensioning Institute PTI, "Recommendations for Stay cable design, test and installation". PTI 2001.

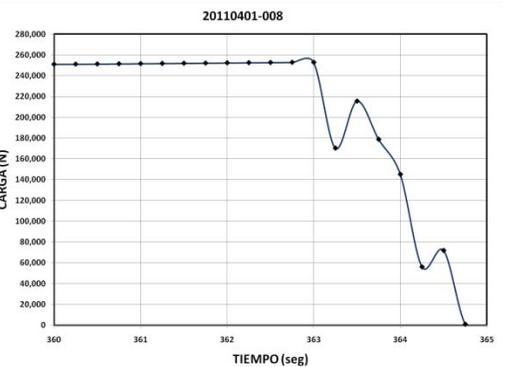
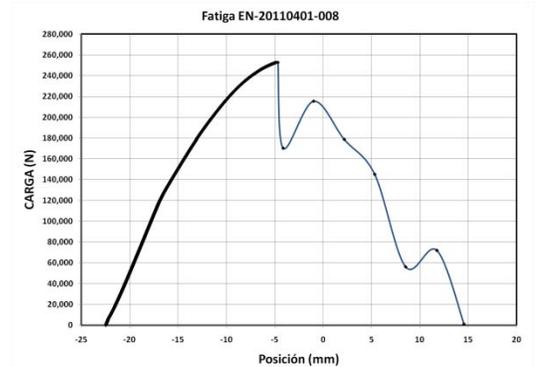
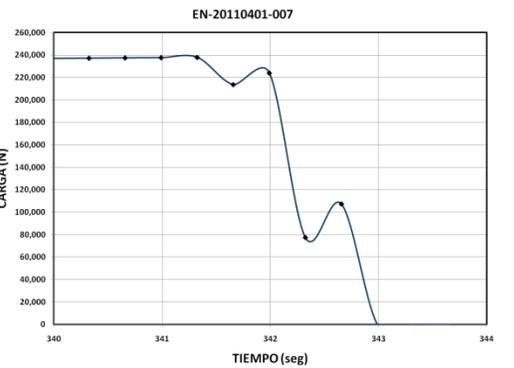
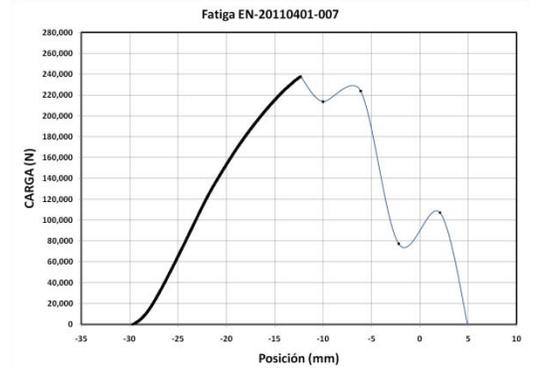
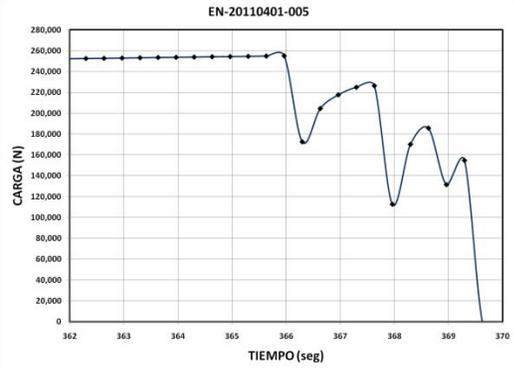
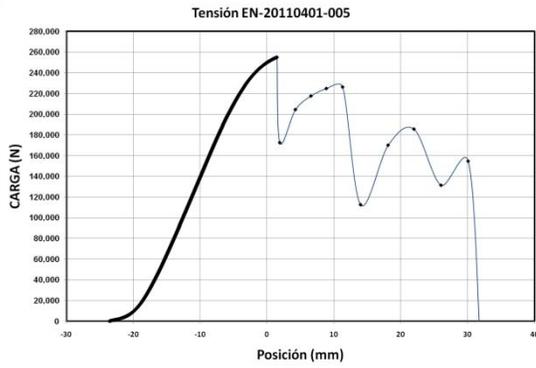
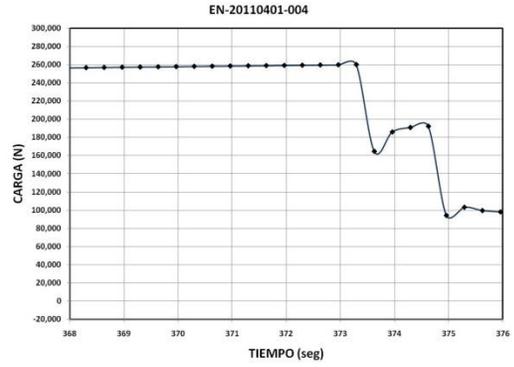
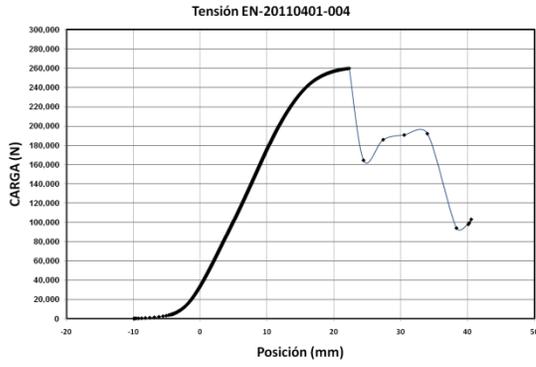
Samayoa Ochoa, Didier. "Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados". Tesis de Doctorado en Ciencias, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME-IPN), México 2005.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Base de datos del Sistema de Puentes Mexicanos SIPUMEX", SCT 2010.

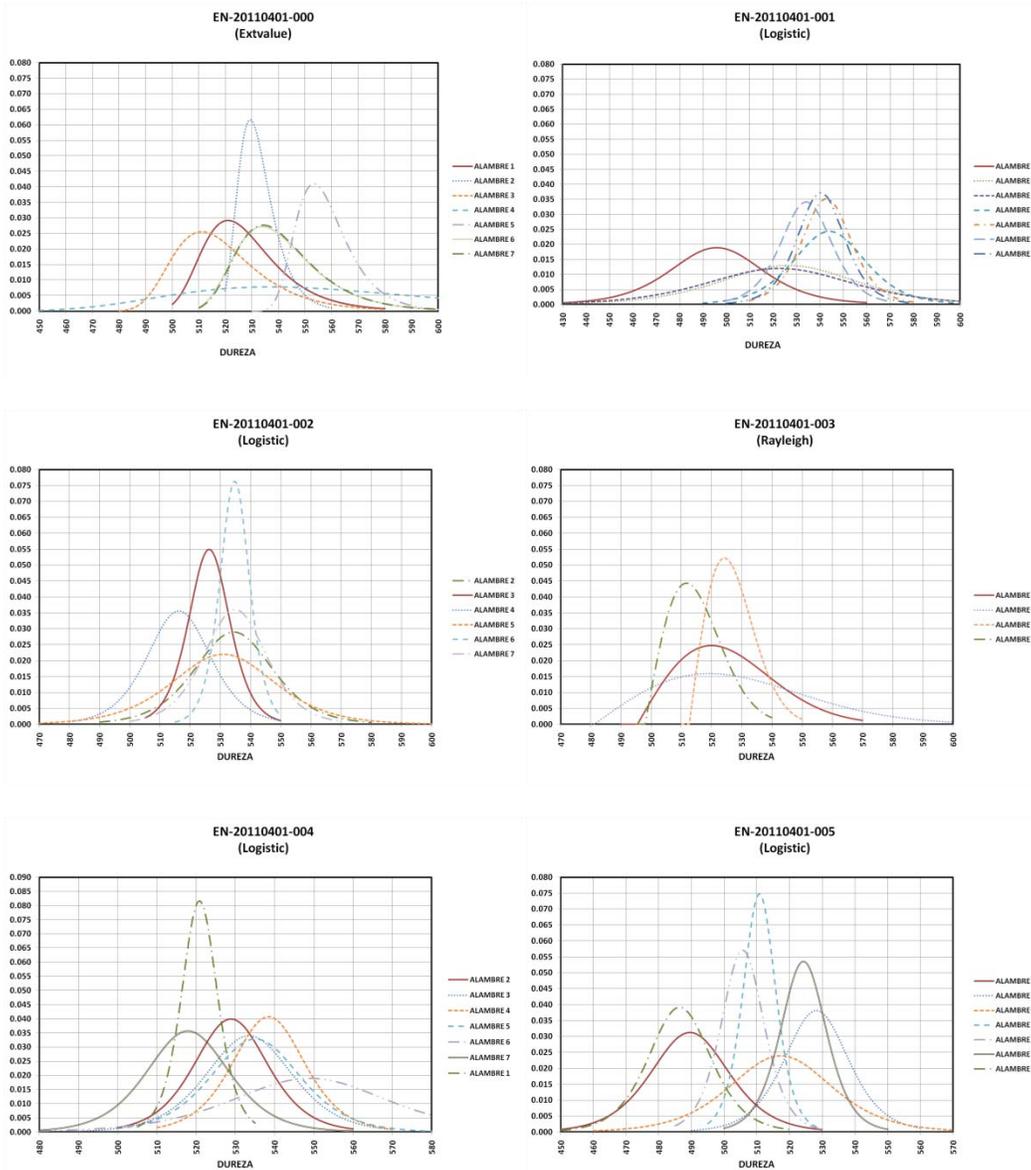
Vásquez García, Javier. "Determinación de Velocidad de Crecimiento de Grieta en Aluminio A413 con Diferente Índice de Porosidad", Universidad Autónoma de Querétaro, 2006.

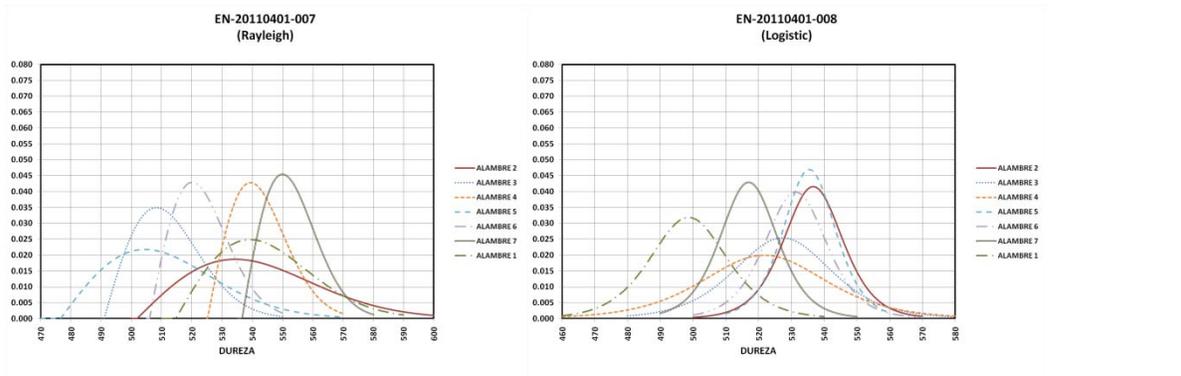
Anexo 1 Gráficos de la prueba de tensión





Anexo 2 Funciones de densidad de probabilidad (PDF) de dureza





Anexo 3 Selección de las funciones de densidad de probabilidad

Las distribuciones de densidad de probabilidad son obtenidas mediante el software comercial @risk, las densidades de probabilidad dan la idea de la dispersión que existe entre los datos de una muestra.

El tipo de distribución estadística se determina mediante un análisis en el cual se examinan todas las distribuciones probables; la mejor distribución será aquella que tenga un menor valor del error estadístico de χ^2 . Para poder comparar las distribuciones de una muestra con las distribuciones de otra es preciso que las dos pertenezcan al mismo tipo de distribución. Las tablas que se incluyen en este anexo muestran los valores del error estadístico de χ^2 . Se seleccionó la distribución que presente menor error acumulado.

EN-20110401-000 (SIN ESFUERZOS)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMB. f	ALAMB. A	ALAMB. B	ALAMB. C	ALAMB. D	ALAMB. E	ALAMB. F	Σ ERROR
ChiSq		0.20				0.20		
Expon	0.20	0.20	1.80	1.80	1.80	0.20	0.20	6.20
ExtValue	0.20	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	3.00
InvGauss	0.20		0.20	0.20			0.20	
Logistic	0.20	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	3.00
LogLogistic			0.20					
Lognorm	0.20	0.20	0.20			0.20		
Lognorm2	0.20	0.20	0.20			0.20		
Pareto	0.20	0.20	0.20	1.80	1.80	0.20	0.20	4.60
Pareto2	0.20	2.60			3.40		1.00	
BetaGeneral	1.00	2.60	0.20	1.00	0.20	1.00	1.00	7.00
Triang	1.00	2.60	1.00	1.00	0.20	1.00	1.00	7.80
Normal	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	4.60
Pearson5	1.80		1.80	1.80	1.80		1.80	
Rayleigh	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	4.60
Uniform	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	1.80	0.20	6.20
Erf	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00
Student	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00

EN-20110401-002 (SOMETIDO A TENSIÓN)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMBRE 1	ALAMBRE 2	ALAMBRE 3	ALAMBRE 4	ALAMBRE 5	ALAMBRE 6	ALAMBRE 7	Σ ERROR
ChiSq								
Expon		0.20	1.80	0.20	1.80	1.80	1.80	7.60
ExtValue		0.20	1.80	1.80	0.20	0.20	0.20	4.40
InvGauss		0.20		0.20				
Logistic		0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.20
LogLogistic								
Lognorm				1.80				
Lognorm2				1.80				
Pareto		0.20	1.80	0.20	0.20	3.40	0.20	6.00
Pareto2		0.20	3.40	1.00		3.40	3.40	
BetaGeneral		0.20	3.40	1.00	1.00	1.00	0.20	6.80
Triang		0.20	1.80	1.00	0.20	0.20	0.20	3.60
Normal		0.20	1.80	1.80	0.20	0.20	0.20	4.40
Pearson5		1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	10.80
Rayleigh		0.20	1.80	1.80	0.20	0.20	0.20	4.40
Uniform		0.20	1.80	1.80	0.20	0.20	0.20	4.40
Erf		5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	30.00
Student		5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	30.00

EN-20110401-003 (SOMETIDO A TENSIÓN)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMBRE 1	ALAMBRE 2	ALAMBRE 3	ALAMBRE 4	ALAMBRE 5	ALAMBRE 6	ALAMBRE 7	Σ ERROR
ChiSq					0.20			
Expon	0.20	1.80	1.80		0.20			4.00
ExtValue	0.20	0.20	0.20		0.20			0.80
InvGauss	0.20							
Logistic	0.20	0.20	0.20		0.20			0.80
LogLogistic								
Lognorm	0.20							
Lognorm2	0.20							
Pareto	1.00	1.00	1.80		1.00			4.80
Pareto2		1.00	3.40					
BetaGeneral	0.20	1.00	1.00		1.00			3.20
Triang	1.00	0.20	0.20		1.00			2.40
Normal	0.20	0.20	0.20		0.20			0.80
Pearson5	1.80	1.80	1.80					
Rayleigh	0.20	0.20	0.20		0.20			0.80
Uniform	0.20	0.20	0.20		0.20			0.80
Erf	5.00	5.00	5.00		5.00			20.00
Student	5.00	5.00	5.00		5.00			20.00

EN-20110401-004 (SOMETIDO A TENSIÓN)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMB. f	ALAMB. A	ALAMB. B	ALAMB. C	ALAMB. D	ALAMB. E	ALAMB. F	Σ ERROR
ChiSq			0.20					
Expon	1.80	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	1.80	7.80
ExtValue	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.80	3.00
InvGauss				0.20	0.20	0.20		
Logistic	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.80	3.00
LogLogistic				0.20	1.80	0.20		
Lognorm				0.20	0.20	0.20		
Lognorm2				0.20	0.20	0.20		
Pareto	1.80	1.80	0.20	0.20	3.40	0.20	1.80	9.40
Pareto2	3.40	3.40	2.60	1.00	3.40		3.40	
BetaGeneral	1.00	0.20	2.60	0.20	0.20	0.20	3.40	
Triang	0.20	0.20	2.60	1.00	0.20	0.20	1.80	6.20
Normal	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.80	3.00
Pearson5	1.80	1.80		1.80	1.80	1.80	1.80	10.80
Rayleigh	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.80	3.00
Uniform	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	1.80	4.60
Erf	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00
Student	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00

EN-20110401-005 (SOMETIDO A TENSIÓN)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMBRE 1	ALAMBRE 2	ALAMBRE 3	ALAMBRE 4	ALAMBRE 5	ALAMBRE 6	ALAMBRE 7	Σ ERROR
ChiSq					0.20			
Expon	1.80	0.20	1.80	1.80	1.80	0.20	1.80	9.40
ExtValue	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	4.60
InvGauss		0.20			0.20			
Logistic	0.20	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	3.00
LogLogistic					0.20			
Lognorm		0.20						
Lognorm2		0.20						
Pareto	3.40	0.20	1.80	3.40	1.00	0.20	0.20	10.20
Pareto2	3.40		3.40	3.40			3.40	
BetaGeneral	3.40	1.00	1.00	3.40	0.20	1.00	1.00	11.00
Triang	0.20	1.00	0.20	1.80	1.00	0.20	0.20	4.60
Normal	0.20	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	3.00
Pearson5	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	12.60
Rayleigh	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	4.60
Uniform	1.80	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	4.60
Erf	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00
Student	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00

EN-20110401-007 (SOMETIDO A FATIGA-TENSIÓN)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMB. f	ALAMB. A	ALAMB. B	ALAMB. C	ALAMB. D	ALAMB. E	ALAMB. F	Σ ERROR
ChiSq	0.20						0.20	
Expon	0.20	1.80	1.80	0.20	1.80	1.80	0.20	7.80
ExtValue	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.40
InvGauss				0.20		0.20		
Logistic	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.40
LogLogistic				0.20		0.20		
Lognorm	0.20			0.20		0.20	0.20	
Lognorm2	0.20			0.20		0.20	0.20	
Pareto	0.20	1.80	1.80	1.00	1.00	0.20	0.20	6.20
Pareto2	2.60	3.40	3.40	1.00	1.00		2.60	
BetaGeneral	2.60	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	2.60	8.60
Triang	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20	1.00	3.80
Normal	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.40
Pearson5		1.80	1.80	1.80	1.80	1.80		
Rayleigh	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.40
Uniform	0.20	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	1.80	4.60
Erf	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00
Student	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00

EN-20110401-008 (SOMETIDO A FATIGA-TENSIÓN)								
DISTRIBUCIÓN	ALAMBRE 1	ALAMBRE 2	ALAMBRE 3	ALAMBRE 4	ALAMBRE 5	ALAMBRE 6	ALAMBRE 7	Σ ERROR
ChiSq					0.20			
Expon	1.80	1.80	1.80	0.20	0.20	1.80	1.80	9.40
ExtValue	1.80	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	0.20	4.60
InvGauss				0.20			0.20	
Logistic	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.40
LogLogistic							1.80	
Lognorm					0.20		0.20	
Lognorm2					0.20		0.20	
Pareto	1.80	0.20	1.80	1.00	0.20	1.80	0.20	7.00
Pareto2	3.40	1.00	3.40	1.00	2.60	3.40	0.20	15.00
BetaGeneral	0.20	0.20	3.40	0.20	2.60	1.00	1.00	8.60
Triang	0.20	0.20	1.80	0.20	2.60	0.20	0.20	5.40
Normal	0.20	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	1.80	4.60
Pearson5	1.80	1.80	1.80	1.80		1.80	1.80	
Rayleigh	1.80	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	0.20	4.60
Uniform	1.80	0.20	1.80	0.20	0.20	0.20	1.80	6.20
Erf	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00
Student	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	35.00

POR TORONES									
DISTRIBUCIÓN	-001	-004	-007	-009	-002	-003	-005	-008	Σ ERROR
ChiSq									
Expon	61.60	36.80	39.60	53.60	53.13	16.81	30.40	34.80	326.73
ExtValue	21.60	8.80	7.60	10.00	20.88	5.58	7.60	18.00	100.06
InvGauss		12.00				4.42			
Logistic	9.20	12.00	3.60	4.80	1.75	5.58	3.20	6.40	46.53
LogLogistic		13.60				5.97			
Lognorm		12.00				4.42			
Lognorm2		12.00				4.42			
Pareto	73.80	54.40	36.60	36.20	57.94	18.61	32.60	32.40	
Pareto2	45.80	38.60	36.60			15.52	29.40	34.20	
BetaGeneral	9.20		4.40	6.40	8.88	14.48	5.60	17.40	
Triang	11.20	20.80	5.20	8.40	10.75	23.26	1.60	6.40	87.61
Normal	10.00	12.80	5.20	3.20	8.13	15.26	5.20	4.80	64.58
Pearson5						4.42			
Rayleigh	34.80		4.80			8.29	11.20		
Uniform	20.80	32.80	14.40	15.20	26.13	55.13	6.00	11.60	182.05
Erf	196.40	183.60	196.40	210.00	109.38	66.74	210.00	210.00	1,382.52
Student	210.00	210.00	210.00	210.00	160.00	155.00	210.00	210.00	1,575.00
Erlang		12.00				4.42			
Gamma		12.00				4.42			
Weibull		12.80	5.20	5.60		7.52	1.60		

POR TIPO DE PRUEBA					
DISTRIBUCIÓN	CERO	TENSION	F.MEX	FAT-TEN	Σ ERROR
ChiSq	27.60	32.87		6.00	
Expon	33.20	247.71	53.60	85.14	419.66
ExtValue	16.00	48.32	10.00	22.00	96.32
InvGauss	30.40	31.89			
Logistic	29.60	20.75	4.80	7.71	
LogLogistic	8.00	25.44			
Lognorm					
Lognorm2					
Pareto	33.20	255.29	36.20	85.43	410.11
Pareto2		249.42		87.29	
BetaGeneral			6.40	5.14	
Triang	47.00	151.53	8.40	4.29	211.22
Normal	38.00	41.08	3.20	5.14	87.43
Pearson5	8.00	31.89			
Rayleigh	14.80				
Uniform	65.60	347.41	15.20	36.86	465.07
Erf	196.40	937.99	210.00	630.00	1,974.39
Student	210.00	1,596.00	210.00	630.00	2,646.00
Erlang	18.40	29.74			
Gamma	30.40	30.72			
Weibull	33.20	62.78	5.60	5.14	

TORONES/CUÑAS			
DISTRIBUCIÓN	TORONES	CUÑA	Σ ERROR
ChiSq	71.05	0.20	71.25
Expon	656.40	0.20	656.60
ExtValue	151.00	0.20	151.20
InvGauss	75.14		
Logistic	91.39	0.20	91.59
LogLogistic	80.17		80.17
Lognorm		0.20	
Lognorm2		0.20	
Pareto	679.62	0.20	679.82
Pareto2	663.84	2.60	666.44
BetaGeneral		2.60	
Triang	422.05	2.60	424.65
Normal	95.95	0.20	96.15
Pearson5	65.68		
Rayleigh		0.20	
Uniform	886.43	0.20	886.63
Erf	3,225.73	5.00	3,230.73
Student	5,236.00	5.00	5,241.00
Erlang	86.83		
Gamma	86.83		
Weibull	178.23		

Anexo 4 Diferencias de medias

Una hipótesis estadística es una afirmación acerca de los parámetros de una población. Se puede realizar una hipótesis estadística acerca de la media de dos muestras. Esto se puede expresar formalmente de la siguiente manera:

Hipótesis 1- Las dos medias son iguales $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis 2 - Las dos medias son diferentes $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

En donde μ_1 es el valor medio de la muestra 1, mientras que μ_2 corresponde al valor medio de la muestra 2. La afirmación $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ se conoce como la hipótesis nula, mientras que $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ se denomina hipótesis alterna. La hipótesis alterna es bilateral ya que puede ser verdadera si $\mu_1 > \mu_2$, o bien si $\mu_1 < \mu_2$.

Para probar una hipótesis hay que diseñar un procedimiento para tomar una muestra aleatoria y calcular una estadística de prueba apropiada con objeto de rechazar o no la hipótesis nula. Parte de este procedimiento consiste en especificar el conjunto de valores de la estadística de prueba que conduzca al rechazo de la hipótesis nula. Este conjunto de valores se denomina región crítica o región de rechazo de la prueba.

El procedimiento general de la prueba consiste en especificar un valor para el *nivel de significación* de la prueba (α). Para una varianza poblacional desconocida, una estadística de prueba es apropiada para usarse en la comparación del nivel medio de los dos tratamientos en un diseño completamente aleatorio donde se supone que las dos medias poblacionales son iguales, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ es:

$$t_0 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

Donde \bar{Y}_1 y \bar{Y}_2 son las medias muestrales, n_1 y n_2 el tamaño de las muestras, S_p es una estimación de la variancia común calculada mediante:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2)$$

Para esta estadística de prueba el número de grados de libertad (ν) se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\nu = n_1 + n_2 - 2 \quad (3)$$

Para el caso en que las varianzas poblacionales sean distintas ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$), la prueba t debe ser modificada ligeramente y el estadístico de prueba se transforma en:

$$t_0 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (4)$$

Esta estadística de prueba no tiene exactamente una distribución t.; sin embargo, la distribución de t_0 puede ser aproximada si se usa como los grados de libertad el valor de la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}} \quad (5)$$

Para rechazar la hipótesis nula H_0 , se deberá evaluar la función $t(\alpha/2, \nu)$ y compararla con la estadística de prueba t_0 . Si $|t_0| > t(\alpha/2, \nu)$ la hipótesis nula $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ se rechaza y se acepta $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

En ocasiones se puede estar interesado en rechazar la hipótesis nula solo si una media es mayor que la otra. En este caso, se usa la hipótesis alterna unilateral $H_1 : \mu_1 > \mu_2$ y se rechaza H_0 sólo si $t_0 > t(\alpha, \nu)$; o bien la hipótesis alterna $H_1 : \mu_1 < \mu_2$ en la cual se debe rechazar H_0 sólo si $t_0 < -t(\alpha, \nu)$.



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



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

publicaciones@imt.mx

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