

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón

Ingeniería



## ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE LOS ACEROS DE PRESFUERZO DE FABRICACION NACIONAL

T E S I S

Que para obtener el título de  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A N

Fidel Gama Herrera

Reynaldo Vilchis Vilchis



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Q<sup>o</sup> 40  
Sist 42704



ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA A LA  
FATIGA DE LOS ACEROS DE PRESIÓN DE  
FABRICACION NACIONAL

7  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12





ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON  
DIRECCION

REYNALDO VILCHIS VILCHIS  
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 15 de abril del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. CARLOS KING REVELO pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado " ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE LOS ACEROS DE PRESFUERZO DE FABRICACION NACIONAL ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., mayo 30 de 1988.  
EL DIRECTOR

LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería.  
Unidad Académica.  
Departamento de Servicios Escolares.  
Director de Tesis.



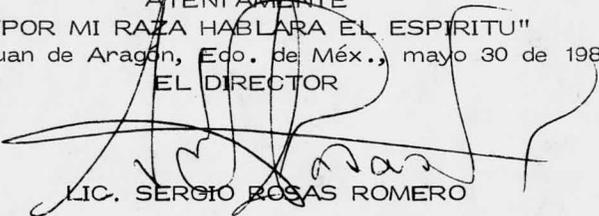
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON  
DIRECCION

FIDEL GAMA HERRERA  
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 15 de abril del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. CARLOS KING REVELO pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado " ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE LOS ACEROS DE PRESFUERZO DE FABRICACION NACIONAL ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., mayo 30 de 1983.  
EL DIRECTOR



LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería.  
Unidad Académica.  
Departamento de Servicios Escolares.  
Director de Tesis.

A

NUESTROS

PADRES

AL C. INGENIERO

CARLOS KING REVELO

POR SU GUÍA Y DIRECCION.

A LA U.N.A.M Y EN PARTICULAR A LA E.N.E.P. ARAGON

A NUESTROS PROFESORES

A NUESTROS FAMILIARES Y AMIGOS.

## P R O L O G O

El hombre, producto máximo del universo, facultado para crear, aunque no con igual certeza como con la que fué concebido, ha logrado transformar con su herencia natural, el indómito metal y utilizarlo en su beneficio.

Desde tiempo inmemorial, la raza humana se afana por lograr más eficiencia en la transformación de los recursos. En el último siglo, se han realizado los más grandes avances en todos los campos, es el siglo en que el hombre pasa de ignaro a sapiente, es la etapa en que controla el rayo su gran energía y es también el tiempo en que el hombre dedicado a las obras civiles ha evolucionado y en la actualidad transforma los materiales en estructuras de gran belleza, equilibradas con la naturaleza y seguras, calculadas con sofisticados métodos y precisos ensayos experimentales de sus elementos componentes.

El desarrollo del país exige la realización de estructuras cada vez más complejas, el logro de tales estructuras, demanda una planeación cuidadosa que precise la tecnología a aplicar y el desarrollo tecnológico existente de manera que una vez requerida cierta tecnología se tenga una respuesta afirmativa de los recursos humanos dedicados a la ciencia.

"México es rico en recursos naturales y rico en población humana, que es ésta la mayor riqueza de un país cuando se le dá cultura y ciencia, tecnificando así su trabajo y guiándolo a metas superiores, orientándola con el ejemplo: rectitud en la dirección política, en la administración de los recursos nacionales, límite a intereses ajenos"

## I N D I C E

### C A P I T U L O I

Introducción . . . . . 1

### C A P I T U L O II

Antecedentes . . . . . 4

### C A P I T U L O III

Fenómeno de la fatiga en los  
aceros estructurales. . . . . 12

Generalidades . . . . . 12

La apariencia de la fractura  
por fatiga . . . . . 13

Naturaleza de la falla de  
fatiga . . . . . 16

Otros estudios experimentales  
sobre el fenómeno de fatiga . . . . . 18

### C A P I T U L O IV

Características del comportamiento  
dinámico de los aceros, mediante -  
los diagramas de Smith y Wohler. . . . . 22

Dimensionamiento de los tirantes . . . . . 32

## C A P I T U L O V

Descripción del dispositivo de ensaye para adaptar una máquina Amsler en la prueba . . . . .	40
Características de la máquina Amsler. . . . .	40
a) Dinamómetro	
b) Pulsador	
c) Acumulador	
d) Pruebas que se pueden realizar con la máquina de ensaye Amsler	
Descripción del dispositivo . . . . .	47
a) Anclaje	
b) Funcionamiento del dispositivo	

## C A P I T U L O V I

Realización de las pruebas . . . . .	54
a) Condiciones de ensaye	
b) Criterios de aceptación	
Pruebas de calibración . . . . .	56
Criterio de prueba . . . . .	58
Control de la prueba . . . . .	60

## C A P I T U L O V I I

Reporte de resultados . . . . .	62
---------------------------------	----

Resultados de ensayos dinámicos de laboratorio, realizados en Estados Unidos y México . . . . .	62
C A P I T U L O    V I I I	
Análisis de resultados . . . . .	74
C A P I T U L O    I X	
Resumen y conclusiones . . . . .	92
B I B L I O G R A F I A . . . . .	115

## C A P I T U L O     I

### INTRODUCCION.

El estudio de las características de resistencia a la fatiga de los aceros, se aplica en la actualidad a estructuras que por su importancia y condiciones de funcionamiento lo hacen esencialmente necesario. Algunos ejemplos de estructuras que requieren este estudio son: máquinas aéreas, máquinas navales, obras de ingeniería civil, como los puentes atirantados y suspendidos entre otras.

Estas características deben ser estudiadas en elementos sujetos a vibraciones o fluctuación de esfuerzos, ya sean, de tensión, torsión, flexión o combinación de estos, los cuales provocan un deterioro progresivo en la resistencia del material, hasta producir en éste, grietas que lo lleven a la falla, fenómeno conocido como falla por fatiga.

Es difícil predecir los efectos de la fluctuación repetida de esfuerzos sobre un elemento presforzado. Los efectos por fatiga deben ser valuados por medio de pruebas de laboratorio que nos reproduzcan este fenómeno, lo que implica el uso de tecnología y equipo especiales. Estas pruebas son realizadas con poca frecuencia debido a las dificultades técnicas y económicas que representan, no obstante en estos casos es un criterio decisivo en la elaboración del proyecto, lo cual justifica la inversión de tiempo y costo de este tipo de estudios.

Un caso real en el cual los resultados de un estudio de fatiga es determinante en el diseño y realización del proyecto, tiene lugar en los puentes atirantados, en los que debe preverse un incremento creciente en intensidad y en frecuencia de las cargas dinámicas en conjunción con la esperanza de una vida útil de servicio de más de 100 años, lo que requiere una amplia investigación sobre la resistencia de todos sus elementos-estructurales, siendo los tirantes elementos de fundamental importancia, que además de cumplir con los requisitos de resistencia estática, deben de satisfacer requisitos de resistencia dinámica a la fatiga y de estabilidad ambiental (corrosión y fragilización por hidrógeno) de el acero con que se fabriquen dichos tirantes.

En la actualidad las pruebas de resistencia dinámica a la fatiga, únicamente se efectúan en los laboratorios de algunas universidades de Estados Unidos y de Europa.

La prueba de susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno al tiocianato de amonio, fué normalizada en 1980 por la Federación Internacional del Presfuerzo y a la fecha sólo se práctica en laboratorios de los países miembros de la Federación.

Dada la necesidad de construir los puentes atirantados Tampico y Coatzacoalcos II y a las restricciones de importaciones impuestas por el gobierno, la Dirección General de Carreteras Federale de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, tomó la decisión de realizar las prue -

bas de resistencia a la fatiga de el acero de presfuerzo de fabricación nacional en forma simultánea con el laboratoio de la Universidad de Austin Texas, con el propósito de absorber la tecnología de apoyo que requieren estas estructuras de tipo avanzado.

La presente tesis esta referida particularmente a la implantación de la prueba de caracterización dinámica en aceros de presfuerzo de fabricación nacional, para la cual fué necesario diseñar y construir dispositivos especiales y emplear una instrumentación adecuada para adaptar una máquina universal Amsler de 500 toneladas con que cuenta la Secretaría.

La realización de éste estudio se llevó a efecto en el laboratorio e instalaciones de la Dirección General de Servicios Técnicos, habiéndose diseñado, instrumentado y supervisado por parte de la Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

## C A P I T U L O     I I ANTECEDENTES.

La construcción de puentes para salvar el paso de los ríos, de las hondonadas ó de los valles profundos, ha sido siempre un acuciante desafío a la inventiva y a la tecnología humana.

Por eso, cuando se logra que las aplicaciones sintetizadas y planificadas de materiales, equipos experiencia y de las teorías de comportamiento estructural, concurren para satisfacer los requerimientos ambientales en la construcción de un puente, puede decirse que la ingeniería de puentes ha alcanzado su máxima expresión.

Una de las manifestaciones del enorme desarrollo alcanzado hasta ahora por la tecnología en que se apoya esta Ingeniería de Puentes es la concepción de los puentes atirantados en los que prácticamente se ha transformado el criterio tradicional de sustentación de las plataformas mediante traveses trabajando a la flexión.

En los puentes atirantados un número múltiple de tirantes inclinados, soportados desde un alto mástil, se extienden a ambos lados del mismo para anclarse en la plataforma del puente con espaciamientos de sólo 8 a 15 m. de longitud.

De esta manera la plataforma, en lugar de trabajar como una viga en flexión, trabaja como la cuerda en compresión de una armadura triangular en catiliver, formada por el mástil, un tirante y un segmento de la plataforma, con suficiente rigidez para mantener la curvatura de la elástica dentro de los límites requeridos por la circulación de las cargas vehiculares del tránsito carretero o ferroviario.

Debido a ésto el peralte de la plataforma es independiente del claro cubierto por el puente y se procura reducirlo al mínimo para evitar la generación de momentos flexionantes por peso propio innecesarios en dicha plataforma.

En éste tipo de diseño predominan los esfuerzos de tensión y de compresión, siendo de un orden secundario los esfuerzos de flexión y de cortante. Esto permite el dimensionamiento de plataformas de una sección transversal muy simple, así como sencillos diseños de anclajes de los cables, la facilidad del montaje y un comportamiento dinámico de la plataforma superior al de los puentes suspendidos, si se procura que los tirantes trabajen a esfuerzos elevados.

El sistema estructural de los puentes atirantados permite lograr claros hasta de 700 m en puentes carreteros de concreto y 500 m en puentes para ferrocarril, en acero se han logrado claros hasta de 1700 m con economías muy notables respecto al costo de los puentes suspendidos.

Existe un análisis comparativo de diseño entre ambas modalidades de

puentes para el cruzamiento del estrecho de Messina, los claros principales se consideraron de 1300 m a 1500 m, en acero con seis bandas de tránsito carretero y dos vías de ferrocarril. Estos diseños no mostraron dificultades estructurales significativas.

Un puente suspendido de 1500 m de claro principal, dos laterales de 680 m, ancho de calzada de 38 m y relación catenaria/claro de 0.10, requiere aproximadamente de 46 000 toneladas de acero para los cables, mientras que para el puente suspendido con las mismas características de claros y anchos de calzada y con una relación altura de mástil/claro principal de 1/4.5, requiere solamente de 20 000 toneladas de acero para los tirantes.

El puente atirantado requiere adicionalmente algo más de acero para rigidizar la plataforma y aproximadamente un 25% más de concreto para la estructura de sus mástiles que son más altos que las torres del puente suspendido, sin embargo, no requieren en cambio los gigantescos bloques que son indispensables para anclar las enormes fuerzas generadas en los cables del puente suspendido. El costo de éstos bloques de anclaje son decisivos para la diferencia de costos entre ambos tipos de puentes, además de otras ventajas que han situado a los puentes atirantados en lugar preferente dentro de la ingeniería de puentes, es por ésto que en la actualidad es cada día más frecuente la construcción de puentes de este tipo.

Dadas las condiciones topográficas, en México se hizo necesaria la construcción del puente Coatzacoalcos II. Primer puente atirantado que se construye en éste país, está ubicado en Minatitlán, Ver., tiene una longitud total de 1 170 m con claro principal de 288 m, ancho de 18.10 m con dos calzadas y un gálibo de 35 m.

La construcción de éste puente despertó el interés de las autoridades mexicanas para la participación de su personal en la realización de éste proyecto y de diversas investigaciones que permitirán conocer el comportamiento de la estructura, de manera que las técnicas empleadas sean asimiladas por ingenieros mexicanos y puedan ser posteriormente aplicadas en proyectos futuros. Esto implica una atención completa y detallada de todos los elementos estructurales del puente, y en forma especial a los tirantes de éste, elementos de máxima importancia los cuales deben estar dotados de características que garanticen su comportamiento estático y su seguridad con relación a la fatiga y corrosión ambiental.

Se debe tener cuidado que al elegir el acero para los cables de un puente atirantado se elija el mejor disponible en cuanto a resistencia dinámica y susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno. Por otra parte, deberá hacerse la caracterización dinámica de dicho acero para determinar dentro de que rango de fluctuación de esfuerzos de éste acero se pueden alcanzar durancias de  $2 \times 10^6$  ó más ciclos de esfuerzos y cuales son los coeficientes de daño que pueden esperarse de cada rango

de fluctuación de carga, a fin de poder hacer un diseño congruente con la vida útil deseable de el puente en cuestión. Esta caracterización debe hacerse tanto con respecto a un torón del acero que pretende usarse como a todo un tirante o cable con los anclajes, tubos de protección, inyecciones de mortero y resina incluidos.

A efecto de seleccionar el acero para los tirantes de el puente - - Coatzacoalcos II, las autoridades mexicana encargaron al Laboratorio - - Phil M. Ferguson de la Universidad de Texas en Austin, la realización de pruebas de varios aceros. En su primera fase el estudio debía establecer el acero más adecuado para la fabricación de los tirantes, seleccionando entre las muestras de procedencia belga, francesa y mexicana.

De acuerdo con el reporte de la Universidad de Texas, aún cuando todas las muestras cumplieron con los requisitos mínimos de aceptación, el acero belga resultó ser el que reúne las mejores cualidades, seguido por los aceros mexicanos y francés en orden de calidad decreciente.

Al aceptar las autoridades mexicana el acero belga y en vista de que el fabricante proporcionó la información complementaria para la caracterización de su acero, se estableció el convenio para la adquisición del acero de los tirantes en una cantidad de 420 toneladas, de las cuales únicamente se recibieron 70 toneladas, en virtud de las recientes restricciones económica decretadas por el gobierno de la República.

Por la anterior razón se hizo necesario considerar la posibilidad -

de recurrir al acero mexicano para poder terminar la construcción del -  
ente.

Se sabe por las pruebas de selección (hechas en la Universidad de -  
Texas) que el acero mexicano cumple con los requisitos mínimos, pero es  
necesario hacer pruebas adicionales para caracterizar su comportamiento-  
dinámico a la fatiga y susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno,  
bajo tensión.

Una vez realizadas éstas pruebas y si se acepta definitivamente el  
acero mexicano, deberán hacerse subsecuentemente pruebas de aceptación -  
de cada lote de producción que el fabricante pretende suministrar para -  
la obra.

Se estima que se requerirá calificar un total de 350 toneladas que  
se producirán en 7 lotes de aproximadamente 50 toneladas cada uno y debe-  
rán ensayarse aproximadamente 21 especímenes para ésta calificación.

Nuevamente se han redactado las especificaciones para las pruebas -  
dinámicas a la fatiga del acero, dividiéndolas en dos fases.

Con las de la primera fase, se busca conocer el comportamiento del  
acero mexicano estableciendo para ello mediante ensayos, los diagramas -  
de Smith y Wöhler.

En la segunda fase, que se iniciará después de terminada la primera,

en caso de que se acepte el empleo del acero mexicano, se harán las pruebas de aceptación de los diferentes lotes de producción.

Estas especificaciones se enviaron a la Universidad de Texas en Austin, la cual remitió una propuesta de entendimiento, en la cual se consigna el importe.

Esta erogación representa una salida considerable de divisas del país, por lo que la Dirección General de Carreteras Federales, estudió la posibilidad de realizar dichas pruebas en el Laboratorio de Ensaye de Materiales de la Dirección General de Servicios Técnicos, construyendo para el efecto dispositivos especiales que permitieran adaptar la máquina universal Amsler con que cuenta dicho laboratorio.

Existe sin embargo, la incertidumbre natural que tiene todo diseño industrial, respecto al funcionamiento y probabilidad de falla de un primer prototipo, el cual debe ajustarse, como es obvio, con base a pruebas experimentales.

Con ésto se propiciaría además el desarrollo de la tecnología nacional y no se correría ningún riesgo en caso de que no resultara aceptable las pruebas en nuestro laboratorio.

La anterior decisión hizo posible nuestra participación en la realización del Estudio de las Características de Resistencia a la Fatiga de los Aceros de Presfuerzo de Fabricación Nacional, con la finalidad de de

terminar la posibilidad de ser utilizado en la fabricación de los tirantes del puente Coatzacoalcos II.

Hay que tener presente que tras el puente Coatzacoalcos II, viene - por lo pronto la construcción del puente Tampico y que el éxito obtenido en la realización de este estudio permitiría analizar este segundo caso con toda garantía y con tecnología estrictamente nacional.

C A P I T U L O     I I I  
FENOMENO DE LA FATIGA  
EN LOS ACEROS ESTRUC-  
TURALES.

G E N E R A L I D A D E S .

Hace un siglo, el diseño estructural se basaba totalmente en conceptos de resistencia estática del material. En aquél tiempo existían relativamente pocas fuentes de vibraciones o de fluctuación de esfuerzos en comparación con las existentes en la actualidad. Bajo tales circunstancias, el diseño basado en las propiedades de resistencia estática fué enteramente satisfactorio.

En nuestros tiempos la mecanización ha llegado a casi todos los campos de la ingeniería; edificios modernos contienen motores, fábricas y -talleres emplean máquinas pesadas operando a altas velocidades, los modernos medios de transporte rápido se han desarrollado con sus correspondientes fuentes de vibración y esfuerzos dinámicos, de aquí el requerimiento de cambios importantes para el diseño eficiente de elementos sujetos a fluctuación de esfuerzos, en la actualidad ha sido implantado el -diseño para resistir fallas de fatiga bajo fluctuación de esfuerzos.

La falla por fatiga ha sido encontrada en algunos aceros estructurala

les, aleaciones metálicas y también en materiales no metálicos. Las experiencias también nos demuestran que la falla de fatiga ocurre en elementos de diseño y forma variable, en elementos sujetos a diversas condiciones de esfuerzo y del medio ambiente. Sin embargo, en todas las fallas se notaron por lo menos dos factores en común: (1) en todos los casos el elemento fué sujeto durante algún tiempo a una fluctuación de esfuerzos, (2) en todos los casos la grieta de fatiga empezó en alguna pequeña discontinuidad de la sección o en alguna imperfección local de el elemento estructural.

#### LA APARIENCIA DE LA FRACTURA POR FATIGA.

Numerosos estudios han sido desarrollados en relación a la apariencia de fractura por fatiga, tales estudios podrían tener dos objetivos: (1) el objetivo práctico de saber diagnosticar la falla por fatiga, y (2) conocer el tamaño del rango deducido de la información concerniente a la naturaleza básica de fatiga.

Usualmente se clasifica a las fracturas de metales como fractura frágil o dúctil. La figura (A) muestra una falla de tensión estática de una barra de acero, la naturaleza dúctil de esta falla es evidente por la reducción de la sección formando un cuello en el centro de la barra.

La figura (B) muestra una fractura de fatiga de una barra del mismo tipo de material, en éste caso la pieza falla por agrietamiento fuera de

FIG. A  
FRACTURA PRODUCIDA  
POR  
TENSION ESTATICA

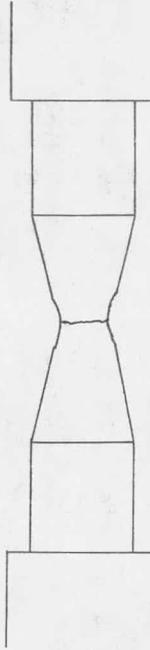
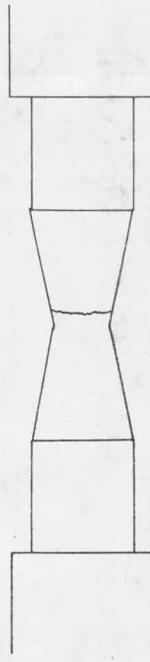


FIG. B  
FRACTURA PRODUCIDA  
POR  
FATIGA



la sección reducida. Dado que no existe una fluidez plástica, una fractura de este tipo es frecuentemente llamada ruptura frágil. En general, si una parte que ha fallado en servicio, muestra evidencias de deformaciones plásticas como la falla de tensión de la figura (A), se puede decir que la falla de servicio fué causada por sobrecarga estática y no por agrietamiento causado por fatiga.

Sin embargo, no todas las fracturas frágiles de elementos son necesariamente causadas por fatiga. Diversos materiales tales como ciertos hierros colados, muestran fractura frágil, cuyas pruebas se realizan en cuartos a temperatura determinada, aceros normalmente considerados dúctiles, pueden fallar en forma frágil a bajas temperaturas, o bajo cargas muy altas aplicadas rápidamente. Así, si la fractura de un metal tiene apariencia frágil, puede ser debido a fatiga, sin embargo, es necesario un examen cuidadoso para un diagnóstico acertado.

Durante los últimos cien años, la principal aportación a problemas de fatiga ha sido en ingeniería, con el propósito de obtener reglas empíricas y métodos para prever la falla.

Todas las aportaciones están implícitas en una gran variedad de datos. Algunas observaciones las cuales parecen ser aplicadas al respecto se enumeran a continuación.

- 1.- La falla de fatiga es el agrietamiento bajo esfuerzos repeti -

dos más bajos que la resistencia última de tensión y es mostrada por casi todos los metales, aleaciones metálicas, por algunos plásticos, maderas y otros materiales que muestran alguna ductilidad en pruebas estáticas.

2.- La fractura por fatiga de metales generalmente depende de el número de repeticiones de un rango de esfuerzos dado. La velocidad, (al menos de 100 a 1000 cps) casi no tiene efectos visibles sobre la resistencia a la fatiga de un metal, excepto bajo condiciones especiales de el medio ambiente.

3.- Algunos metales, (especialmente aleaciones ferrosas) tienen rangos de esfuerzos "seguros" bajo algunas amplitudes de esfuerzos llamados "límite de fatiga".

4.- Para casi todos los materiales, las ranuras, hendiduras o cualquier otro tipo de discontinuidad de la sección, disminuye grandemente la amplitud del esfuerzo que puede ser resistido para un número determinado de ciclos de esfuerzo.

5.- El rango de esfuerzo necesario para producir la falla en un número fijo de ciclos, usualmente decrece cuando el esfuerzo de tensión medio es incrementado.

NATURALEZA DE LA FALLA DE FATIGA.

Desde la aparición de la fractura de fatiga, es razonable considerar que el progreso ocurre en tres fases: (1) El inicio de una grieta extendiéndose a partir de un núcleo; (2) Propagación de la grieta bajo ciclos sucesivos de carga; (3) Ruptura final de la pieza, cuando la extensión de la grieta ha debilitado la sección. En los esfuerzos para derivar una teoría de fatiga, casi toda la atención ha sido puesta en la primera fase, además la atención ha sido enfocada al aspecto de "cómo una grieta empieza bajo esfuerzos repetidos a nivel más bajo que el esfuerzo necesario para ruptura estática."

Evidencia al respecto nos dan una muestra cualitativa de la naturaleza de la fatiga. Se presume que la resistencia a la fatiga de un material, depende del comportamiento de regiones débiles afectadas por microgrietas, muescas o cualquier otro tipo de discontinuidad, y ni la posición ni la naturaleza de estos puntos débiles, pueden ser deducidos correctamente del conocimiento de otras propiedades ingenieriles comunes de un material. Así, es necesario para el diseño, el uso de datos verdaderos acumulados de pruebas de materiales específicos.

La naturaleza local del origen de falla de fatiga más amplia, requiere un conocimiento detallado de un elemento para estimar su resistencia a la fatiga mediante pruebas de laboratorio en simples especímenes del material. Un análisis profundo y su completo entendimiento de todos los detalles de fabricación y ensamble, también como la correcta información de la carga de servicio, pueden ser necesarios para cuantificar la

predicción de vida de un elemento estructural, sin embargo, profundas observaciones de importancia relativa de detalles tales como hendiduras, grietas, tratamiento térmico, esfuerzos residuales, y otros detalles metalúrgicos, mecánicos y químicos y demás, ayudan a obtener la estructura o elemento estructural cualitativamente mejor.

#### OTROS ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE EL FENOMENO DE FATIGA.

La difracción de rayos X ha sido usada para investigar cambios que podrían ocurrir en estructuras metálicas con el progreso de la fatiga. - Cambios bajo esfuerzos repetidos más bajos que el límite de fatiga de un metal, han sido encontrados no muy diferentes en apariencia, de los cambios observados bajo cargas estáticas en niveles de esfuerzos bajos similares. Esfuerzos repetidos más altos producen complejas redes de distorsión antes de la fractura por fatiga.

Se han hecho pruebas para seguir los cambios de algunas propiedades de el material durante el desarrollo de la grieta por fatiga; cambios en resistencia eléctrica, en propiedades magnéticas, en coeficientes de expansión térmica, en módulos de elasticidad y otros, han sido buscados experimentalmente, hasta ahora tales experimentos han contribuido con pequeñas aportaciones concernientes a la naturaleza básica de la falla de fatiga y sirven de ayuda en problemas prácticos de diseño para resistir la fatiga.

Dentro de la gran diversidad de estudios experimentales de fatiga, se encuentra el estudio de crecimiento de grietas de fatiga mediante experimentos exoelectrónicos, técnica de reciente aplicación al fenómeno de fatiga.

Los investigadores que se disponen a estudiar las grietas, el desgaste u otros fenómenos de la superficie de un metal, pueden recurrir a una gran variedad de técnicas; microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y autorradiografía, entre otras. Así, estas técnicas nos proporcionan normalmente una gran colección de fotografías, pero se encuentran enormes dificultades para extraer de ellas cualquier dato que pueda ser representado gráficamente y comparado críticamente con otros resultados análogos. Por otra parte, no puede asegurarse que las regiones visibles en las fotografías sean verdaderamente representativas de la totalidad de la superficie. Esta situación poco satisfactoria está siendo superada por la antes dicha técnica exoelectrónica, basada en la detección de exoelectrones, que son electrones emitidos por los átomos de la superficie bajo ciertas condiciones que proporcionan la energía necesaria para provocar su liberación. Resulta que éstas condiciones están directamente relacionadas con los cambios en la superficie producidos por el desgaste, las grietas y la fatiga en general. Los exoelectrones pueden contarse fácilmente, de modo que ésta técnica proporciona lo que falta en las fotografías, números que pueden ser comparados y representados.

Por lo que respecta a la producción de exoelectrones, una superficie fresca o nueva tiene dos fuentes de energía evidentes de las que carecen otras superficies antiguas. Una es la energía química de enlace del metal, consideremos de manera extremadamente simplificada, uno de los procesos mediante los cuales puede liberarse ésta energía. Cuando se crea una superficie reciente, por un procedimiento cualquiera, pueden quedar algunos átomos en una posición expuesta, de manera que algunos de sus enlaces químicos permanezcan desocupados. Posteriormente cuando éstos átomos formen nuevos enlaces con otros átomos del metal, el número de enlaces desocupados se reducirá y la energía de los nuevos enlaces quedará disponible, bien sea en forma de calor o tal vez, en forma de exoelectrones. La otra forma de energía es la oxidación o de otros procesos químicos análogos.

En el fenómeno de la fatiga, es de interés poder localizar con precisión donde se emiten exoelectrones. Con la radiación ultravioleta, el número de exoelectrones emitidos por una superficie puede incrementarse en un factor de más de 10,000 respecto a la emisión normal. Esto significa que, si una pequeña región de una superficie se ilumina mientras se mide la emisión exoelectrónica de la totalidad, casi toda la emisión proviene de el área iluminada. En consecuencia, podemos barrer con un haz de radiación ultravioleta toda la superficie y medir simplemente la emisión de electrones en función del tiempo. El número de exoelectrones contados en los distintos tiempos indica la emisión procedente de las -

diferentes zonas de las superficies sólidas.

Una de las primeras demostraciones de la información que puede obtenerse mediante ésta técnica se encuentra la presentada por William J. - Baxter. Colocó una tira de aluminio en una cámara de vacío que contenía un detector de electrones; la sometió a esfuerzos cíclicos flexionándola. Al mismo tiempo, iba barriendo la superficie con un haz de radiación ultravioleta enfocando puntualmente. Antes de aplicar los esfuerzos mecánicos no había emisión de exoelectrones por parte de la superficie. Después de 1 000 ciclos, había tres lugares que presentaron una emisión - por encima de la media. Después de 4 000 ciclos, los sitios activos se habían hecho más prominentes. Uno de ellos dió lugar a la rotura des- - pués de 14 000 ciclos de esfuerzos. Está claro que los sitios activos - indicaban los lugares donde se formaban, crecía y se extendían las grietas. Este resultado es muy importante ya que hasta entonces no se disponía de ningún método para identificar grietas finas en superficies metálicas y seguir su evolución hasta la ruptura.

C A P I T U L O    I V  
CARACTERISTICAS DEL  
COMPORTAMIENTO DINA  
MICO DE LOS ACEROS-  
MEDIANTE LOS DIAGRA  
MAS DE SMITH Y - -  
WOHLER.

En el comportamiento dinámico de los aceros, particularmente en cables de presfuerzo, puede observarse la existencia de efectos tales como: agrietamiento, disminución de resistencia, alargamiento y la falla del cable. Es de notarse que éstos efectos dependen en gran parte del tipo de acero, del rango de esfuerzo, del número de repetición de la carga y de las condiciones del medio ambiente.

Dicho comportamiento puede ser descrito por métodos diagramáticos - resultados de numerosos estudios e investigaciones avocadas al fenómeno de la fatiga. Dentro de estos métodos se encuentran los diagramas S-N - que se obtienen mediante pruebas de laboratorio, su finalidad es la de - determinar el comportamiento dinámico del acero, manifestándolo en forma gráfica a partir de la relación rango de esfuerzo y número de ciclos o - repeticiones de esfuerzo. Esto es usualmente graficado, rango de esfuer - zos contra logaritmo de N figura IV-1.

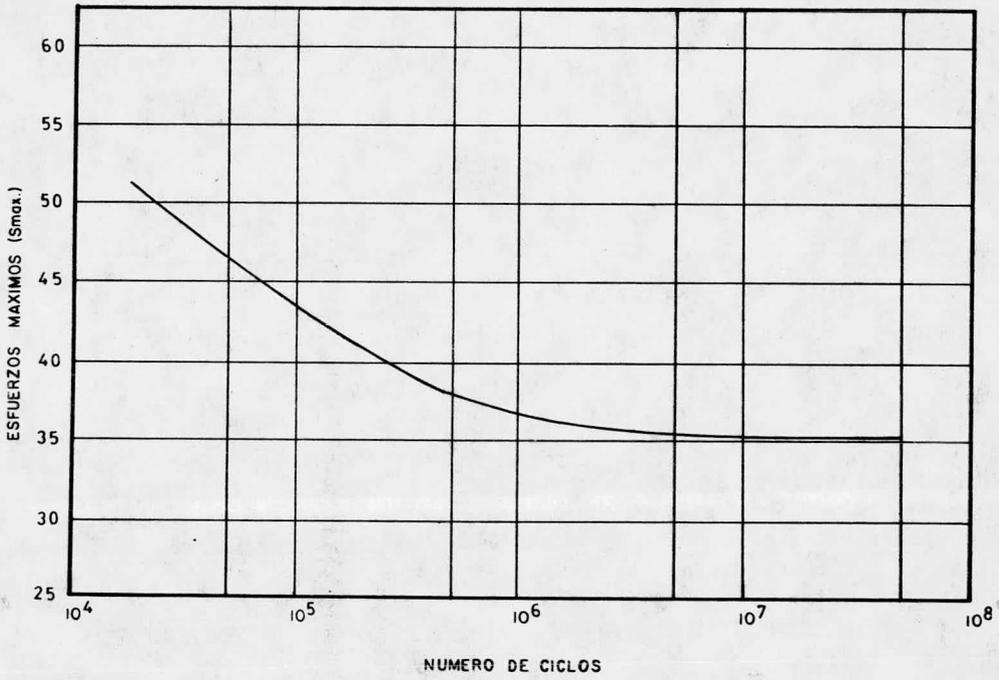


FIG. IV-1 DIAGRAMA S-N

Estos diagramas S-N están basados en una serie de conceptos teóricos, los cuales a su vez constituyen los criterios para la caracterización dinámica de los aceros, éstos conceptos y su significado son descritos a continuación. Los símbolos usados en la descripción fueron emitidos por la Sociedad Americana para Ensayo de Materiales.

Ciclo de esfuerzo.- Un ciclo de esfuerzo es la sección más pequeña de la función tiempo esfuerzo, la cual es repetida idéntica periódicamente. La figura IV-2 muestra los ciclos de esfuerzo usuales e indica diagramáticamente muchos de los siguientes conceptos.

Esfuerzo nominal.- Se le llama al esfuerzo calculado sobre la sección neta, tal como  $S = P/A$  sin tomar en cuenta la variación de esfuerzos causados por discontinuidades tales como cavidades, estrías, ranuras, etc.

Esfuerzos máximo.-  $S_{m\acute{a}x}$ .- Es el valor algebraico más grande de los esfuerzos en un ciclo.

Esfuerzo mínimo.-  $S_{m\acute{i}n}$ .- Es el valor algebraico más pequeño de los esfuerzos en un ciclo,

Rango de esfuerzos.-  $S_r$ .- Es la diferencia algebraica entre el máximo y el mínimo esfuerzo en un ciclo, es decir  $S_r = S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n}$ .

Amplitud de esfuerzos alternos.-  $S_a$ .- Es la mitad del rango de esfuerzos.

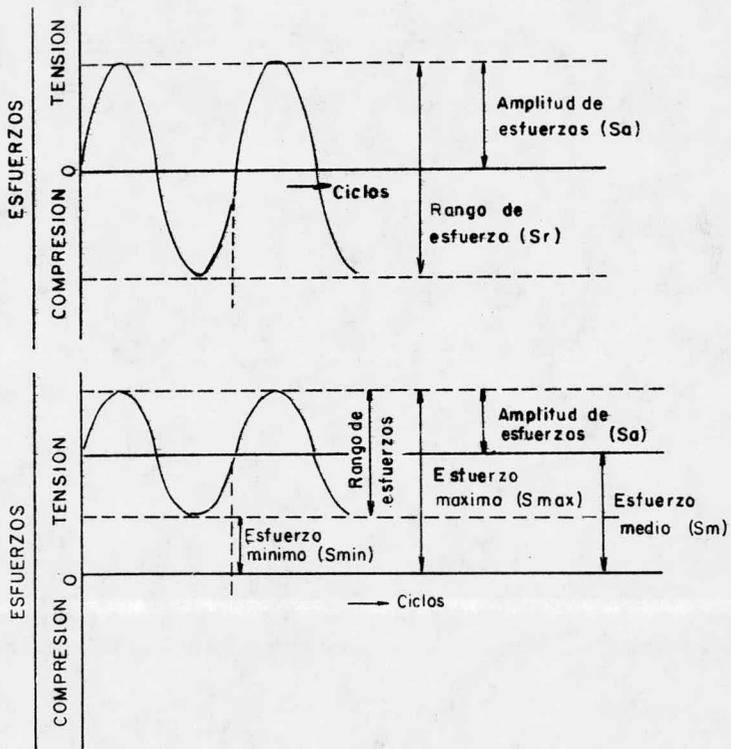


FIG. IV-2 DIAGRAMA DE CICLOS DE ESFUERZO

Esfuerzo medio.-  $S_m$ .- La media algebraica de esfuerzos máximo y mínimo, es decir  $S_m = (S_{m\acute{a}x} + S_{m\grave{a}n})/2$ .

Razón de esfuerzo.-  $R$ .- La relación algebraica del esfuerzo mínimo al máximo en un ciclo  $R = S_{m\grave{a}n}/S_{m\acute{a}x}$ .

Endurancia de ciclos de esfuerzo.-  $n$ .- El número de ciclos los cuales un espécimen ha durado en una prueba de fatiga.

Vida de fatiga.-  $N$ .- El número de ciclos de esfuerzo, los cuales pueden ser resistidos por un espécimen en una condición de prueba dada.

Límite de fatiga (o endurancia límite).-  $S_e$ .- Al valor límite del esfuerzo bajo el cual un material presumiblemente puede resistir un número infinito de ciclos de esfuerzo, que es el esfuerzo al cual el diagrama S-N llega a ser horizontal y permanece así. Debe notarse que ciertos materiales y medio ambientes, impiden la obtención de un límite de fatiga.

Daño acumulativo.- Al daño causado por cada ciclo de esfuerzo el cual es acumulado durante una prueba de fatiga.

Experimentos efectuados por Wohler, mostraron la importancia que tiene la repetición de esfuerzos, así como la duración de tiempo que tarda en causar la falla del espécimen con esfuerzos relativamente bajos. Estos experimentos dieron origen a un conocido método, este es el de la

curva de Wohler que es una variación de el diagrama S-N y al igual que - este es utilizado para determinar el comportamiento dinámico de materia- les.

El diagrama de Wohler indica la amplitud de la oscilación del es- - fuerzo que puede resistir un elemento en función del número de ciclos de carga y descarga que le solicite.

Para obtener esfuerzos admisibles se hace mediante el diagrama de - Smith que representa la variación de esfuerzos que se puede producir a - partir de un esfuerzo significativo para determinar el número de ciclos- de carga y descarga, que generalmente es de  $2 \times 10^6$  ciclos. ver figuras, IV-3 y IV-4.

De éstas gráficas se pueden deducir varias facetas importantes:

- 1.- El número de ciclos que puede ser resistido, decrece rápidamen- te con la amplitud del incremento de tensión, ver figura IV-3.
- 2.- Para amplitudes de tensión por abajo de ciertos límites, el nú- mero de ciclos que puede ser resistido no parece tener límite.
- 3.- La amplitud de tensión que puede ser resistida para  $2 \times 10^6$  ci- clos depende poco del nivel de la tensión significativa del elemento pa- ra aquellos casos en que ésta no supere el 70% de la resistencia caracte- rística del acero, ver figura IV-4.

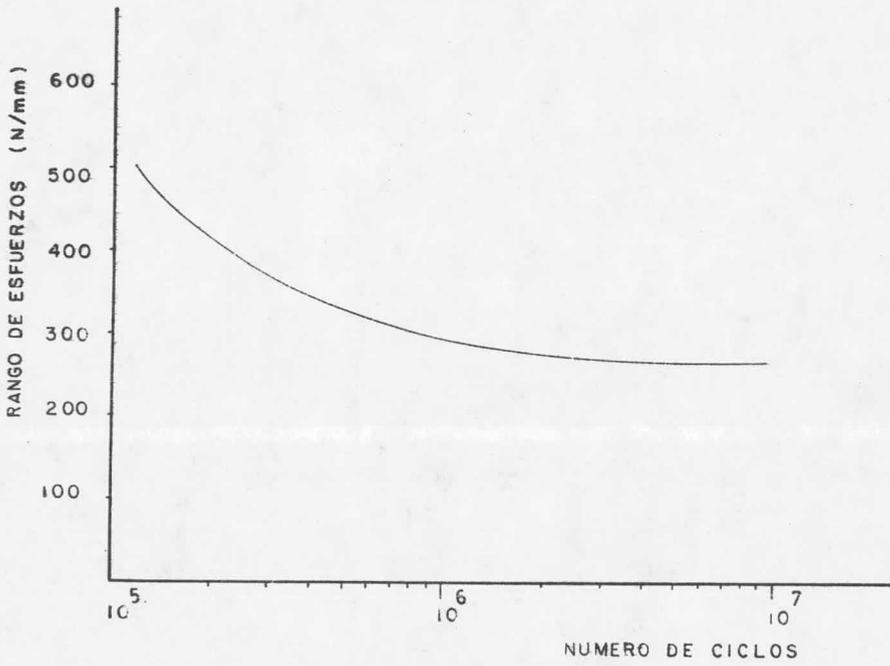


FIG. IV - 3 DIAGRAMA DE WOHLER

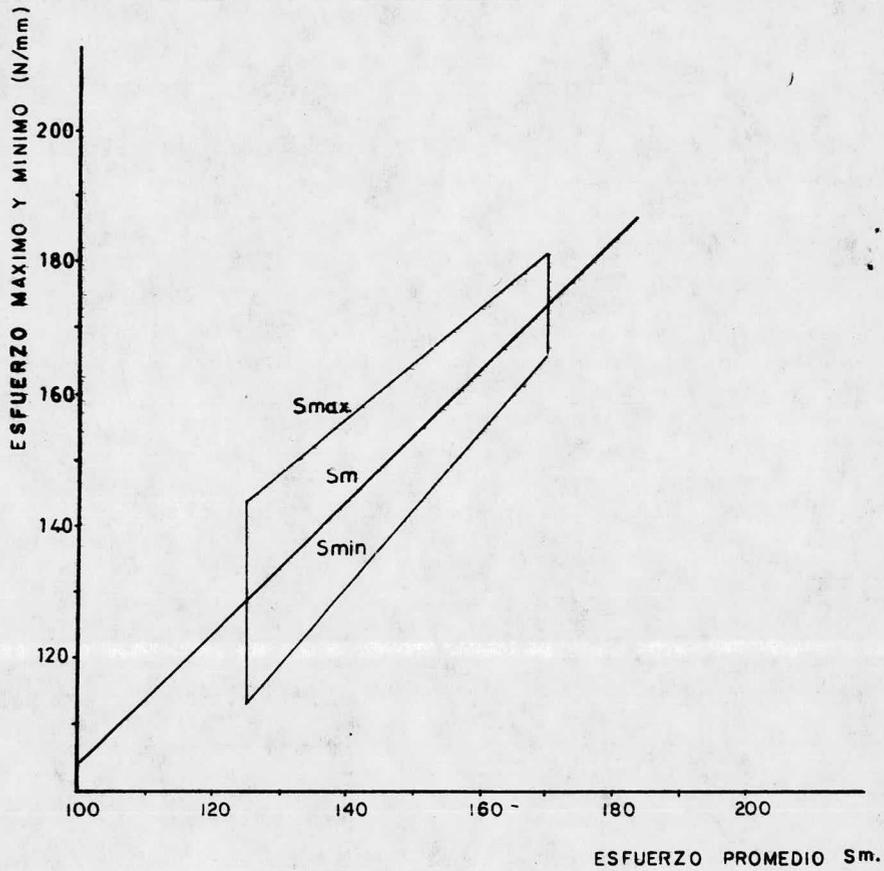


FIG. IV-4 DIAGRAMA DE SMITH

Comparando las propiedades de fatiga de cables de presfuerzo de varias manufacturas, se encuentran notables diferencias, algunos son considerablemente más sensitivos a sollicitaciones dinámicas que otros, dependiendo especialmente de la calidad del cable, pero también del subsecuente proceso de fabricación.

Generalmente, puede ser establecido que buenas cualidades de acero de presfuerzo también incluyen una alta homogeneidad de resistencia a la fatiga.

Los cables para tirantes podrían ser hechos de mejor calidad y patentes de primera, y se requieren algunas pruebas para establecer que la acción de la fatiga se encuentra dentro de una dispersión razonable de la gráfica de Smith y la curva de Wohler mostradas.

Cuando cables de tales características son ensamblados para formar un tirante, variaciones de un cable a otro decrementarán la cantidad de propiedades de todos los cables que forman el tirante. Además, la resistencia de el tirante puede ser influenciada por el anclaje y por posibles desviaciones de los cables o interacción entre ellos. Consecuentemente la resistencia a la fatiga de los tirantes podría ser determinada a través de pruebas sobre modelos representativos.

La resistencia dinámica y estática de los tirantes descritos ha sido checada por medio de pruebas emprendidas por laboratorios oficiales -

en varios países sobre modelos.

La evaluación de las pruebas, puede ser basada sobre el criterio - que el modelo de tirante después de la prueba dinámica debe ser capaz de resistir fuerza estática no menor que el 80% de la resistencia de la sección de acero original, así las pruebas realizadas mostrarán la vida de fatiga del modelo arriba de  $2 \times 10^6$  ciclos.

Parece ser que pruebas disponibles pueden ser interpretadas como - muestra de que un cierto "efecto de grupo" existe, más pronunciado para cables que para alambres, como cada cable es en sí mismo un minigrupo. - Siguiendo ésta idea, el rango de esfuerzos correspondiente a una vida de fatiga de  $2 \times 10^6$  ciclos y un esfuerzo inferior de 350 MPa ha sido llevado a efecto a 500, 320 y 300 MPa respectivamente para el alambre central de un cable, un sólo cable y un modelo de tirante de 7 cables. Sin embargo, se ha tenido en mente que el alambre central aislado fué probado usando un pulsador trabajando a 200 Hz, mientras que en modelos de tirantes y cables sólo fueron probados aproximadamente a 5 Hz.

Como resultado de las pruebas ya mencionadas y particularmente de - las pruebas realizadas en el laboratorio Freyssinet, podemos concluir - que la esperanza de vida de fatiga de  $2 \times 10^6$  ciclos puede ser satisfactoriamente admitida dentro de la franja representada en el diagrama de - Smith.

## DIMENSIONAMIENTO DE LOS TIRANTES.

El procedimiento de diseño de los tirantes para puentes debe satisfacer tanto requisitos de resistencia estática como requisitos de resistencia dinámica a la fatiga.

El método de dimensionamiento para resistencia estática es el de tipo tradicional, cumpliendo simplemente con las especificaciones vigentes de diseño.

Bastará, por lo general, con verificar que el esfuerzo máximo en el acero de los torones del tirante, bajo carga total, cumpla con la condición de que:

$$\sigma \text{ máx} < 0.45 \beta z$$

en donde

$\sigma \text{ máx}$  = esfuerzo máximo bajo carga total.

$\beta z$  = resistencia nominal a la ruptura por tensión en el acero de los torones del tirante.

El método de dimensionamiento para resistencia dinámica por fatiga se basa en verificar que se cumpla la siguiente condición:

"El rango de variación de los esfuerzos que se produzcan en el acero de los torones del tirante,  $\Delta \sigma \text{ máx}$ , por acción de la carga dinámica deberá ser menor o igual que el rango admisible de variación de esfuer -

zos,  $\Delta\sigma$  tirante, comprobado experimentalmente para N ciclos de carga mediante el ensaye de modelos de dicho tirante".

La acción de la carga dinámica que debe considerarse para determinar el rango de variación,  $\Delta\sigma$  máx, a que se refiere, ésta condición se establece con relación al espectro de carga dinámica que se estima para el lapso de vida planeado de la estructura. Un espectro típico de carga impuesta para un puente carretero es dado en la figura IV-5.

Si el espectro de carga es conocido, la seguridad contra los efectos acumulativos de carga repetida a diferentes niveles de esfuerzos puede ser checada usando el criterio Palmderg Miner. El margen de seguridad requerido dependerá primeramente de la exactitud con la cual el espectro de carga y la acción de la fatiga ha sido establecido.

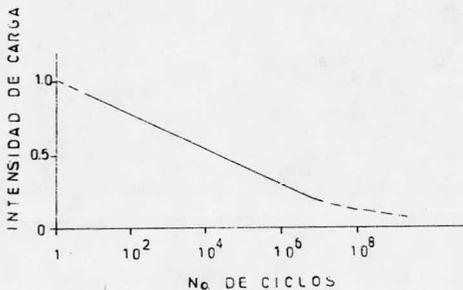


Figura IV-5.- Espectro típico de carga para un puente carretero

Generalmente, se desconoce la exactitud de éste espectro y se tiene que recurrir a un método simplificado de diseño que consiste en suponer que el efecto de todo el espectro de carga corresponde al efecto de una fracción  $m$  de la carga nominal de diseño.

El valor de la fracción  $m$  depende desde luego de la importancia de esta carga nominal de diseño, del tamaño del puente, del número de bandas de circulación, de la longitud de los tramos cargados y del volumen y la composición del tránsito, especialmente de la proporción relativa de los camiones pesados con respecto a los vehículos ligeros.

Desafortunadamente, hasta la fecha no existe suficiente información estadística para poder definir con un criterio adecuado los valores correctos de la fracción  $m$ .

Las especificaciones DIN 1073 consideran que debe darse a  $m$  un valor de 1.0 para carga de ferrocarril y de 0.8 y de 0.5 respectivamente para puentes carreteros con cargas clase 30 y clase 60 de la norma Alemana.

Obviamente, estos valores de  $m$  no pueden aplicarse más que dentro de las condiciones específicas para las que han sido establecidas, se estima en particular que el valor de 0.8 resulta demasiado conservador para la mayoría de los puentes carreteros.

Como una primera aproximación se considera razonable que para los -

puentes carreteros diseñados conforme a las cargas vivas de proyecto estipuladas por los códigos de especificaciones vigentes más relevantes se tome para  $m$  un valor comprendido entre 0.4 y 0.5.

La necesidad de tener que confrontar el rango de variación de esfuerzos,  $\Delta\sigma$  máx, producidos en los tirantes por esta carga viva, con un rango admisible de variación de esfuerzos comprobado experimentalmente en modelos de los mismos tirantes obliga, por un lado, a hacer evaluaciones de tipo probabilístico y por el otro a hacer el diseño preliminar de tales cables el cual a su vez tiene que apoyarse en evaluaciones aleatorias y en determinaciones experimentales de comportamiento dinámico realizado en muestras de los torones con los que se van a fabricar los tirantes.

Por otra parte el carácter probabilístico y experimental de la evaluaciones impone un procedimiento riguroso de diseño, el cual no es recomendable apartarse si se quieren evitar riesgos graves en el comportamiento final de la estructura.

El criterio de selección debe basarse en la consideración armónica de la resistencia a cargas estáticas y dinámicas de la muestra y sobre todo en la confiabilidad que se tenga en cuanto a la calidad de producción del acero y en una baja susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno en el proceso de corrosión bajo tensión, determinada mediante la prueba del tiocianato de amonio.

La determinación de los rangos de variación de esfuerzos que pueden admitirse para el diseño preliminar de los tirantes, se hace mediante el empleo de los diagramas de Smith y Wohler determinados experimentalmente a partir de los ensayos dinámicos de éstos torones.

En el caso del diagrama de Smith se determinan los valores de los rangos de esfuerzo en que el acero investigado puede alcanzar una endurance de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga para un reducido número (generalmente tres) de niveles medios de esfuerzo.

Con fines prácticos se estima que un valor de N igual a  $2 \times 10^6$  ciclos de carga es representativo de un rango de vida ilimitado de la estructura.

Los valores de los esfuerzos máximos y mínimos del rango de esfuerzos correspondientes a esta endurance se miden sobre el eje de ordenadas de una gráfica, en cuyas abscisas se miden los valores de los esfuerzos medios correspondientes y se obtiene un diagrama en forma de banda trapezoidal inclinada la cual no se prolonga más allá de un valor de 0.65 del valor nominal de ruptura a la tensión del acero seleccionado ya que los anclajes diseñados hasta la fecha para los tirantes se someten a pruebas de aceptación que no rebasan este esfuerzo límite. Ver figura IV-4.

De todas maneras se recomienda que, dado el estado actual de conoci

mientos, el esfuerzo de diseño no debe exceder de 0.5 del esfuerzo nominal de ruptura.

A partir del diagrama de Smith se puede establecer una relación lineal del tipo

$$\sigma_{\text{sup}} \leq \frac{C_1}{1 + C_2 \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{\text{sup}}}}$$

en la cual los valores de  $C_1$  y  $C_2$  se determinan del propio diagrama de - Smith afectándolos de los coeficientes de seguridad pertinentes.

La especificación DIN 1073 requiere que se satisfaga la condición

$$\sigma_G + m \sigma_Q = \sigma_D \text{ adm}$$

en la cual

$\sigma_G$  - es el esfuerzo producido en el acero de los torones por las cargas muertas.

$m$  - es la fracción de la carga nominal de diseño equivalente al efecto del espectro de carga.

$\sigma_Q$  - es el esfuerzo producido por la carga viva.

$\sigma_D \text{ adm}$  - es el esfuerzo medio admisible considerado como seguro para efectos de fatiga.

Como el diagrama de Smith se construye con un número muy reducido de observaciones, se estima que este método de diseño no refleja la gran dispersión que normalmente se presenta en los ensayos dinámicos de los aceros.

Un procedimiento más congruente para evaluar la resistencia dinámica a la fatiga de los aceros, es por medio de los diagramas de Wohler. Ver figura IV-3.

Para obtener estos diagramas se seleccionan 5 valores diferentes de rangos de esfuerzos cuya diferencia sea constante y a continuación se hace el ensayo dinámico de un número considerable de muestras, con los valores de cada uno de estos rangos de esfuerzos, registrando para cada uno de ellos el número de alambres del torón que se rompen para valores inferiores a  $2 \times 10^6$  ciclos de carga.

Para interpretar estadísticamente los resultados se calcula para cada rango de esfuerzos ensayado el porcentaje de frecuencia de especímenes fallados con relación al número total de muestras, para  $N = 2 \times 10^6$  ciclos de carga.

$$Pr = \frac{3r - 1}{3r + 1} \cdot 100$$

Graficando éstos valores en un diagrama en que se representen en las ordenadas los rangos de esfuerzos en escala natural y en las abscisas los valores de ciclos de carga de vida a escala logarítmica, para ca

da porcentaje, se tendrá una familia de curvas de Wohler con la probabilidad de que no ocurran más fallas que las expresadas por el porcentaje correspondiente.

Para el diseño de tirantes generalmente se emplea la curva de Wohler correspondiente al porcentaje del 5% del acero ensayado a la que se designa como "La curva de resistencia intrínseca del acero a la fatiga" del torón.

Para complementar el diseño de los tirantes se verifican las condiciones de seguridad con relación a los efectos de acumulación lineal de daño para los diferentes niveles del espectro probable de carga dinámica empleando el criterio de Palmderg Miner el cual se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\sum_i \frac{N_{pi}}{N_i} \leq 1$$

en donde

$N_{pi}$  es el número efectivo de ciclos de carga sobre el puente correspondiente al nivel  $i$  del espectro de carga dinámico.

$N_i$  es el número de ciclos de carga correspondiente a la resistencia última de fatiga para el nivel de carga  $i$  actuando en forma aislada.

C A P I T U L O     V  
DESCRIPCION DEL DISPO-  
SITIVO DE ENSAYE PARA  
ADAPTAR UNA MAQUINA -  
AMSLER EN LA PRUEBA.

CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA AMSLER.

Las limitaciones de las máquinas de ensaye comunes, existentes en los laboratorios, son las dimensiones generalmente pequeñas de su marco de carga, por lo que solamente se pueden probar especímenes de dimensiones reducidas y a veces, probetas maquinadas que dificultan la interpretación de resultados.

En algunas ocasiones es muy conveniente ensayar especímenes de grandes dimensiones, como estructuras o elementos estructurales completos, para ello se requiere el empleo de una máquina de ensaye de gran capacidad y dimensiones. La máquina Amsler es de tipo Universal, de 500 toneladas de capacidad (compresión y tensión) para carga estática y de 200 toneladas de capacidad para cargas dinámicas. Sus principales características son las que se mencionan a continuación:

La máquina de ensaye cuenta con un sólo marco de carga, que sirve tanto para las pruebas de tensión, como para las de compresión.

El marco de carga está formado por dos columnas de acero con perforaciones a cada 75 cm para fijar a diferentes alturas el cabezal superior, que viene a constituir el elemento fijo del marco en el momento de la prueba.

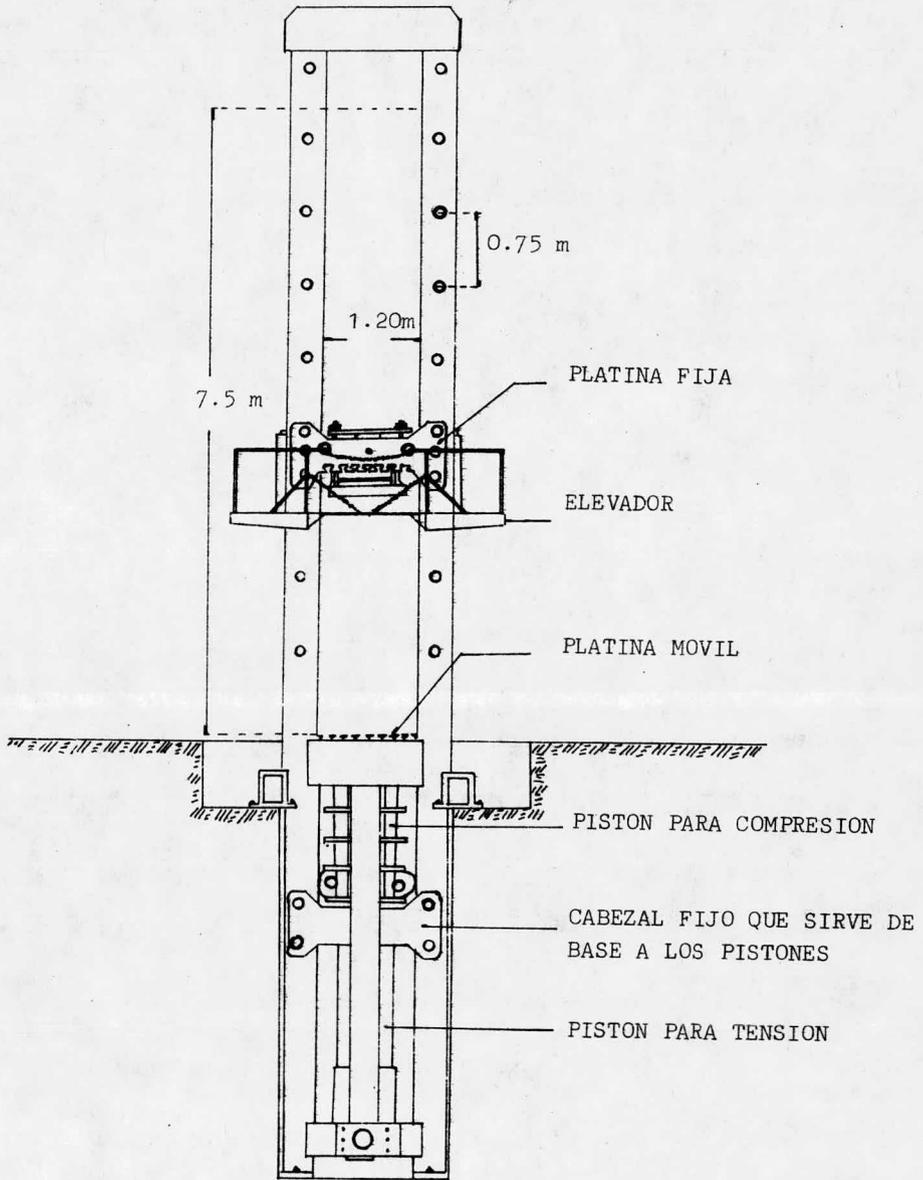
El mecanismo para aplicar cargas a través de su platina inferior, consta de dos elementos hidráulicos localizados en la parte inferior del marco bajo el nivel de piso.

En pruebas estáticas, la carrera máxima de la platina móvil es de aproximadamente 50 cm. En pruebas dinámicas la amplitud de desplazamiento de la platina móvil depende de las condiciones de la prueba que se está efectuando.

La altura libre entre las platinas del marco de prueba, se puede hacer variar fácilmente cada 25 centímetros, moviendo el cabezal fijo por medio del elevador propio de la máquina de ensaye desde 0.25 m hasta 7.50 m.

El elevador tiene una capacidad de 8 toneladas y sirve tanto para mover el cabezal superior, como para situar a los operadores que pueden observar y tomar datos de la probeta o pieza que esté sujeta a prueba. Este elevador tiene dos velocidades: la marcha rápida de 1.2 metros por minuto, y la marcha lenta de 0.12 metros por minuto.

La longitud máxima del espécimen de prueba, dependerá del tipo y di



MAQUINA AMSLER

mensiones del dispositivo de sujeción que se use.

El ancho máximo de las piezas que pueden ensayarse en la máquina es de 1.20 metros.

La máquina cuenta con un dispositivo montado sobre rieles que facilita la colocación y centrado de la probeta de ensaye dentro del marco, - este dispositivo es particularmente útil cuando las probetas de ensaye sean de gran peso.

Para la prueba de flexión se tiene un dispositivo formado por una viga de gran rigidez montada sobre rieles, sobre la que corren los dos apoyos libres que se desplazan hasta lograr con toda exactitud el claro requerido para la prueba, pudiéndose adaptar a diferentes condiciones de apoyo. El claro libre máximo que se puede lograr con este dispositivo es de tres metros.

Los principales elementos para producir y medir las cargas, son los siguientes:

a) **Dinamómetro.**

Para la aplicación de las cargas estáticas, la máquina de ensaye cuenta con un dinamómetro de péndulo, el cual está equipado con una bomba de aceite para producir la presión hidráulica requerida en las operaciones de ensaye. La presión de aceite es suministrada a la máquina de ensaye a través de una válvula de admisión, la cual tiene un regulador,-

a fin de que para cualquier posición de la válvula, la cantidad de aceite que pasa por unidad de tiempo, permanezca constante e independiente de la presión ejercida. El flujo de aceite puede regularse variable de cero a un máximo. La presión que actúa en el elemento de carga (máquina de ensaye), actúa en el pistón de medida del dinamómetro, y este pistón, por medio de un dispositivo de unión adecuado mueve el péndulo fuera de la posición de descanso. La amplitud de la desviación del péndulo, sirve para medir la fuerza que se está ejerciendo, la cual se registra mediante la aguja de la carátula graduada del dinamómetro.

b) Pulsador.

El pulsador, se utiliza solamente cuando vayan a realizar en la máquina de ensaye pruebas dinámicas con un sólo sentido de aplicación de la carga (compresión o tensión) y tiene por objeto suministrar y retirar una cantidad definida de aceite del elemento de carga (máquina de ensaye) de manera que la carga máxima actúa sobre el espécimen y varía en forma sinusoidal. Tanto el valor máximo como el mínimo de carga, se pueden ajustar y leer directamente en las carátulas del pulsador.

Las cargas aplicadas por el pulsador, se realizan a una frecuencia de 300 ciclos por minuto y utilizando los dos pulsadores con que cuenta esta máquina se pueden realizar pruebas a 600 ciclos por minuto.

c) Acumulador.

El acumulador, es un tubo de acero cerrado por su extremo superior,

el cual se encuentra lleno de aceite y nitrógeno. Se usa para pruebas -  
dinámicas, cuando se requiere que la carga constante mínima tanto de ten-  
sión como en compresión, tenga un valor de más de 90 toneladas.

d) Pruebas que se pueden realizar con la máquina de ensaye Amsler.

Las pruebas que se pueden realizar con ésta máquina de ensaye, son  
las siguientes:

- 1.- Ensayes estáticos de compresión de 0 a 500 toneladas.
- 2.- Ensayes estáticos de tensión de 0 a 500 toneladas.
- 3.- Ensayes dinámicos de compresión, con una amplitud de pulsación controlable de 0 a 90 toneladas.
- 4.- Ensayes dinámicos de compresión hasta 200 toneladas, con una - amplitud de pulsación controlable de 0 a 100 toneladas.
- 5.- Ensayes dinámicos de tensión, con una amplitud de pulsación - controlable de 15 a 115 toneladas.
- 6.- Ensayes dinámicos de tensión hasta 200 toneladas, con una am - plitud de pulsación controlable de 15 a 115 toneladas.
- 7.- Ensayes dinámicos de tensión de 5 a 105 toneladas.
- 8.- Ensayes estáticos de flexión con claros hasta de tres metros, - para una carga máxima de 400 toneladas.
- 9.- Ensayes dinámicos de flexión con un claro hasta de tres me- -



en 3, 4 y 9.

$K'$  = Carga constante durante la prueba, controlable mediante el acumulador para los casos 4 y 9, o carga mínima de aproximadamente 5 toneladas que, por condiciones mecánicas del dispositivo debe aplicarse en los casos 3 y 4.

#### DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO.

Para la realización de las pruebas de fatiga de cables de presfuerzo, fué necesario diseñar y construir un dispositivo que adaptado a la máquina de ensaye Amsler, permita que las cargas de presión aplicadas verticalmente, sean transformadas en fuerzas de tensión en el cable, en el plano horizontal.

El dispositivo es una estructura triangular, construído en su totalidad de acero para que así pueda soportar las cargas aplicadas, dicho dispositivo es montado sobre la viga con que cuenta la máquina de ensaye y a su vez ésta es colocada sobre el pistón para aplicarle carga dinámica de compresión, según se requiera.

La geometría de ésta estructura, permite que la carga de compresión aplicada verticalmente, sea transformada en carga de tensión en el cable que se encuentra colocado en la parte inferior del marco, en un plano horizontal.

Los elementos que forman el dispositivo son dos barras de sección cajón, unidas entre sí en su extremo superior por una articulación, la cual liga también a una placa de apoyo que hace contacto con el cabezal-fijo de la máquina de ensaye durante la prueba. Los extremos inferiores de estas dos barras son unidos por medio de articulación a un apoyo y a un elemento de anclaje en el que el cable de prueba es colocado.

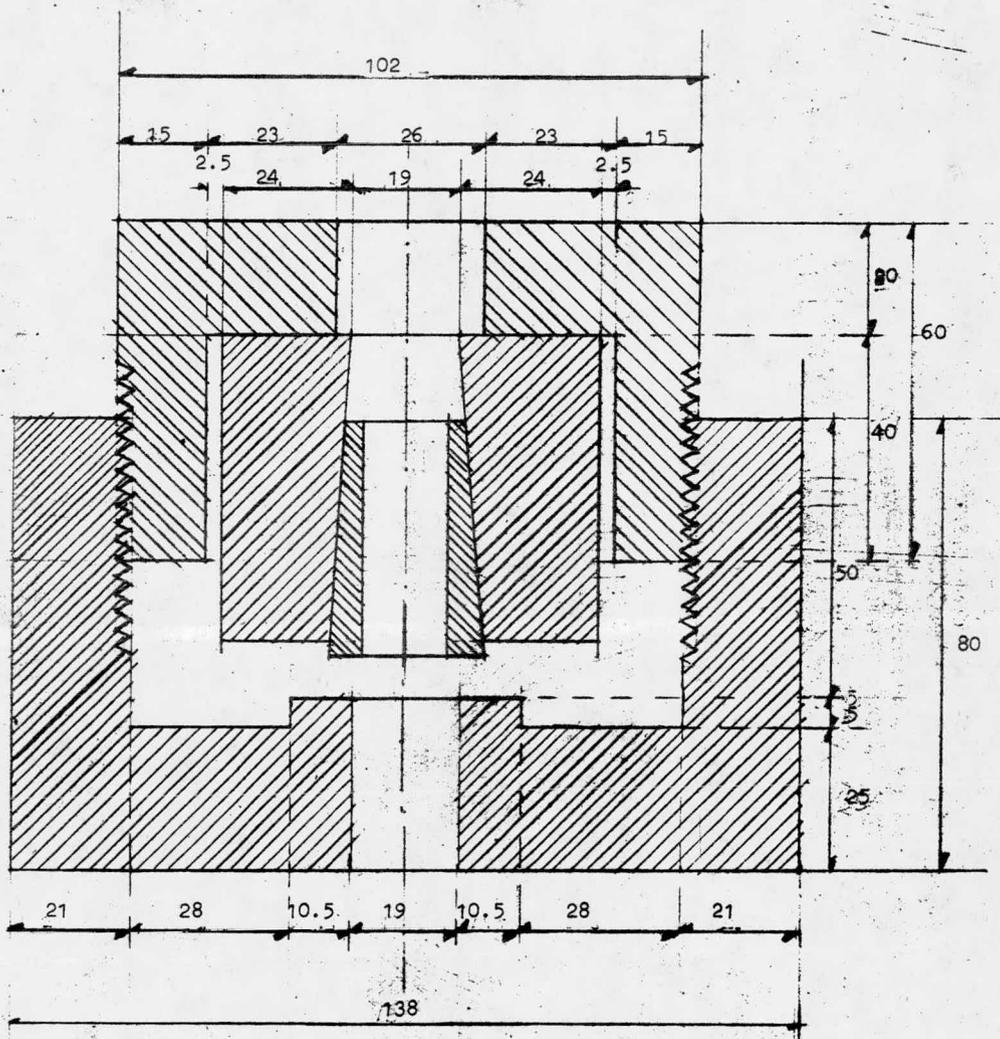
Los apoyos son de tipo mecedora, contruídos con placas de acero. Son colocados sobre una guía que le permite desplazamientos horizontales provocados por la acción de las cargas en el dispositivo. Además permite la colocación de la estructura sobre la viga. El desplazamiento de los apoyos es limitado por un respaldo en el extremo de la guía.

El elemento de anclaje está formado por dos placas de acero unidas en un extremo al apoyo y en el otro son unidas a una placa del mismo material, que tiene la función de sujetar el cable durante la prueba. Esta placa tiene una perforación que permite el paso del cable a través de ella y así ser sujetado por los anclajes.

a) Anclaje.

El anclaje que se utiliza en la prueba está formado por un barrilete por el que pasa el cable y son incertadas dos cuñas que se incrustan en el cable al ser tensado, de manera que impiden que éste se zafe.

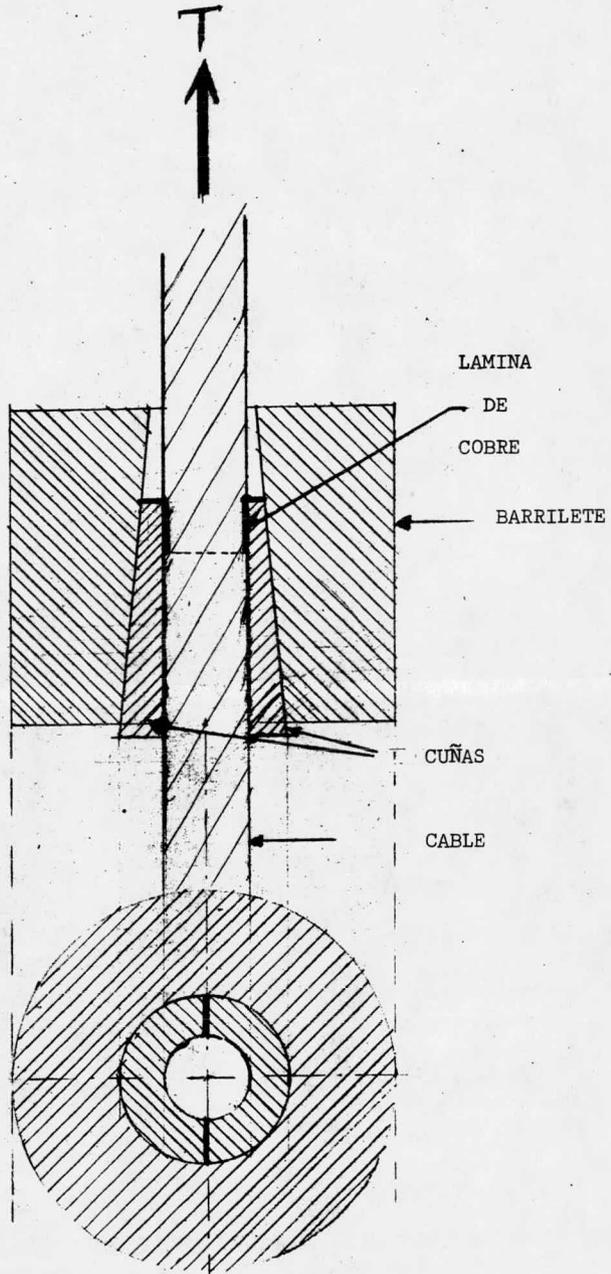
Para evitar que las cuñas dañen al cable al penetrar demasiado en -



DISPOSITIVO DE ANCLAJE

Acotaciones en mm.

ANCLAJE  
DEL  
CABLE



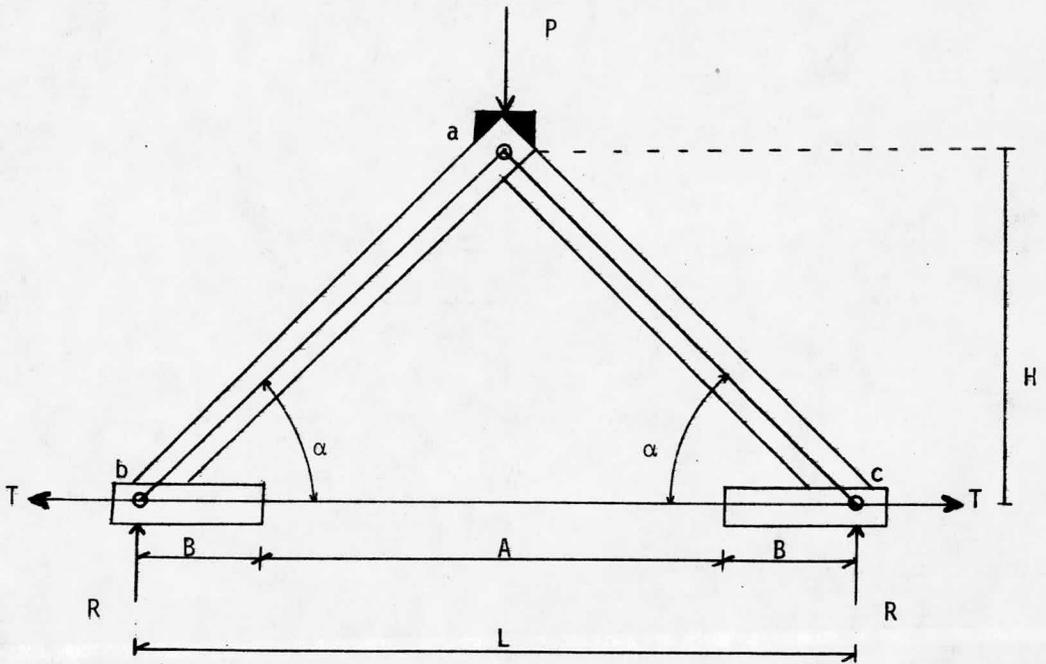
él provocando una reducción de la sección y con ésto una concentración de esfuerzos que daría como resultado la falla del especimen en el anclaje, se protegió esa parte del cable colocando al final de la cuña una pequeña lámina de cobre, entre cuña y cable. Además, cuando el cable es probado, está sujeto a una fluctuación de esfuerzos, lo que ocasiona una vibración en el cable provocando con esto que la cuña se salga de su posición original dañando considerablemente al cable y originando fracturas tanto en las cuñas como en el barrilete, por lo que se confinan en una caja de acero la cual es ajustado cuando el cable es tensado a su carga máxima de prueba, impidiendo de ésta forma todo movimiento de dichos elementos (ver figura).

b) Funcionamiento del dispositivo.

Durante la ejecución de la prueba podemos conocer las cargas de presión aplicadas verticalmente por la máquina de ensaye sobre el dispositivo leyéndolas directamente en las carátulas del acumulador.

Ahora bién, para conocer la carga de tensión a que está sometido el cable debido a las cargas verticales, es necesario hacer un análisis del marco. Debemos tomar en cuenta que tendremos pérdidas por la fricción existente en las superficies que están en contacto con los apoyos u otro elemento del marco, pérdidas por las condiciones de apoyo del marco sobre la viga, por el funcionamiento de las articulaciones y algunas otras.

DISPOSITIVO PARA LA PRUEBA DE FATIGA



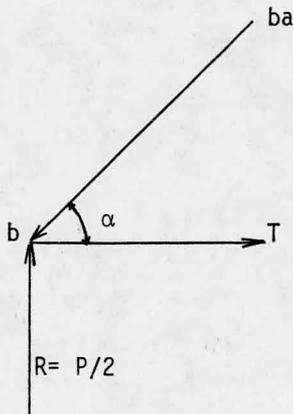
a Articulación superior del dispositivo

b y c Articulaciones inferiores del dispositivo

B Elementos de anclaje = 0.45 m

ac = ab = 1.56 m

Si analizamos el nudo b tendremos:



$$\Sigma f_y = 0$$

$$ba \operatorname{Sen}\alpha + P/2 = 0$$

$$ba = P/2 \operatorname{Sen}\alpha$$

$$\Sigma f_x = 0$$

$$T - b \operatorname{acos}\alpha = 0$$

$$T - \frac{P \operatorname{cos}\alpha}{2 \operatorname{sen}\alpha} = 0$$

$$T - \frac{P}{2 \operatorname{tan}\alpha} = 0$$

$$P = 2T \operatorname{tan}\alpha$$

Por lo que para conocer la carga que debe aplicar la máquina Amsler para obtener una tensión requerida podemos usar la siguiente fórmula:

$$P = \{2T \operatorname{tan}\alpha\} C$$

donde

P es la carga aplicada por la máquina Amsler.

T es la tensión en el cable (tensión requerida).

C es un coeficiente por pérdidas, se obtiene con la calibración del cable.

## C A P I T U L O    V I REALIZACION DE LAS PRUEBAS.

La realización de las pruebas de fatiga de torones de acero de presfuerzo de 7 alambres de 15.7 mm de diámetro de fabricación mexicana, para determinar su posible utilización en los tirantes del puente Coatza - coalcos II, es el resultado de el esfuerzo y el interés de las autoridades mexicanas por la implantación de tecnología de apoyo tan necesaria - para el desarrollo del país.

La realización de una prueba es también la aportación práctica de - las teorías y diseños que involucran una serie de investigaciones, tiempo y equipos especiales, la cual culmina en una serie de mediciones que se comparan con un estandar que constituye los criterios de aceptación - o rechazo de una calidad específica de acero.

Como se hizo mención en capítulos anteriores, la realización de las pruebas fué llevada a cabo por la Secretaría de Comunicaciones y Trans - portes, bajo la supervisión de la Dirección General de Carreteras Federa - les, de la propia Secretaría. Dicha prueba se llevó a cabo en dos fases:

En la primera fase, se cuenta con una serie de muestras de torones-

proporcionados por CAMESA, industria que utiliza el acero nacional para la fabricación de cables de presfuerzo. Cada muestra de cable está formada por (7) siete alambres, con una calidad nominal de  $1550/1770 \text{ N/mm}^2$ , - diámetro de 15.7 mm y un área nominal de  $150 \text{ mm}^2$  debiendo cumplir con la norma BS 5896.

Se elaborarán especímenes de prueba de las muestras a ensayar con una longitud total mínima de 1500 mm empleando disco abrasivo para efectuar los cortes.

La fase II se iniciará una vez terminada la fase I y si se acepta emplear el acero de fabricación Mexicana para la construcción del puente.

a) Condiciones de ensaye.

La amplitud de las cargas para éstas pruebas corresponderá a una variación de esfuerzos que tendrá como máximo el 80% de su resistencia efectiva determinada en un especimen de prueba adyacente, y un mínimo determinado para un rango de esfuerzos de  $195 \text{ N/mm}^2$ .

La prueba se suspenderá después de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga.

Las rupturas válidas deberán producirse en la zona central del especimen. Las rupturas dentro del dispositivo de sujeción se consideran sin valor.

b) Criterios de aceptación.

- - Lote inferior a 50 toneladas.

Se realizará una prueba de fatiga con una de las tres muestras. El lote es aceptado si el espécimen soporta  $2 \times 10^6$  ciclos sin ruptura; en caso contrario se ensayarán las otras dos muestras y el lote será rechazado si una de las muestras falla antes de  $2 \times 10^6$  ciclos.

- - Lote igual o superior a 50 toneladas.

Se realizarán dos pruebas con dos de las tres muestras. El lote será aceptado si ambos especímenes soportan  $2 \times 10^6$  ciclos sin ruptura.

Si una de las dos primeras pruebas no es satisfactoria, se realizará una tercera prueba.

El lote será aceptado si ésta última prueba es satisfactoria.

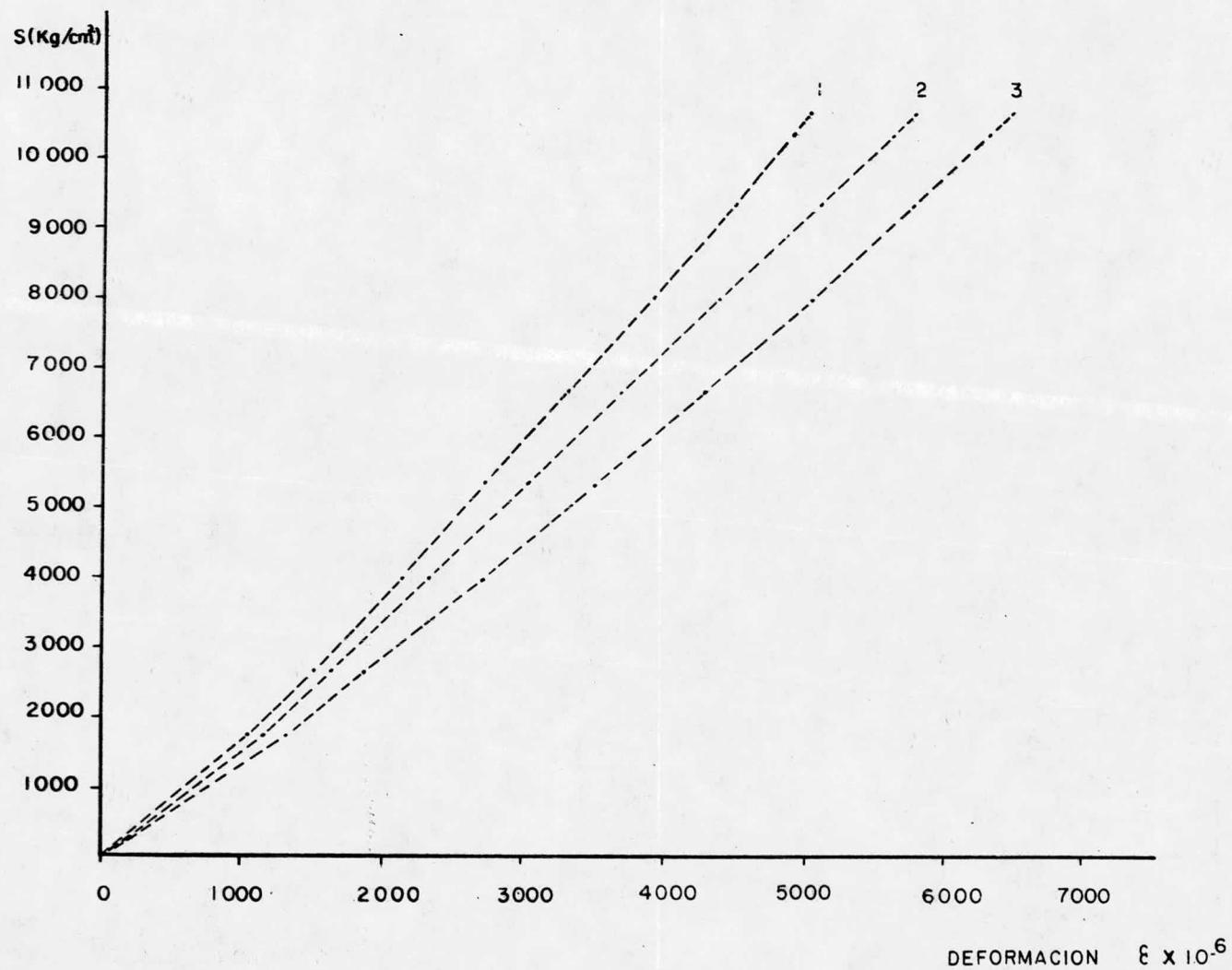
El lote será rechazado si ésta prueba no es satisfactoria.

#### PRUEBAS DE CALIBRACION.

Estas pruebas se realizan previas a la prueba de fatiga con el objeto de determinar la relación esfuerzo deformación del cable. Son realizadas en máquinas de tipo universal de funcionamiento estático que nos proporcionan la carga que es aplicada al cable, con el propósito de poder comparar posteriormente la relación esfuerzo deformación con la obtenida del espécimen de prueba una vez ya montado en el dispositivo y así

GRAFICA DE CALIBRACION ESTATICA PARA EL ESPECIMEN No. 3

UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE EXTENSOMETRO



CARGA Kg	ESFUERZO	EXT. 3	EXT. 1	EXT. 2
Kg	Kg/cm <sup>2</sup>	def. unitaria	def. unitaria	def. unitaria
0	0	0	0	0
2650	1767	1320	1038	1150
4000	2667	1860	1520	1625
6000	4000	2710	2136	2350
8000	5333	3500	2716	3025
10000	6667	4280	3316	3700
12000	8000	5050	3916	4400
14000	9333	5750	4496	5125
15500	10333	6320	4915	5625
16000	10667	6465	5020	5800
módulo de elasticidad		1729835	2235058	1913978

- 1 Extensometro eléctrico soldable
- 2 Extensometro mecánico
- 3 Extensometro eléctrico pegable

poder fijar las cargas tanto máxima como mínima, a que será sometido el -  
especimen.

Otra prueba realizada, es la prueba de tensión estática a la ruptura  
en especímenes de las mismas características que los sometidos a la prue-  
ba de fatiga con el objeto de determinar la resistencia a la ruptura por  
tensión, módulo de elasticidad y límite elástico para una deformación uni-  
taria de 1.0% en la prueba de tensión.

#### CRITERIO DE PRUEBA.

Se procedió a efectuar los ensayos de fatiga bajo carga de amplitud-  
constante de los especímenes de cable para obtener tanto diagramas de - -  
Wohler como de Smith.

Para determinar el rango máximo de variación de carga que los especí-  
menes pueden soportar sin ruptura para una endurance de  $2 \times 10^6$  ciclos -  
de carga, los niveles máximos de carga para los ensayos serán constantes-  
e iguales a:

$$F_{1\text{máx}} = 0.55 F_{Rg}$$

$$F_{2\text{máx}} = 0.80 F_{Re}$$

en donde

$F_{Rg}$  es la capacidad nominal a tensión, es decir

$$(F_{Rg} = 177 \times 150 = 265.5 \text{ kN})$$

$F_{Re 1.0}$  es la carga correspondiente al límite nominal de fluencia al 1.0% de deformación  $F_{Re} = 233 \text{ kN}$

$A_R$  es el área nominal de la sección transversal del torón.

Los ensayos consistieron en determinar el número de ciclos de carga dinámica de amplitud constante que los especímenes soportan sin romperse, para cada uno de los rangos de carga seleccionados, entre una carga superior fija ( $F \text{ máx.}$ ) y una carga inferior ( $F \text{ mín.} = F \text{ máx.} - \Delta F$ ) que un espécimen es capaz de soportar antes de la ruptura.

En ningún caso se llevaron los ensayos a más de  $3 \times 10^6$  ciclos. El rango de carga a una vida de fatiga de  $2 \times 10^6$  ciclos, se define como el rango de carga que produce por lo menos una ruptura entre  $2 \times 10^6$  y  $3 \times 10^6$  ciclos.

La determinación del límite de fatiga de los especímenes a  $2 \times 10^6$ -ciclos para el valor impuesto de carga superior, se logró por medio de decrementos sucesivos de carga inferior, realizándose ésto para cuatro (4) especímenes de características similares. Dicho límite es la aportación principal de la prueba y constituye el criterio de aceptación de un determinado tipo de acero, pues proporciona la amplitud de rango de carga que un espécimen resiste antes de fallar, es decir, define el rango -

dentro del cual puede considerarse seguro el comportamiento del acero ante la fatiga.

#### CONTROL DE LA PRUEBA.

El control de la prueba se hizo por medio de un sistema de instrumentación aplicado al cable por medio de una celda eléctrica, un lector de deformaciones eléctrico y un osciloscopio, los cuales trabajan en forma conjunta para poder medir la señal ondulatoria producida por la variación de impulsos de carga. Cabe señalar que el equipo utilizado así como la supervisión de la prueba estuvo acorde con la usada para este tipo de pruebas en otras partes del mundo, lo que le da relevancia y trascendencia a la prueba. Además, la carga fué controlada por medio de las cartúlas indicadoras de carga con que cuenta la máquina tipo universal - Amsler, obteniéndose la carga deseada a partir de las deformaciones determinadas en las pruebas de calibración realizadas.

Uno de los factores objeto de más cuidado fué el de falla en el anclaje, pues la falla ocurría aún para cargas relativamente bajas anulando de ésta manera la validez de la prueba. Sin embargo, ésto fué corregido por medio de una protección en esa zona y un adecuado sistema de anclaje.

Cabe hacer notar que el acero utilizado en ésta prueba procedió en su totalidad de un sólo rollo de cable (rollo No. 2) debido a que sus ca

racterísticas se aproximaron más a las especificaciones requeridas.

## C A P I T U L O    V I I REPORTE DE RESULTADOS

Reporte que presenta los resultados de la fase I de las pruebas dinámicas llevadas a cabo en aceros de presfuerzo de fabricación nacional con el objeto de determinar sus características dinámicas.

Este proyecto de investigación incluye en sus resultados, los obtenidos en los laboratorios Mexicano y Estadounidense, puesto que ambos conforman la estrategia corroborativa y constituye el punto de análisis del citado proyecto de investigación, de manera que concilie al mismo tiempo y en forma categórica, el doble objetivo que de éste se desprende, objetivos los dos de importancia trascendente; el primero, caracterizar dinámicamente el acero de presfuerzo mexicano con miras a ser utilizado en los tirantes del puente Coatzacoalcos II, el segundo, es confirmar el grado de precisión con que fué implantada en México la metodología de prueba utilizada en éste proyecto de investigación.

### RESULTADOS DE ENSAYES DINAMICOS DE LABORATORIO REALIZADOS EN ESTADOS UNIDOS Y MEXICO.

Resultados de los ensayos realizados en Estados Unidos.

Las pruebas fueron hechas de acuerdo a la norma British Standard - 5896, usando cuatro muestras de cable que son los rollos 2, 6, 22 y 23.

El área transversal de los cables fué calculada de acuerdo a la norma antes mencionada, los resultados son dados en la tabla VII-1. La tabla VII-2 muestra los diámetros de cada uno de los alambres de que constan los especímenes de los diferentes rollos, además nos proporcionan el área total del cable.

El equipo utilizado para los ensayos de fatiga ha sido desarrollado previamente para otras pruebas similares (ver figura VII-1). Cada uno de los elementos que lo componen son cuidadosamente alineados en forma concéntrica, siendo introducido el cable a través del centro de cada uno de éstos elementos.

Las cargas fueron controladas por un sistema hidráulico automático.

Los anclajes usados fueron a base de cuñas y barriletes, el área afectada por las cuñas fué protegida con laminillas de aluminio para evitar fallas en el anclaje.

Cada uno de los especímenes de prueba fué cortado con disco abrasivo, con una longitud entre anclajes de 1200 a 1300 mm y posteriormente instalado en el dispositivo.

Una vez ya montado el cable, fué aplicada una pequeña presión con -

el propósito de checar el alineamiento y acomodo de las cuñas.

Después la carga es incrementada al nivel deseado y es iniciada la acción dinámica. La carga fué mantenida dentro de  $\pm 1\%$  en la prueba y - la detección de cualquier error en la carga se hizo por medio de una señal retroalimentada por una celda de carga.

La ruptura de un sólo alambre fué suficiente para detener la prueba y considerar fallado el especimen, la prueba fué realizada a una frecuencia de 7 a 14 Hz. Las frecuencias bajas fueron usadas para los rangos de carga más grandes.

Los ensayos de fatiga fueron efectuados en dos niveles, como es requerido para éste tipo de investigación. La serie "A" formada por los ensayos a  $0.55 F_{Rg}$  (146.0 KN) mientras que la serie "B" se compone de las pruebas realizadas a  $0.80 F_{Re}$  (186.4 KN) siendo  $F_{Rg}$  la capacidad nominal a la tensión veces el área nominal ( $F_{Rg} = 1770 \times 150 = 265.5$  KN) y  $F_{Re}$  es la carga correspondiente al límite nominal de fluencia al 1% de deformación ( $F_{Re} = 233$  KN). Las tablas de la VII-3 a la VII-6 muestran numéricamente los resultados de las pruebas para cuatro rollos de cable, cada tabla consta de cuatro columnas donde se enlistan el rango de carga, las cargas máximas y mínimas, los ciclos de durancia y en la última columna se dá la localización y número de alambres fallados para cada prueba. Las pruebas enlistadas no falladas se detuvieron después de haber soportado más de 3 millones de ciclos de carga.

Los resultados de los ensayos realizados en México aparecen en la - tabla VII-7 y muestran los rangos de carga y endurancia de cuatro especímenes tomados del rollo No. 2, las características de éste cable son las siguientes:

Torón de siete alambres.

Area del torón 150 mm<sup>2</sup>

Calidad nominal 1550/1770 N/mm<sup>2</sup>

Diámetro 15.7 mm

Las condiciones de prueba fueron las descritas en el capítulo VI y son las mismas utilizadas por el laboratorio de Texas, cumpliendo al - - igual que éstas, los requerimientos para la realización y control de dichas pruebas.

Frecuencias de 5 y 10 hz fueron utilizadas en los ensayos, utilizán - dose la frecuencia de 10 Hz para una amplitud de rango de carga bajo.

El nivel de carga máximo fué mantenido constante en las cuatro prue - bas, mientras que el nivel inferior fué variando con decrementos de la - carga mínima para cada prueba, de tal manera que la amplitud de rango de carga se fué ampliando hasta localizar el rango deseado.

TABLAS DE RESULTADOS.

Tabla VII-1

A r e a s .	
Rollo No.	Area (mm <sup>2</sup> )
2	151.2
6	150.9
22	151.3
23	151.7

Tabla VII-2

Diámetros y Areas acumuladas de los diferentes alambres de las mues  
tras.

Alambre	R o l l o    N o .			
	2	6	22	23
1	5.26	5.26	5.26	5.26
2	5.23	5.26	5.26	5.23
3	5.26	5.23	5.23	5.23
4	5.23	5.23	5.23	5.23
5	5.21	5.21	5.23	5.26
6	5.21	5.21	5.21	5.26
Central	5.46	5.41	5.44	5.36
Area Acum.	152.5	152.1	152.5	152.2

Tabla VII-3

Cable No. 2

Resultado de la Prueba de Fatiga  
para el Rollo No. 2.

I Serie "A" Carga Máxima 146 kn.

Rango de carga (kn)	Cargas Kn	Ciclos a la falla	Localización de la falla
37.4	110.3 - 147.7	358,530	1 a 12" 1 a 11" y la 1-3/8
29.0	117.0 - 146.0	212,630	1 en el anclaje
29.0	117.0 - 146.0	962,160	1 a 24" 1 a 34"
24.8	121.2 - 146.0	1 511,380	2 en el anclaje
22.7	123.3 - 146.0	1 720,000	1 en el anclaje
20.9	125.1 - 146.0	3 088,880	No falla
20.9	125.1 - 146.0	3 600,800	No falla
37.4	108.6 - 146.0	534,740	2 en el anclaje
29.0	117.0 - 146.0	694,810	1 en el anclaje
24.8	121.2 - 146.0	4 110,800	No falla

II Serie "B" Carga Máxima

37.4	150.8 - 188.2	296,410	1 a 1/8"
22.7	163.7 - 186.4	2 278,950	1 en el anclaje
22.7	163.7 - 186.4	683,580	1 en el anclaje
20.9	165.5 - 186.4	1 285,650	1 en el anclaje
20.9	165.5 - 186.4	1 229,740	1 en el anclaje
29.0	157.4 - 186.4	385,090	1 en el anclaje
29.0	157.4 - 186.4	452,990	1 en el anclaje

Tabla VII-4

Cable No. 6

## Resultados de la Prueba de Fatiga

I Serie "A"

Carga Máxima 146 (kn).

Rango de Carga. Kn	Cargas Kn		Ciclos a la falla.	Localización de la falla.
37.4	110.3	147.7	532,840	1 a 11"
29.0	117.0	146.0	674,770	1 a 2"
24.8	121.2	146.0	1 336,050	1 a 9.5"
22.7	123.3	146.0	2 511,650	1 en el anclaje
22.7	123.3	146.0	1 725,130	1 a 3.5"
20.9	125.1	146.0	3 163,560	No falla
20.9	125.1	146.0	1 213,860	1 a 2"
37.4	108.6	146.0	336,190	2 en el anclaje 1 a 1"
29.0	117.0	146.0	2 960,700	3 en el anclaje
24.8	121.2	146.0	715,450	2 a 24"
37.4	108.6	146.0	191,560	1 en el anclaje

II Serie "B"

29.0	157.4	186.4	245,980	1 en el anclaje
29.0	157.4	186.4	277,760	1 en el anclaje
22.7	163.7	186.4	1 106,360	1 en el anclaje
20.9	165.6	186.4	1 306,610	1 en el anclaje
20.9	165.5	186.4	5 580,030	No falla
29.0	157.4	186.4	648,150	2 en el anclaje
29.0	157.4	186.4	786,180	1 en el anclaje
29.0	157.4	186.4	871,260	1 en el anclaje

Tabla VII-5

Cable No. 22

## Resultados de Prueba de Fatiga

I Serie "A" Carga Máxima 146 kn

Rango de Carga. Kn	Cargas Kn		Ciclos a la falla.	Localización de la falla.
37.4	110.3	147.7	499,220	2 a 7"
29.0	117.0	146.0	438.,890	1 a 20"
24.8	121.2	146.0	1 914,760	1 en el anclaje
22.7	123.3	146.0	1 050,820	2 en el anclaje
20.0	126.0	146.0	3 545,470	No fallo
20.9	125.1	146.0	3 321,150	No fallo
20.9	125.1	146.0	503,306	2 en el anclaje
37.4	108.6	146.0	427,250	1 a 18"
29.0	117.0	146.0	540,330	1 en el anclaje
24.8	121.2	146.0	2 858,420	1 en el anclaje
24.8	121.2	146.0	1 881,390	1 en el anclaje
29.0	117.0	146.0	1 623,390	1 en el anclaje

II Serie "B" Carga Máxima 186.4 kn

29.0	157.4	186.4	2 304,450	2 a 36"
22.7	163.7	186.4	2 519,830	1 en el anclaje
22.7	163.7	186.4	1 063,710	1 a 18"
20.9	165.5	186.4	3 014,960	No fallo
20.9	165.5	186.4	950,370	1 en el anclaje
29.0	157.4	186.4	614,710	1 en el anclaje

Tabla VII-6

Cable No. 23.

## Resultados de la Prueba de Fatiga

I Serie "A" Carga Máxima = 146 kn

Rango de Carga. Kn	Cargas Kn		Ciclos a la falla.	Localización de la falla.
37.4	110.3	147.7	470,470	2 a 35"
29.0	117.0	146.0	564,750	1 a 20"
24.8	121.2	146.0	4 001,330	1 a 14"
				2 en el anclaje
24.8	121.2	146.0	901,530	1 a 2"
				1 en el anclaje
22.7	123.3	146.0	4 014,200	No fallo
22.7	123.3	146.0	4 248,120	No fallo
22.7	123.3	146.0	3 524,700	No fallo
37.4	108.6	146.0	179,020	1 en el anclaje
37.4	108.6	146.0	428,040	2 a 6"
29.0	117.0	146.0	2 281,320	1 a 1/4"

II Serie "B" Carga Máxima = 186.4 kn

29.0	157.4	186.4	337,900	1 en el anclaje
22.7	163.7	186.4	643,000	1 en el anclaje
20.9	165.5	186.4	889,030	1 en el anclaje
20.9	165.5	186.4	2 926,020	1 en el anclaje
29.0	157.4	186.4	822,490	1 a 12"
29.0	157.4	186.4	455,120	1 en el anclaje

Tabla VII-7

Resultados de la Prueba de Fatiga

	Rango de Carga. Ton.	Carga		No de Ciclos a la falla.	Rollo No.
		máx. Ton.	mín. Ton.		
1	2.7	16.0	13.3	1 536,000	2
2	2.7	16.0	13.3	2 996,200	2
3	3000	15.5	12.5	2 703,200	2
4	4500	15.5	11.0	602,700	2

Cabe mencionar que los ensayos realizados en el laboratorio mexicano, sólo fueron efectuados para el nivel de  $0.55 F_{Rg}$  para cuatro especímenes que corresponden a la primera serie. La suspensión de la prueba se decidió dada la confirmación de la alta susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno del acero de presfuerzo de fabricación nacional determinada mediante pruebas que para el efecto fueron realizadas.

Esta prueba de susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno fue normalizada en 1980 por la FIP y su objeto es determinar el grado de susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno que presentan las diferentes calidades y/o manufacturas de aceros de presfuerzo. La citada prueba consiste en la exposición de un espécimen de acero a un medio ambiente hostil (hidrógeno al tiocianato de amonio), cronometrar su duración en fallar y comparar éste tiempo con un escantillón o estandar.

La influencia de los resultados de ésta prueba en la suspensión de los ensayos de fatiga es determinante toda vez que si un acero de presfuerzo no cumple con las especificaciones de la prueba de susceptibilidad a la fragilización, la caracterización dinámica que de éste acero se obtenga de los correspondientes ensayos de fatiga, no se cumple, de manera que ni la amplitud de rango de carga ni la endurancia podrían ser garantizados para éste acero, consecuencia esencial de la fragilización, fenómeno que disminuye las características de ductilidad y resistencia a la fatiga. Por lo que la continuación de los ensayos de fatiga ya no

tenía objeto, puesto que aún obteniendo resultados satisfactorios, estos no corresponderían con el comportamiento del acero en la estructura bajo condiciones de fatiga y un medio ambiente corrosivo, requerimientos éstos necesarios para el acero que forme los tirantes del puente Coatzacoalcos II.

Sin embargo, los resultados obtenidos de los laboratorios Mexicano y Estadounidense, proporcionan datos suficientes para poder caracterizar dinámicamente el acero de presfuerzo nacional, así como confirmar la capacidad del laboratorio Mexicano para realizar investigaciones de caracterización dinámica de acero de presfuerzo utilizando la metodología de prueba que se usa en los laboratorios más desarrollados al respecto.

Basándonos en los resultados de ésta investigación indicados en las tablas, se puede hacer la observación siguiente:

Las muestras de cable 2 y 23 dieron el mejor comportamiento dinámico con un rango de carga medio de 24 KN para  $2 \times 10^6$  ciclos. El cable No. 22 dió el siguiente mejor resultado con un rango de carga medio de 18 KN mientras que el número 6 dió el comportamiento más pobre con un rango de carga inferior a 16 KN.

## C A P I T U L O    V I I I ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En todo proyecto de investigación, el análisis de resultados es sin lugar a dudas un aspecto muy importante, dado que es el conjunto de datos e inferencias producto de la observación, relación, medición y comparación que sobre los resultados de prueba se realice. Objetivo de un análisis de resultados es obtener conclusiones que determinen la proximidad de los resultados con relación a lo esperado, las posibles causas que originan la divergencia, así como también los procesos y recomendaciones mediante las cuales se puede favorecer el resultado de dicho proyecto de investigación.

El estudio analítico de resultados efectuado para muestras de acero de presuferzo, se apoya en la relación y comparación de los resultados obtenidos de los correspondientes ensayos de laboratorio. Este análisis consta de una serie de diagrama de Smith y Wohler, los cuales representan en forma gráfica el comportamiento dinámico de las diferentes muestras de cable (rollos 2, 6, 22 y 23).

Una vez realizado el análisis se infiere y al mismo tiempo se corrobora notaciones ya antes citadas en el reporte de resultados, Capítulo -

## VII.

En nuestro acero de presfuerzo (CAMESA), se manifiesta en los diagramas una gran dispersión de valores en su compartimiento, no obstante, el cuidado que se tuvo para aplicar condiciones iguales a especímenes con las mismas características, de manera que podemos encontrar durancias muy diferentes para una misma amplitud de rango de carga, lo que implica una conformación heterogénea, consecuencia probable de un no muy estricto control en el proceso de fabricación.

Otro dato resultado del análisis es la baja resistencia a la fatiga del acero nacional, obteniéndose en el cable que mejor comportamiento tuvo (rollo 2) un rango de carga de 24 KN para  $2 \times 10^6$  ciclos cuando las normas especifican un rango de carga de 29.2 KN para éste tipo de cables.

DATOS PARA LA ELABORACION DE LOS DIAGRAMAS DE SMITH

$N \geq 2 \times 10^6$ ciclos	Fmáx. Kn	Fmfn. Kn	$\Delta F$ Kn	$\sigma_{máx}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{mfn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma$ N/mm <sup>2</sup>	
Curva de Wohler 1	146.0	121.0	25	973.3	806.7	166.6	Rollo 2
Curva de Wohler 2	186.4	162.2	23.2	1242.7	1088.0	154.7	
Curva de Wohler 1	146.0	124.4	21.6	973.3	829.3	144.0	Rollo 6
Curva de Wohler 2	186.4	171.0	15.4	1242.7	1140.4	102.7	
Curva de Wohler 1	146.0	122.5	23.5	973.3	816.7	156.6	Rollo 22
Curva de Wohler 2	186.4	163.6	22.8	1242.7	1090.7	152.0	
Curva de Wohler 1	146.0	120.6	25.4	973.3	804.0	169.3	Rollo 23
Curva de Wohler 2	186.4	164.6	21.8	1241.7	1097.3	145.3	
Curva de Wohler 1	146.0	121.2	24.8	973.3	808.0	165.3	Todos los Rollos.
Curva de Wohler 2	186.4	163.0	23.4	1242.7	1086.7	156.0	

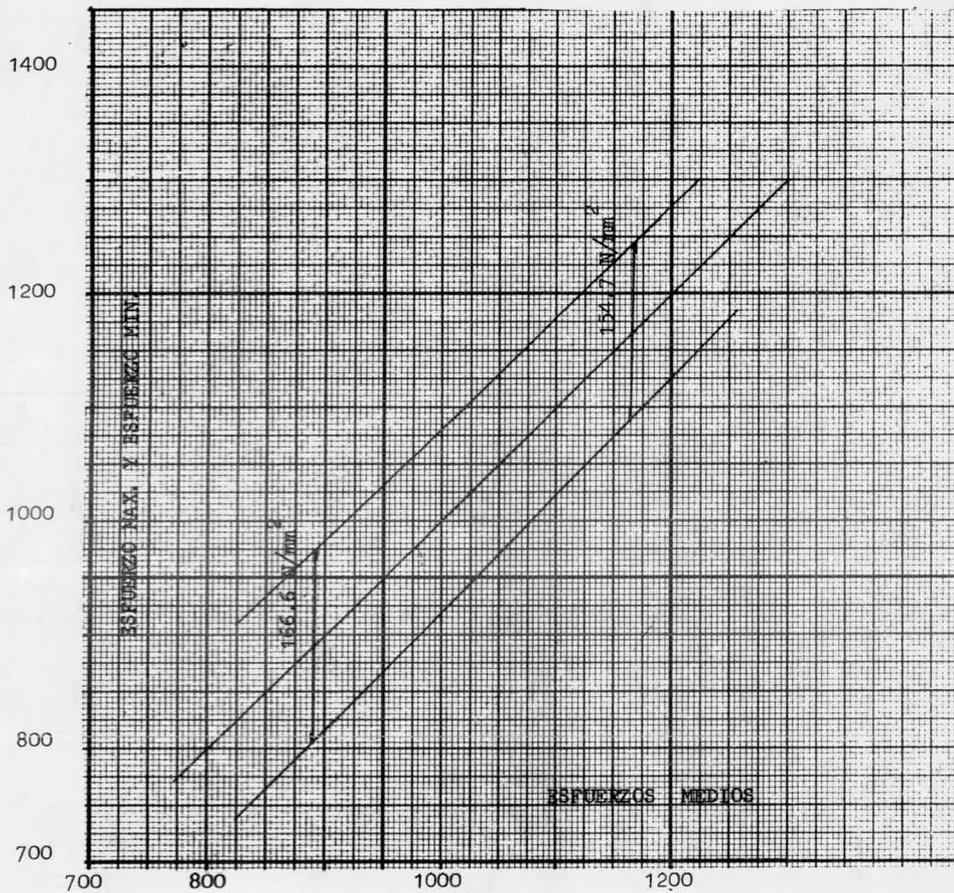
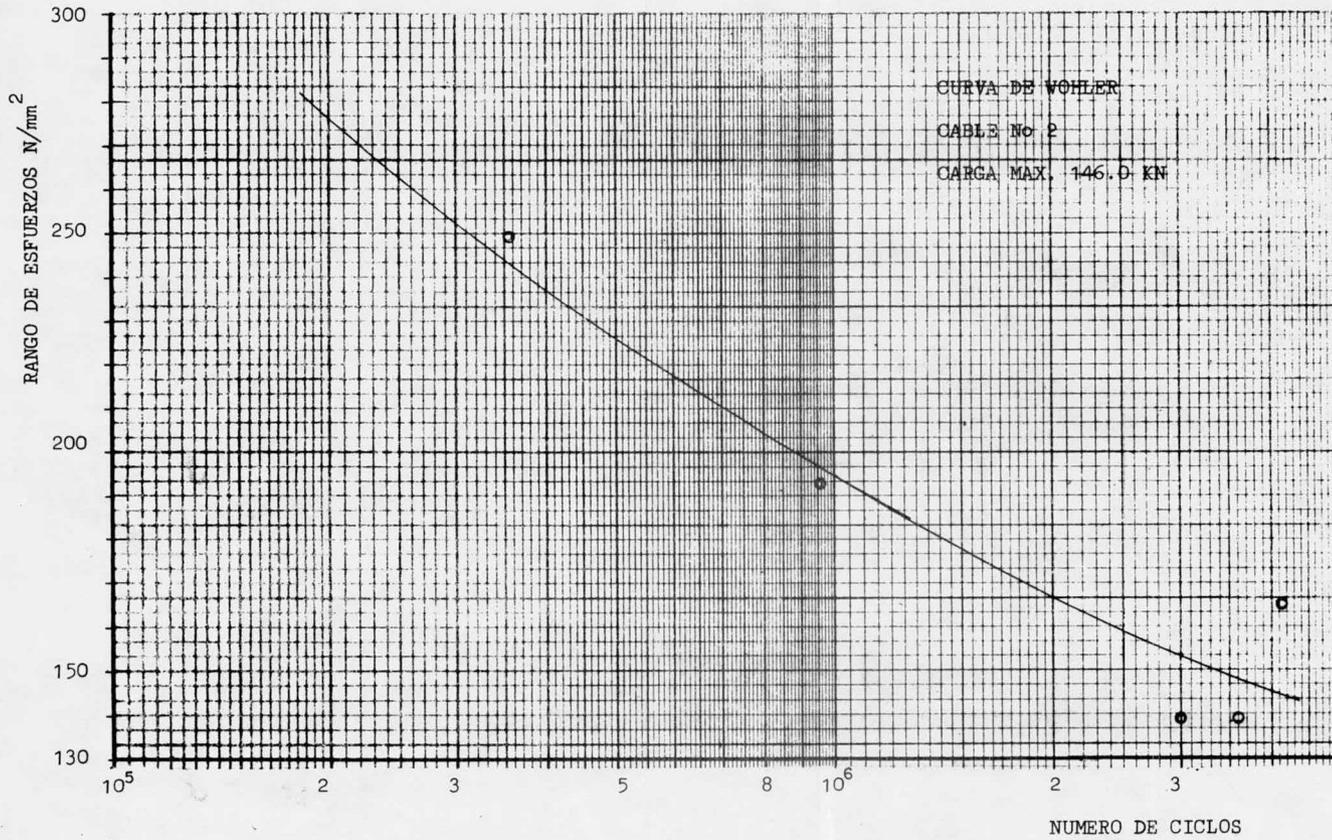
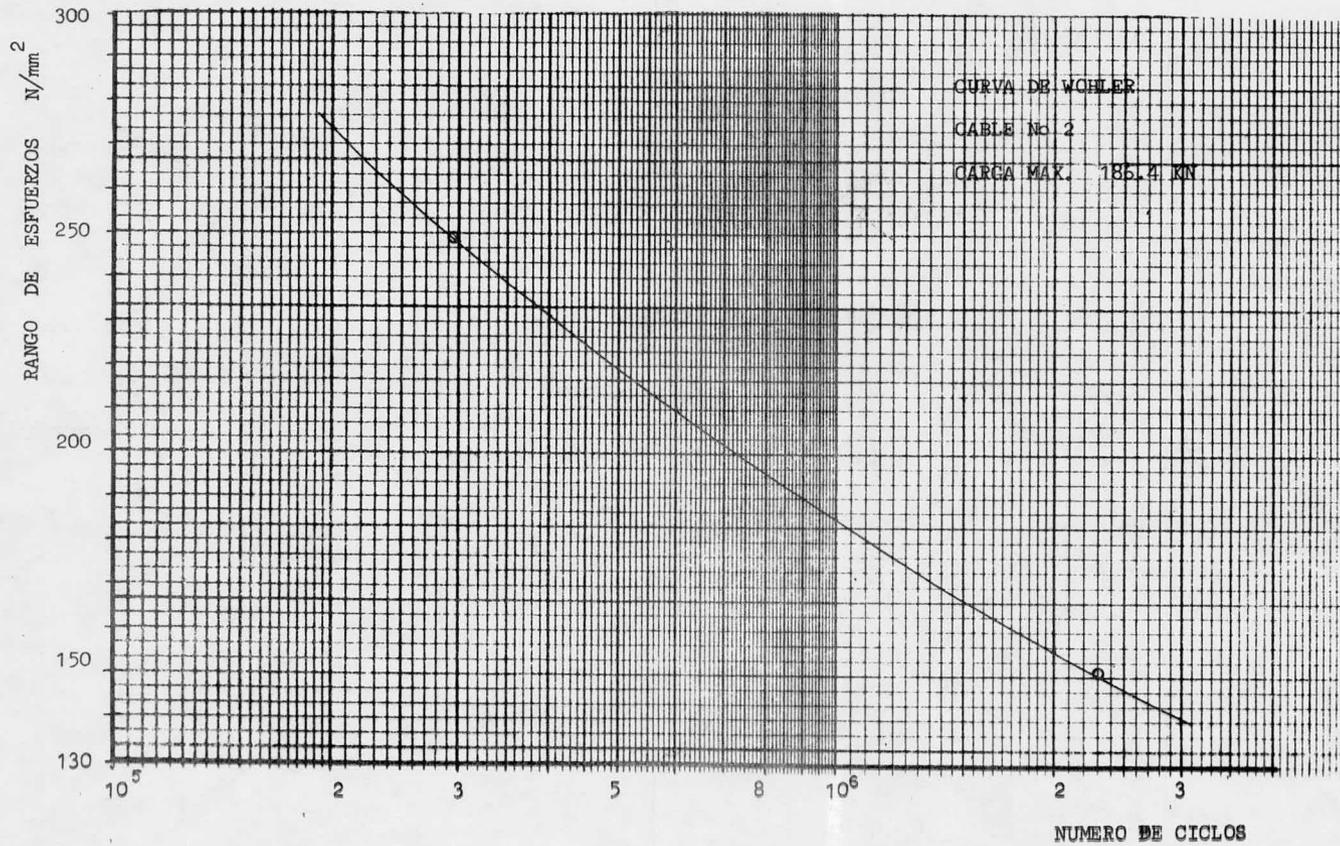


DIAGRAMA DE SMITH

CABLE No. 2





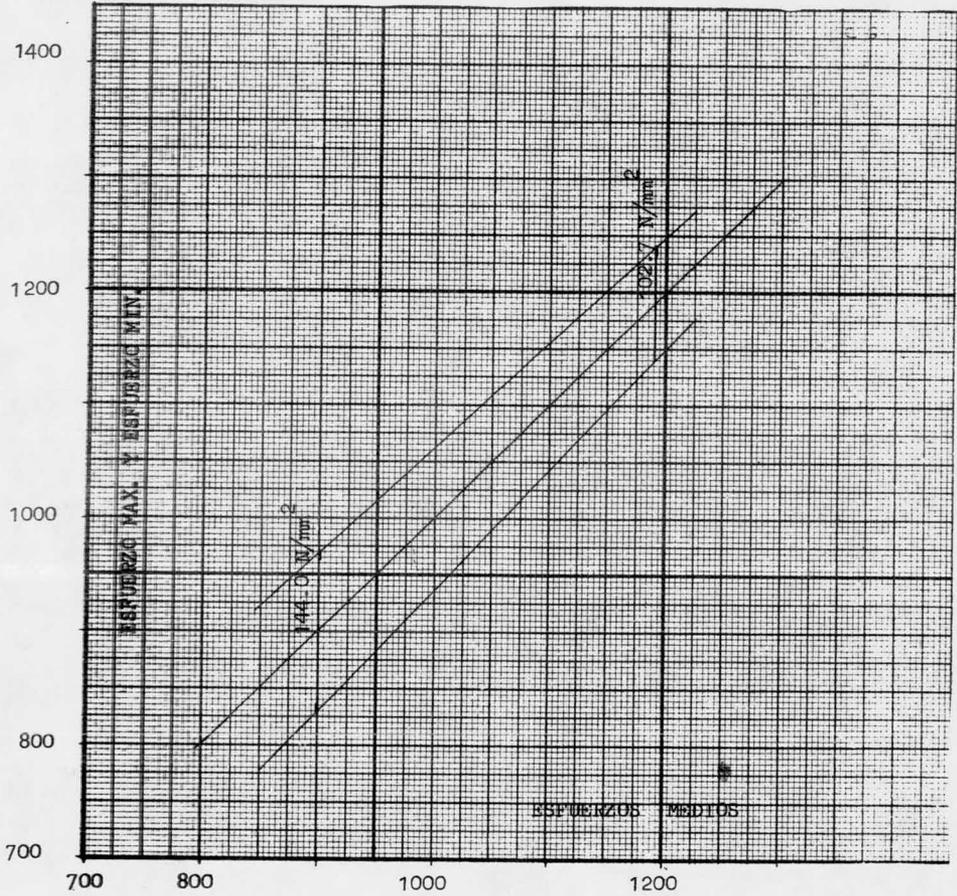
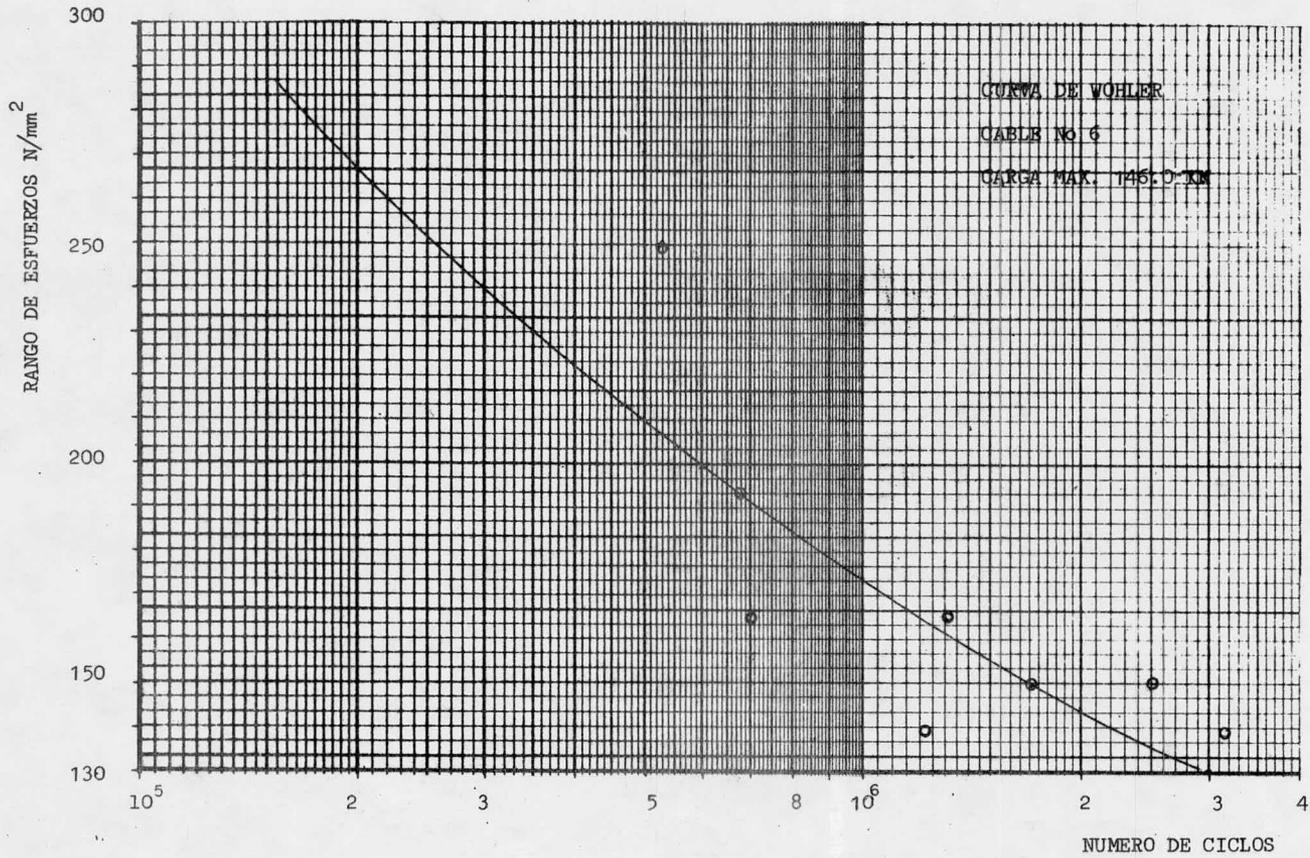
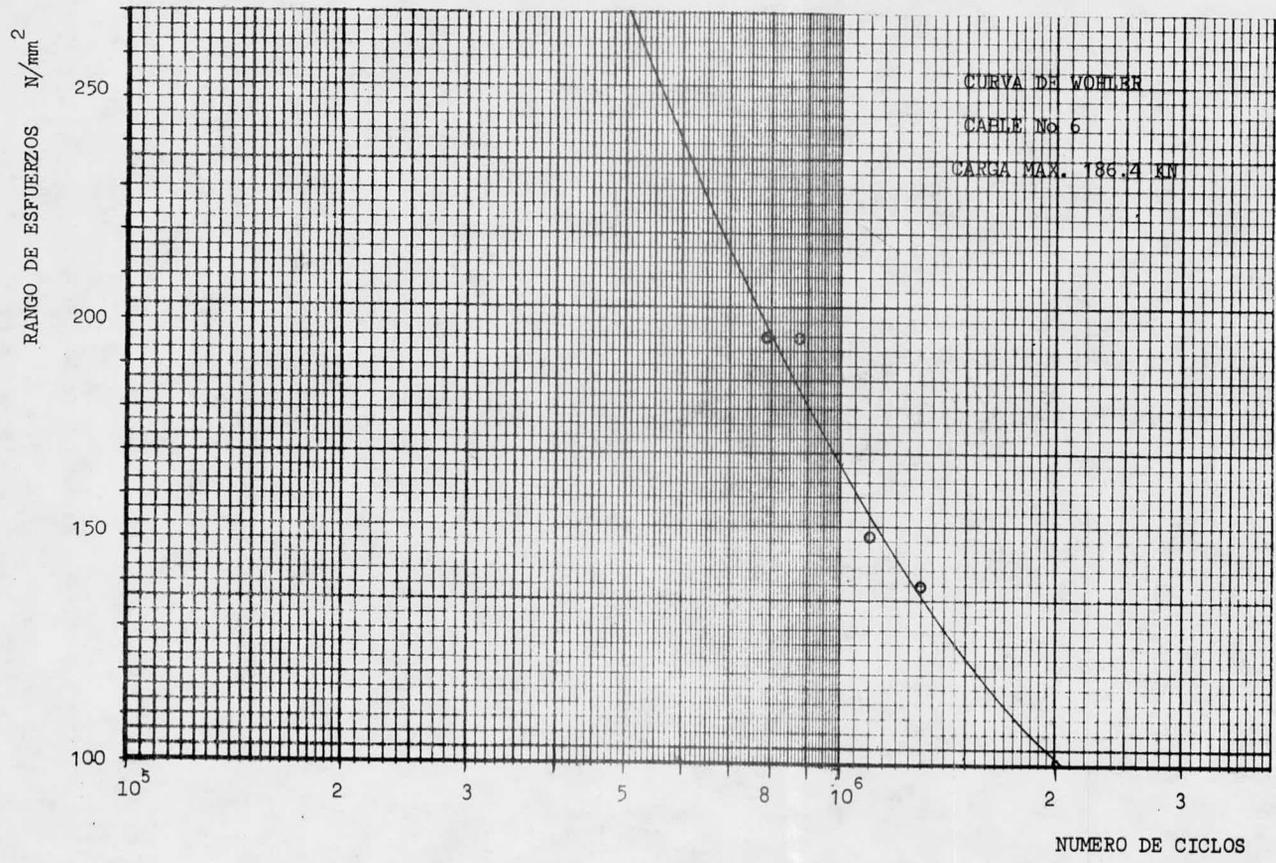
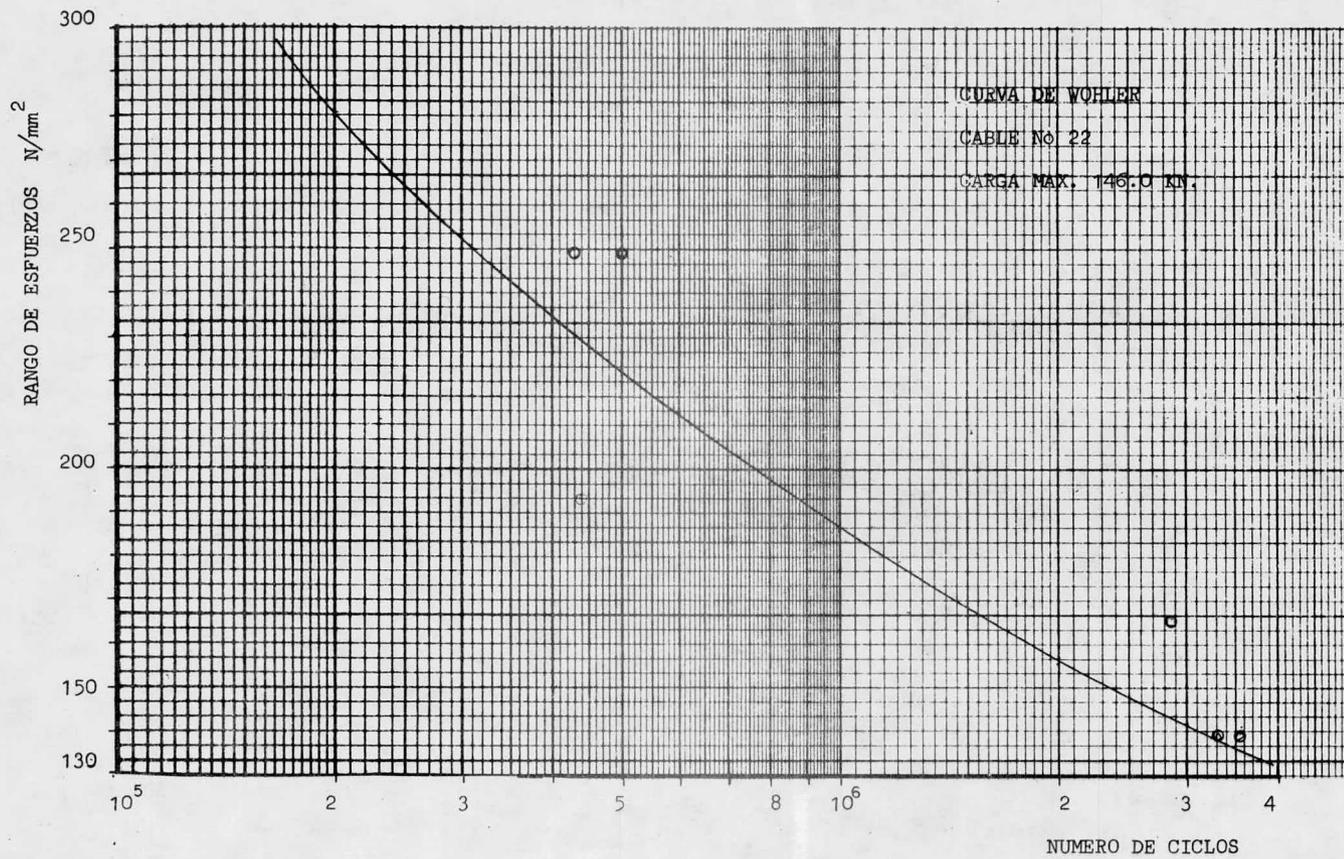


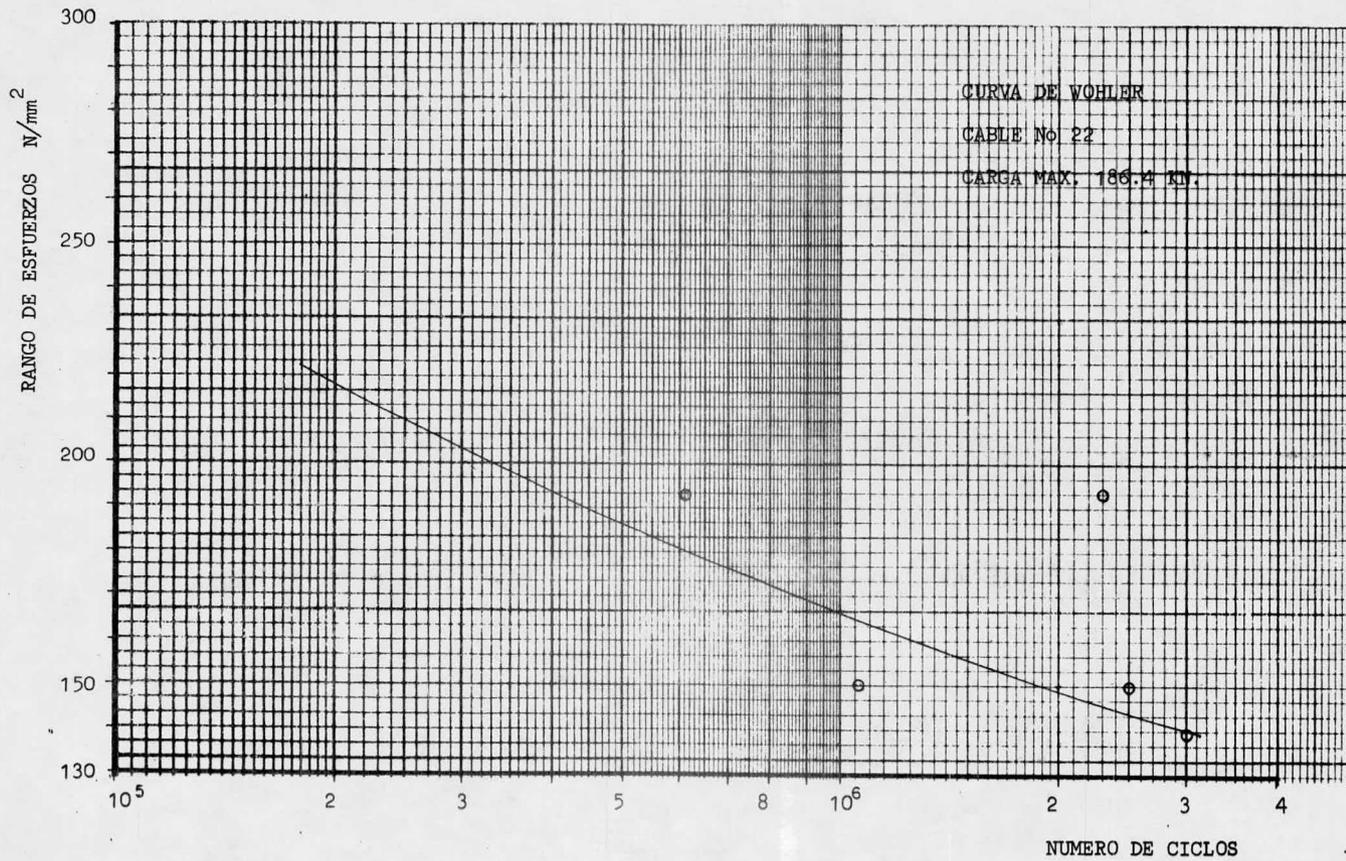
DIAGRAMA DE SMITH

CABLE No. 6









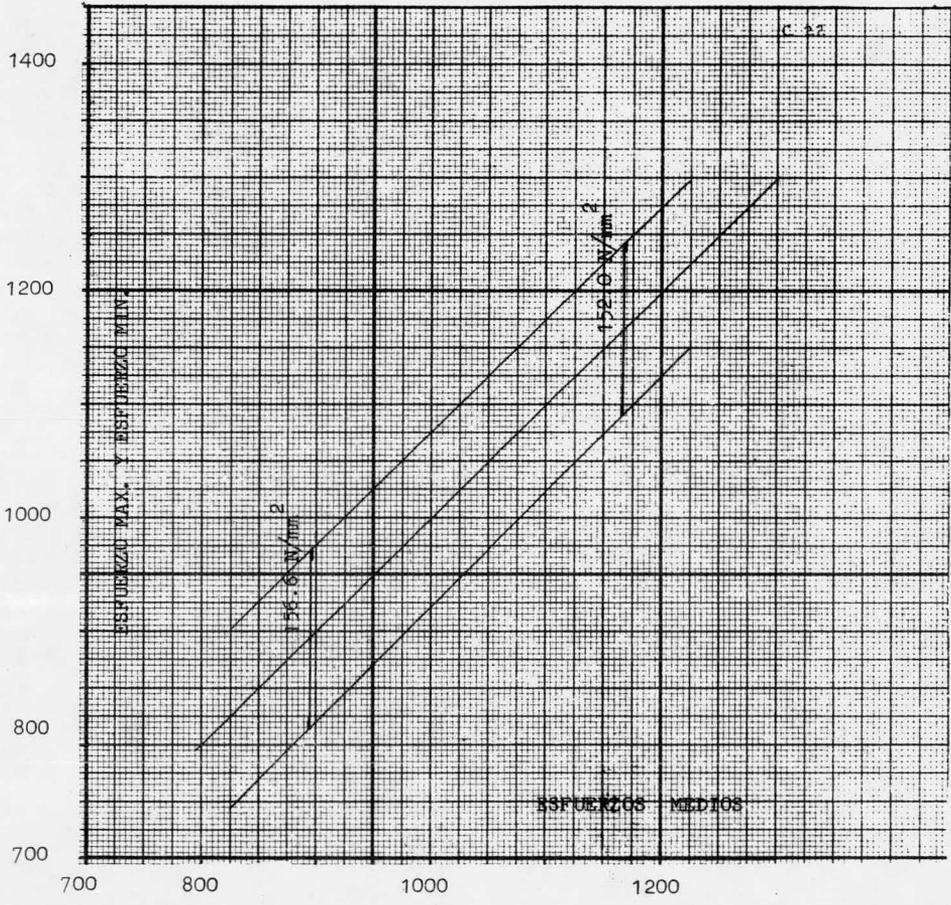
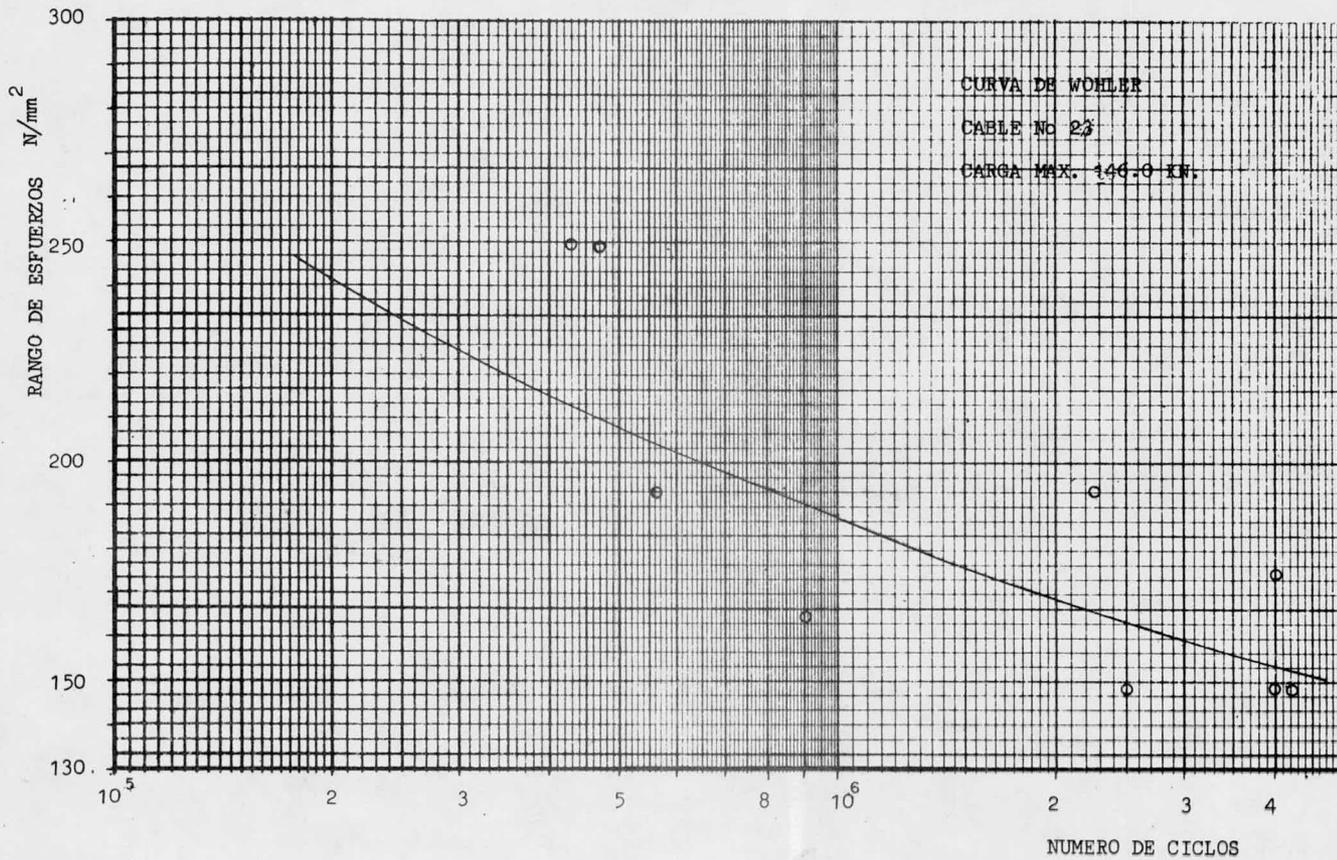
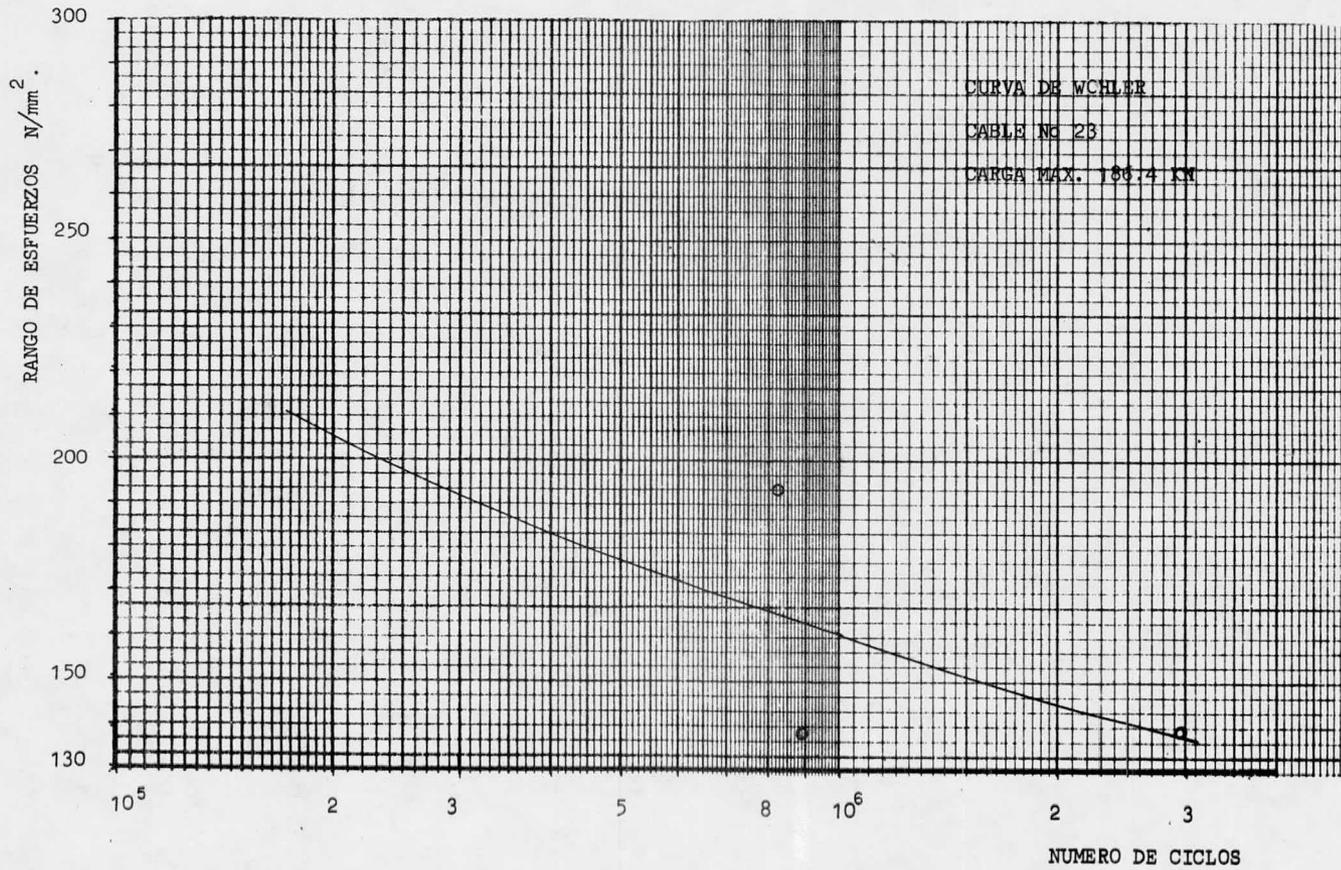


DIAGRAMA DE SMITH

CABLE No. 22





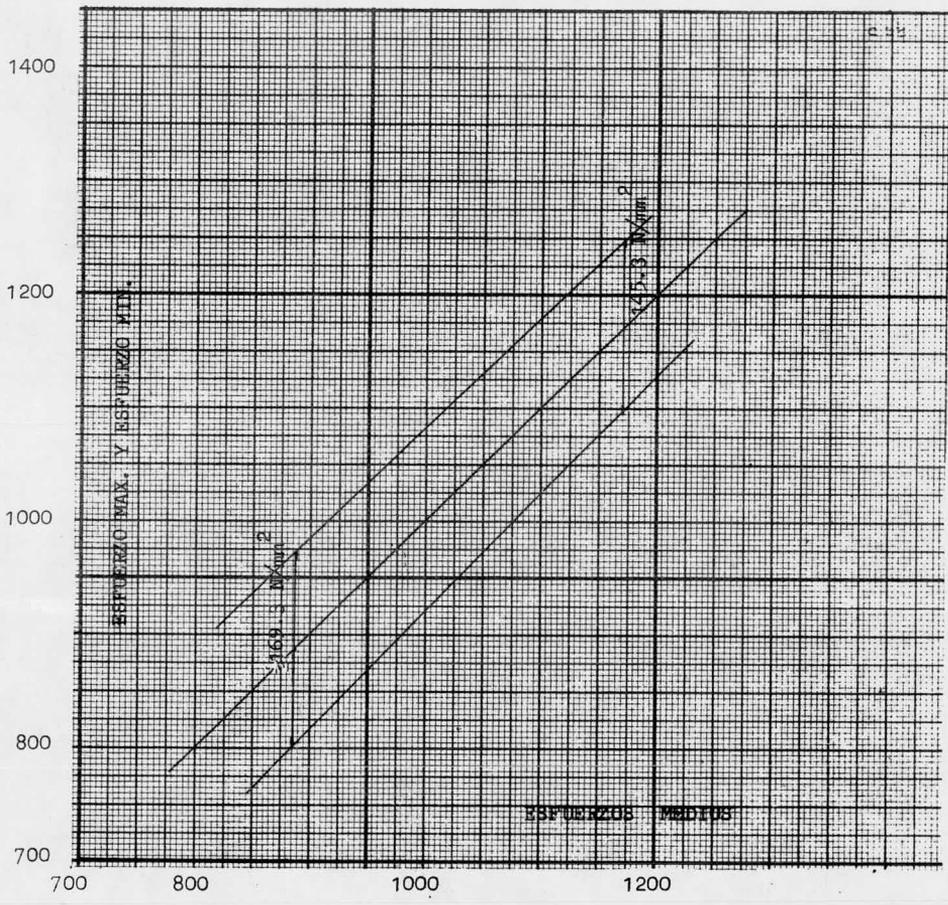
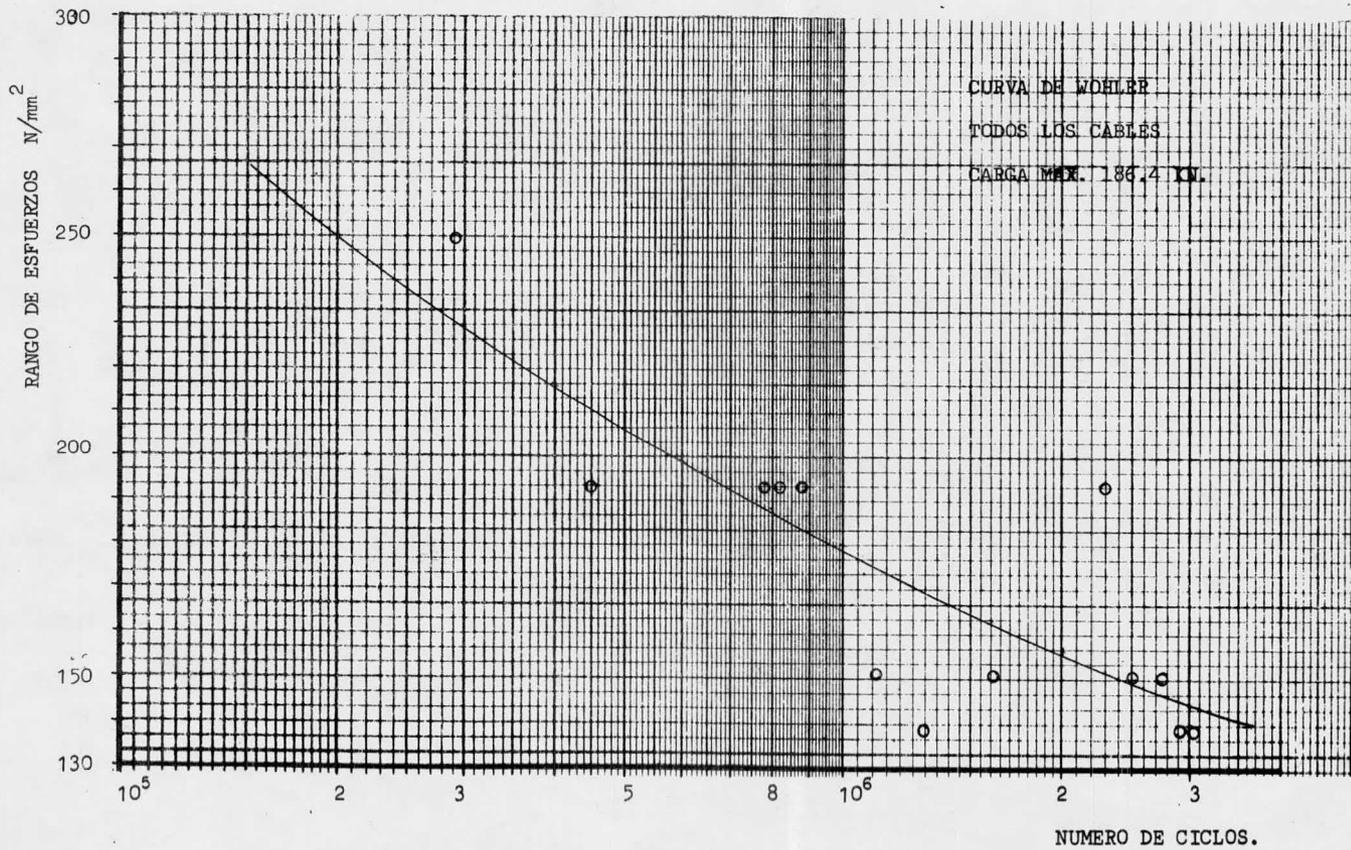


DIAGRAMA DE SMITH

CABLE No 23





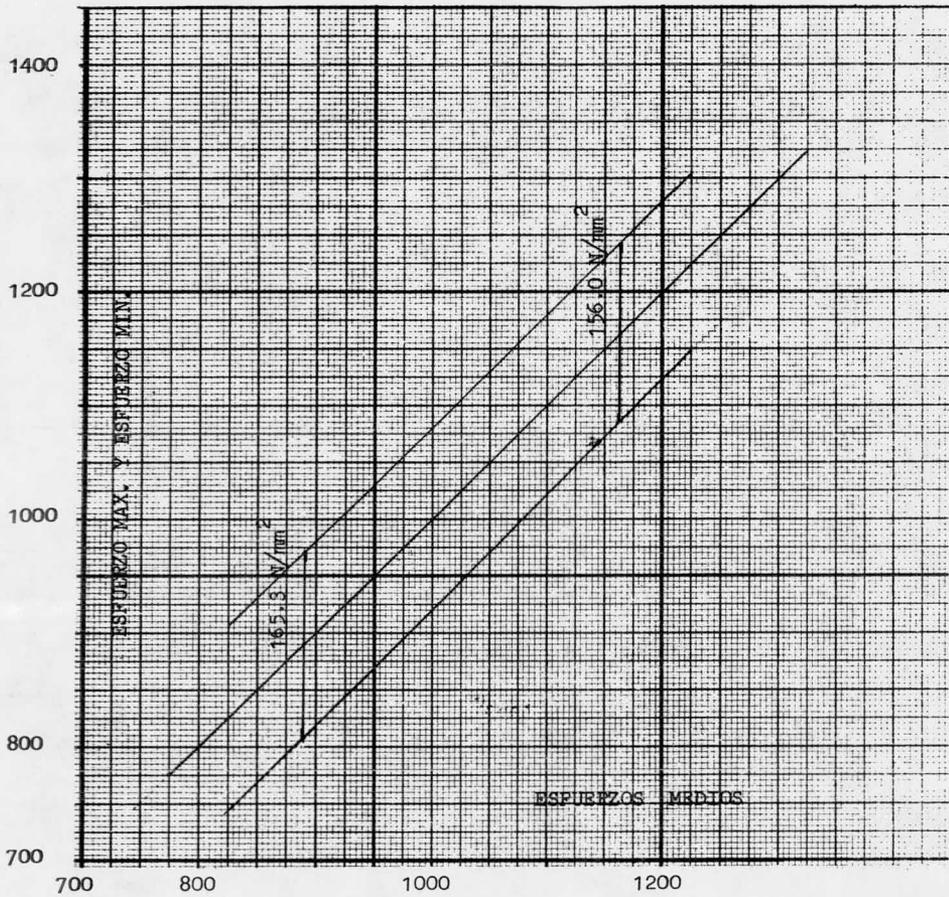


DIAGRAMA DE SMITH  
 TODOS LOS CABLES

CAPITULO I X  
RESUMEN Y CONCLUSIONES

La construcción de Puentes para salvar el paso de los ríos, de las hondonadas y de los valle profundos, ha sido siempre un acuciente desafío al ingenio y a la tecnología humana.

La manifestación más grande del desarrollo alcanzado por la ingeniería de puentes es la concepción de los puentes atirantados, en los que el criterio tradicional de sustentación de las plataformas mediante traveses trabajando a flexión ha sido transformado.

En los puentes atirantados la plataforma es soportada por tirantes, los cuales penden de una torre o mástil y son anclados a ella, haciéndola trabajar como una cuerda en compresión de una armadura triangular en cantiliver, formada por el mástil, un tirante y un segmento de la plataforma.

El sistema estructural de los puentes atirantados, permite lograr claros bastante grandes con economías muy notables, respecto al costo de los puentes suspendidos. Por lo anterior, este tipo de puentes es cada día más utilizado en el mundo.

En México, para la comunicación hacia el sureste es necesario cru -

zar el río Coatzacoalcos y antes de la construcción de un puente, éste - cruce se realizaba mediante un Chalán. El día 18 de marzo de 1982, se dá paso por medio de un puente "Coatzacoalcos", en pocos años el gran volumen de tránsito carretero y fluvial, así como accidentes ocurridos al puente, pusieron de manifiesto la conveniencia de contar con otro puente para cruzar el río.

Acorde a las condiciones de la zona y tomando en cuenta los problemas y restricciones derivados de las características del puente en servicio, se decidió que el nuevo puente debería permitir el paso simultáneo de vehículos y embarcaciones. Que siendo el ambiente de la zona hostil, altamente corrosivo, por efecto de las emanaciones de las industrias petroquímicas, de la salinidad y la frecuencia de vientos violentos, la estructura del puente debería ser de concreto.

Con las premisas anteriores y analizando diferentes alternativas se decidió la construcción del puente tipo atirantado Coatzacoalcos II, por considerarse más ventajosa y económica ésta solución. Este puente es el primer puente atirantado que se construye en México, su ubicación está localizada en Minatitlán, Ver. y tiene una longitud total de 1,170 m contando con un claro central de 288 m.

La necesidad de construir este puente requirió hacer una selección del acero de presfuerzo para los tirantes, realizándose para el efecto pruebas sobre aceros de varias nacionalidades (Belga, Francés y Mexica -

no), con objeto de establecer el acero más adecuado. Del reporte de resultados se observa, que aún cuando los tres aceros cumplieron con los requisitos mínimos, el acero Belga resultó mejor, seguido por el acero mexicano y francés por orden decreciente.

Las autoridades mexicanas aceptaron el acero belga y establecieron un convenio de adquisición de 420 toneladas, en vista de los reportes enviados por Bélgica, complementando así el estudio de sus aceros y siendo estos de calidad y comportamiento a la fatiga más que suficiente. De este convenio, sólo fué recibida la sexta parte de la cantidad solicitada, en virtud de restricciones a importaciones hechas por el gobierno mexicano.

La anterior razón, motivó considerar la utilización del acero mexicano en la construcción de los tirantes del puente, para el efecto hubo de realizarse la caracterización dinámica así como la determinación a la susceptibilidad a la fragilización de éste acero, de manera que garantice un comportamiento aceptable a la fatiga una vez constituido en tirantes.

Debido al comportamiento estructural del puente, los tirantes están sujetos a una variación de esfuerzos, provocada principalmente por el paso de vehículos causando así la fatiga de éstos. Además los puentes atirantados son estructuras con grandes deformaciones en sus elementos debido a su carácter no líneal, siendo variables las rigideces con respecto-

a las cargas, ésto los convierte en estructuras sumamente delicadas, para las cuales las teorías de diseños convencionales no son aplicables. - Esto obligó a realizar estudios especiales entre los que destacan los de fatiga y corrosión para los aceros con que se fabriquen los tirantes del puente, elementos de máxima importancia en éste tipo de estructuras.

Estos estudios fueron encargados a el Laboratorio de la Universidad de Texas, el interés de las autoridades mexicanas de absorber tecnología y hacer partícipe a la nación de los avances ingenieriles internacionales, así como la erogación que representa ésta investigación en el extranjero, fueron motivo para que esta se realizará en forma simultánea - en laboratorios mexicano y estadounidense. En el Laboratorio Mexicano - fué necesario la adaptación del equipo existente mediante dispositivos - que hicieran factibles la realización de la prueba, lo que implicó trabajo e ingenio de tecnólogos mexicanos. Lo anterior hizo posible que participáramos en la realización de los estudios de caracterización dinámica de los aceros de presfuerzo nacionales.

Por otra parte, la fatiga se define como el deterioro progresivo en la resistencia de los materiales produciéndole grietas que lo llevan inminutamente a la ruptura. La falla por fatiga ha sido encontrada en aceros estructurales, aleaciones metálicas y también en materiales no metálicos, ocurre también en elementos de diseño y forma variable, en componentes sujetos a diversas condiciones de esfuerzo y del medio ambiente, pero en todos los casos la falla de fatiga presenta por lo menos dos fac

tores en común:

- 1.- En todos los casos el elemento fué sujeto a esfuerzos fluctuantes.
- 2.- En todos los casos la grieta fué continuación de alguna pequeña discontinuidad o alguna imperfección de la superficie del elemento.

El comportamiento dinámico del acero de presfuerzo nacional fué descrito por métodos diagramáticos, resultado de numerosas pruebas y son: El diagrama de Wohler que es una gráfica que relaciona número de ciclos contra rango de esfuerzos e indica la amplitud de la oscilación de esfuerzo que puede resistir un elemento en función del número de carga y descarga que le sean aplicados. El diagrama de Smith que representa la variación que se puede producir a partir de un esfuerzo significativo para determinar el número de ciclos de carga y descarga que generalmente es de  $2 \times 10^6$  (ver figura IV-3 y IV-4), de estos diagramas se obtuvo una serie de datos del acero de presfuerzo, entre estos destacan por su importancia en la descripción del comportamiento dinámico los siguientes:

- 1.- El límite de fatiga o durabilidad límite ( $S_e$ ) que es el valor límite del esfuerzo bajo el cual un material presumiblemente puede resistir un número infinito de ciclos de esfuerzo, éste esfuerzo es el mismo en el cual la gráfica llega a hacer horizonta

tal y permanecer así.

- 2.- Vida de fatiga (N) el número de ciclos de esfuerzo, los cuales pueden ser resistidos por un espécimen en una condición de - - prueba dada.
- 3.- Daño acumulativo, se dice al daño causado por cada ciclo de es fuerzo, el cual es acumulado durante una prueba de fatiga.

Este estudio fué planeado en dos fases, en la primera, se pretende caracterizar a la fatiga el acero de presfuerzo mexicano con objeto de - decidir su utilización en la fabricación de los tirantes del puente Coat zacoalcos II. La segunda, se iniciaría sólo en el caso de ser aceptado el acero nacional y tendría la finalidad de checar que la calidad del acero se mantuviera dentro de las especificaciones y además fuera uniforme esa calidad.

La investigación se llevó a cabo acorde a la norma Británica BS5896 usando muestras de cables de presfuerzo de la compañía CAMESA (rollos 2, 6, 22 y 23), los cuales presentan una área promedio de  $150\text{mm}^2$  y una longitud entre anclajes de 1300 a 1350 mm. Los ensayos de fatiga fueron efectuados en dos niveles de esfuerzo, como es requerido para este tipo de - investigaciones, el primero formado por los ensayos a 0.55 de FRg (146.0 Kn) mientras que el segundo se compone de las pruebas realizadas a 0.80-FRe (186.4 Kn) siendo FRg la capacidad nominal a la tensión veces al área nominal y FRe es la carga correspondiente al límite nominal de fluen

cia al 1% de deformación. Estos ensayos de fatiga consistieron en la aplicación de impulsos dinámicos de amplitud constante a un espécimen de acero por medio del equipo y maquinaria necesarios (ver croquis dispositivo), para determinar el rango de esfuerzos que pueden soportar con una endurance de  $2 \times 10^6$  ciclos, el nivel de carga máximo fué mantenido - - constante mientras que el nivel inferior fué variando con decrementos de carga en cada prueba, de manera que el rango de carga se fué ampliando - hasta localizar el rango deseado, es decir el rango para el cual se tenga una endurance de  $2 \times 10^6$  ciclos, indicándose así el límite de fatiga.

El control de los ensayos se hizo por medio de un sistema eléctrico constituido por una celda eléctrica, un lector de deformaciones y un osciloscopio, los cuales trabajaron en forma conjunta para poder medir la señal ondulatoria producto de la fluctuación de esfuerzos. Siendo este sistema así como la supervisión acorde con la usada en los países más de sarrollados al respecto, dando con esto relevancia al citado estudio de fatiga realizado en nuestro país.

Uno de los factores objeto de un cuidado especial fué el de falla - en el anclaje, si un espécimen falla en el anclaje los resultados que se obtengan no pueden considerarse válidos para el estudio de fatiga por es pecificaciones. Sin embargo, esto fué resuelto por medio de una protec- ción a base de aluminio en la zona de anclaje del espécimen y un adecua- do sistema de cuñas de anclajes.

Cabe mencionar que los ensayos realizados en el laboratorio mexicano, sólo se realizaron para la primera fase de la investigación y únicamente para el nivel de 0.55 de FRg. Esto debido a la suspensión de las pruebas decidida dada la confirmación del alto grado de susceptibilidad a la fragilización que presenta el acero de presfuerzo mexicano, determinado mediante la prueba de susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno al tiocianato de amonio. La cual se basa en la estimación del tiempo a la ruptura de una probeta de alambre tensado al 80% de su resistencia última y expuesto a un medio ambiente corrosivo ( $\text{NH}_4\text{NCS}$ ), esta prueba fué encomendada a laboratorios extranjeros (veáanse reportes, anexos al presente), ya que a la fecha sólo es realizada en países miembros de la F.I.P. El resultado obtenido de esta prueba para el acero nacional fué de ocho horas, cuando la duración mínima especificada es de doce horas, siendo estos resultados de gran importancia en la decisión tomada por las autoridades mexicanas para suspender el citado estudio de fatiga.

Al no cumplir con la especificación el acero de presfuerzo, será susceptible a fragilizarse y corroerse, disminuyendo así su ductilidad y resistencia a la fatiga, de manera que, aún obteniéndose resultados satisfactorios en los ensayos de fatiga, no corresponderían con el comportamiento del acero en la estructura en condiciones de servicio en un medio ambiente hostil.

De los resultados de pruebas de fatiga del acero de presfuerzo de fabricación nacional proporcionados por los laboratorios, se desprende -

los siguientes puntos importantes, los cuales a su vez son conclusión de esta investigación.

- 1.- Para obtener una vida de fatiga promedio de 2 millones de ciclos de carga, el rango de fluctuación de esfuerzos que resiste el acero de presfuerzo mexicano resultó menor que el que especifica la norma británica BS5896 para éste tipo de acero, siendo el rango de carga de 24 Kn para el cable que reportó el mejor comportamiento, cuando la norma indica un rango medio de 29 Kn.
- 2.- Existe una muy notoria dispersión en los resultados de las pruebas, lo que influye en la determinación de rango correspondiente a una endurancia de  $2 \times 10^6$  ciclos, teniéndose de esta manera, endurancias diferentes para una misma amplitud de rango de esfuerzos, ésto muestra la heterogeneidad del acero de presfuerzo mexicano, resultado probable de un proceso de manufactura no muy cuidadoso y/o una composición metalúrgica inadecuada.

Por lo tanto el carácter desfavorable de los resultados de la prueba de susceptibilidad aunado a las características dinámicas y de heterogeneidad del acero mexicano, constituyeron el criterio en que se basaron las autoridades mexicanas para decidir la utilización del acero de presfuerzo extranjero en la fabricación de los tirantes del puente Coatza-

coalcos II, dado que el acero de presfuerzo mexicano requiere de un cuidadoso estudio que logre mejorar su calidad y cualidades que garanticen un adecuado comportamiento dinámico una vez ya constituido en tirantes para un puente de la magnitud del Coatzacoalcos II.

Hasta aquí hemos abstraído puntos de interés que aborda la presente tesis, presentando así con pocas palabras todo un estudio y una experiencia que en lo particular consideramos fué rica en aportaciones, el sólo hecho de lograr conocer el comportamiento dinámico y a la fragilización por hidrógeno del acero de presfuerzo, es ya una aportación considerable. más aún, el haber retenido la metodología en el país, tan necesaria como apoyo a la ingeniería nacional. Ahora bién, de los resultados obtenidos del estudio en cuestión haremos en lo que sigue algunas inferencias y comentarios así como modestas sugerencias.

De un análisis hecho sobre los resultados de pruebas estáticas de tensión a la ruptura en el acero de presfuerzo mexicano, se observa lo siguiente:

ROLLO No.	CARGA A LA RUPTURA Kn
22	277.3
23	276.3
2	277.0
6	278.0

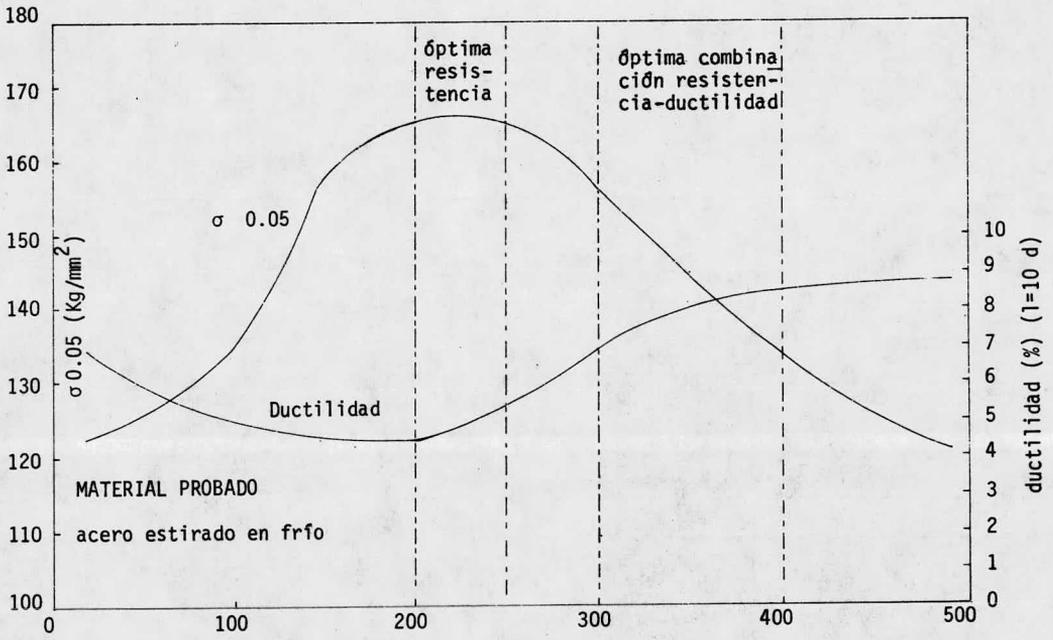
Existe una relación entre la capacidad de un acero de presfuerzo a la tensión, su contenido de carbón y el correspondiente comportamiento a la fatiga y corrosión, es decir a mayor contenido de carbón, el acero presenta un valor más alto de resistencia al esfuerzo de tensión estática, sin embargo, ésta misma característica implica que el acero sea más frágil, efecto que reduce la capacidad de resistencia del acero de presfuerzo a la fatiga. De aquí que los especímenes que tuvieron un mejor comportamiento a la fatiga sean los rollos 2 y 23, que presentaron las más bajas resistencias a la tensión estática. El rollo 22 es el segundo que mejor comportamiento tuvo en las pruebas de fatiga, y tiene una resistencia al esfuerzo de tensión estática un poco más alta que los anteriores. Por último el rollo No. 6 es el que presenta un más pobre comportamiento a la fatiga y el de más alta resistencia a la tensión estática, lo cual pone de manifiesto en forma clara la citada relación.

El acero de presfuerzo mexicano enviado para ser probado a la fragilización por hidrógeno, reportó un análisis metalúrgico en donde el porcentaje de carbón es del 0.82%, porcentaje un poco mayor que el del acero belga (0.78%) que es el acero que mejor comportamiento tuvo de los especímenes probados en las pruebas de selección.

Sabemos que el acero mexicano no cumplió con los requisitos mínimos en la prueba de susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno al tiocianato de amonio, se conoce también que el acero es más fragilizable -

cuanto más resistente es a la tensión estática, es decir, mientras mayor sea el contenido de carbón, por lo que se requiere una adecuada combinación entre resistencia y ductilidad del acero de presfuerzo de fabricación nacional, para mejorar sus cualidades y su calidad.

En el proceso de fabricación, el acero de presfuerzo es sujeto a tratamientos térmicos, en los cuales el cable es mantenido dentro de un cierto rango de temperatura por un lapso de tiempo. La gráfica muestra el efecto, en cuanto a resistencia y ductilidad se refiere, del calentamiento a diferentes rangos de temperatura con tiempos de una hora para cada uno de ellos, ésta gráfica es el resultado del análisis efectuado a aceros de presfuerzo mediante pruebas experimentales realizadas en laboratorio. Puede observarse que un tratamiento con duración de una hora y un rango de temperatura de 200 a 250 °C proporcionan al acero la óptima resistencia, pero la ductilidad que corresponde a éste rango de temperatura es próxima la mínima (5 - 6%), los especímenes tratados en esta forma fueron más sensibles al agrietamiento y a la corrosión, es probable que el acero de presfuerzo mexicano además de contener un porcentaje de carbón un poco alto, haya sido sometido a un tratamiento térmico de esta naturaleza y consecuencia de este su alta susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno que presentaron los especímenes probados. Si ésta fuera la causa, una solución posible es encontrar un punto en la gráfica que indique el tratamiento térmico a seguir para equilibrar adecuadamente la resistencia y la ductilidad, acorde a las solicitaciones -



Gráfica que muestra el efecto en cuanto a resistencia y ductilidad se refieren del tratamiento térmico en aceros de presfuerzo a varias temperaturas con lapsos de una hora para cada una de ellas.

que se tengan, por ejemplo un rango de temperatura de 300 a 400 °C, dá una combinación óptima de resistencia y ductilidad para el acero de presfuerzo, no obstante para mejorar el acero mexicano, es necesario cuidar los diferentes aspectos que intervengan en su fabricación.

Otra manera de aumentar la endurancia de los aceros de presfuerzo - sujetos a fluctuación de esfuerzos y a medios ambientes corrosivos, es por medio de la inducción de esfuerzos residuales en su superficie.

Investigaciones recientes han demostrado que es posible obtener una baja susceptibilidad a la fragilización en éste tipo de acero sí se le inducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie, esto consiste en esforzar el acero después de que ha sido estirado en frío a 50% de su resistencia última de tensión mientras se mantiene a una temperatura de aproximadamente 400 °C por unos cuantos segundos.

La inducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie del acero también se puede realizar mediante rodamiento.

Una vez hechos los comentarios y sugerencias al respecto y analizando la trayectoria de éste trabajo, puede decirse que:

La implantación de la metodología de la prueba para caracterizar dinámicamente el acero de presfuerzo, es sin lugar a duda un paso trascendente en nuestro desarrollo tecnológico, dado que con ésta prueba es posible conocer el comportamiento dinámico de éste tipo de acero, pudiendo

de ésta manera conformar los criterios que decidan los alcances de su uti-  
zación, así mismo, promueve en el caso de resultados poco satisfacto- -  
rios la abocación de las compañías manufactureras e instituciones de in -  
vestigación a lograr aceros de presfuerzo de buena calidad y comportamienu  
to a la fatiga que cumplan con los requerimientos de las diferentes obras  
en que sean empleados, normándose con ésto, procesos de fabricación que -  
tomen en cuenta su composición metalúrgica, así como los diferentes tratau  
mientos térmicos y mecánicos de que sea objeto el acero de presfuerzo na-  
cional, de tal manera que en un futuro no lejano podamos utilizar nues- -  
tros recursos, garantizados por tecnología estrictamente nacional, en la  
multitud de grandes obras requeridas por un país en desarrollo como es  
México.

ANALISIS QUIMICO DEL ACERO DE PRESFUERZO

CAMESA. LAS MUESTRAS SE TOMARON DEL -

ROLLO No. 2

ELEMENTO	CONTENIDO EN %	CONTENIDO EN POR CIENTO ESPECIFICADO EN SOP 99 04-1976.	
Carbón	0.85	0.72	- 0.93
Manganeso	1.05	0.40	- 0.10
Fósforo	0.01	0.04	- máximo
Azufre	0.01	0.05	- máximo
Silicio	0.11	0.10	- 0.35

ANALISIS QUIMICO DEL ACERO DE PRESFUERZO

DE FABRICACION BELGA.

ELEMENTO	CONTENIDO EN %
Carbón	0.785
Manganeso	0.550
Fósforo	0.820
Azufre	0.250
Silicio	0.150



Ing. Carlos King Revelo  
Sanchez Trujillo 277  
Col. San Alvaro, Tacuba  
02090 MEXICO 17, D.F.  
Mexico

visitors  
laan van westenenk 501  
apeldoorn

p.o. box 541  
7300 AM apeldoorn  
the netherlands

telex 36395 tnoap nl  
phone 055 - 77 33 44

date June 30th 1983  
your letter -  
our reference 16362M/WIJ/VLT/6138.64.332  
enclosures table  
subject tests on core wire

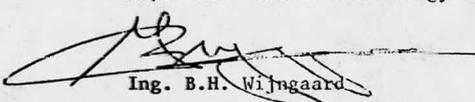
Dear Mr. Revelo,

Annexed I send you our results of the executed FIP-NH<sub>4</sub>CNS- tests on your core wire.

The meantime to fracture (1,19) indicates in our opinion a higher susceptibility of the test material to hydrogen embrittlement, probably connected with the relative high tensile strength of the material.

The alternate bending tests over a mandrel with R = 7x wire diameter does not comply to any specification. This test has been introduced by our Institute to get a fair indication for an arising embrittlement.

Yours respectfully,  
METAALINSTITUUT TNO  
Dept. for General Metallurgy



Ing. B.H. Wijngaard

TableResults of stresscorrosiontest ( $\text{NH}_4\text{NCS}$ -test)

serie MEXICO		received test rods 15		Tensile strength 2000 N/mm <sup>2</sup>	
test rod		Time to fracture in hours		Alternate bends *	
Nr.	Code	t	e <sub>log t</sub>	after testing	before testing
1	MEX	1,44	0,365	1	36
2	"	1,22	0,199	2	48
3	"	1,14	0,131	17	34
4	"	1,15	0,140	10	36
5	"	1,07	0,068	22	37
6	"	1,20	0,182	19	32
7	"	1,56	0,445	1	29
8	"	1,20	0,182	1	40
9	"	1,08	0,077	21	45
10	"	1,10	0,095	12	35
11	"	1,15	0,140	3	28
12	"	1,01	0,010	9	47
mean time		1,19	0,169	10	37
coefficient of variation		0,16 (13%)	0,124 (73%)		

\* Number of alternate bends, over a mandrel with R = 7x wire diameter.

Bendingfrequency 6/min.

## TABLA

Resultados del ensaye de corrosión por esfuerzo  
(Ensaye  $NH_4$  NCS)

Serie MEXICO		Barras para ensaye recibidas: 15		Resistencia a la tensión 2000N/mm <sup>2</sup>	
Barra ensayada		Tiempo a la fractura en hrs.		Dobles alternados *	
No.	Código	t	e log t	Después del ensaye	Antes del ensaye
1	MEX	1,44	0,365	1	36
2	"	1,22	0,199	2	48
3	"	1,14	0,131	17	34
4	"	1,15	0,140	10	36
5	"	1,07	0,068	22	37
6	"	1,20	0,182	19	32
7	"	1,56	0,445	1	29
8	"	1,20	0,182	1	40
9	"	1,08	0,077	21	45
10	"	1,10	0,095	12	35
11	"	1,15	0,140	3	28
12	"	1,01	0,010	9	47
Tiempo promedio		1,19	0,169	10	37
Coeficiente de variación		0,16 (13%)	0,124 (73%)		

\* Número de dobles alternados, en un rodillo de  $R=7$  veces el diámetro del alambre

Frecuencia del doblado 6/min.

TRADUCCION DEL INGLES

TNO

Sr. Carlos King Revelo  
Sánchez Trajillo # 272  
Col. San Alvaro, Tacuba  
02090 MEXICO 17, D. F.  
MEXICO.

Fecha: Junio 30, 1983  
Su carta:  
N/Ref.: 16362M/WIJ/VLT/6138.64.332  
Anexos: Tabla  
Asunto: Ensayes en muestras de alambres centrales

Estimado Sr. Revelo:

Adjunto me permito enviarle los resultados de los ensayes FIP-NH CNS  
4  
realizados en sus muestras de alambres centrales.

El tiempo promedio a la fractura (1,19) indica, en nuestra opinión, una alta susceptibilidad del material ensayado a la fragilización por hidrógeno, probablemente debido a la relativamente alta resistencia a la tensión del material.

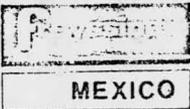
Los ensayes de doblado alternado en un rodillo con  $R = 7$  veces el diámetro del alambre, no satisfacen ninguna especificación. Este ensaye fue implantado por nuestro Instituto para obtener una indicación precisa de cuando empieza la fragilización.

Atentamente.

METAALINSTITUUT TNO.  
Depto. de Metalurgia General.

Ing. B.H. Wijngaard.

gauss 9-302 col. anzures c.p. 11590 méxico. d. f.



FREYMEX.GG.449/83/JPI\*san.

S. C. T.  
DIRECCION GENERAL DE  
CARRETERAS FEDERALES  
★ NOV 16 1983  
DIRECCION DE PROYECTO DE  
PUENTES E INFRAESTRUCTURA  
EXPERIMENTAL

México D.F., a 15 de noviembre de 1983.

SECRETARIA DE COMUNICACION  
Y TRANSPORTE  
XOLA Y AV. UNIVERSIDAD  
MEXICO, D.F.

AT'N. ING. J.M. GARCIA CHAVEZ

Estimado Ingeniero :

Adjunto a la presente una copia del telex que recibimos del Sr. B. de Halleux de la Universidad de Louvain con relación a las - pruebas que se realizaron sobre el acero de Cameasa  $\emptyset$  0.6 " para tirantes.

La traducción de este telex es :

- Resultados de los ensayos :

1) Relajación 0.7 R - 20 ° C. - 3000 horas sobre escantillon NR-13 .

Reporte No. 83-28

500 horas	6.36 %
1000 horas	7.22 %
3000 horas	8.74 %

2) Corrosión Nh4 SCH a 50 ° C. - Reporte No. 83-29 .

ESCANTILLON

DURACION DE VIDA  
HORAS:

1	5.63
2	9.86
3	7.63
4	5.98
5	4.84
6	6.22
7	6.38
8	4.40
9	5.07

Freyssinet de Mexico, S. A. de C.V. tel. 250-7000

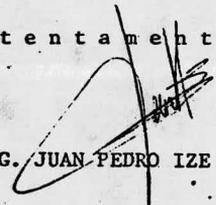
<u>ESCANTILLON</u>	<u>DURACION DE VIDA</u> <u>HORAS</u>
10	3.40
11	5.00
12	4.30
12 BIS	8.00

ATENTAMENTE

B. DE HALLEUX /TH VAN DE VYVERE.

Sin otro particular por el momento, quedo de usted,

Atentamente

  
ING. JUAN PEDRO IZE

cc.- Ing. King. ( S.C.T. )  
cc.- Ing. A. Sánchez Sánchez ( S.C.T. )  
cc.- Ing. F. Paredes ( I.C.A. )

V  
1771464 FREYME  
FRESI B 260727F

1522041183

TLX NO FIAE524 DU 4/11/83 CDF/FIS

ATTN. MR IZE

AU CAS OU VOUS NE L'AURIEZ PAS RECU, VOICI COPIE DU TLX QUE NOUS  
ENVOIE LE LABORATOIRE DE LOUVAIN :

QUOTE

FREYSSINET INTERNATIONAL  
AL'ATTENTION DE M. C. DE LA FUENTE

CONCERNE: ESSAIS SUR TORON POUR PRECONTRAINTE  
VOS REFERENCES: DEX/237.83/CDF/FV

RESULTATS D'ESSAIS

1. RELAXATION 0,7R - 20 DEGRE C - 3000 HEURES SUR ECHANTILLON  
NR.13  
RAPPORT NO 83-28

500 HEURES	6,36 0/0
1000 "	7,22 0/0
3000 "	8,74 0/0

2. CORROSION NH4 SCH A 50 DEGRE C.  
RAPPORT NO 83-29

ECHANTILLON NO	DUREE DE VIE HEURE
1	5,63
2	9,86
3	7,63
4	5,98
5	4,84
6	6,22
7	6,38
8	4,40
9	5,07
10	3,40
11	5,00
12	4,30
12BIS	8,00

SALUTATIONS  
B. DE HALLEUX  
TH. VAN DE VYVERE

B I B L I O G R A F I A

- M. BIRKENMAIER - Fatigue Resistant Tendons for Cable - Stayed Construction - I.A.B.S.E. (Mayo 1980).
- M. BIRKENMAIER AND R. NARAYANAN - Fatigue Resistance of Large High Tensile Steel Stay Tendons - I. - A.B.S.E. - Colloquium Lausanne - (Mayo 1982).
- P. E. MONDORF - Paralled Strand Cable Stays Static and Fatigue Strength - I.A.B.S.E. (Mayo 1980).
- S. BASU AND M. CHI - Analytical Study for Fatigue of Bridge Cables - I.A.B.S.E. - Colloquium Lausanne (1982).
- UGO ROSSETTI - Methode de Dimensionnement des Cables á la Fatigue - I.A.B.S.E. - Colloquium Lausanne (1982).
- V. SANCHEZ GALVEZ - Fatigue Crack Propagation in Steel Prestressing-Wires - I.A.B.S.E - Colloquium Lausanne (1982).
- H. J. GROVE - Fatigue of Metals and Structures Bureau of Aeronautics Department of the Navy - U.S.A. (1954)
- SIMPOSIUM ON STRESS - Corrosion Cracking of Materials (Agosto 1945).

ESTE TRABAJO SE IMPRIMIO EN LOS TALLERES  
GRAFICOS DE GUADARRAMA IMPRESORES, S. A.  
AV. CUAUHEMOC 1201, COL. VERTIZ NARVARTE  
MEXICO 13, D. F. TEL. 559 22 77 CON TRES LINEAS