



188  
2/14

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

Comportamiento de Durmientes de Concreto  
y un Nuevo Sistema para Sujetar el Riel  
al Durmiente

**T E S I S**

Que para Obtener el Título de:

**INGENIERO CIVIL**

p r e s e n t a :

**Abraham Roberto Sánchez Ramírez**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## INDICE

0.	INTRODUCCION	1
1.	ASPECTOS GENERALES	3
1.1	ANTECEDENTES	3
1.2	OBJETIVOS	5
2.	VIA ELASTICA	7
2.1	ASPECTOS GENERALES	7
2.2	ELEMENTOS QUE INTEGRAN LA VIA ELASTICA	8
3.	ENSAYES DE LABORATORIO.	13
3.1	ASPECTOS GENERALES	13
3.2	DESCRIPCION DE LOS ENSAYES	14
3.2.1	<i>Ensayes para durmientes de concreto</i>	14
3.2.2	<i>Ensayes para sistemas de fijación</i>	17
4.	COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE DURMIENTES DE CONCRETO	21
4.1	GENERALIDADES	21
4.2	TIPOS DE DURMIENTES DE CONCRETO	22
4.3	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DURMIENTES	23
4.3.1	<i>Características de las sollicitaciones produ-</i>	

	<i>cidas por el paso de trenes</i>	23
4.3.2	<i>Representación estática de las cargas y de la interacción</i>	24
4.3.3	<i>Comportamiento observado de durmientes instalados</i>	28
4.3.4	<i>Mediciones de campo de las sollicitaciones</i>	31
4.4	DISEÑO DE DURMIENTES DE CONCRETO	35
5.	UN NUEVO SISTEMA PARA SUJETAR EL RIEL AL DURMIENTE	40
5.1	ANTECEDENTES	40
5.2	FUNCIONES DE UN SISTEMA DE FIJACION	41
5.3	OBJETIVOS DEL NUEVO SISTEMA DE FIJACION	42
5.4	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE SUJECION RE X	43
5.5	CARACTERISTICAS Y FUNCIONAMIENTO	45
5.6	CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES	46
5.7	ALGUNAS VENTAJAS E INCONVENIENTES DE ESTE SISTEMA DE FIJACION	49
6.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	51
7.	REFERENCIAS	54
8.	BIBLIOGRAFIA	56
	TABLAS	60
9.	FIGURAS	62
	APENDICES	91

## 0. INTRODUCCION

## 0. INTRODUCCION

Parte del trabajo presente se apoya en un estudio sobre el comportamiento y el diseño de durmientes de concreto reforzado.

Dicho estudio se efectúa en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el patrocinio de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, a quien le interesa obtener una metodología clara y sencilla para analizar y diseñar durmientes de concreto reforzado adecuados a las condiciones de servicio que imperan en las líneas de la red ferroviaria nacional, porque en un futuro próximo espera que se construyan durmientes de concreto con tecnología mexicana.

Por otra parte, el autor de este trabajo tuvo interés particular por desarrollar un sistema para unir el riel al durmiente. Ese interés se justifica porque un sistema de este tipo es tan importante en la vía como los durmientes mismos y, desafortunadamente, México no tiene un sistema propio para realizar la unión entre ambos elementos.

Con base en ese interés, se desarrolló un nuevo sistema para sujetar el riel al durmiente.

Bajo los tópicos anteriores, la estructuración del trabajo presente queda integrada por seis capítulos que se desglosan en el siguiente orden:

En el capítulo 1 se tratan algunos problemas por los que atraviesa el sistema de transporte ferroviario, y las causas que dieron origen a este trabajo.

En los capítulos 2 y 3 se pretende dar un panorama general sobre la vfa elástica y las principales pruebas de laboratorio a las que se ven sujetos durmientes y sistemas de fijación.

En el capítulo 4 se estudia el comportamiento de durmientes de concreto y se discuten los problemas que involucra el diseño estructural de estas piezas. En ese mismo capítulo se desarrolló un programa de computadora que facilita la tarea de diseñar durmientes de concreto presforzado de sección variable.

Por lo que respecta al capítulo 5, éste se refiere a un modelo de un sistema de fijación, el cual se presenta como una solución para sujetar el riel al durmiente, y contempla desde los fundamentos sobre los que se basa dicha solución hasta los resultados de un ensaye que se realizó sobre un prototipo de ésta.

Finalmente, en el capítulo 6, se dan los comentarios y las conclusiones respecto al contenido de este trabajo.

## 1. ASPECTOS GENERALES

## 1 . A S P E C T O S   G E N E R A L E S

### 1.1 ANTECEDENTES

El crecimiento agigantado de nuestro país ha propiciado que el sector público y el privado reclamen un sistema de transporte ferroviario eficiente.

Para los países desarrollados, el sistema de transporte ferroviario constituye la columna vertebral de la economía, y es por ello que cada día se esmeran más por aumentar la eficiencia de este sistema.

Desafortunadamente, en México el desarrollo del sistema de transporte en cuestión ha quedado rezagado y prácticamente olvidado desde el siglo pasado; muestras de esta situación son el deterioro de las instalaciones con las que cuenta, y parte del equipo rodante que aún está en circulación desde aquel entonces.

En general, este problema surgió a raíz de subestimar la capacidad del sistema ferroviario como un sistema de transporte terrestre eficiente, dedicando así la mayor parte de los esfuerzos a la construcción de carreteras.

Para remediar la situación anterior, a principio de la década de los 60, la administración del gobierno federal fijó como objetivos mejorar y ampliar el sistema de transporte ferroviario. Al respecto, emprendió varias actividades cuyas metas fueron las siguientes:

- Ampliar y rehabilitar las principales líneas
- Construir nuevas estaciones de arribo y remodelar las instalaciones existentes
- Adquirir equipo rodante más rápido y con mayor capacidad de carga

Durante el desarrollo de esas actividades han surgido algunos problemas; principalmente, al emplear el sistema de vía elástica para ampliar y rehabilitar la red ferroviaria.

El sistema de vía elástica tiene mayores ventajas estructurales que una vía convencional, sin embargo, su construcción implica un desequilibrio económico para el país al tener que pagar regalías, en particular, por usar durmientes y sistemas de fijación de nacionalidad extranjera.

Esta situación constituye un problema que pasó desapercibido casi desde 1960, fecha a partir de la cual en México se han construido cerca de 3 500 kilómetros de vía elástica. Esto significa que existen instalados en la vía aproximadamente 5.5 millones de durmientes de concreto y el doble de juegos de sistemas de sujeción, todos ellos construidos bajo patentes extranjeras.

Estas cifras indican que hay más durmientes de concreto instalados en las vías nacionales que en las de todo Estados Unidos y Canadá juntos.

Lo adverso de esta política propició que la SCT ahora trate de canalizar el crecimiento del sistema ferroviario de tal manera que existan mayores beneficios para la sociedad mexicana.

Entre los diversos objetivos y metas que persigue la SCT, prevalecen el diseñar y construir durmientes de concreto que satisfagan adecuadamente las necesidades del país.

Para llevar a cabo esta tarea, la Secretaría solicitó al Instituto de Ingeniería de la UNAM un estudio sobre el diseño y el comportamiento de durmientes de concreto para las condiciones que imperan en las vías del territorio nacional.

El sistema para unir el riel al durmiente es tan importante como los mismos durmientes, sin embargo, hasta ahora no existe el patrocinio para estudiar la problemática que existe con este sistema.

A pesar de que no existe tal patrocinio, el autor de este trabajo desarrolló un nuevo sistema de fijación. Este sistema trata de cumplir con su objetivo de una manera eficiente, además, se espera que mejore el comportamiento estructural de los durmientes sobre los que se instale.

## 1.2 OBJETIVOS

Los objetivos que se establecieron para elaborar este trabajo fueron los siguientes:

- Estudiar el comportamiento de durmientes de concreto
- Dar un panorama general sobre los problemas que involucra el diseño de estas piezas

- Desarrollar un programa de computadora para facilitar el cálculo estructural de durmientes
- Proponer un nuevo sistema de fijación para unir el riel al durmiente, como una aportación al desarrollo de la tecnología ferroviaria nacional.

## 2. VIA ELASTICA

## 2 . V I A E L A S T I C A

### 2.1 ASPECTOS GENERALES

La vía elástica ha sido, sin duda, un logro mas alcanzado por la técnica ferroviaria.

El sistema de vía elástica se inventó en Francia a principios de este siglo y tiene por objetivo reducir de una manera importante las juntas entre los rieles. Así, en el ámbito ferroviario se han generado grandes beneficios, entre otros:

- La conservación, tanto de la vía como del equipo rodante, se ven disminuidas considerablemente
- Se pueden alcanzar altas velocidades (de 80 a 90 kilómetros por hora en trenes de carga y hasta de 140 kilómetros por hora en trenes de pasajeros)
- El confort que brinda a los usuarios en un viaje resulta superior al proporcionado por la vía convencional (constituida por rieles ordinarios, juntas de dilatación y un sistema de fijación entre

riel y durmiente a base de clavos)

- El movimiento de carga y equipo pesado se realiza con menor dificultad.

En general, la vía elástica consiste en emplear rieles soldados en largos tramos, usualmente con más de 1 000 metros de longitud, durmientes de concreto reforzado, balasto, juntas de dilatación y un sistema de sujeción flexible para unir el riel al durmiente.

Para tener un concepto preciso de los elementos que integran dicho sistema en lo que resta de este capítulo se hará una descripción de cada uno de ellos.

## 2.2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN LA VIA ELASTICA

Como en todo sistema, cada uno de los elementos que constituyen la vía elástica desempeñan un función específica y, en conjunto, tienen por objetivo permitir que el tren se desplace con la mínima dificultad y a un costo razonable. Para que esta vía opere satisfactoriamente, además de estar bien diseñada, debe contar con todos y cada uno de sus componentes en buen estado. Dichos elementos son los siguientes:

### a. Riel continuo (largos rieles soldados)

Un riel de cualquier calibre puede clasificarse como: ordinario, largo o continuo; la diferencia se da únicamente en función de la longitud del mismo. Así tenemos que:

- Un riel ordinario es aquel que tiene una longitud comprendida entre 10 (33') y 11.9 (39') metros
- El riel largo tiene entre 20 (66') y 250 metros de longitud, estos

rieles se forman uniendo, mediante soldadura, dos o más rieles ordinarios

- Los rieles continuos suelen alcanzar más de 1 000 metros de longitud al unir, también por medio de soldadura, varios tramos de riel largo.

El objetivo primordial del riel continuo es evitar el empleo de juntas entre los rieles, problema tan viejo como la vía férrea, que tanto el estudio como el perfeccionamiento de las planchuelas no ha podido resolver satisfactoriamente dado que las planchuelas son piezas mecánicas que se someten a cargas cuyo tipo y magnitud las deterioran al grado de impedir el funcionamiento adecuado de éstas.

#### b. *Juntas de dilatación*

Estos dispositivos van intercalados entre dos rieles consecutivos de gran longitud. En general, tales juntas están formadas por agujas y contra-agujas que se anclan a la vía para permitir que los extremos de los rieles que a ellas concurren se desplacen sin ocasionar dificultades. (Ver fig 1).

#### c. *Sistemas de sujeción*

Este sistema, necesario para unir el riel al durmiente, resulta tan importante en la vía como el durmiente mismo. Sin embargo, las soluciones que se han propuesto para satisfacer las necesidades que ese sistema requiere, no han proporcionado los resultados esperados, pues las acciones que ejerce el tren sobre la vía son de gran magnitud y difíciles de valorar. Actualmente en México se emplea un sistema de sujeción elástico de patente

francesa. Este modelo de sujeción queda constituido por los siguientes elementos:

- Dos placas de acero al cromomanganeso, cada una de ellas sujeta al durmiente por medio de un tornillo tirafondo que une el riel al durmiente
- Un cojinete amortiguador que se coloca bajo las grapas exteriores
- Dos casquillos aislantes que evitan el contacto directo entre el perno tirafondo y la grapa de acero, para aislar eléctricamente al riel del durmiente, y
- Una placa acanalada de hule que se coloca entre el riel y el durmiente para disminuir la concentración de esfuerzos sobre este último.

La sujeción elástica, además de tener una vida útil superior a la del tirafondo común, presenta una mayor eficiencia al no transmitir grandes concentraciones de esfuerzos a los durmientes y amortiguar los efectos vibratorios que ocasiona el paso del tren.

En las figs 2 y 3 se muestra una vista general de este sistema de sujeción.

#### d. *Durmientes*

Estos son piezas fundamentales en la construcción de una vía férrea y más aún si se trata de una vía elástica, pues los durmientes son los elementos que, primordialmente, dan apoyo a los rieles, transmiten la carga del tren a la cimentación, mantienen el escantillón de la vía y dan estabilidad a ésta.

Para determinar sobre qué tipo de durmientes deberían apoyar los rieles

continuos, originalmente se pensó que dichos rieles podrían apoyar en durmientes de madera, acero o concreto; no obstante, en la actualidad el costo tan elevado del acero, el aumento de zonas vedadas para la tala de árboles destinados a la construcción de durmientes de madera y el gran desarrollo de la tecnología del concreto reforzado, han propiciado que desde los puntos de vista de economía, seguridad y funcionamiento, el durmiente de concreto reforzado se ajuste mejor a las condiciones de servicio.

Así, cada día es más frecuente el empleo de durmientes de concreto en varios países del mundo. Quizá la única excepción sea Brasil, país que ha desarrollado una verdadera industria en la producción de durmientes de ma dera.

Actualmente, México emplea en más de 3 500 kilómetros de sus vía principales durmientes de concreto reforzado (tipo bloque) o postensado (tipo monobloque) de patentes francesa y alemana, respectivamente (ver figs 4 y 5).

#### e. *Balasto*

Esta parte de la vía es, en esencia, una carpeta de material escogido; ya sea piedra triturada, grava de río o bien escoria triturada, cuyo espesor depende del tonelaje movido anualmente.

El balasto va colocado sobre un sub-balasto, o directamente sobre la terracería del ferrocarril para:

- Proporcionar a los durmientes un apoyo tal que los esfuerzos se transmitan uniformemente a las terracerías
- Dar estabilidad a la vía

- Permitir el alineamiento, nivelación y elevación de los rieles, y
- Proporcionar un buen drenaje a la vía.

Una sección típica del balasto en la vía se muestra en las figs 6.a y

6.b.

### 3. ENSAYES DE LABORATORIO

### 3. ENSAYES DE LABORATORIO

#### 3.1 ASPECTOS GENERALES

Diversos organismos relacionados con el diseño y construcción de vías férreas se han encargado de proponer, a través de especificaciones, requisitos mínimos de comportamiento que deben satisfacer los durmientes y fijaciones.

En general, los requisitos mínimos procuran reproducir la experiencia lograda mediante mediciones de campo, u observaciones directas del comportamiento de los durmientes en servicio. Esos requisitos son tan precisos, u objetivos, como la experiencia obtenida a la fecha y es frecuente que el desconocimiento sobre el comportamiento de los elementos en cuestión imponga restricciones fuertes en el diseño.

Estas restricciones se verifican mediante ensayos de laboratorio que pretenden ser representativos de lo que ocurre en el campo. Los durmientes y fijaciones se someten a dichos ensayos por separado o en conjunto, y es posible incluir al balasto dependiendo de la prueba que se realice.

En nuestro país, las normas que prevalecen para certificar la calidad de durmientes y sistemas de sujeción son las que establece la American Railway Engineering Association, AREA. Algunos de los principales ensayos que dictan estas normas y que con mayor frecuencia se efectúan sobre durmientes de concreto presforzado y sistemas de fijación se describen a continuación.

### 3.2 DESCRIPCION DE LOS ENSAYES

#### 3.2.1 *Ensayes para durmientes de concreto*

En los durmientes se realizan ensayos estáticos o dinámicos para valuar su capacidad de resistir momentos flexionantes especificados en la zona bajo el riel y al centro de la pieza. Los ensayos requeridos son:

##### *a. Momentos flexionantes en el asiento del riel*

Con este ensaye se evalúa la capacidad de esa zona del durmiente para resistir momentos, positivo o negativo. En ambos casos se aplica una carga vertical creciente hasta llegar a la carga especificada, que es función del momento que debe aplicarse y de la distancia del centro del apoyo del riel al paño del durmiente. Los momentos flexionantes especificados por la AREA a la vez dependen de la longitud del durmiente y de la separación a que se colocan éstos en la vía.

Una vez aplicada la carga, ésta se sostiene por no menos de tres minutos, tiempo que se emplea para inspeccionar la zona del durmiente afectada por el ensaye para determinar si ocurre agrietamiento estructural\* del mismo.

---

\* Es común definir como agrietamiento estructural de un durmiente presforzado a aquel que deja un ancho de grieta mayor de 0.05 mm al descargar el espécimen que ha sido agrietado hasta el nivel del refuerzo longitudinal inferior

La inspección se realiza empleando una lupa y una regla graduada que permite medir el ancho de las grietas. Es indispensable que la zona que se revisa esté bien iluminada.

Cronológicamente, primero se realiza el ensaye por momento negativo y en seguida, en la misma zona de apoyo del riel, se prueba por momento positivo. Ambos extremos del durmiente deben ser ensayados.

En las figs 7 y 8 aparece la disposición general de estos ensayes.

El criterio de aceptación de esta prueba es que bajo carga máxima no deben aparecer grietas de tipo estructural en la zona ensayada.

Una vez ensayados ambos extremos de un durmiente, el último extremo probado debe sujetarse a carga repetida en el asiento del riel.

Para hacerlo, se vuelve a cargar la zona del asiento del riel produciendo momento flexionante positivo hasta agrietar al durmiente al nivel del refuerzo longitudinal inferior.

En estas condiciones, la zona del riel debe someterse a tres millones de ciclos de carga con una variación sinusoidal, y con una frecuencia no mayor de 10 hz. La carga que se aplica en cada ciclo va desde un valor 1810 kg (3 Kip ) hasta otra cuya magnitud es función de la carga especificada para el ensaye de flexión positiva.

La disposición de este ensaye aparece en la fig 9.

Para que el resultado de esta prueba sea satisfactorio, el durmiente debe soportar, al terminar el ensaye por carga repetida, una carga estática superior a la carga especificada para flexión positiva en el asiento del riel. Una falla típica en durmientes pretensados sujetos a este ensaye es

como la que se ilustra en la fig 10.

b. *Momentos flexionantes al centro del durmiente*

Con estos ensayos se pretende medir la capacidad de la zona central del durmiente para resistir flexión negativa o positiva.

Para el primer caso, se somete la parte central del durmiente a un momento flexionante negativo mediante cargas simétricas crecientes hasta el valor especificado y, en general, con una rapidez inferior a 2270 kg por minuto. La carga se mantiene por no menos de tres minutos; este intervalo de tiempo se debe emplear para examinar el durmiente y verificar si hay agrietamiento estructural en él.

Si no existe se cumple con los requisitos del ensaye.

La disposición general del ensaye se presenta en la fig 11.

A continuación, sobre el mismo espécimen, se realiza el ensaye de momento flexionante positivo al centro del durmiente. Las condiciones de carga y requisitos son los mismos que los antes descritos y la disposición para hacerlo aparece en la fig 12.

c. *Desarrollo de la adherencia*

Es importante conocer la capacidad del durmiente para resistir sobrecargas sin que los tendones de presfuerzo deslicen. Por ello, los durmientes de concreto presforzado quedan sujetos al siguiente proceso de aceptación.

Los durmientes se apoyan y se les aplica la carga de la misma forma en que se hizo el ensaye de carga vertical para producir momento flexionante positivo

en el asiento del riel. En este caso, la magnitud de la carga aplicada depende de la carga que provoca agrietamiento inicial al nivel del acero de refuerzo inferior.

Los requisitos del ensaye se satisfacen si no hay un deslizamiento de los tendones de refuerzo mayor de 0.025 mm (0.001 pulg).

Este deslizamiento se debe registrar con extensómetros, cuya precisión sea de 1/10 000 pulg, colocados en los tendones del lecho inferior del refuerzo.

La disposición de un ensaye empleando deformímetros eléctricos capaces de registrar el deslizamiento con la precisión estipulada aparece en la fig 13.

### 3.2.2 *Ensayes para sistemas de fijación*

Los ensayes que involucran a la fijación son estáticos o dinámicos, y pretenden valuar la capacidad de la fijación para resistir cargas o ambientes específicos. Los ensayes más frecuentes son:

#### *a. Comportamiento de los insertos de fijación*

Esta prueba consta de dos partes:

- Extracción del inserto, y
- Torsión del inserto

Para la primera parte el criterio de aceptación se basa en el resultado de los ensayes de los cuatro insertos de cada durmiente, cada uno de los cuales debe resistir una carga total de 5 443 kg (12 kip) que se aplica por lo menos durante 3 minutos, lapso en que se inspecciona el bloque para verificar que el inserto no se deslice, el concreto no se agriete o el inserto resista la carga total sin deformarse de manera permanente.

La disposición de los ensayos aparece en la fig 14.

En la elaboración de estos ensayos es común observar que insertos embebidos en el durmiente a poca profundidad suelen dañar el concreto adyacente y aquellos insertos colocados a una profundidad adecuada satisfacen los requisitos impuestos.

Para el ensaye de torsión el criterio de aceptación se basa en el resultado obtenido al probar cada uno de los insertos de la fijación en los durmientes, los cuales deben resistir un momento torsionante de 39.6 m-kg (250 pie-lb) aplicado respecto al eje vertical de la fijación. Este momento se debe aplicar cuando menos durante tres minutos y el inserto debe resistirlo sin girar, deformarse de manera permanente ni el concreto deberá agrietarse.

En la fig 15 aparece la forma en que se dispone el ensaye de torsión.

#### b. Levantamiento de la fijación

El criterio de aceptación de la prueba se apoya en el resultado de ensayar el sistema de fijación del riel.

Dicho sistema debe instalarse en un bloque de concreto equivalente a un durmiente, sobre el cual se coloca un segmento de riel como si estuviera en una vía en servicio.

A continuación, se debe aplicar una carga vertical que levante al riel durante no menos de tres minutos, tiempo durante el cual se inspecciona todo el sistema para determinar si los insertos se mueven, se desplazan o se aflojan respecto al concreto, si éste se agrieta o si cualquier elemento del sistema de fijación del riel sufre una deformación permanente.

Durante el desarrollo de este ensaye es común obtener, además, la magnitud de la carga que provoca la separación entre el riel y su placa de asiento, o entre ésta y el durmiente. A esta carga se le llama de separación y se emplea, más adelante, en el ensaye de carga repetida.

La disposición del ensaye aparece en la fig 16.

Los durmientes que se emplean en la elaboración de este ensaye y cuyos insertos están instalados superficialmente en el concreto tienen problemas serios como el que se indica en la fig 17 en donde se aprecia que el concreto que cubre al inserto se fractura.

### *c. Carga repetida de la fijación*

El criterio de aceptación de estas pruebas se apoya en el comportamiento observado durante el ensaye del sistema de sujeción, incluyendo al durmiente y al mismo riel.

En las figs 18 y 19 se aprecia la forma en que se coloca el durmiente y la manera en que se aplica la carga repetida.

El sistema de sujeción así colocado, debe resistir tres millones de ciclos de carga alternante, desde una tensión cuyo valor es función de la magnitud de la carga de separación (definida en el inciso anterior) hasta una compresión de 13.6 toneladas (30 Kips).

La variación de carga es de tipo sinusoidal y la frecuencia con la que se aplica, por lo general, de 5 hz.

Sin duda este ensaye es uno de los más estrictos que existen dadas las condiciones de carga, además de exigir que ningún componente del sistema de

fijación falle por ruptura.

En las figuras 20 y 21 se muestran algunas de las fallas que con mayor frecuencia se presentan como resultados de este ensaye.

Otros ensayes a los que suelen sujetarse los sistemas de fijación son:

- *Restricción longitudinal.* Este ensaye tiene como objetivo determinar la capacidad de la sujeción para restringir movimientos longitudinales del riel.
- *Restricción lateral.* Mediante esta prueba se pretende conocer la capacidad de la fijación para restringir los movimientos laterales del riel y mantener el escantillón de la vía.
- *Conductividad eléctrica.* Aquí se mide la conductividad eléctrica para determinar la capacidad de aislamiento del sistema de fijación.

#### 4. COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE DURMIENTES DE CONCRETO

## 4. COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE DURMIENTES DE CONCRETO

### 4.1 GENERALIDADES

En nuestro país, el uso de durmientes de concreto cada día adquiere mayor importancia por las razones siguientes:

- Se puede obtener mayor consistencia y calidad en su fabricación; también, sus propiedades estructurales mejoran la estabilidad y funcionamiento de la vía
- Por otra parte, el interés que se tiene por satisfacer la demanda de la nación por tener un sistema de transporte ferroviario eficiente se ve obstaculizado pues, como se indicó en capítulos previos, los durmientes de concreto que actualmente se usan están fabricados bajo patentes extranjeras.

Se ve la magnitud del problema de satisfacer esa demanda al tomar en cuenta la necesidad de ampliar la red actual y rehabilitar sus líneas y saber que son necesarios 1 680 durmientes para construir un kilómetro de vía.

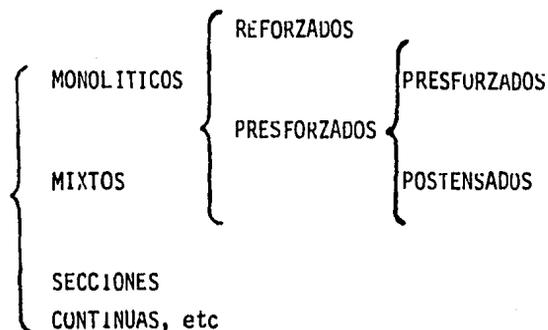
Ahora, estas razones hacen necesario diseñar y fabricar, con tecnología mexicana, durmientes de concreto adecuados a las condiciones de trazo, equipo y operación de la red ferroviaria nacional.

Los conocimientos y la experiencia adquiridos acerca de ensayos de laboratorio, trabajos publicados, problemas observados en la vía y visitas realizadas a fábricas de durmientes, se agruparon para iniciar un proyecto sobre el diseño y construcción de durmientes de concreto.

En este capítulo se expondrán algunos aspectos acerca del comportamiento y el diseño de durmientes de concreto.

#### 4.2 TIPOS DE DURMIENTES DE CONCRETO

A partir de 1884, fecha en que se empezaron a usar durmientes de concreto se han desarrollado y empleado diversos tipos de ellos que incluyen:



Cabe mencionar que el mayor número de durmientes de concreto instalados en las principales líneas del país son monolíticos postensados y, en menor cantidad, mixtos reforzados (bloques).

#### 4.3 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DURMIENTES

##### 4.3.1 *Características de las solicitaciones producidas por el paso de trenes*

Las fuerzas internas que se originan en un durmiente por el tránsito de un tren a cierta velocidad dependen de una interacción compleja, de tipo dinámico, entre el tren y los distintos componentes de la vía: riel, fijación, durmiente, balasto y terraplén. Las mediciones de campo han mostrado que los resultados son muy sensibles a pequeñas imperfecciones en el equipo rodante y a irregularidades en las condiciones de apoyo entre uno y otro componente de la vía. El impacto juega un papel decisivo en definir la magnitud de las solicitaciones que se origina por las imperfecciones mencionadas; la magnitud del efecto de impacto depende de la resiliencia (capacidad para disipar energía) del sistema, comúnmente este efecto llega a incrementar en dos o más veces las solicitaciones estáticas.

La consideración anterior ha llevado a enfocar el análisis del problema mediante un planteamiento estático simplista, y a fijar la atención en los factores que influyen en la amplificación de los efectos estáticos debidos a impacto.

Otro aspecto importante del problema es el carácter repetitivo de las cargas impuestas. Durante la vida útil de un durmiente son de esperarse varias decenas de millones de repeticiones de cargas de magnitud signifi-

tiva, lo cual hace que el aspecto de falla por fatiga merezca una atención especial.

#### 4.3.2 *Representación estática de las cargas y de la interacción*

Las cargas extremas producidas sobre la vfa son las debidas al paso de las locomotoras en cuyos ejes se concentran pesos mayores que en los vagones. En Europa se usan locomotoras eléctricas cuyo peso no ha cambiado, prácticamente, en varias décadas y que producen una carga estática por eje (por cada par de ruedas) de 22 toneladas como máximo; lo que ha aumentado notablemente con el tiempo ha sido la velocidad de los vehículos. En los Estados Unidos, en cambio, el peso de las máquinas se ha ido incrementando con el tiempo, llegando actualmente a cargas por eje de 37 toneladas y con indicios de que se moverán pronto equipos con cargas por eje de 45 toneladas. La velocidad de los trenes es inferior que la de los europeos. Obviamente, los diseños resultantes para los durmientes son distintos.

En condiciones normales la carga de cada eje se distribuye en partes iguales entre los dos rieles. En las curvas se concentra una porción mayor de la carga en uno de los rieles; esto no se toma en cuenta en el modelo estático simplificado, y se asocia a un factor correctivo del resultado.

La carga por rueda así obtenida se distribuye a los diferentes durmientes en una proporción que depende de la rigidez relativa del riel y balasto. Si este último fuese infinitamente rígido, la carga gravitaría totalmente sobre el durmiente colocado directamente bajo la rueda. Desde los inicios del estudio teórico de este problema se ha adoptado el modelo de Winkler

de viga sobre cimentación elástica para determinar la carga correspondiente de cada durmiente. El modelo se ilustra en la fig 22 y la rigidez relativa queda expresada en términos de una longitud equivalente,  $L_e$ , que se calcula como

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bc}}$$

en que E es el módulo de elasticidad del acero del riel ( $2.1 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>), I el momento de inercia del riel (2/30 cm<sup>4</sup> para el riel de 115 lb usual en México), b es el ancho de una zapata continua, equivalente al apoyo del durmiente sobre el balasto

$$b = \frac{A_a}{2a}$$

en que  $A_a$  es el área de la cara inferior del durmiente y a, la separación entre durmientes.

c es el coeficiente del balasto que expresa la rigidez de los resortes equivalentes que representan la reacción del durmiente.

La fracción de la carga de cada rueda que es soportada por un durmiente se obtiene a partir de la solución elástica del problema en función del parámetro  $x/L_e$ , en que x es la distancia del durmiente en cuestión a cada una de las ruedas que forman el tren de carga.

Los análisis para condiciones típicas muestran que la carga en el durmiente resulta ser entre 45 y 60 por ciento de la carga de rueda, por lo que la AREA ha propuesto en lugar del análisis anterior el empleo de la expresión siguiente

$$F_D = 0.45 + 0.006 (a - 50)$$

en donde  $F_D$  es un factor que, multiplicado por la carga de rueda, proporciona

la carga de durmientes y a es la separación entre durmientes, en centímetros. La validez de la fórmula está limitada al intervalo

$$50 \leq a \leq 75, \text{ en cm}$$

Las fuerzas internas que se generan en el durmiente debido a la carga en el riel dependen de la distribución de presiones bajo el durmiente, ocasionada por la reacción del balasto.

Desde principios de siglo se han realizado mediciones de la distribución de presiones en el balasto. Los resultados muestran que ésta depende, además que de la rigidez relativa durmiente-balasto, del grado de uniformidad de la compactación del balasto, como consecuencia del proceso de colocación de la vía y del progresivo desacomodo y segregación del balasto bajo el durmiente. La distribución de presiones, por tanto, varía con el tiempo. Las mediciones muestran que las concentraciones de presiones que se presentan inicialmente bajo el durmiente se disipan con el tiempo por el reacomodo del balasto y la distribución de presiones se asemeja cada vez más a una uniforme. Lo indicado sería diseñar para una envolvente de las fuerzas internas producidas por condiciones extremas de distribución de presiones. Como se aprecia en la fig 23, los momentos ocasionados por diferentes distribuciones posibles difieren significativamente. Sin embargo, las normas AKEA y diversos otros organismos basan el diseño en los resultados de considerar una distribución uniforme de presiones para definir los momentos críticos, que son el positivo en el asiento del riel y el negativo en el centro de la pieza.

Los momentos pueden calcularse con la teoría de vigas. Las concentraciones de carga bajo el riel modifican localmente las distribuciones de es-

fuerzos; sin embargo, análisis con elementos finitos realizados para diferentes condiciones de carga indican diferencias despreciables con los determinados con teoría de vigas.

Para el caso de un durmiente monolítico el momento positivo bajo el riel es:

$$M_r = \frac{PL_1^2}{2L}$$

en que P es la carga sobre el durmiente, L es la longitud del mismo y  $L_1$  la distancia del extremo a la sección crítica. El momento negativo en el centro resulta

$$M_c = \frac{P}{8} ( 4L_1 - L )$$

Todos los efectos debidos a la respuesta dinámica e impacto del sistema se asocian, en un análisis estático como el aquí descrito, a un factor de amplificación de las cargas, que dependen principalmente de la velocidad máxima de los trenes y de las condiciones del equipo rodante y de la vía. Estas últimas se refieren a las irregularidades en las ruedas (achataamiento) y al riel (soldaduras imperfectas y torceduras), a la falta de compactación local del balasto y a otros defectos. Un aspecto muy importante al definir esta amplificación es el relativo a la resiliencia (capacidad de disipar energía) del sistema de fijación entre riel y durmiente. Entre ambos componentes se colocan comúnmente placas de hule, neopreno u otro material flexible que amortiguan parcialmente los efectos del impacto y reducen sustancialmente las cargas y energía absorbidas por el durmiente.

Los factores de amplificación por impacto fijados por las distintas especificaciones tienen poca justificación teórica. La forma de proceder ha

sido en todos los casos la de ir ajustando en sucesivas versiones de una especificación los factores de impacto hasta lograr que los diseños resultantes dieran lugar a que el número de fallas en los durmientes fuera limitado. Los ajustes en los factores han sido en general hacia valores mayores; en parte, debido a la creciente severidad de las cargas impuestas, pero principalmente para ir eliminando defectos de comportamiento de los durmientes que se han detectado con el paso de los años.

Por ejemplo, la AREA especifica un factor de impacto de 2.5 que se supone representativo de las condiciones de velocidad del tránsito (120 km/h) y de las condiciones de mantenimiento del equipo rodante y de la vía en las redes norteamericanas. Otras normas separan el efecto del impacto en factores parciales que dependen de la velocidad del tránsito y del estado de conservación de la vía.

Adicionalmente al efecto principal de carga vertical, y de los momentos flexionantes que esta ocasiona, existen otras fuerzas que, aunque en general menos críticas, deben considerarse en el diseño. El apoyo irregular de las ruedas, el frenado y las curvas producen cargas en la dirección longitudinal de la vía y en la transversal a ésta. Por falta de uniformidad del apoyo se presentan además momentos torsionantes sobre riel y durmientes. Existen pocos estudios relacionados con la cuantificación de estos efectos. Algunas de las normas contienen valores de diseño de estas acciones, con bases esencialmente empíricas.

#### 4.3.3 *Comportamiento observado de durmientes instalados*

La experiencia sobre el desempeño de durmientes de concreto ha sido diversa en distintos países. En general, mientras que en los países europeos

hay consenso de que estos durmientes no han presentado problemas estructurales de consideración, en los Estados Unidos la experiencia ha sido poco favorable en las primeras aplicaciones, y esto ha retardado mucho la difusión de los durmientes de concreto. Las fallas que se han presentado tiene características típicas ligadas con sollicitaciones críticas inducidas por las cargas de rueda, y la separación entre durmientes.

Para los durmientes monolíticos los tipos de falla más comunes se muestran en la fig 24. La falla que se presenta con mayor frecuencia es el agrietamiento por momento positivo bajo el asiento del riel; en general, éste se origina por una sobrecarga excepcional debida a irregularidades de las ruedas o del riel y se propaga verticalmente hacia arriba debido a la repetición de carga. Este tipo de falla se ve favorecida por la existencia de huecos en la sección. Al llegar aproximadamente a la mitad del peralte la grieta se abre en forma de una "Y" cuyas dos ramas siguen prolongándose hacia arriba a medida que continúan las repeticiones de carga. Finalmente puede llegarse a la fractura del durmiente. Se trata por tanto de un fenómeno en que están ligados el efecto de pocas cargas excepcionales que producen el agrietamiento, con el de la fatiga por un gran número de repeticiones de carga de menor magnitud, que hacen progresar el agrietamiento.

El siguiente tipo de falla, por la frecuencia con que se observa, es el agrietamiento por momento negativo al centro del durmiente, dicho agrietamiento sigue una trayectoria análoga a la anterior, pero ahora con una forma de "Y" invertida.

Con menor frecuencia se han observado grietas diagonales por cortante o

torsión. Una falla que se ha presentado con frecuencia se debe a los es fuerzos locales ocasionados por las fijaciones que producen aplastamientos, desconchamientos y agrietamientos.

Un tipo de falla muy particular es el debido a descarrilamiento del tren, que ocasiona el impacto de las ruedas sobre el durmiente y con frecuencia la fractura de este último. Ante este tipo de falla no hay diseño válido.

Un aspecto importante en los durmientes presforzados es la falla de ancla je de los tendones. El problema se origina porque la sección crítica de momento positivo (el asiento del riel) se encuentra muy cercana al extre mo del durmiente. En ella se presenta el momento máximo y el máximo es fuerzo en los tendones, el cual debe disiparse por adherencia en la lon gitud que hay entre dicha sección y el extremo.

La longitud del durmiente está regida, cuando no se cuenta con un disposi tivo de anclaje mecánico, por la necesidad de que  $L_1$  sea suficiente para que no se produzca una falla de anclaje. Este tipo de falla es particu larmente crítico una vez que se presenta el agrietamiento de momento posi tivo y que la grieta alcanza el nivel del presfuerzo. Se produce una con centración de esfuerzos de adherencia en la cercanía de la grieta, la cual hace que con la repetición de ciclos de carga se provoque una pérdida de adherencia en una longitud que aumenta progresivamente hacia el extremo del durmiente ocasionando el corrimiento de los tendones y la pérdida de su efectividad.

En los durmientes mixtos (bloques) la falla estructural más común es tam bién el agrietamiento por momento positivo bajo el riel; además se presen

tan problemas locales por la fijación y los de torceduras de las barras de unión entre los dos bloques.

Con cierta frecuencia se presenta el problema de aplastamiento del balasto por las altas concentraciones de esfuerzos transmitidos por el durmiente. El área de la cara inferior del durmiente debe ser suficiente para que los esfuerzos transmitidos sean aceptables para el balasto.

Sobre el desempeño de los durmientes de concreto en México no se tiene información detallada relativa al tipo de daño estructural pero se cuenta con una estadística, muy interesante, acerca del número de durmientes que se han tenido que reponer por daños debidos a problemas estructurales, mala colocación o descarrilamiento. Estos datos, mencionados por Rodríguez McNiece (ref 1), indican que de los 3.5 millones de durmientes de concreto colocados hasta 1980 (aproximadamente 2.5 millones monolíticos y 1 millón bloques) el porcentaje global de desperfectos fue de 0.50 por ciento para los monolíticos y de 0.75 por cientos para los mixtos (sin incluir los problemas debidos a descarrilamiento). En particular, la tabla 1 muestra el porcentaje de defectos en dos tramos sometidos a un tránsito total de cerca de 200 millones de toneladas brutas de carga. Dichos porcentajes varían significativamente de una a otra línea, pero se mantienen en valores no muy superiores a 1 por ciento. En el medio ferroviario se considera que estos resultados indican un desempeño muy satisfactorio de los durmientes de concreto.

#### 4.3.4 Mediciones de campo de las solicitaciones

Se han realizado gran número de pruebas de campo para determinar distintos aspectos del comportamiento de durmientes de concreto y en particular

para medir la fuerzas internas que se presentan en el durmiente.

Antes de aceptar el uso generalizado de durmientes de concreto, en los ferrocarriles de los Estados Unidos se instalaron diversos tramos de prueba con distintos tipos de durmientes y fijaciones. La información recabada en esas pruebas es muy cuantiosa y ha sido resumida y comentada en un informe de Battelle Lab (ref 2 ). Las pruebas que se realizaron pueden dividirse en:

*Pruebas en condiciones controladas.* Que tienen como objetivo cuantificar algunos aspectos particulares del problema como son la rigidez del sistema, para determinar el coeficiente del balasto o el factor de distribución de carga de rueda.

*Pruebas en servicio.* Que consisten en la observación del comportamiento y en la medición de solicitaciones en tramos de prueba sujetos al tránsito normal de los trenes.

De pruebas del primer tipo se obtuvieron, por ejemplo, datos con respecto a la fracción de la carga de rueda que soporta un durmiente. Se encontró que, por la mayor rigidez de la vía, ese porcentaje es mayor cuando se usan durmientes de concreto que cuando se usan los de madera. La expresión propuesta por la AREA predice aceptablemente la fracción que toma el lado más cargado del durmiente, en función de la separación entre estas piezas.

Las mediciones en servicio se han concentrado en determinar la distribución de presiones bajo el durmiente, de la carga soportada por él mismo y de las deformaciones inducidas en el concreto.

El grado de refinamiento de los equipos de medición ha ido creciendo con el tiempo. Cronológicamente, las primeras mediciones realizadas son poco confiables, en lo que se refiere a la posibilidad de detectar los picos máximos, que se presentan por el carácter dinámico de la sollicitación. Probablemente esta es la razón de la incongruencia que se encuentra, en diversos estudios, entre el hecho de que las máximas sollicitaciones medidas son muy inferiores a la resistencia prevista del durmiente, mientras que se observan consistentemente daños en el mismo por dichas sollicitaciones.

El programa más ambicioso de mediciones en los Estados Unidos está relacionado con el proyecto FAST, bajo el cual se construyó en Pueblo, Colorado, una pista de prueba en la que se someten distintos componentes de vía, y del equipo rodante, a pruebas aceleradas de funcionamiento mediante el paso repetido de trenes en condiciones extremas de peso y velocidad.

Un tramo de pista de prueba se destinó a ensaye de durmientes; en él se revisa el funcionamiento de los durmientes y las fijaciones y la posible aparición de daños, además se miden las cargas y los momentos que se presentan. Después de la aplicación de 245 millones de toneladas de carga, se encontró que los durmientes diseñados de acuerdo con la AREA no presentaban mayores problemas de fisuración o daños ( fig 26 ). Esto induce a pensar que los requisitos actuales son conservadores.

Por otra parte se hizo un estudio comparativo de las cargas y momentos producidos en durmientes de concreto colocados en líneas de ferrocarril en servicio. Los durmientes eran similares a los de la pista de la prueba de FAST pero estaban diseñados con una versión anterior de la AREA en la que los momentos especificados eran 80 por ciento de los actuales.

El resultado se muestra en la tabla 2, (ref 4); se aprecia que el porcentaje de durmientes que presentaron fisuras fue muy alto, llegando en algunos casos casi a 100 por ciento. El nivel de daño dependió de la existencia de imperfecciones en las ruedas y del peso del equipo rodante, en este orden de importancia.

La justificación de la diferencia en el comportamiento de los durmientes se encuentra en los resultados de las mediciones de solicitaciones. La comparación se muestra en la fig 27 en la que se relaciona la carga vertical en el durmiente con la frecuencia con que dicha carga fue superada. Se aprecia que en el tramo FAST las cargas fueron superiores y casi uniformes, pero las máximas que se presentaban excepcionalmente fueron mayores en los durmientes instalados en vías públicas en servicio. En la fig 28 aparece la distribución de los momentos flexionantes máximos medidos bajo el - riel en el tramo FAST y en un tramo en servicio; se aprecia que los momentos máximos medidos fueron superiores en los durmientes en servicio que en los de FAST, a pesar de que los trenes que transitaban en FAST eran de mayor peso y con mayor velocidad.

Los resultados anteriores son de suma importancia, ya que ponen en evidencia la influencia decisiva que tienen las condiciones de la vía y del equipo rodante en las solicitaciones que se inducen en los durmientes , además de que invalidan los resultados del proyecto FAST en lo que concierne a la valuación del desempeño de los durmientes, ya que las pruebas se realizaron en condiciones óptimas de conservación de la vía y de las ruedas, y no son representativas de lo que ocurre en la realidad.

#### 4.4 DISEÑO DE DURMIENTES DE CONCRETO

En ingeniería, el diseño estructural se realiza mediante una serie de operaciones encaminadas a determinar la forma general, las dimensiones específicas y otras características de una estructura, de modo que se obtenga un grado de seguridad razonable, comportamiento satisfactorio en condiciones de servicio y costo dentro de límites aceptables.

Las etapas que suelen seguirse para diseñar durmientes de concreto son:

*Definición de la geometría.* La geometría de estas piezas debe estar definida con precisión para que el durmiente reúna las características siguientes:

- Mantener el escantillón entre rieles
- Albergar el sistema de fijación del riel en un lugar prescrito, y facilitar la instalación y el mantenimiento de éste
- Proporcionar superficie de apoyo suficiente para que las cargas en los rieles se transmitan a esfuerzos permisibles para el balasto
- Consumir el menor volumen de concreto
- Facilitar la fabricación de la pieza
- Permitir que los durmientes sean apilados para ser almacenados y trasladados fácilmente.

En particular, un problema que ha surgido para satisfacer las características indicadas en el segundo punto, ha sido impedir el movimiento indeseable de la placa de hule que se coloca entre el riel y el durmiente. Tanto en

la vía como en pruebas de laboratorio se ha observado que ese movimiento origina serios desgastes en la misma placa y un deterioro acelerado del comportamiento de la sujeción.

Este problema debe ser considerado en la construcción de los durmientes en uso y en el diseño de modelos futuros.

Una solución a ese problema sería imponer restricciones en el durmiente que impidan el movimiento de la placa de hule, como se ilustra en la fig 31. Ahí se observa que el durmiente tiene dos salientes las cuales, además de marcar el escantillón entre rieles, permiten que una placa de hule con muescas en los extremos se acople a dichas salientes.

*Acciones.* Las acciones que obran sobre los durmientes son principalmente de tipo variable y, ocasionalmente, accidentales.

Las acciones variables se deben al paso del tren y su magnitud depende de los siguientes factores:

- Carga anualmente trasladada
- Velocidad de los trenes
- Características del medio ambiente

Por lo que respecta a las acciones accidentales, éstas se presentan en casos de descarrilamientos o sismos.

Sin duda, esta etapa constituye una de las más complejas en el proceso de diseño dado que las acciones que obran, incluso, en dos durmientes adyacentes pueden variar considerablemente.

Tomando en cuenta la variabilidad de las cargas, es deseable aplicar las técnicas más adecuadas de probabilidad y estadística para determinar mejor las cargas de diseño.

Una distribución de probabilidades que resulta conveniente para manejar el problema en cuestión es la llamada Extrema I (ref 5).

*Estructuración.* Esta consiste en:

- Seleccionar el modelo de durmiente adecuado a las condiciones de servicio
- Proponer la separación entre estas piezas, y.
- Señalar el espesor del balasto

*Análisis.* Aquí se determinan las fuerzas internas que obran en el durmiente, para lograrlo se toman en cuenta los siguientes factores:

- Acciones sobre el durmiente
- Estructuración
- Calibre del riel
- Características del terreno de cimentación

*Dimensionamiento.* En esta etapa se determina la escuadría y las características del refuerzo de los durmientes.

Al respecto, diversos organismos norman el dimensionamiento de estas piezas limitando los esfuerzos en las fibras extremas de las secciones críticas a esfuerzos permisibles para el concreto, para prever el agrietamiento o el aplastamiento de este material.

Finalmente, el durmiente que resulta de seguir el proceso descrito debe cumplir con ciertos requisitos de calidad y funcionamiento para garantizar un buen comportamiento en la vía. Además, su costo de fabricación tendrá que ser razonable.

Al considerar la secuencia para diseñar durmientes y haciendo hincapié en la última etapa, se desarrolló un programa de computadora que agiliza la tarea de diseñar durmientes de concreto presforzado. Este programa se describe en el Apéndice A.

Cuando por primera vez se pretende generar un prototipo de durmiente de concreto, el proceso de diseño se convierte en una tarea de aproximaciones sucesivas. En general, para llegar a un modelo adecuado se puede seguir un proceso como el que se indica en el diagrama de bloques de la fig 29

Aquí, el primer paso consiste en diseñar el durmiente siguiendo la secuencia indicada en párrafos anteriores. A continuación se construye el prototipo el cual deberá sujetarse a ensayos de laboratorio. Luego, los resultados serán analizados; si el comportamiento fue satisfactorio y su costo es razonable entonces ese modelo estará en condiciones de ser colocado en la vía en donde se corrobora su capacidad para prestar un buen servicio, pero si los resultados de laboratorio son satisfactorios y su costo es excesivo, entonces es necesario proponer otro modelo de durmiente procurando que su costo sea menor, y adicionalmente deberá repetirse la secuencia indicada en el diagrama de bloques.

Por otra parte, si los resultados de las pruebas de laboratorio no son satisfactorios es necesario identificar las causas que produjeron la falla, a continuación se efectuarán las correcciones necesarias y de nuevo se volve-

rá a construir el prototipo que será sometido al mismo proceso.

Esta secuencia terminará cuando el comportamiento ante pruebas de laboratorio sea satisfactorio y el costo resulte apropiado.

**5. UN NUEVO SISTEMA PARA SUJETAR EL RIEL  
AL DURMIENTE**

## 5. UN NUEVO SISTEMA PARA SUJETAR EL RIEL AL DURMIENTE

### 5.1 ANTECEDENTES

Unir el riel al durmiente es un problema siempre presente en la vía, dadas las condiciones tan severas que obran sobre los rieles en servicio y la incertidumbre que existe acerca del tipo, y la magnitud, de tales acciones.

Hasta ahora, para efectuar la unión entre ambos elementos se han desarrollado diversos sistemas de fijación. Estos van desde el empleo de clavos en durmientes de madera, hasta los más elaborados en durmientes de concreto.

En el caso de una fijación a base de clavos, éstos mantienen únicamente el escantillón de la vía sin evitar el movimiento vertical del riel

pues se ha observado que desde el primer paso sobre una vía recién instalada, los clavos se aflojan.

Dentro de los sistemas de sujeción elaborados, los hay con distintos grados de rigidez: los rígidos, aun cuando unen firmemente el riel al durmiente, este último se ve afectado considerablemente por la amplificación de las cargas dinámicas que genera el paso del tren. En contraste, las fijaciones flexibles tienen un comportamiento más acorde con las características mecánicas del durmiente.

Sin embargo, no todas las fijaciones fabricadas hasta ahora han resultado adecuadas, pues no se puede negar que varios de los accidentes ocurridos en la vía, con fuertes pérdidas materiales y de vidas humanas, se deben al mal funcionamiento del sistema de fijación.

Esta situación, que México no cuente con un sistema propio para unir el riel al durmiente y la demanda de un sistema de transporte ferroviario - eficiente, constituyeron los motivos para desarrollar un nuevo sistema - de sujeción.

Este sistema, designado RE X, se encuentra en la fase experimental y se espera que en un futuro próximo, después de que apruebe las exigencias de economía y servicio, genere grandes beneficios en el ámbito ferroviario.

## 5.2 *FUNCIONES DE UN SISTEMA DE FIJACION*

Las funciones primordiales de un sistema de fijación son las que se indican a continuación:

- a. Mantener el escantillón y el alineamiento del riel
- b. Restringir el movimiento longitudinal del riel
- c. Tener resiliencia; es decir, debe ser capaz de absorber energía y cederla sin sufrir deformación permanente, y
- d. Aislar eléctricamente al riel del durmiente.

Para que una fijación realice estas funciones, debe soportar adecuadamente las acciones siguientes:

- a. El bamboleo del tren sobre la vía
- b. La fuerza centrífuga sobre los rieles, que produce el tren en curvas
- c. Las ondas elásticas en los rieles producidas por la tracción, el frenado y el movimiento en general
- d. La contracción bajo la presencia de una soldadura defectuosa o rotura del riel, y
- e. Los desplazamientos en las zonas aledañas a las juntas de dilatación.

En general, la magnitud de cada una de estas acciones no se conoce con precisión.

### 5.3 OBJETIVOS DEL NUEVO SISTEMA DE FIJACION

Los objetivos que prevalecieron al desarrollar la fijación RE X fueron, entre otros:

- a. Ofrecer mayor comodidad y seguridad a los usuarios
- b. Disminuir los gastos de conservación tanto de la vía como del equipo rodante
- c. Lograr una mayor armonía en el comportamiento durmiente, riel y fijación
- d. Eliminar la fuga de divisas que genera el pago de los derechos por usar fijaciones con patentes extranjeras, y
- e. En última instancia, contribuir al desarrollo tecnológico del país.

#### 5.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN RE X

La sujeción propuesta está integrada por los elementos siguientes:

- Cuatro sujetadores
- Cuatro pernos tirafondo
- Cuatro rondanas aislantes
- Cuatro rondanas de presión
- Ocho rondanas metálicas planas
- Dos insertos embebidos en el durmiente, y
- Una placa de hule.

En la fig 30 se muestran estos elementos, y las funciones de cada uno de ellos se indica a continuación:

*Sujetadores.* Son piezas metálicas cuyo diseño contempla una parte cón cava que permite asir firmemente al riel.

Este sujetador se construyó de una placa de acero; sin embargo, posteriormente dicho elemento se obtendrá de un proceso de fundición para abatir los costos de producción.

*Insertos.* Estos elementos sirven para anclar los pernos tirafondo al durmiente. Están construidos con una sección canal para evitar que el perno tirafondo, cuya cabeza tiene forma de ovoide, gire al apretar la tuerca de éste.

Los insertos quedan sumergidos en concreto como se muestra en la fig 31

*Perno tirafondo.* Es un tornillo largo con rosca en un extremo y cabe za de ovoide en el extremo opuesto. Estos elementos funjen como un es tabón entre los sujetadores y los insertos, y es la disposición de estas piezas la que gobierna la rigidez del sistema en general.

*Rondanas aislantes.* Son elementos que impiden el paso de la corriente eléctrica entre el riel y el durmiente.

*Rondanas metálicas.* Estas piezas proporcionan mayor superficie de contacto a las tuercas y a la cabeza de los tirafondos.

*Rondanas de presión.* Su finalidad es evitar que las vibraciones provo cadas por el paso del tren aflojen las tuercas de los tirafondos.

En las figs 32 y 33 se aprecia la disposición general de la fijación RE X instalada en un durmiente, y en la fig 34 se muestra un tramo de vía con esta fijación.

### 5.5 CARACTERISTICAS Y FUNCIONAMIENTO

La característica principal de la fijación desarrollada estriba en proporcionar su rigidez mediante los pernos tirafondos dispuestos en forma de "X". Además, esta disposición permite limitar los movimientos del riel.

Para las diversas condiciones de servicio a las que se ve sujeta la vía, la sujeción RE X ofrece la posibilidad de variar su propia rigidez para hacerla congruente con las características del durmiente y el riel.

La propiedad de esta fijación para variar su rigidez es una ventaja que se puede traducir en un mejor comportamiento de la vía en general. Con base en las figs. B.1 a B.3 del Apéndice B esta propiedad se obtiene mediante alguno de los procedimientos siguientes:

- a. Variar el ángulo,  $\phi$ , de los tirafondos
- b. Modificar la longitud L
- c. Variar el diámetro de estos mismos pernos
- d. Reducir\* a la mitad el número de sujetadores por sujeción, y
- e. Combinando estos procedimientos

---

\* Esta reducción se logra colocando dos sujetadores en cada uno de los extremos del durmiente. Para obtener un funcionamiento efectivo, la fijación se instalaría alternadamente como se ilustra en la fig 35.

Ahora bien, al quedar los insertos embebidos en el concreto, éstos adquieren capacidad suficiente para anclar al resto de la fijación sin reducir la sección transversal del durmiente y, por consiguiente, sin reducir la capacidad de carga del mismo.

En las fig 31 se aprecia la importancia de hacer compatible la geometría del durmiente con las características de la sujeción que se emplea. Por ejemplo, las muescas que tiene la placa de hule se acoplan con dos salientes que debe tener el durmiente. Como se indicó en el capítulo anterior, la finalidad de este detalle es, además de marcar el escantillón entre rieles, evitar que la placa de hule se mueva por las vibraciones que provoca el tren.

## 5.6 CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES

Pese a la incertidumbre que existe sobre la magnitud de las acciones que obran en un sistema de sujeción, el análisis y el diseño de la sujeción RE X se llevaron a cabo para condiciones de laboratorio, sin olvidar que el destino de este sistema será operar en vías férreas en servicio.

Para efectuar el análisis correspondiente, el sistema en estudio se idealizó de la siguiente manera:

- a. Los insertos se representan con barras de material elástico lineal sujetas únicamente a fuerzas de tensión
- b. El patín del riel como una barra infinitamente rígida

- c. La unión de los extremos de un tirafondo con el sujetador y con el inserto, se representa con articulaciones
- d. El contacto entre el riel y el durmiente queda representando con apoyos articulados sin más restricción lateral que la fuerza de fricción entre ambas piezas
- e. El durmiente se representó como un apoyo rígido.

En el Apéndice B se muestran los diagramas de cuerpo libre que corresponden con esta idealización. Ahí mismo, se determinan las expresiones generales que gobiernan las rigideces lineales de la sujeción en tres direcciones y, además, se determinan las fuerzas internas en la misma fijación para las cargas de laboratorio que impone la AREA.

Con base en ese análisis se dimensionaron los elementos de la sujeción para que el comportamiento de ésta quedara dentro de patrones establecidos por la AREA para durmientes monolíticos de concreto. Así, la construcción de la fijación quedó con las características siguientes:

- a. Angulo de inclinación de los pernos tirafondos
$$\phi = 23^\circ$$
- b. Longitud efectiva de los mismos pernos
$$L = 27.5 \text{ cm}$$
- c. Diámetro nominal y área transversal de cada tirafondo
$$d = 1.27 \text{ cm}$$

$$A = 1,27 \text{ cm}^2$$

d. Material

$$\text{Acero} \left\{ \begin{array}{l} E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \\ f_y = 5\,427 \text{ kg/cm}^2 \\ f_u = 6\,600 \text{ kg/cm}^2 \end{array} \right.$$

Donde E es el módulo de elasticidad y,  $f_y$  y  $f_u$  son los esfuerzos de fluencia y último, respectivamente.

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones del Apéndice B se obtienen los resultados siguientes:

- Rigidez vertical

$$K_v = 5\,905 \text{ kg/mm}$$

- Rigidez transversal

$$K_t = 16\,393 \text{ kg/mm}$$

- Rigidez longitudinal

$$K_l = 190 \text{ kg/mm}$$

Estos valores quedan dentro de los establecidos por la AREA. Sin embargo, el sistema debe ser ensayado para verificar dichos resultados.

Hasta ahora, la fijación RE X se sometió al ensaye de levantamiento de la fijación que se describe en el capítulo 3, en la fig 36 se muestra la disposición del ensaye. Mediante esta prueba se determinó que la rigidez vertical de esta fijación es:

$$Kv' = 5\,568 \text{ kg/mm}$$

que es un valor muy próximo a la rigidez calculada,  $Kv$ .

En la fig 37 aparece la curva fuerza-desplazamiento que se obtuvo del ensayo de levantamiento de la fijación. Cabe hacer notar que el comportamiento de la fijación ante dicho ensayo fue totalmente satisfactorio.

### 5.7 ALGUNAS VENTAJAS E INCONVENIENTES DE ESTE SISTEMA DE FIJACION

La fijación propuesta ofrece las ventajas siguientes:

- El durmiente no tiene huecos especiales para albergar al inserto; por tanto, no se reduce la capacidad de carga del durmiente
- Es factible modificar la rigidez de esta sujeción para hacerla congruente con la rigidez de la vía
- Se puede emplear en cualquier tipo de durmiente
- Su instalación y mantenimiento son sencillos
- El diseño observa varios detalles; como es evitar que deslice la placa de neopreno que se coloca bajo el riel
- La fabricación del sistema no requiere dobleces ni tratamientos térmicos especializados
- Tiene resiliencia

- Aprobó satisfactoriamente el ensaye de levantamiento de la fijación que establecen las normas AREA
- Se puede eliminar la fuga de divisas que genera el pago de regalías por usar fijaciones con patente extranjera
- En última instancia, contribuye al desarrollo tecnológico del país.

Por otra parte, los inconvenientes que esta fijación presenta son:

- Los durmientes que utilicen esta sujeción necesitan mayor espacio para ser almacenados y trasladados, ya que los insertos sobresalen transversalmente del durmiente
- El inserto queda en contacto con el balasto; por tanto, queda expuesto directamente a la acción del medio ambiente.

## 6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

## 6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Finalmente, en relación con los temas desarrollados en este trabajo se pueden emitir los siguientes comentarios y conclusiones:

- Es indiscutible que la vía elástica tiene mayores ventajas que una vía convencional
- La situación económica del país hace necesario que los elementos que integran la vía elástica, en particular durmientes y sistemas de fijación, se desarrollen con tecnología mexicana
- Las cargas que rigen el diseño de durmientes son provocadas por locomotoras; por tanto, es deseable que los criterios para elegir equipos de tracción consideren esta característica, ya que se ha observado en países europeos que los durmientes tienen un buen comportamiento en la vía cuando las locomotoras transmiten cargas por eje del orden de 20 toneladas, y alcan--

zan velocidades superiores a las de los trenes americanos

- Obtener diseños adecuados, tanto de durmientes como de sistemas de fijación implica conocer el comportamiento de estos elementos de la vía, y realizar experimentos en los laboratorios y estudios analíticos. Para lograrlo, hay que efectuar mediciones precisas en el campo, que complementen y modifiquen las pruebas hechas en condiciones controladas en el laboratorio, de los prototipos que se diseñaron mediante análisis estructural. Ninguno de ellos tomado por separado, dará buenos resultados a corto plazo
- Se tendrá un mejor comportamiento estructural del conjunto durmiente - sistema de fijación, cuando las características de ambos elementos sean compatibles
- Para obtener mejores diseño de durmientes de concreto conviene desarrollar criterios, en función de las características de la vía, que sirvan para valorar la magnitud del efecto de impacto del cual depende que existan diseños más o menos conservadores. Además, se deben buscar parámetros objetivos para tomar en cuenta la magnitud de los efectos por torsión y cortante, a pesar de que el número de fallas producidas por estos efectos en el durmiente sea reducido
- Un programa de computadora para diseñar durmientes de concreto resulta una herramienta útil y versátil para el ingeniero.
- La fijación RE X se caracteriza por tener capacidad para variar

su rigidez lineal en tres direcciones y no reducir la resistencia del durmiente

- El modelo que se presentó de la fijación RE X es un primer prototipo; por tanto, cabe señalar que algunas dimensiones de sus elementos serán modificadas para que el costo de fabricación resulte aún menor
- El comportamiento de esta fijación al someterla al ensaye de levantamiento de la fijación, que establecen las normas AREA, dio resultados alentadores
- Para reducir la importación de tecnología, que tanto afecta a la economía de nuestro país, es necesario dirigir las líneas de investigación a la solución de problemas prácticos como los expuestos en este trabajo, pues recordemos una frase célebre de Hardy Cross

*La sociedad no quiere análisis,  
reclama estructuras*

## 7. REFERENCIAS

## 7. REFERENCIAS

1. G. Rodríguez Mac Nice, "Vía moderna de los Ferrocarriles Nacionales de México", Revista Ingeniería, Vol. LIII, No. 2, 1983.
2. R.H. Prause, J.C. Kennedy y R.C. Arnlund, "An Evaluation of Performance Requirements for Cross Ties and Fasteners", Rep FRA/ORD-78/37 por Battelle-Columbus Lab., U.S. Gvt Printing Office, dic 1978
3. F.E. Dean, "Concrete and Wood Tie Performance through 425 MGT", Rep FRA/TT6-81/06 por Battelle-Columbus Lab., U.S. Gvt Printing Office, oct 1981
4. H.G. Moody, "Some Aspects of Concrete Tie Performance in FAST and Revenue Service", Proc FAST Engineering Conference, Denver Col, nov 1981
5. J.R. Benjamin y A.C. Cornell, "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers", McGraw Hill Co., N. York, 1970.

6. Hewlett Packard, HP-67 HP-97 Civil Engineering Pac I, Corvallis Oregon
7. Apuntes tomados de la clase de Estructuras de Concreto, impartida por el Ing. Santiago Loera Pizarro, Facultad de Ingeniería, UNAM
8. Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal
9. DOS, versión 3.2 Disk Operating System. Instructional and Reference Manual. Apple Computer Inc.

## 8. BIBLIOGRAFIA

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. John W. Weber, "Concrete crossties in the United States", PCI Journal, V. 14, No. 1, feb., 1969
2. G.K. Narasimha Murthy, "Buckling of beams supported by Pasternak foundation", J. of Eng. Mech. Div., ASCE, V. 99, No. EM3, jun., 1973
3. Arnold D. Kerr, "The stress and stability analysis of railroad tracks", J. of Applied Mechanics, ASME, V. 41, No. 4, dic., 1974
4. Arnold D. Kerr, "On the derivation of well posed boundary value problems in structural mechanics", Int. Journal of Solids and Structures, V. 12, Pergamon Press, 1976
5. Shiraz D. Tayalaji y Marshall Thompson, "Considerations in the analysis of conventional railway track support system", Transp. Eng. Journal, ASCE, V. 103, No. TE2, mar., 1977
6. Gerald P. Raymond, "Railroad wood tie design and behavior", Transp. Eng. Journal, ASCE, V. 103, No. TE4, jul., 1977

7. De Leuw, Cather/Parsons, "Northeast Corridor improvement project Task 202: Concrete tie cost and performance for track structures", U.S. Dept. of Transp., FRA, No. FRA-NECPO-77-2, PB 272 745, oct., 1977
8. Paul N. Gaskin, Gerald P. Raymond y Allan G. Powell, "Response of railroad ballast to vertical vibration", Transp. Eng. Journal, ASCE, V. 104, No. TE1, ene., 1978
9. Gerald P. Raymond, "Design for railroad ballast and subgrade support", J. Gertechnical Eng. Div., ASCE, V. 104, No. GT1, ene., 1978
10. Gerald P. Raymond, "Soil-structural interaction and concrete tie design", J. Gertechnical Eng. Div., ASCE, V. 104, No. GT2, feb., 1978
11. G.P. Raymond y John R. Davies, "Triaxial tests on dolomite railroad ballast", J. of Gertech. Eng. Div., ASCE, V. 104, No. GT6, jun., 1978
12. G.P. Raymond y David R. Williams, "Repeated load triaxial tests on a dolomite ballast", J. Geotech. Eng. Div., ASCE, V. 104, No. GT7, jul., 1978
13. D.W. White, R.C. Arnlund y R.H. Prause, "Economics of concrete and wood-tie track structures", U.S. Dept. of Transp., FRA, No. FRA/ORD-78/2, PB-291 613, ago., 1978
14. Yehia M. El-Aini, "Effect of imperfections on vertical track buckling", J. Eng. Mechanics Div., ASCE, V. 104, No. EM6, dic., 1978
15. R.H. Prause, J.C. Kennedy y R.C. Arnlund, "An evaluation of performance requirements for cross-ties and fasteners", U.S. Dept. of Transp., FRA, No. FRA/ORD-78/37, PB 294431, dic., 1978
16. G.P. Raymond, "Railroad ballast prescription: State-of-the-art", J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, V. 105, No. GT2, feb., 1979

17. G.P. Raymond, "Examination of degraded aggregate cement value test", Transp. Eng. Journal, ASCE, V. 105, No. TE3, may., 1979
18. G.P. Raymond y Vishnu A. Diyaljee, "Railroad ballast sizing and grading", J. Geotech. Eng. Div., ASCE, V. 105, No. GT5, may., 1979
19. Arnold D. Kerr, "Improved stress analysis for cross-tie tracks", J. Eng. Mech. Div. ASCE, V. 105, No. EM4, ago., 1979
20. Amir N. Hanna, "State-of-the-art report on: Prestressed concrete ties for North American railroads", PCI Journal, Sep-oct., 1979
21. Wai-Cheong So, "Track structure design by mathematical models", Transp. Eng. Journal, ASCE, V. 105, No. TE5, sep., 1979
22. G.P. Raymond y Vishnu A. Diyaljee, "Railroad ballast load ranking classification", J. Geotech. Eng. Div., ASCE, V. 105, No. GT10, oct., 1979
23. D.B. Scott, "Concrete support for railway track: Sleepers", Proc. Instn. Civ. Engrs. Parte 1, V. 66, nov., 1979
24. Lufti Road y José L. Figueroa, "Load response of transportation support systems", Transp. Eng. Div., ASCE, V. 106, No. TE1, ene., 1980
25. Ching S. Chang, Clement W. Adegoke y Ernest T. Selig, "GEOTRACK model for railroad track performance", J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, V. 106, No. GT11, nov., 1980
26. Alfred E. Fazio, "Track maintenance: management and planning", Transp. Eng. J., ASCE, V. 106, No. TE6, nov., 1980
27. Andrés López Rita y Juan Miquel Canet, "El método del prisma finito en el análisis estructural de las infraestructuras ferroviarias", Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Barcelona, jul., 1981

28. American Railway Engineering Association, AREA, Bulletin 69 Vol 85, 1984
29. Ferrocarriles Nacionales de México, Ferrocarriles Mexicanos, Vols. ( varios )

## TABLAS

TABLA 1

FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO  
EJEMPLOS DE DEFECTOS DE DURMIENTES COLOCADOS

MODELO	División Guadalajara 175 millones ton (brutas) Línea I (8 años)		División San Luis 200 millones ton (brutas) Línea "BC" (11 años)		BIBLOQUES	
	CANTIDAD	%	CANTIDAD	%	CANTIDAD	%
INSTALADOS	431494	100	8299	100	290,723	100
MAL ORDEN	1,119	0.25	118	1.42	3,471	1.19
FALTANTES	105	0.02	107	1.29	51	0.02
POR ACCIDENTE	334	0.07	---	----	2,575	0.89
T O T A L	1,558	0.34	225	2.71	6,097	2.10

TABLA 2  
 RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO OBSERVADO DE DURMIENTES DE CONCRETO EN LA  
 ESTACION EXPERIMENTAL FAST Y TRES VIAS PUBLICAS DE ESTADOS UNIDOS

Identificación	Carga transportada, MGT		Tipo de tráfico	Velocidad máxima mph	Defectos en el equipo	Porcentaje de durmientes agrietados	Carga vertical excedida en		Momento bajo el riel excedido en	
	total	anual					1/100	1/1000	1/100	1/1000
FAST	425		Pesado		Ninguno	0	-----	-----	150	-----
ATSF	125	20	Medio	70 carga 79 pasajeros	Moderados	14	40	65	200	275
CHE	220	30	Ligero medio	70 carga 110 pasajeros	Solo a altas velocidades	93	50	75	175	300
NW	260	60	Pesado	40 carga	Severos	100	62	82	300	-----

Nota: Datos de la referencia 3

## 9. FIGURAS

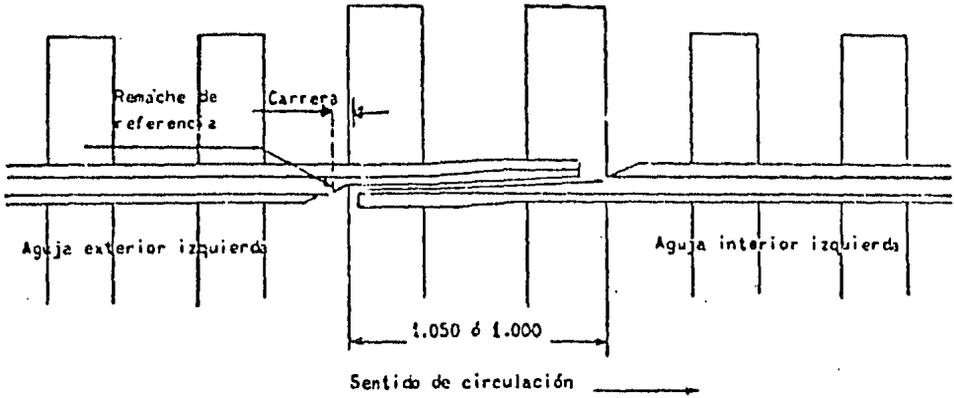


FIG 1 Forma típica de una junta de dilatación

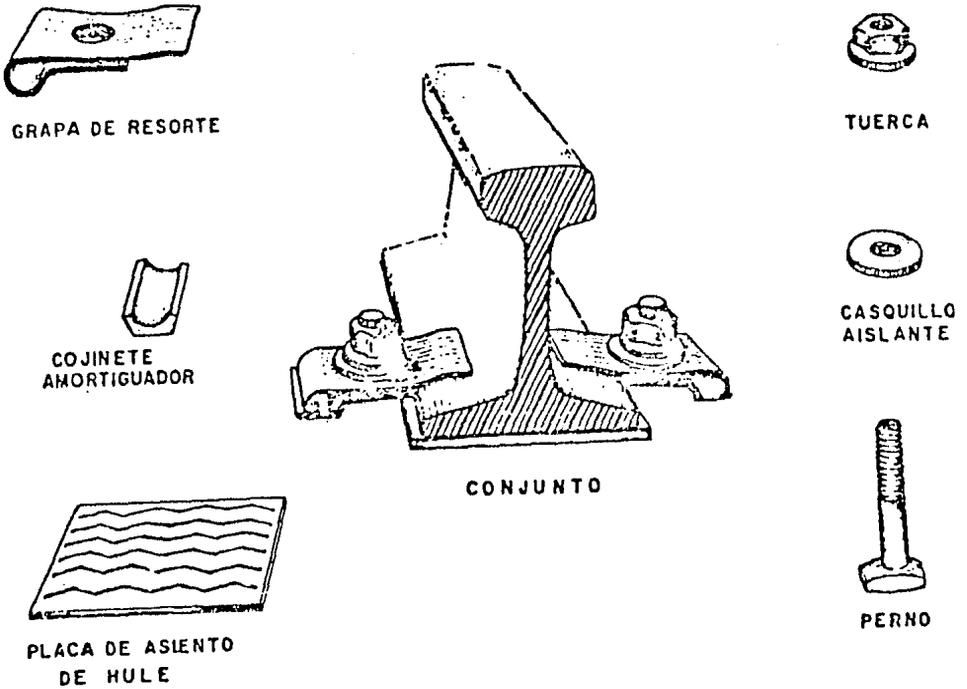


FIG 2 Elementos del sistema de sujeción RN

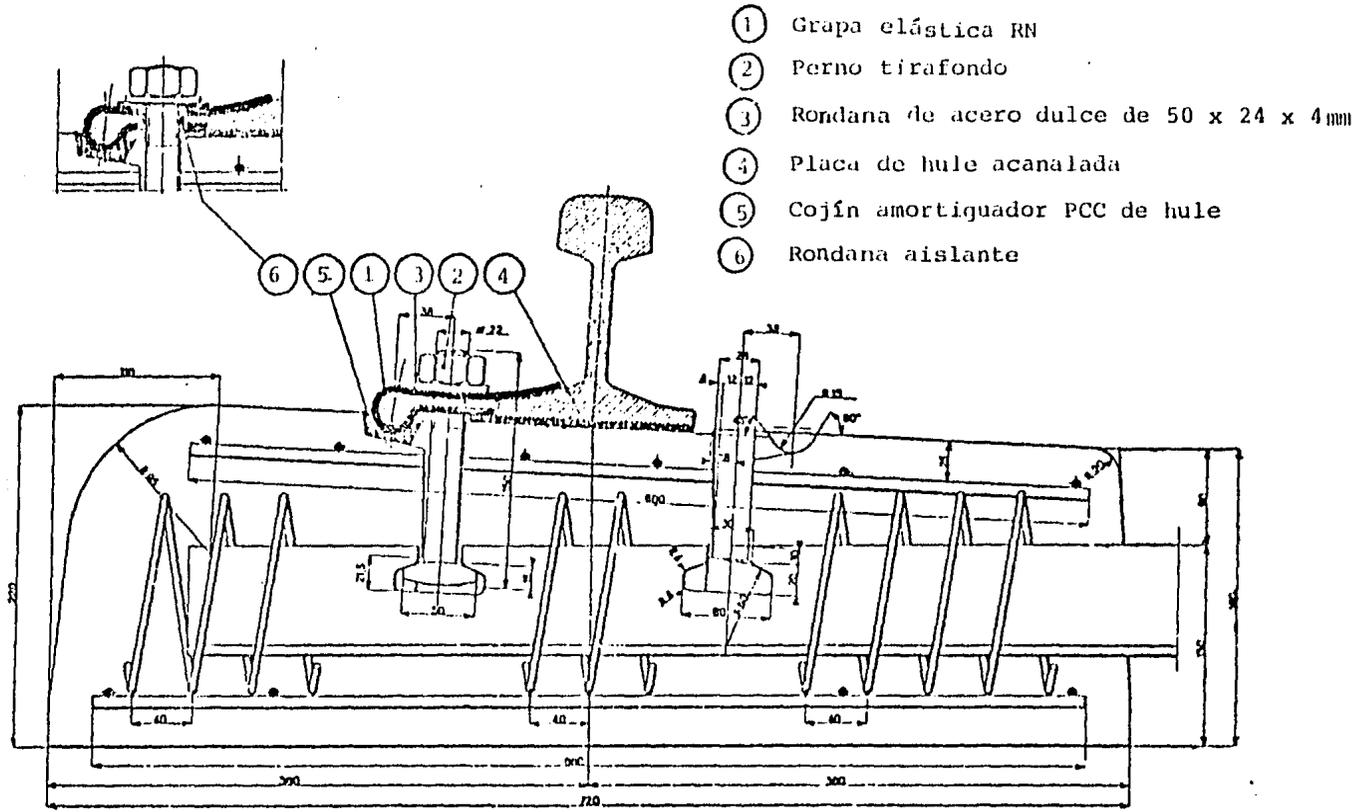


FIG 3 Sujeción RN instalada en el durmiente



Fig. 4 Durmientes RS, origen francés



Fig. 5 Durmiente Dywidag, origen alemán

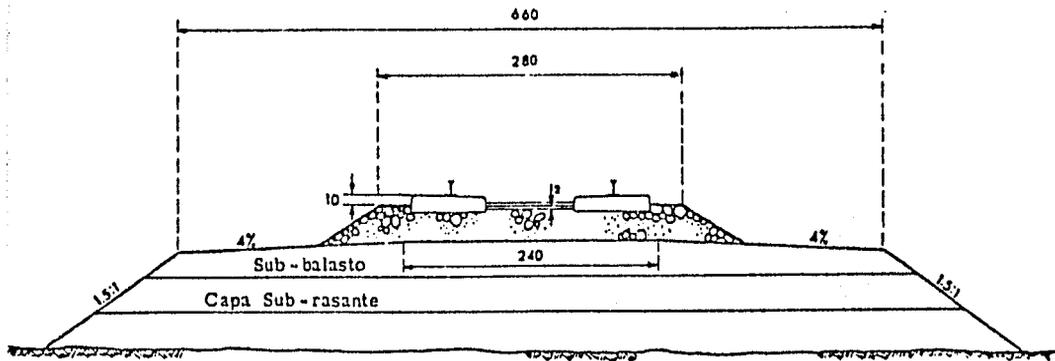


FIG 6.a Terraplén con capas de sub-balasto y sub-rasante

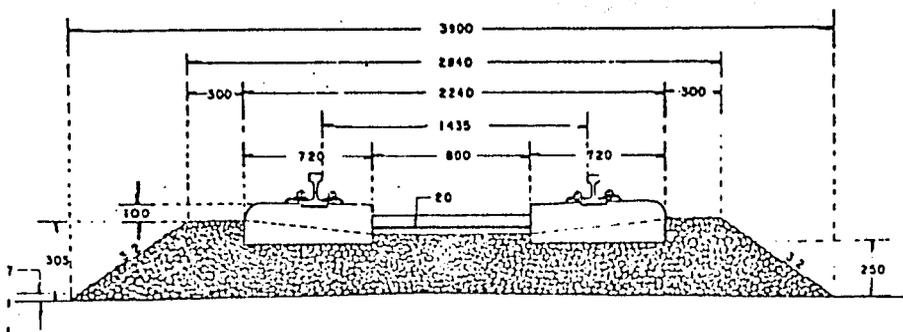


FIG 6.b Sección de balasto para vía elástica



Fig. 7 Flexión negativa en el asiento del riel

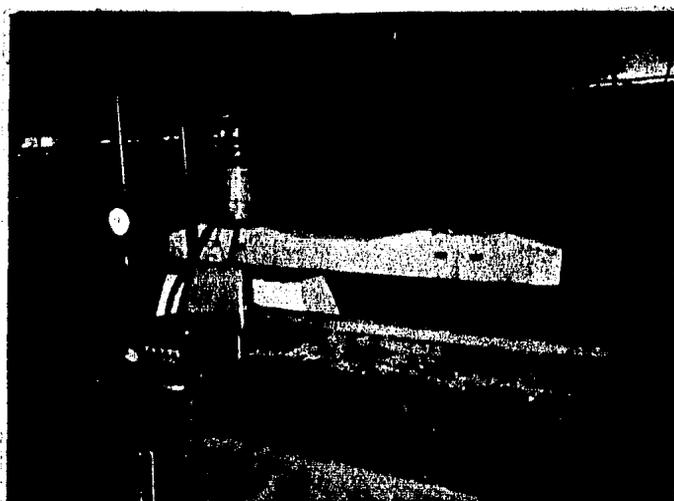


Fig. 8 Flexión positiva en el asiento del riel

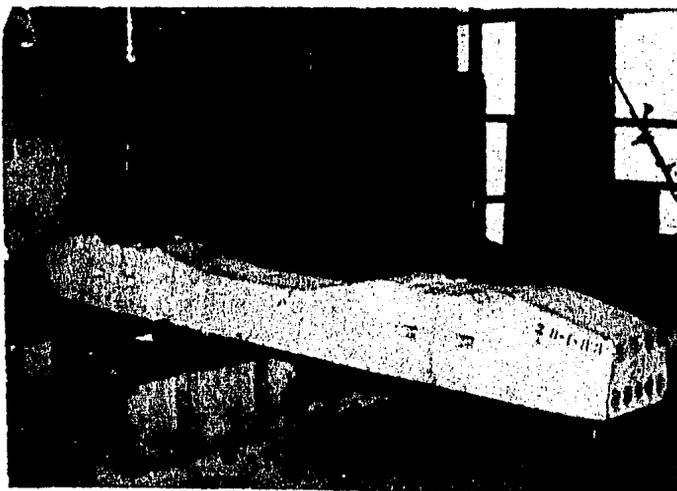


Fig. 9 Disposición general para ensaye de carga repetida en el asiento del riel

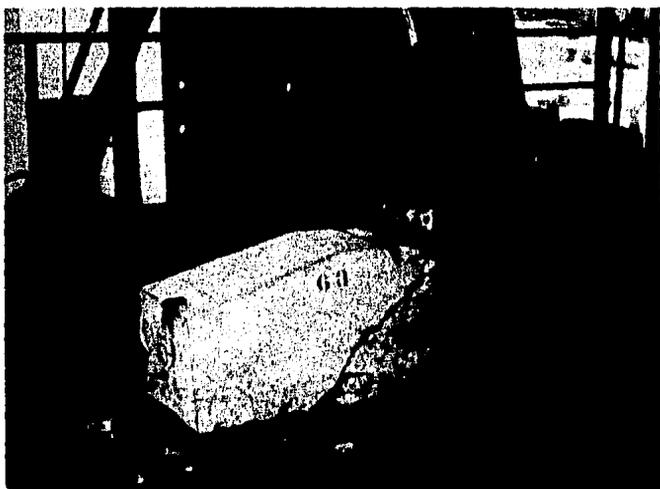


Fig. 10 Falla de espécimen sujeto a carga repetida.

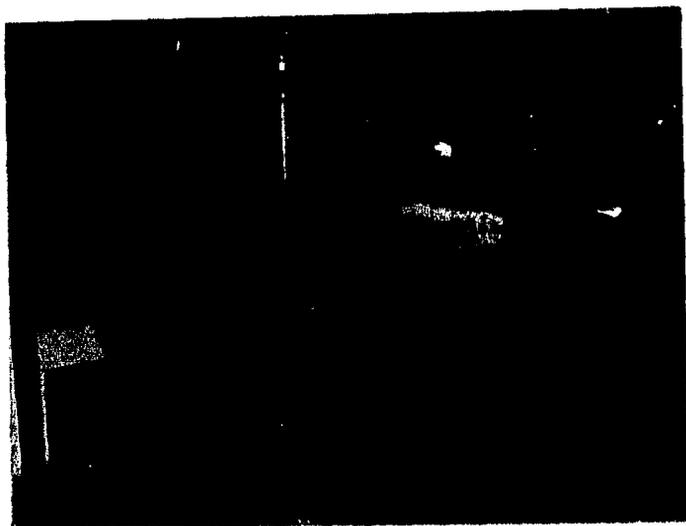


FIG. 11. REACTION OF W. S. ...

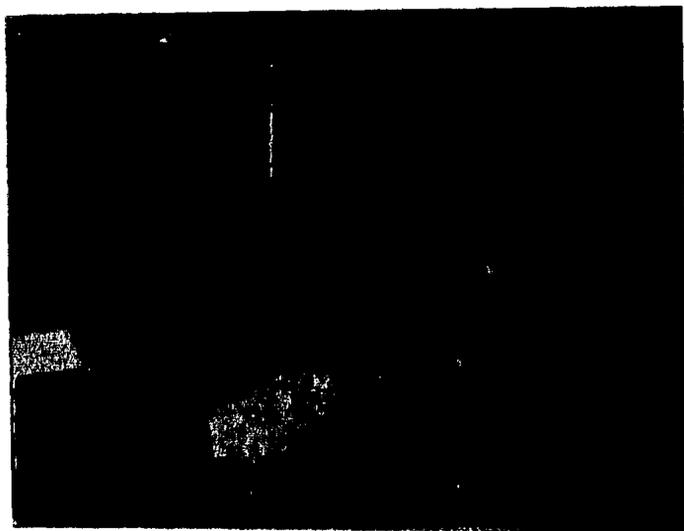


FIG. 12. REACTION OF W. S. ...

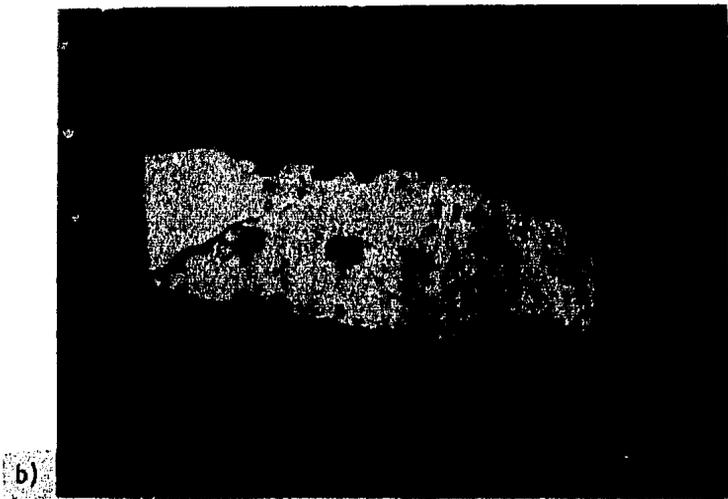


Fig. 13. a) Instrumentación para el ensayo de adherencia b) falla de compresión por cortante en ensayo de adherencia.

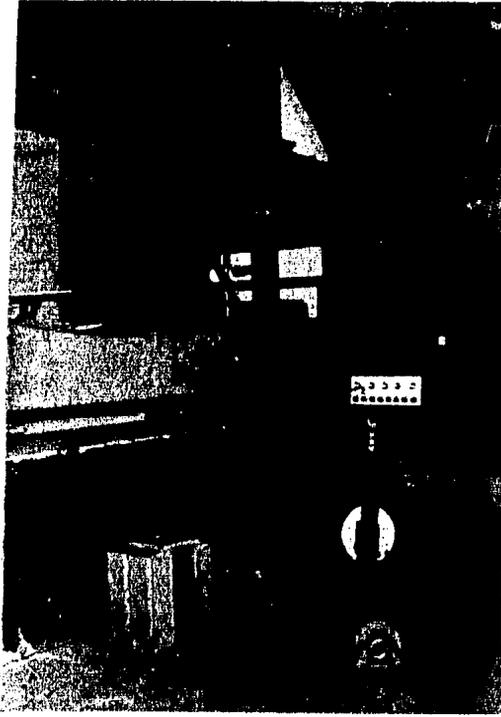


Fig. 14 Ensaye de extracción del inserto

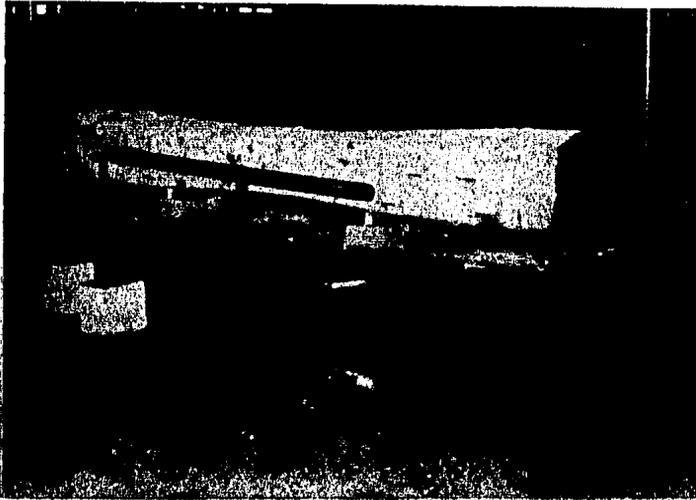


Fig. 15 Ensaye de torsión del inserto

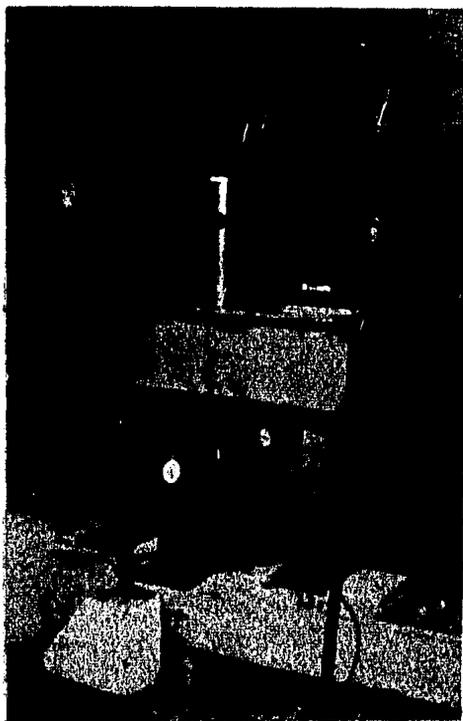


Fig. 16 Disposición general para el ensayo de levantamiento de la fijación



Fig. 17 Fractura del durmiente debido al ensayo de levantamiento de la fijación.

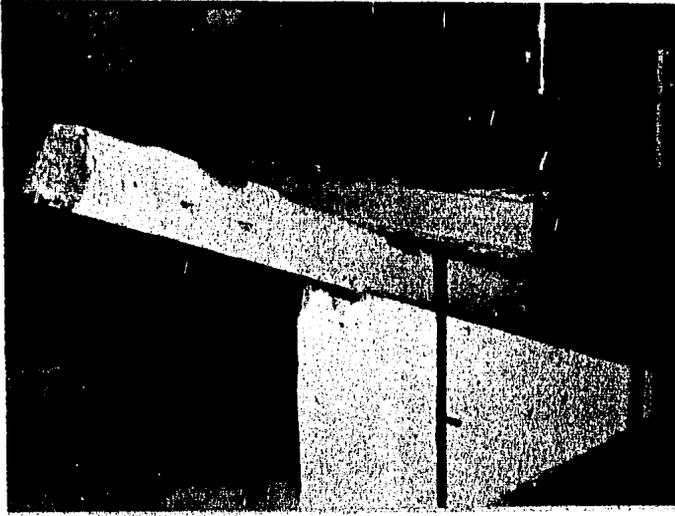


Fig. 18 Disposición general del ensayo de carga repetida en la fijación



Fig. 19 Detalle del sistema para aplicar carga repetida en la fijación



Fig. 20 Ruptura de una grapa en ensaye de carga repetida.

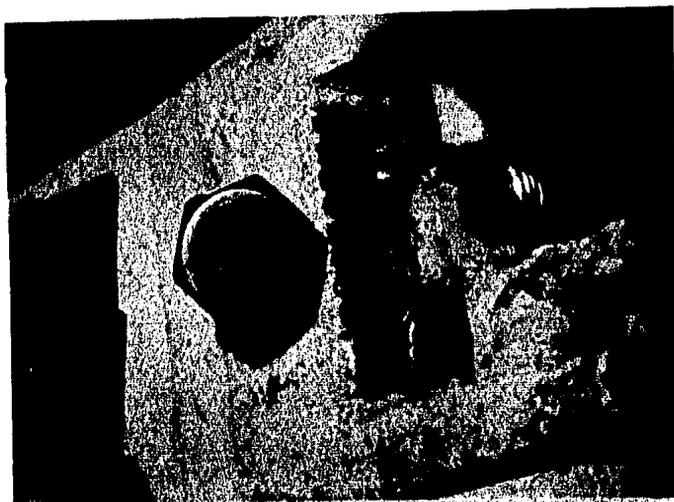
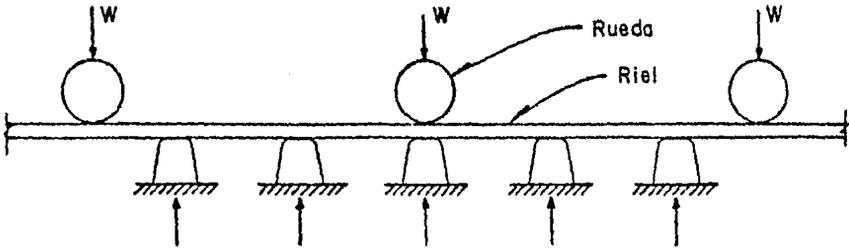
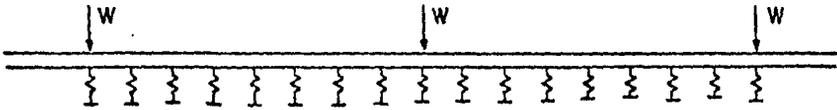


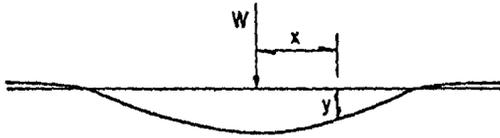
Fig. 21 Ruptura del perno tirafondo en ensaye de carga repetida.



a) Distribución de cargas de ruedas



b) Modelo de viga sobre cimentación elástica



c) Deformada de la viga sobre cimentación elástica, bajo una carga concentrada

Fig 22 Distribución de cargas de rueda entre los durmientes

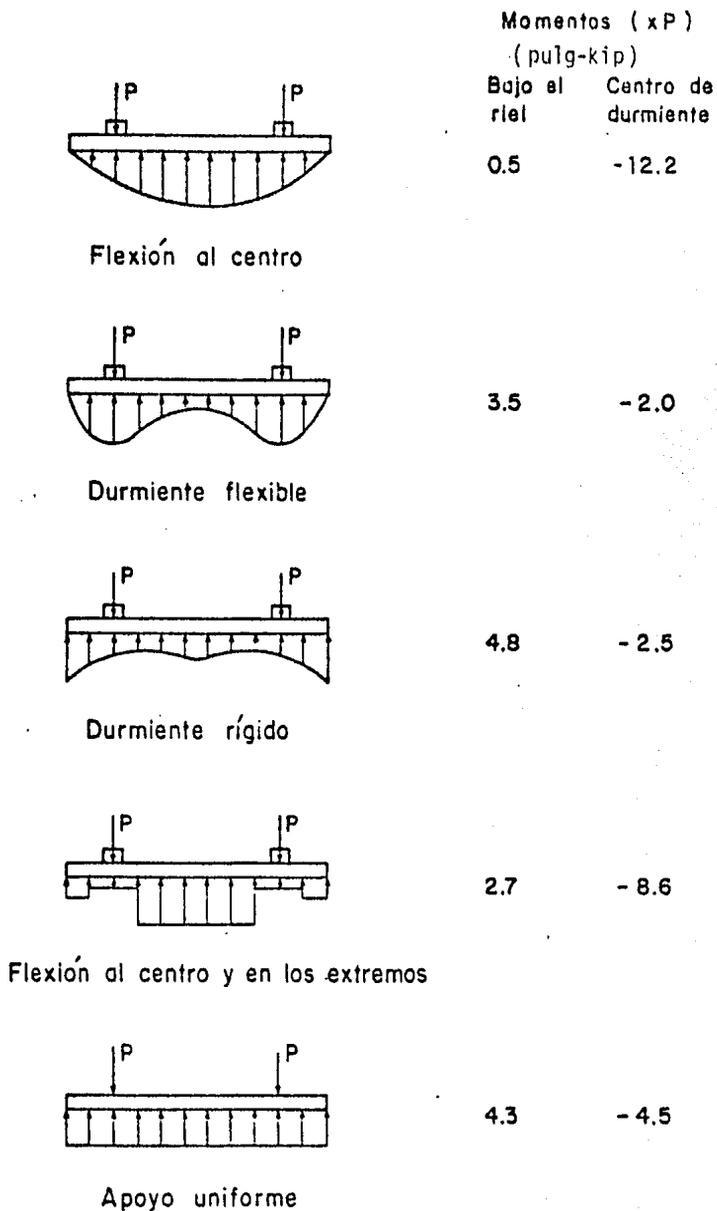


Fig 23 Distributions de presiones de balasto utilizadas en el diseño de durmientes

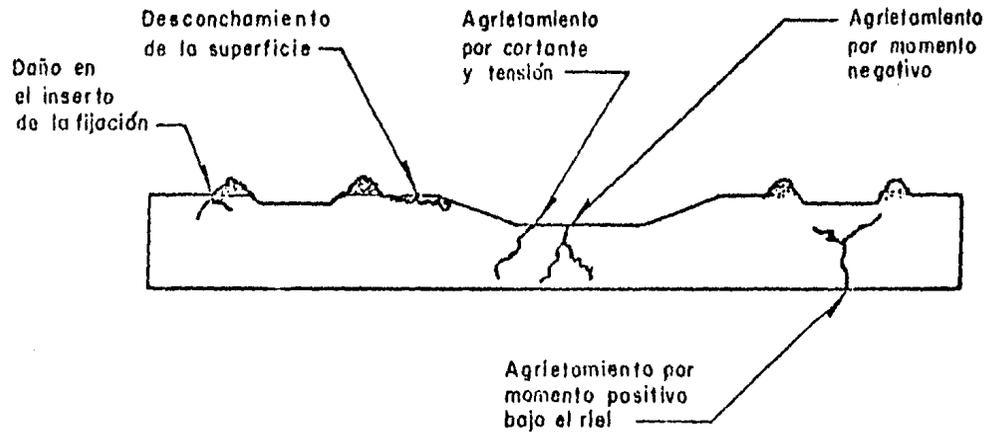


Fig 24 Agrietamientos observados en durmientes

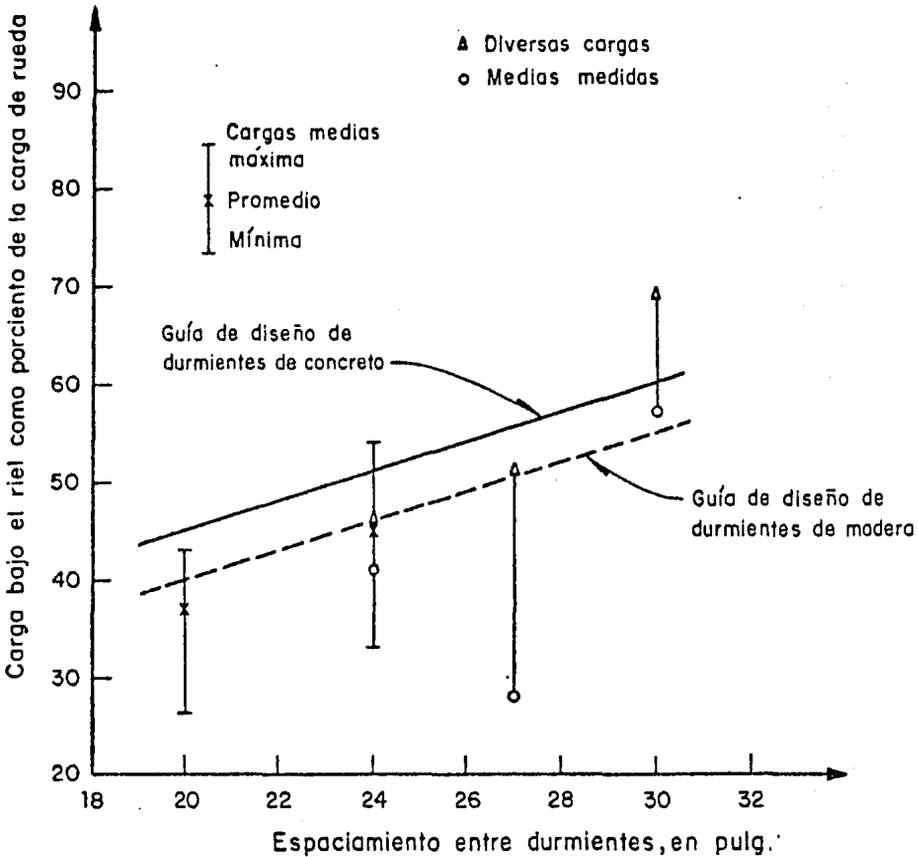


Fig 25 Efecto del espaciamiento de los durmientes en las cargas medias en el asiento del riel para locomotoras ( de la ref. 2 )

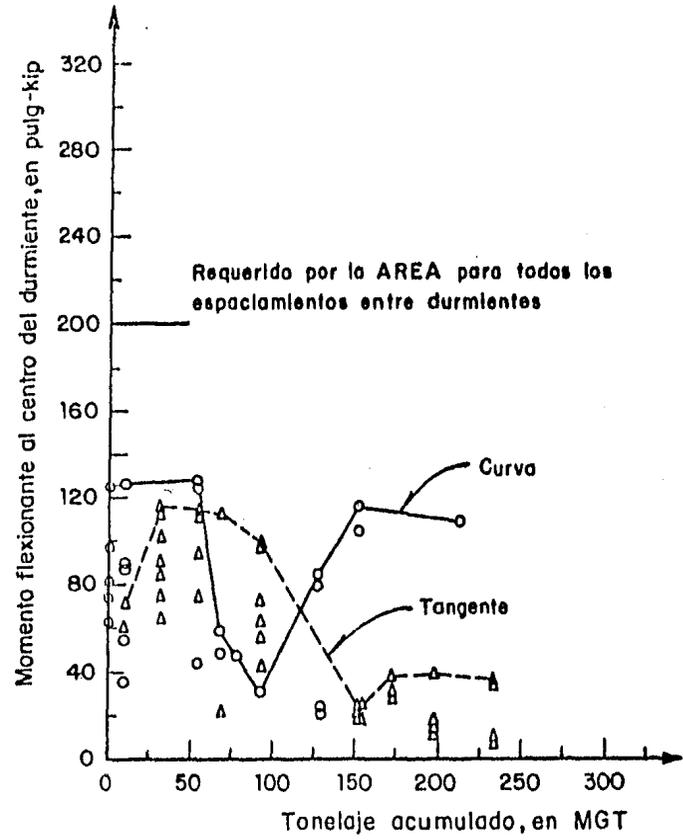
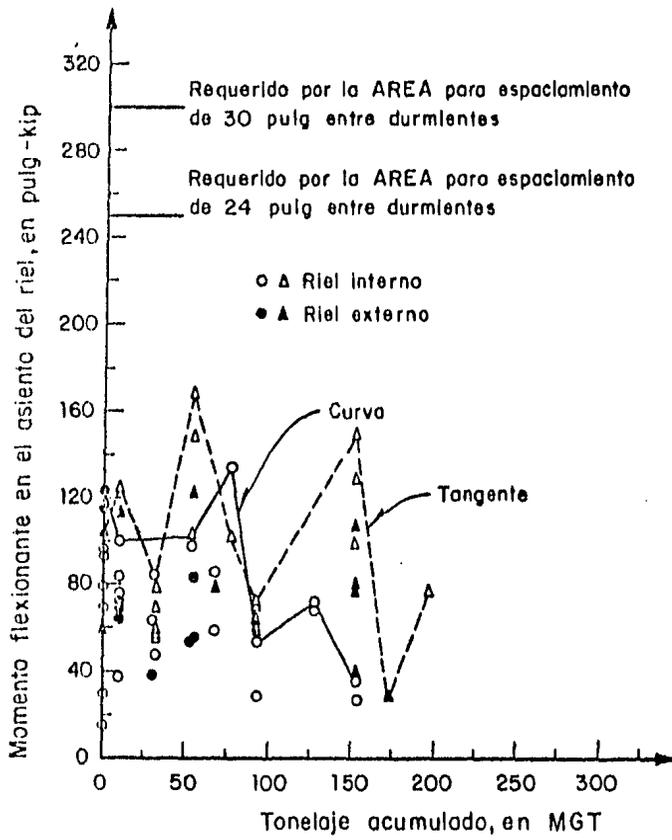


Fig 26 Curva momento flexionante -tonelaje acumulado, valores máximos de una pasada individual del tren

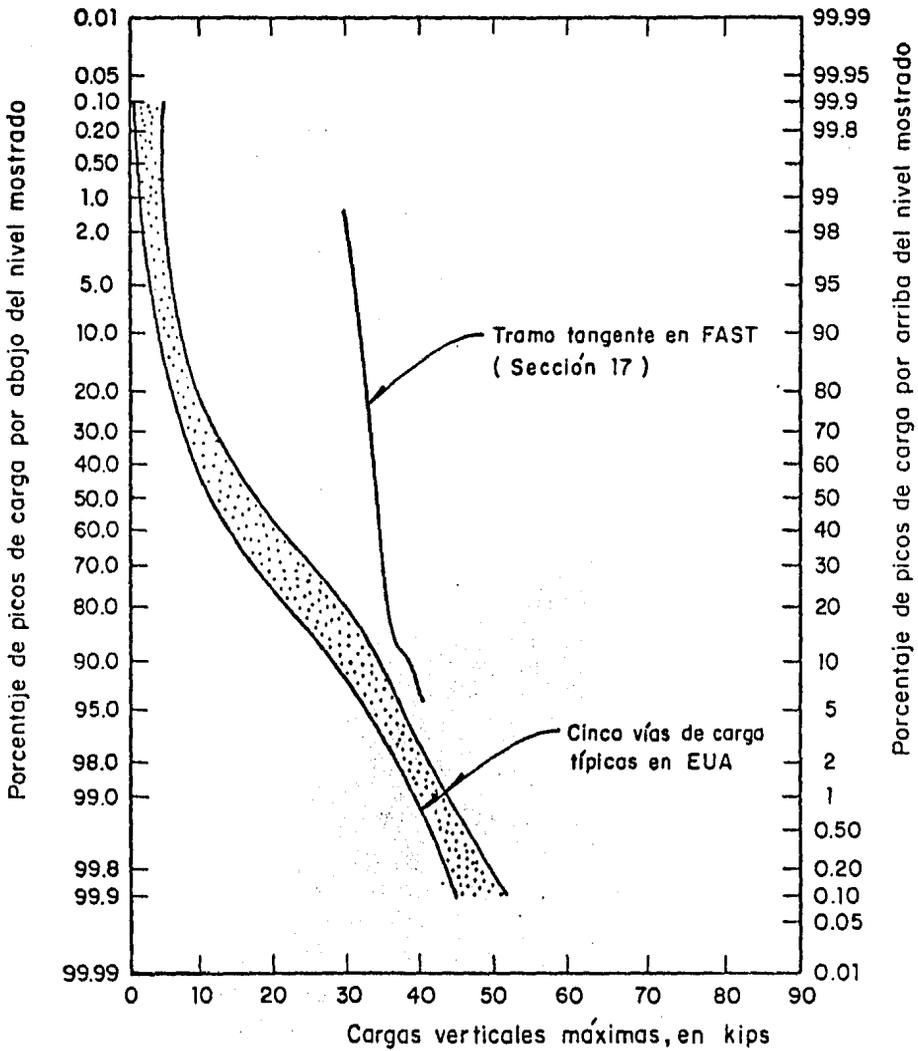
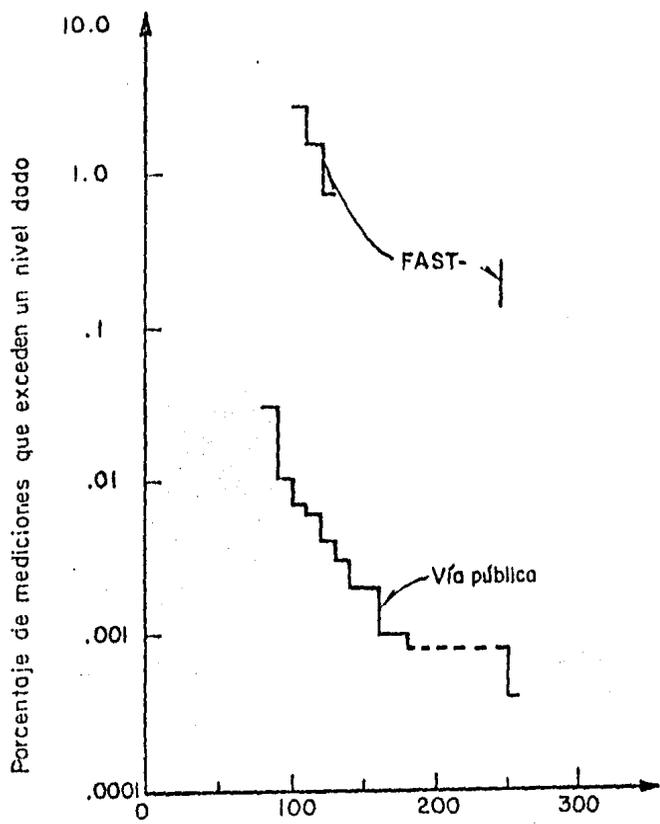
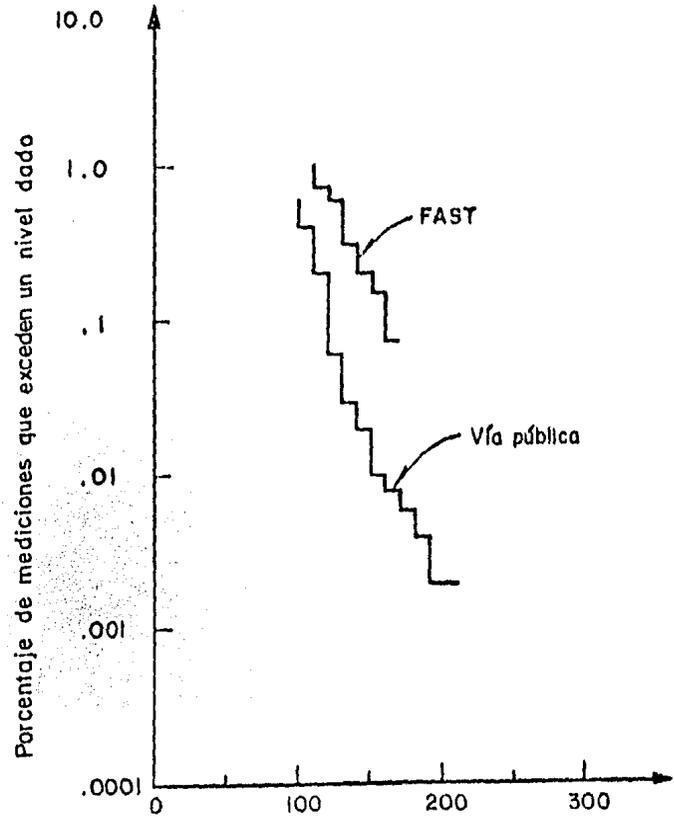


Fig 27 Comparación entre la distribución de carga vertical obtenida en FAST y las de cinco vías típicas en EUA



Momento flexionante al centro del durmiente, en pulg-kip



Momento flexionante bajo el riel, en pulg-kip

Fig 28 Valores extremos de momentos flexionantes en FAST y en vías públicas

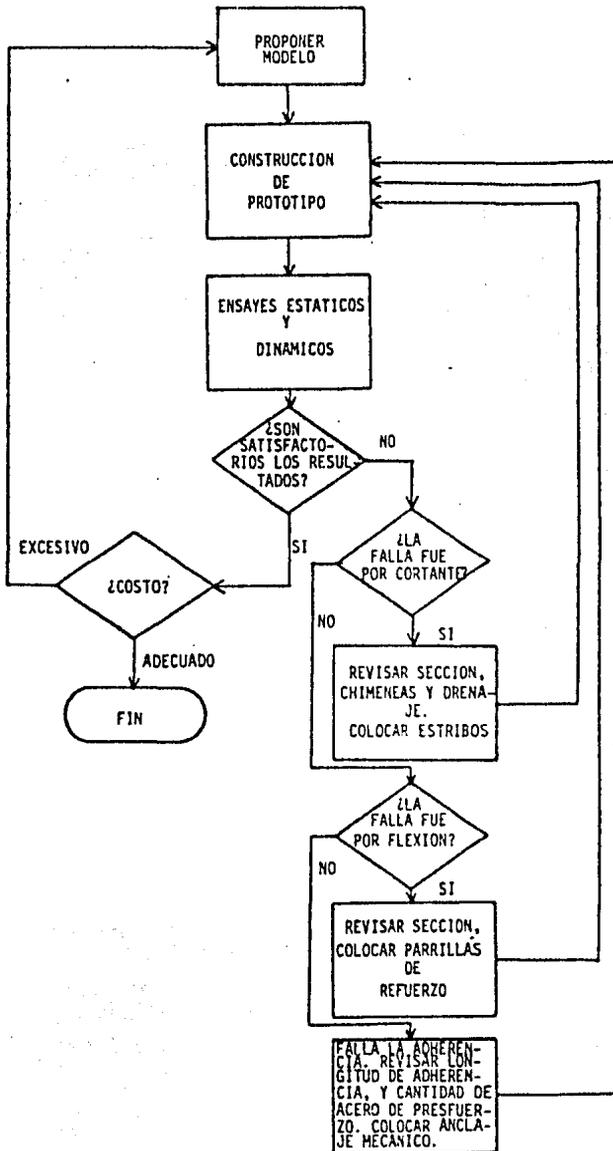
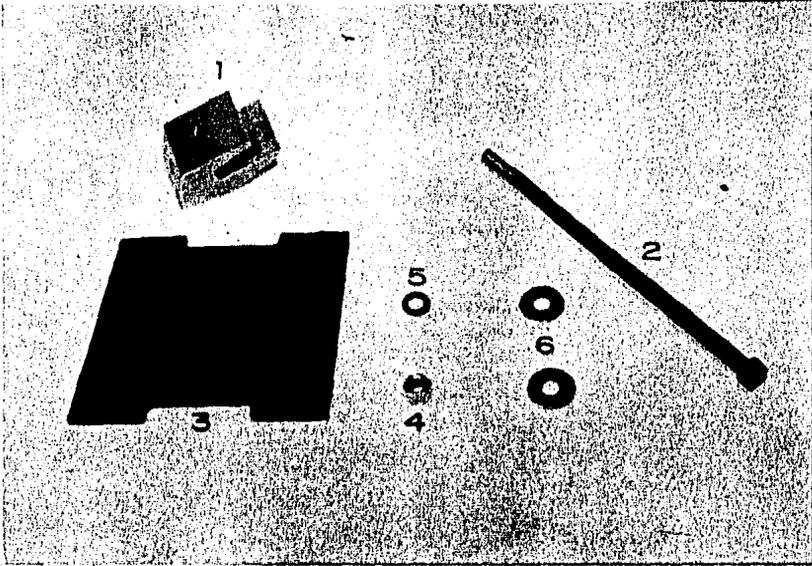


FIG. 29 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GENERAR EL PROTOTIPO DE UN DURMIENTE DE CONCRETO REFORZADO.



- 1. Support
- 2. Pin
- 3. Plate
- 4. Washer
- 5. Washer
- 6. Washer

Fig. 20. Elements of a simple machine.

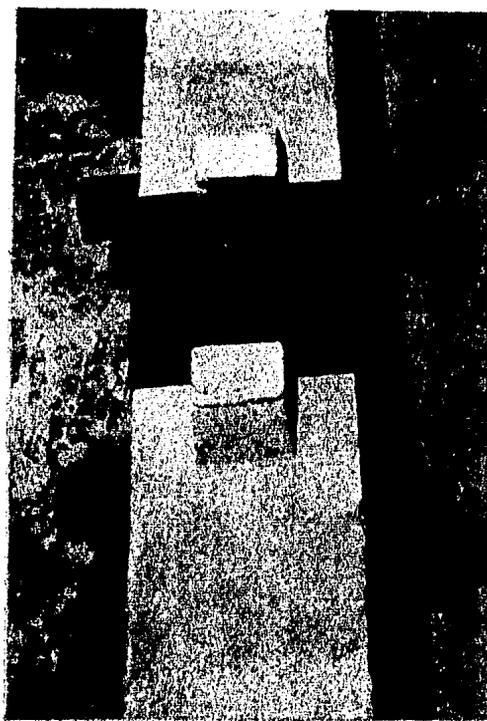
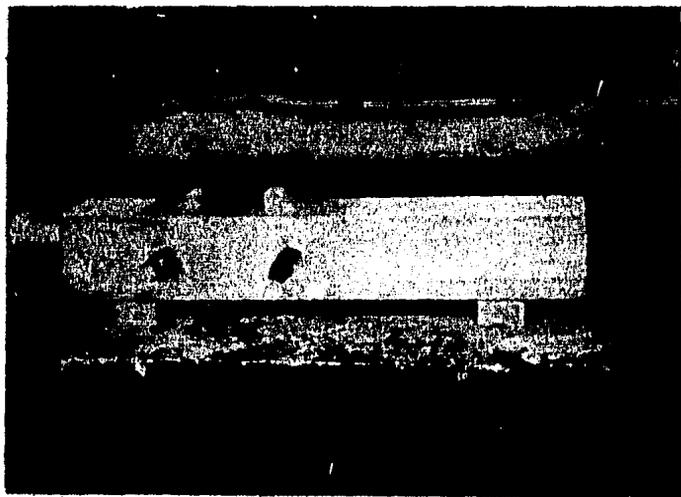


Fig 31 Insertos ahogados en concreto y dos salientes en el  
durmiente que impiden el movimiento de la placa de  
neopreno

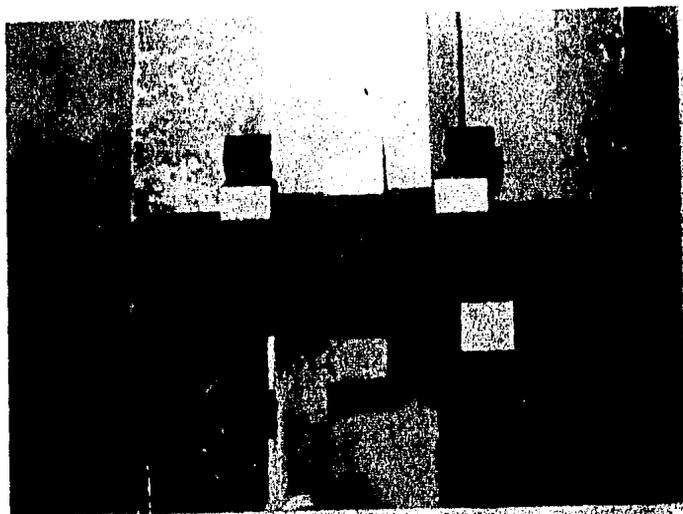
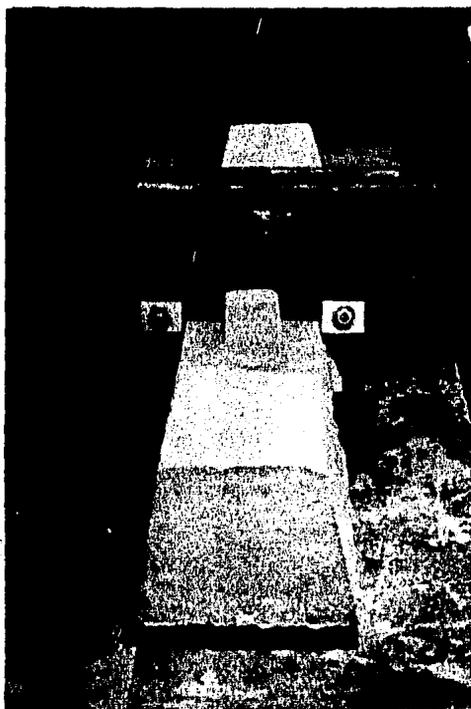


Fig. 32 Dos vistas de la fijación RE X instalada en un durmiente.

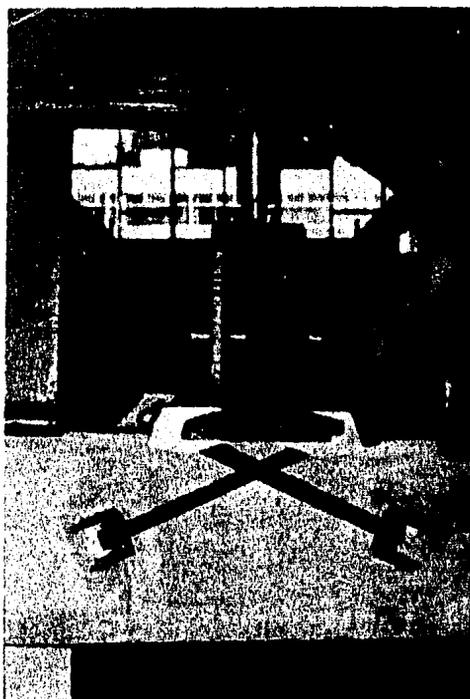


Fig. 33 Vista general de la fijación instalada en un durmiente

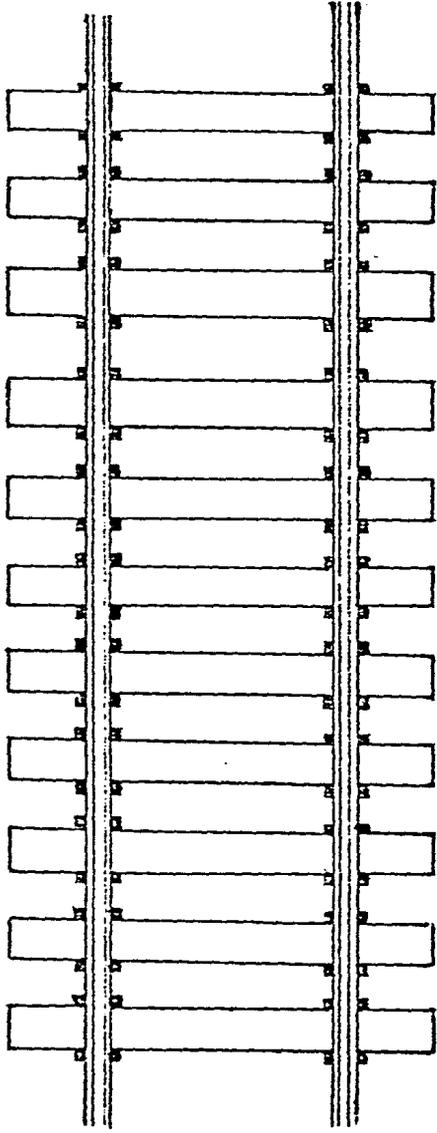


Fig 34 Fijación RE X instalada de una manera continua en una vfa en servicio

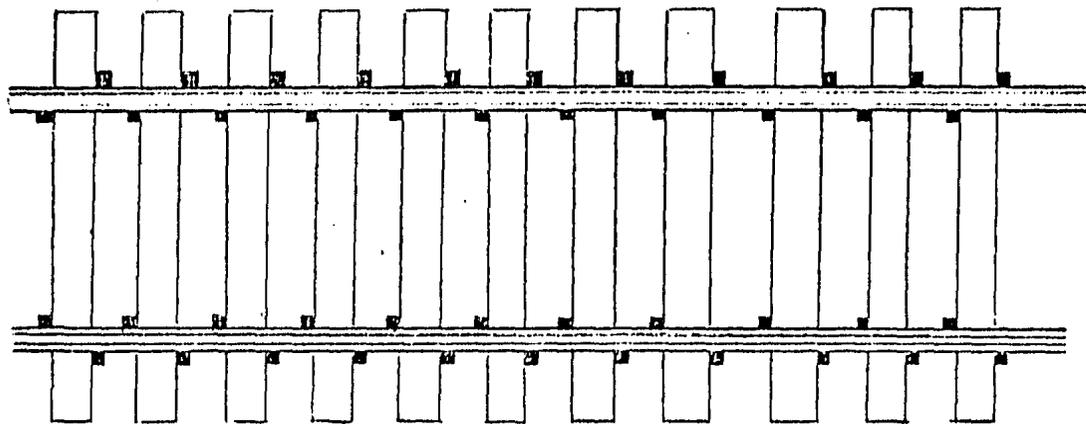


Fig 35 Fijación KE X instalada alternadamente en una vía en servicio

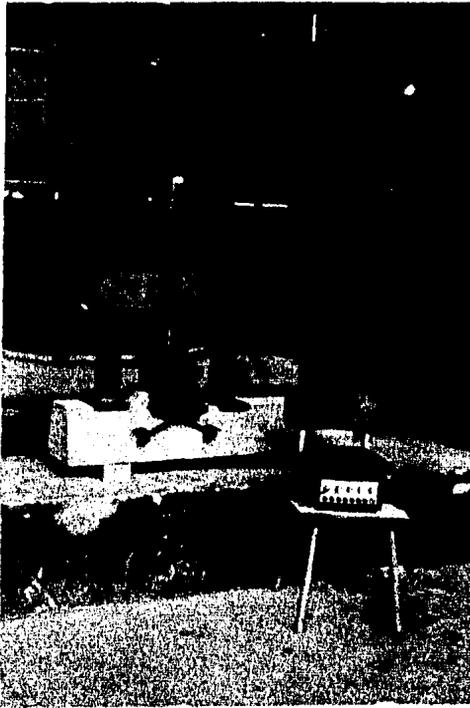


Fig 36 Disposición del ensayo de levantamiento  
de la fijación (Fijación RE X)

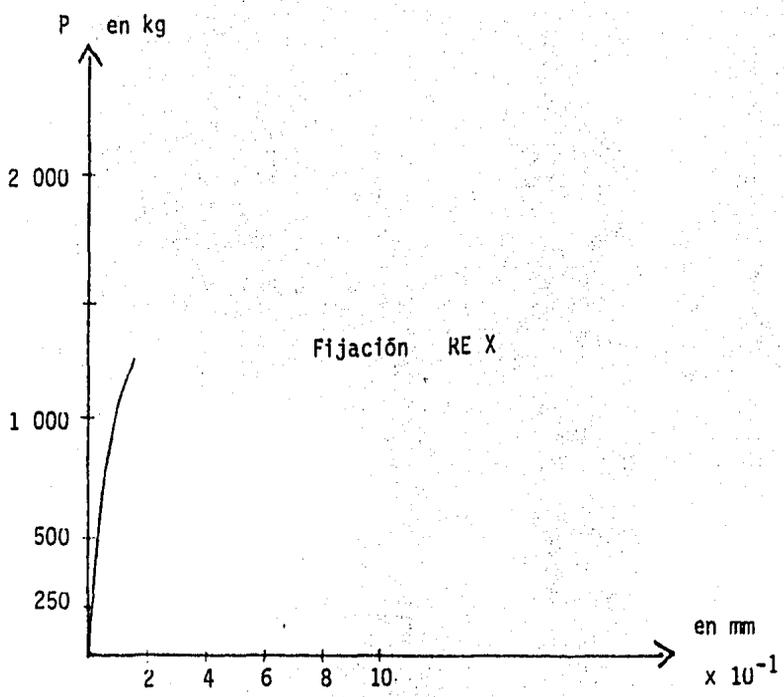


Fig. 37 Gráfica carga-desplazamiento en el ensaye de levantamiento de la fijación

## APENDICES

## A P E N D I C E A

### DESCRIPCION Y ALCANCES DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA

#### PARA ANALIZAR DURMIENTES DE CONCRETO PRESFORZADO

La secuencia lógica para diseñar durmientes monolíticos de concreto presforzado, mediante computadora, se agrupó en un programa principal y tres subprogramas.

Estos subprogramas son de tipo conversacional para que el usuario tenga una participación directa en la toma de decisiones durante la ejecución de las instrucciones. La estructuración de los subprogramas efectúa lo siguiente:

- El subprograma 1 genera la geometría del durmiente y es posible incluir, o no, agujeros en estas piezas para el inserto de la fijación
- El subprograma 2 obtiene secciones transversales a lo largo del durmiente
- El subprograma 3 calcula las propiedades geométricas de una sección transversal tales como área, momento de inercia y coordenadas centroidales (ref 6). Además en cualquier sección transversal del durmiente sujeto a flexión uniaxial este subprograma determina los momentos flexionantes que producen distintos niveles de esfuerzos de tensión en el concreto y calcu-

la el momento resistente de esa misma sección (refs 7 y 8)

En las figs A.1, A2 y A.3 aparecen los diagramas de bloques correspondientes a estos subprogramas, en ellos se muestra que los resultados aparecen en la pantalla de monitor y que existe la opción de imprimirlos o almacenarlos en disco flexible.

La codificación de las instrucciones se realizó en lenguaje BASIC para una microcomputadora marca FRANKLIN ACE 1200 con dos unidades de disco. Un ejemplo numérico y el listado del programa aparecen al final de este Apéndice.

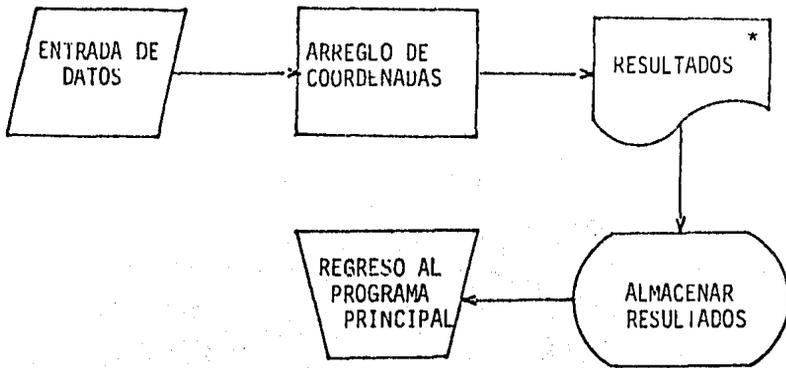


Fig. A.1 Diagrama de bloques para generar la geometría de durmientes de concreto

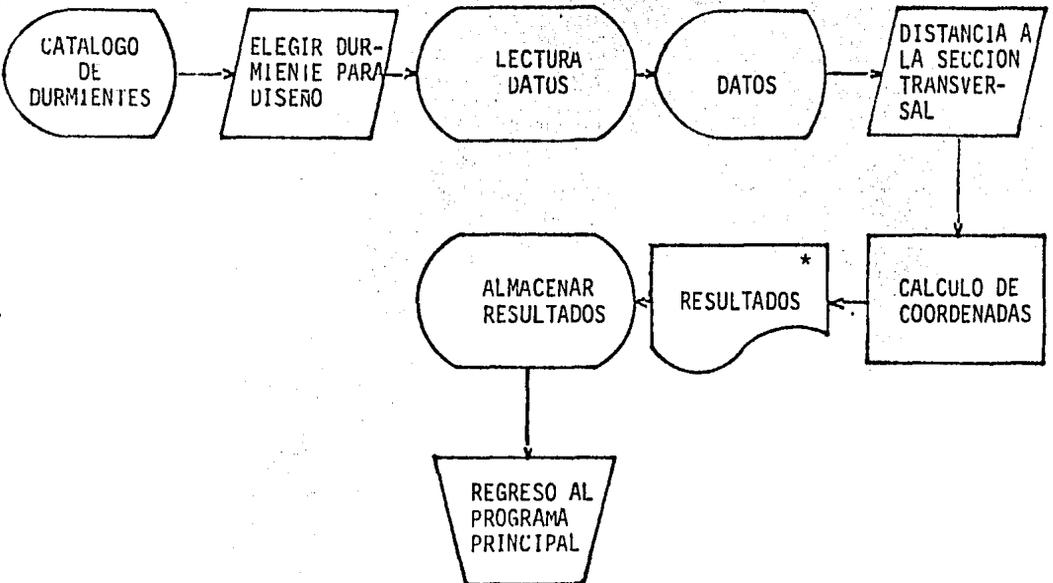


Fig. A.2 Diagrama de bloques para obtener secciones transversales a lo largo del durmiente

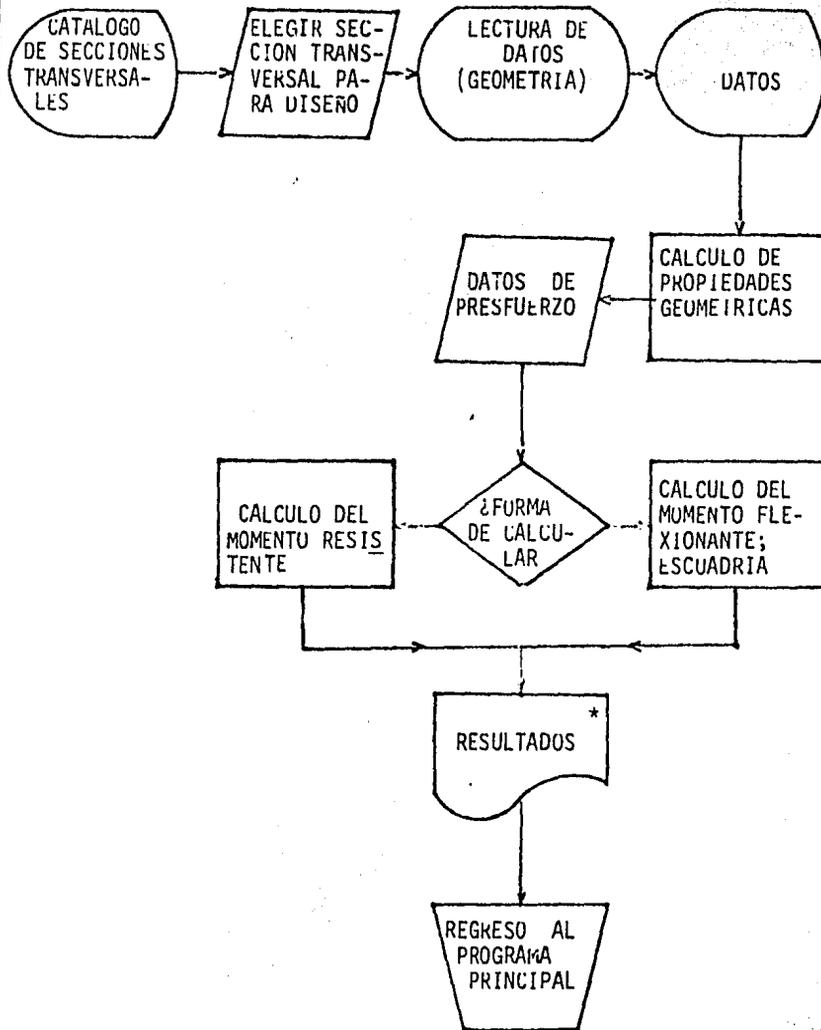
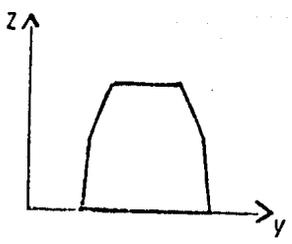


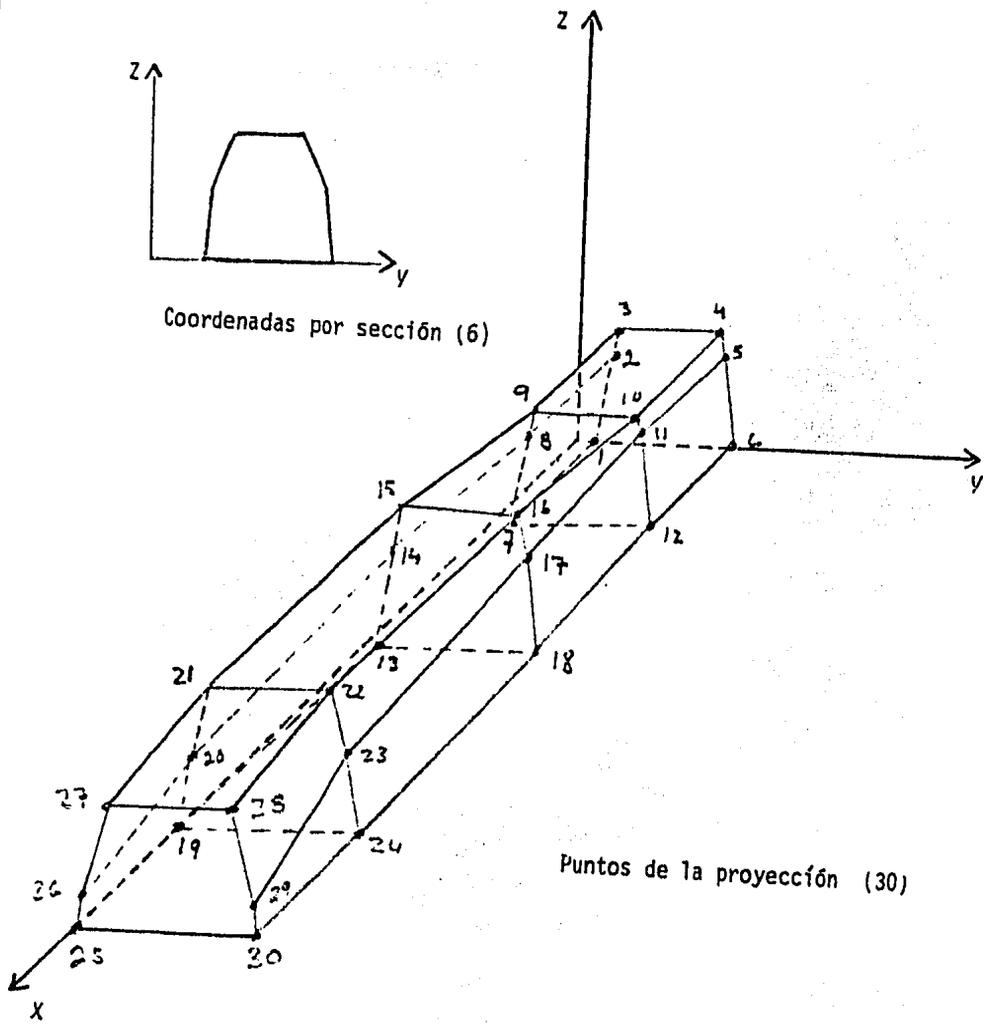
Fig A.3 Diagrama de bloques para diseñar y revisar secciones transversales

\* En todos los casos, existe la opción de obtener los resultados en pantalla, o bien, en pantalla y en papel

EJEMPLO



Coordenadas por sección (6)



Puntos de la proyección (30)

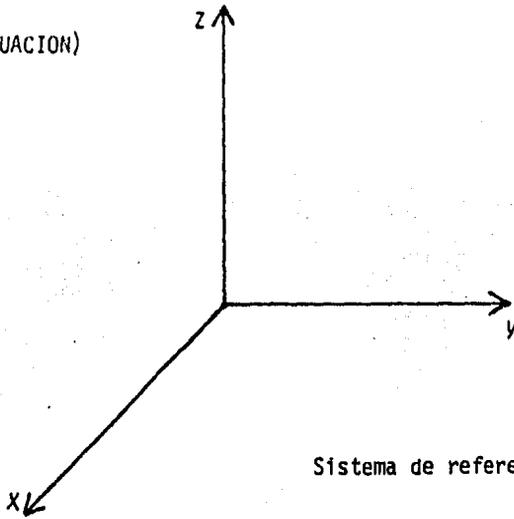
Características geométricas del durmiente:

## EJEMPLO (CONTINUACION)

COORDENADAS		
X	Y	Z
0.000	4.000	0.000
0.000	6.515	15.000
0.000	7.100	18.500
0.000	24.900	18.500
0.000	25.485	15.000
0.000	28.000	0.000
20.000	4.000	0.000
20.000	6.515	15.000
20.000	7.100	18.500
20.000	24.900	18.500
20.000	25.485	15.000
20.000	28.000	0.000
50.000	2.000	0.000
50.000	4.000	15.700
50.000	5.500	22.850
50.000	26.500	22.85
50.000	28.000	15.700
50.000	30.000	0.000
95.000	0.000	0.000
95.000	2.667	12.240
95.000	5.500	24.150
95.000	26.500	24.150
95.000	29.333	12.240
95.000	32.000	0.000
120.000	0.000	0.000
120.000	1.000	5.000
120.000	5.500	20.000
120.000	26.500	20.000
120.000	31.000	5.000
120.000	32.000	5.000

Las coordenadas se dan en cm

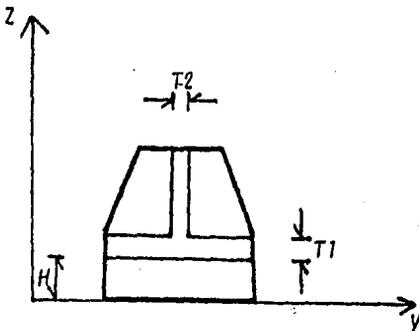
EJEMPLU (CONTINUACION)



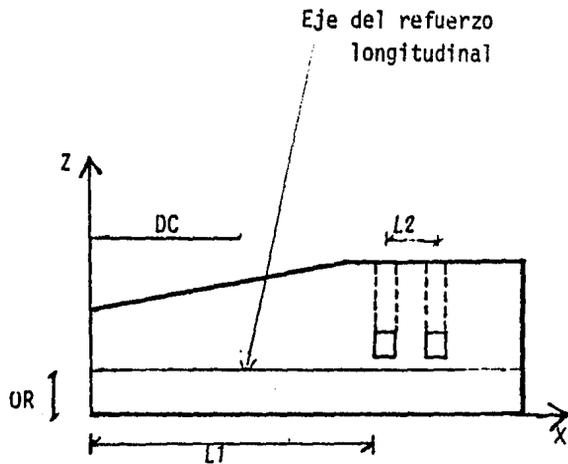
Sistema de referencia

OR Ordenada del acero de refuerzo longitudinal

DC Distancia a la que se quiere cortar el durmiente para obtener una sección transversal



Agujero tipo



Caracterfsticas geométricas del durmiente (Continuación)

\*\*\* COORDENADAS \*\*\*

EJEMPLO TESIS GEOM

0	4	0
0	6.515	15
0	7.1	18.5
0	24.9	18.5
0	25.485	15
0	28	0
20	4	0
20	6.515	15
20	7.1	18.5
20	24.9	18.5
20	25.485	15
20	28	0
50	2	0
50	4	15.7
50	5.5	22.85
50	26.5	22.85
50	28	15.7
50	30	0
95	0	0
95	2.667	12.24
95	5.5	24.15
95	26.5	24.15
95	29.333	12.24
95	32	0
120	0	0
120	1	5
120	5.5	20
120	26.5	20
120	31	5
120	32	0

```
*****
** COORDENADAS QUE DEFINEN GEOMETRIA **
** DE LA SECCION TRANSVERSAL **
*****
```

DISTANCIA A LA QUE  
SE EFECTUO EL CORTE ... 0

4	0
6.515	15
7.1	18.5
24.9	18.5
25.485	15
28	0
4	0

```
*****
** COORDENADAS QUE DEFINEN GEOMETRIA **
** DE LA SECCION TRANSVERSAL **
*****
```

DISTANCIA A LA QUE  
SE EFECTUO EL CORTE ... 76

.84444444	0
3.22982225	13.700889
5.5	23.601111
26.5	23.601111
28.7701778	13.700889
31.1555556	0
.84444444	0

\*\*\*\* ASIENTO RIEL \*\*\*\*  
COORDENADAS

(X , Y)

C(1): ( .844 , 0 )  
C(2): ( 9.23 , 19.701 )  
C(3): ( 5.5 , 23.601 )  
C(4): ( 26.5 , 23.601 )  
C(5): ( 28.77 , 19.701 )  
C(6): ( 31.156 , 0 )

AREA

AREA =612.987301 cm2

COORDENADAS CENTROIDALES

X= 16 cm

Y= 11.1032208 cm

MOM DE INERCIA CENTROIDALES

IX =27986.1082cm4

IY= 35540.8676cm4

\*\*\*\*\*

\*\*\* MOMENTO FLEXIONANTE \*\*\*

\*\*\* PARA DISTINTOS ESFUERZOS \*\*\*

\*\*\* DE TENSION EN EL \*\*\*

\*\*\* CONCRETO \*\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*\* RESULTADOS \*\*\*

FUERZA DE PRESFUERZO 29993

POR CIENTO PERDIDAS 11

ORDENADA DEL ACERO 9.5

FIBRA	ESFUERZO TENSION kg/cm2	MOMENTO FLEXIONANTE kg-m
SUPERIOR	0	61480.2016
INFERIOR	0	171413.479
SUPERIOR	10	83872.8675
INFERIOR	10	196618.875
SUPERIOR	20	106265.533
INFERIOR	20	221824.272
SUPERIOR	30	128659.199
INFERIOR	30	247029.668
SUPERIOR	40	151050.865
INFERIOR	40	272235.065
SUPERIOR	50	173443.531
INFERIOR	50	297440.461
SUPERIOR	60	195836.197
INFERIOR	60	322645.858
SUPERIOR	70	218228.863
INFERIOR	70	347851.254
SUPERIOR	80	240621.528
INFERIOR	80	373056.651

## RESULTADOS

### 1. ACERO DE REFUERZO

AREA DE ACERO	2.85
PRESF. INICIAL	11824.5614
PRESF. EFECTIVO	10523.8596
POR CIENTO PERD.	11
ORDENADA ACERO	9.5
DEF. A LA RUP.	.035
ESF. A LA RUP.	17500

### 2. CONCRETO

RESISTENCIA ESP 600  
FALLA SOBRESFORZADA  
ESFUERZO EN EL ACERO;  $f_s = 15590.7717 \text{ kg/cm}^2$   
MOMENTO RESISTENTE;  $M_R = 437502.866 \text{ kg-cm}$



```

1170 PRINT : PRINT "COORD. NO. "A1": "
1175 INPUT A1:PRINT A1
1180 PRINT : PRINT "QUIERE CORREGIR OTRA COORDENADA?"
1185 INPUT "C/S/N":A2
1190 IF A2 = "C" THEN 1185
1195 IF A2 = "N" THEN 1195
1200 GOSUB 1220
1205 GOTO 1125
1210 PRINT : PRINT "OPRINA "A1: INVERSE : PRINT "RETURN": NORMAL : PRINT "PARA CONTINUAR"
1215 RETURN
1220 HOME : VTAB 10:
1225 PRINT "LAS COORDENADAS QUE INTRODUCO SON: "
1230 PRINT : PRINT
1235 FOR I = 1 TO N
1240 PRINT "COORD. NO. "I": ("X1(I)":"Y1(I)":"Z1(I)":"
1245 TE = I / 10:TE = INT (TE)
1250 IF TE = 0 THEN 1265
1255 GET A3
1260 HOME : VTAB (10): HTAB (10): INVERSE : PRINT "CONTINUACION": NORMAL : PRINT : PRINT
1265 NEXT
1270 RETURN
1275 HOME : VTAB 15:
1280 PRINT "/////////////////////////////////////"
1285 PRINT "
1290 PRINT "          IMPORTANTE          "
1295 PRINT "
1300 PRINT "/////////////////////////////////////"
1305 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
1310 HTAB (10): PRINT "QUIERE GUARDAR LOS " : PRINT
1315 HTAB (10): PRINT "DATOS DE INTRODUCION" : PRINT
1320 HTAB (10): PRINT "EN UN ARCHIVO (....) " : PRINT
1325 VTAB 123)
1330 HTAB (10): PRINT "S/N / N... " : PRINT
1335 IF A3 = "S" THEN 1345
1340 IF A3 = "N" THEN 1325
1345 GOTO 1425
1350 HOME : VTAB (10): GOSUB 1340: GOSUB 1350:Z8
1355 Z8 = CHR$(4)
1360 PRINT Z8:"NUNCA"
1365 PRINT Z8:"OPEN"
1370 PRINT Z8:"DELETE"
1375 PRINT Z8:"OPEN"
1380 PRINT Z8:"DELETE"
1385 PRINT Z8:"DELETE"
1390 PRINT Z8:"DELETE"
1395 PRINT Z8:"DELETE"
1400 PRINT Z8:"DELETE"
1405 PRINT Z8:"DELETE"
1410 PRINT Z8:"DELETE"
1415 PRINT Z8:"DELETE"
1420 NEXT
1425 PRINT Z8:"CLOSE"
1430 PRINT Z8:"NUNCA"
1435 GOSUB 1340: GOSUB 1350: GET A3
1440 VTAB 12: HTAB 10: PRINT A3
1445 HOME : VTAB 12:
1450 HTAB 7: PRINT "QUIERE GENERAR LA GEOMETRIA"
1455 PRINT : HTAB 7: PRINT "DE OTRO DURMIENTE"
1460 PRINT : FLASH : INVERSE : HTAB 7:
1465 INPUT "C/S/N" : A3
1470 NORMAL
1475 IF A3 = "S" THEN 1485
1480 IF A3 = "N" THEN 1435
1485 Z8 = CHR$(4)
1490 PRINT Z8:"FIN CURV. PROG. PRINCIPAL"
1495 HOME : VTAB 10: HTAB 15:
1500 INVERSE : PRINT "ALTERNATIVAS": NORMAL
1505 VTAB 15: HTAB
1510 PRINT "1. CON AGUJERO PARA FIJACION"
1515 PRINT : HTAB 7:
1520 PRINT "2. SIN AGUJERO PARA FIJACION"
1525 HTAB 12: HTAB 7:
1530 PRINT "ELIGA UNA OPCION (1 / 2)...":
1535 INPUT Z8
1540 INPUT L1
1545 HOME
1550 INVERSE : VTAB (1): HTAB 7:
1555 PRINT " CARACTERISTICAS GEOMETRICAS"
1560 VTAB (3): HTAB (3)
1565 PRINT " DEL AGUJERO EN EL DURMIENTE"
1570 NORMAL
1575 VTAB 7:
1580 PRINT : PRINT " L1= " : INPUT L1
1585 PRINT : PRINT " L2= " : INPUT A
1590 PRINT : PRINT " T1= " : INPUT T1

```







```

2850 PRINT " NOMBRE DEL DORMIENTE"; PRINT : PRINT "SELECCIONADO .. " ; N$
2851 PRINT : PRINT " IMPRIMO LOS RESULTADOS (S / N) " ;
2855 INPUT N$; IF N$ = "S" THEN IO = 1
2870 RETURN
2875 REM == SECTORA DE N$ ==
2881 OS = 049 : 14
2885 PRINT OS; "OPEN SEC-DW-26" ; " 88.VI.02"
2891 PRINT OS; "READ SEC-DW-26"
2895 INPUT N$
2901 PRINT OS; "CLOSE"
2905 RETURN
2910 REM
2915 OS = 062 : 14
2921 "NAME 2875"
2925 PRINT OS; "OPEN SECCIONES"
2931 PRINT OS; "READ SECCIONES"
2935 FOR I = 1 TO N$
2941 INPUT A$ ;
2945 PRINT A$ ; I ;
2950 NEXT I
2955 PRINT OS; "CLOSE"
2961 RETURN
2965 REM
2971 REM
2975 REM
2981 REM == 0000 2500
2985 I = 15
2991 PRINT OS; "OPEN SEC-DW-26"
2995 PRINT OS; "DELETE SEC-DW-26"
3001 PRINT OS; "OPEN SEC-DW-26"
3005 PRINT OS; "WRITE SEC-DW-26"
3011 PRINT N$
3015 PRINT OS; "CLOSE"
3021 PRINT OS; "OPEN SECCIONES"
3025 PRINT OS; "DELETE SECCIONES"
3031 PRINT OS; "CLOSE"
3035 PRINT OS; "CLOSE"
3041 RETURN

```



```

3365 IF = IP + IT
3370 NEXT M
3375 A = A / 2
3380 XT = -YT / A / B
3385 YT = YT / A / B
3390 IX = IX / 24
3395 IY = IY / 24
3400 CX = IX - A * YT * YT
3405 CY = IY - A * XT * XT
3410 PM = IP - A * XT * YT
3415 HOME
3420 P# 30
3425 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "      **** ;N0; ****"
3430 HTAB (7): HTAB (11)
3435 PRINT " COORDENADAS": PRINT : HTAB (15): PRINT "(X , Y)": PRINT
3440 FOR M = 0 TO N - 1: TM = P(M,1): TN = P(M,2): GOSUB 3275
3445 HTAB (6): PRINT "(C(I+1 + M))": (":
3450 HTAB (14): PRINT TM: HTAB (21): PRINT ",": TN: )": NEXT
3455 GET A$: HOME : PRINT : INVERSE : P# 50: PRINT "AREA"
3460 NORMAL : PRINT : PRINT "AREA =": A: " cm2"
3465 PRINT : PRINT : INVERSE : PRINT "COORDENADAS CENTROIDALES"
3470 NORMAL : PRINT : PRINT "X =": XT: " cm": PRINT
3475 PRINT "Y =": YT: " cm"
3480 PRINT : PRINT : INVERSE : PRINT "MOM DE INERCIA CENTROIDALES"
3485 NORMAL : PRINT : PRINT "IX =": CX: "cm4": PRINT
3490 PRINT "IY =": CY: "cm4": PRINT
3495 P# 5
3500 PRINT : PRINT : INVERSE
3505 PRINT " OFRIMA UNA TECLA PARA CONTINUAR ": GET A$
3510 NORMAL
3515 GOSUB 4940
3520 D$ = CHR$(4)
3525 PRINT D$:RMI DIRM, PPOG, PRINCIPAL, 01"
3530 REM ==PUNTA AREA BLOQUE DE CONCRETO==
3535 REM == *****
3540 REM INICIO DEL PROGRAMA
3545 J = 0: REM PERIMETRO LLENO SOBRE Y
3550 FOR I = 0 TO M - 1
3555 IF P(I,2) < Y AND P(I + 1,2) = < Y THEN 3635
3560 IF P(I,2) = Y AND P(I + 1,2) > Y THEN 3610
3565 IF P(I,2) > Y AND P(I + 1,2) < Y THEN 3560
3570 T(J,1) = P(I,1):T(J,2) = P(I,2)
3575 GOTO 3630
3580 T(J,1) = P(I,1):T(J,2) = P(I,2):J = J + 1
3585 DX = P(I + 1,1) - P(I,1)
3590 DY = P(I + 1,2) - P(I,2)
3595 T(J,1) = DX / DY * (Y - P(I,2)) + P(I,1)
3600 T(J,2) = Y
3605 GOTO 3630
3610 DX = P(I + 1,1) - P(I,1)
3615 DY = P(I + 1,2) - P(I,2)
3620 T(J,1) = DX / DY * (Y - P(I,2)) + P(I,1)
3625 T(J,2) = Y
3630 J = J + 1
3635 NEXT
3640 T(J,1) = T(J,1):T(J,2) = T(J,2)
3645 IF J = N THEN 3850
3650 J = J + 1: G = 0
3655 FOR I = M + 1 TO N - 1
3660 IF P(I,2) < G THEN 3670
3665 G = P(I,2)
3670 NEXT
3675 CH = G
3680 FOR I = M + 1 TO N - 1
3685 IF P(I,2) > CH THEN 3695
3690 CH = P(I,2)
3695 NEXT
3700 IF Y > = G THEN 3845
3705 IF Y < = CH THEN 3830
3710 REM CORTE CENTRO DEL ASUJERO
3715 W = J
3720 FOR I = M + 1 TO N - 2
3725 IF P(I,2) < Y AND P(I + 1,2) < Y THEN 3805
3730 IF P(I,2) < Y AND P(I + 1,2) = Y THEN 3760
3735 IF P(I,2) > Y AND P(I + 1,2) < Y THEN 3750
3740 T(J,1) = P(I,1):T(J,2) = P(I,2)
3745 GOTO 3660
3750 T(J,1) = P(I,1):T(J,2) = P(I,2):J = J + 1
3755 DX = P(I + 1,1) - P(I,1)
3760 DY = P(I + 1,2) - P(I,2)
3765 T(J,1) = DX / DY * (Y - P(I,2)) + P(I,1)

```

```

3770 T(1,2) = Y
3775 GOTO 3800
3780 Z = P(1 + 1,1) - F(1,1)
3785 D = P(1 + 1,2) - F(1,2)
3790 T(1,1) = G1 / D1 * (Z - F(1,2)) + F(1,1)
3795 T(1,2) = Y
3800 J = J + 1
3805 NEXT I
3810 T(1,1) = T(1,1); T(1,2) = T(1,2); J = J + 1
3815 T(1,1) = T(1,1); T(1,2) = T(1,2); GOTO 3850
3820 REM ==LATE SUARE EL 200 200==
3825 REM ==DATE ARAJO DEL ABOGADO==
3830 FOR I = M + 1 TO N - 1: T(1,1) = F(1,1); T(1,2) = F(1,2)
3835 I = I + 1; NEXT I: T(1,1) = T(1,1); T(1,2) = T(1,2)
3840 GOTO 3850
3845 J = J + 1
3850 REM FIN DEL PROGRAMA
3855 A1 = 0; A2 = 0; A3 = 0
3860 P = M = 0 TO N - 1
3865 M1 = T(1,1); M2 = T(1,2)
3870 M = T(1,1); M1 = M + 1.2)
3875 M = M + 1.1; M = M + 1.2)
3880 M = M + 1; M1 = M + 1
3885 M = M + 1; M1 = M + 1
3890 M = M + 1; M1 = M + 1
3895 M = M + 1; M1 = M + 1
3900 M = M + 1; M1 = M + 1
3905 M = M + 1; M1 = M + 1
3910 M = M + 1; M1 = M + 1
3915 M = M + 1; M1 = M + 1
3920 M = M + 1; M1 = M + 1
3925 M = M + 1; M1 = M + 1
3930 M = M + 1; M1 = M + 1
3935 M = M + 1; M1 = M + 1
3940 M = M + 1; M1 = M + 1
3945 M = M + 1; M1 = M + 1
3950 M = M + 1; M1 = M + 1
3955 M = M + 1; M1 = M + 1
3960 M = M + 1; M1 = M + 1
3965 M = M + 1; M1 = M + 1
3970 M = M + 1; M1 = M + 1
3975 M = M + 1; M1 = M + 1
3980 M = M + 1; M1 = M + 1
3985 M = M + 1; M1 = M + 1
3990 M = M + 1; M1 = M + 1
3995 M = M + 1; M1 = M + 1
4000 M = M + 1; M1 = M + 1
4005 M = M + 1; M1 = M + 1
4010 M = M + 1; M1 = M + 1
4015 M = M + 1; M1 = M + 1
4020 M = M + 1; M1 = M + 1
4025 M = M + 1; M1 = M + 1
4030 M = M + 1; M1 = M + 1
4035 M = M + 1; M1 = M + 1
4040 M = M + 1; M1 = M + 1
4045 M = M + 1; M1 = M + 1
4050 M = M + 1; M1 = M + 1
4055 M = M + 1; M1 = M + 1
4060 M = M + 1; M1 = M + 1
4065 M = M + 1; M1 = M + 1
4070 M = M + 1; M1 = M + 1
4075 M = M + 1; M1 = M + 1
4080 M = M + 1; M1 = M + 1
4085 M = M + 1; M1 = M + 1
4090 M = M + 1; M1 = M + 1
4095 M = M + 1; M1 = M + 1
4100 M = M + 1; M1 = M + 1
4105 M = M + 1; M1 = M + 1
4110 M = M + 1; M1 = M + 1
4115 M = M + 1; M1 = M + 1
4120 M = M + 1; M1 = M + 1

```

```

4125 PRINT "DESEA REALIZAR OTRO CALCULO?";
4130 INPUT "SI=1, NO=2":M
4135 IF M = "2" THEN GOTO 4140
4140 RETURN
4145 REM *****
4150 HOME
4155 REM ==T-4000 DE SECCIONES DE DURMIENTES==
4160 FA = 0.08 * 14 : GOTO 4245
4165 REM "DESEAN SECCIONES": "02.06.VI"
4170 PRINT OS:"READ SECCIONES"
4175 FOR I = 1 TO NS
4180 INPUT A(I)
4185 PRINT I:"TABLA"
4190 NEXT I
4195 PRINT OS:"CLOSE SECCIONES"
4200 PRINT : INVERSE : PRINT "
4205 NORMAL : PRINT
4210 PRINT "ELIJA UNA SECCION PARA SER ANALIZADA ": PRINT
4215 PRINT ".....": INPUT M
4220 M = VL / 2 OR IL / 2 THEN 4235
4225 M = A(M) : PRINT : PRINT "NUMERO: "M
4230 GOTO 4490
4235 HOME : FOR I = 1 TO NS: PRINT I:"TABLA": NEXT : GOTO 4200
4240 RETURN
4245 REM == CUCANTINA LIMITE ==
4250 REM == LECTURA ==
4255 PRINT OS:"READ SEC-24-26": "02.06.VI"
4260 PRINT OS:"READ SEC-24-26"
4265 INPUT NS
4270 PRINT OS:"CLOSE"
4275 RETURN
4280 REM ==CALCULO DE MOMENTO RESISTENTE==
4285 REM ==UTILIZANDO EL METODO DE RESISTENCIA==
4290 HOME : TAB : TAB = 7
4295 HTAB (0): PRINT "*****"
4300 HTAB (1): PRINT "
4305 HTAB (0): PRINT "    CALCULO DEL MOMENTO "
4310 HTAB (1): PRINT "
4315 HTAB (0): PRINT "    RESISTENTE "
4320 HTAB (1): PRINT "
4325 HTAB (0): PRINT "*****"
4330 PRINT
4340 INVERSE
4345 HTAB (0): PRINT "
4350 PRINT
4355 HTAB (0): PRINT "
4360 NORMAL : FOR I = 1 TO 2000: NEXT
4365 HOME : HTAB (0): HTAB (1)
4370 PRINT "DATOS GENERALES": PRINT : INVERSE
4375 HTAB (0) : PRINT "    NORMAL
4380 PRINT : PRINT : PRINT
4385 PRINT "1. TIPO DE SECCION ": PRINT : PRINT
4390 INPUT "AREA DE AREA " : A(I) : PRINT
4395 INPUT "FUERZA PRESF. " : P(I) : PRINT
4400 FI = PI / NS
4405 INPUT "POR CIENTO SECC. " : PC : PRINT
4410 INPUT "ORDENADA AREA " : Y(I) : PRINT
4415 INPUT "ESP. FUENTE " : E(I) : PRINT
4420 INPUT "REF. A LA RIV " : X(I) : PRINT
4425 INPUT "ESP. A LA RIV " : E(I) : PRINT : PRINT
4430 PRINT "2. COMPLETOS": PRINT : PRINT
4435 INPUT "RESISTENCIA E1 " : R1 : PRINT
4440 R2 = R1
4445 PRINT "DESEA OBTENER DATOS NS YND... ":
4450 GET OS: IF OS = "N" THEN 4290
4455 RETURN
4460 REM ==CALCULO DE CONSTANTES==
4465 F1 = .9 * F1
4470 IF FA = 0 THEN 4465
4475 FE = .85 * FA
4480 GOTO 4490
4485 FE = (1.05 - (FA / 1250)) * FA
4490 FE = F1 * (1 - FE / 100)
4495 E = 2.0E+01 : E1 = FE * E
4500 G1 = 0
4505 FOR M = 0 TO M - 1
4510 IF E(M) > G1 THEN G1 = E(M)
4515 NEXT M : G1 = 0

```



```

1410 SET AN: HOME : PRINT : PRINT
1420 INVERSE : HTAB (15) : PRINT "CONTINUACION": NORMAL : FF# 50
1430 GET
1440 PR# : INVERSE
1450 PRINT "PUSHAR UNA TECLA PARA CONTINUAR": GET CH# : NORMAL
1460 RETURN
1470 REM *****
1480 REM SUBROUTINA: RELECCION DEL TIPO DE CALCULO
1490 REM
1500 NAME : UNTAB : UNTAB# :
1510 HTAB (14) : PRINT "*****"
1520 HTAB (14) : PRINT " "
1530 HTAB (14) : PRINT " " DISEÑO : REVISION
1540 HTAB (14) : PRINT " "
1550 HTAB (14) : PRINT " " DE LA SECCION TRANSVERSAL
1560 HTAB (14) : PRINT " "
1570 HTAB (14) : PRINT "*****"
1580 GET
1590 PRINT : INVERSE
1600 PRINT "ALTERNATIVAS "
1610 NORMAL : PRINT : FF# 10
1620 PRINT "1. ELEMENTO FLEXIONANTE PARA DISEÑO "
1630 PRINT "2. ELEMENTOS DE TENSION EN EL CONCRETO" : PRINT
1640 PRINT "3. ELEMENTO RESISTENTE" : PRINT
1650 PRINT "4. DISEÑO DE OTRA SECCION" : PRINT
1660 PRINT "5. FIN DEL PROGRAMA" : PRINT
1670 HTAB (10) : PRINT CH# : CH# (1) : CH# (2)
1680 PRINT "PUSHAR UNA ALTERNATIVA " : INPUT EL
1690 EL = INT (EL)
1700 IF EL = 1 THEN S#45
1710 IF EL = 4 THEN RETURN
1720 IF EL = 2 THEN S#55
1730 IF EL = 3 THEN S#60S# 1000
1740 IF EL = 5 THEN S#60S# 1575
1750 S#45 :
1760 :
1770 :
1780 :
1790 :
1800 NAME : HTAB : HTAB (5) : PRINT "***** RESULTADOS
1810 PRINT : PRINT : FF# 10
1820 PRINT "MOMENTO DE REVERSO" : HTAB : PRINT
1830 PRINT "MOM. DIENTE POSICION" : HTAB : PRINT
1840 PRINT "MOMENTO DEL VERO" : HTAB : PRINT
1850 PRINT : PRINT : FF# 10
1860 RETURN
1870 NAME : UNTAB : UNTAB# :
1880 PRINT "***** RESULTADOS " : PRINT : INVERSE
1890 HTAB (14) : PRINT " " : NORMAL
1900 PRINT : PRINT :
1910 PRINT "MOMENTO DE REVERSO" : PRINT : PRINT
1920 PRINT "MOM. DIENTE POSICION" : PRINT : PRINT
1930 PRINT "MOMENTO DEL VERO" : PRINT : PRINT
1940 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
1950 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
1960 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
1970 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
1980 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
1990 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
2000 PRINT "MOMENTO PERD. VERO" : PRINT : PRINT
2010 GET
2020 RETURN
2030 :
2040 PRINT CH# (1) : CH# (2) : CH# (3)
2050 PRINT CH# (4)
2060 PRINT " "
2070 LIST 5000 - 6100
2080 PRINT "FIN LIST"
2090 END
2100 REM
2110 REM SUBROUTINA REDONDEO CIFRAS
2120 FN = INT (FN + 1000) / 1000
2130 FN = INT (FN + 1000) / 1000

```

```
2525 RETURN
```

## SUBPROGRAMAS PARA EL MANEJO DE ARCHIVOS

## DURM. GEN. GEOM.

```

6000 REM == ARCHIVO LIMITE ==
6005 REM == DE LECTURA ==
6010 N1 = 1
6015 GE = CHR$(1)
6020 PRINT DE:"OPEN DIRM"/"SCL.DS.VI"
6025 PRINT DE:"DELETE DIRM"
6030 PRINT DE:"OPEN DIRM"
6035 PRINT DE:"WRITE DIRM"
6040 PRINT N1
6045 GE = "INVESTIGACION DORMIENTES"
6050 PRINT DE:"CLOSE"
6055 PRINT DE:"OPEN DORMIENTES"
6060 PRINT DE:"DELETE DORMIENTES"
6065 PRINT DE:"OPEN DORMIENTES"
6070 PRINT DE:"WRITE DORMIENTES"
6075 PRINT DE:"CLOSE"
6080 PRINT DE:"OPEN DIRM.FIGS.FRONTERA.DI"

```

## DURM. BORRA ARCHIVO

```

6100 REM == RUTINA BORRADO ==
6105 REM == DE ARCHIVO DE ==
6110 REM == DORMIENTES ==
6115 REM ==
6120 GOTO 6130
6125 GE = CHR$(1)
6130 PRINT DE:"OPEN DIRM"/"SCL.DS.VI"
6135 PRINT DE:"DELETE DIRM"
6140 PRINT N1
6145 PRINT DE:"CLOSE"
6150 REM FIN
6155 PRINT DE:"OPEN DORMIENTES"
6160 PRINT DE:"READ DORMIENTES"
6165 IF I = 1 TO N1
6170 INPUT A$
6175 PRINT DE:"WRITE"
6180 PRINT DE:"CLOSE"
6185 IF A$ = ""
6190 PRINT " ¿QUE ARCHIVO QUIERE BORRAR ?"
6195 INPUT T$
6200 IF T$ = "S" OR T$ = "N" THEN GOTO 6215
6205 T$ = ASC(LEFT$(T$, 4))
6210 T$ = ASC(LEFT$(T$, 4))
6215 N1 = N1
6220 PRINT DE:"OPEN DIRM"

```

```

6305 PRINT CR:"DELETE CUR"
6310 PRINT CR:"OPEN CUR"
6315 PRINT CR:"WRITE CUR"
6320 PRINT CR:
6325 PRINT CR:"CLOSE"
6330 PRINT CR:"OPEN ELEMENTES"
6335 PRINT CR:"CLOSE ELEMENTES"
6340 PRINT CR:"OPEN ELEMENTES"
6345 PRINT CR:"WRITE ELEMENTES"
6350 PRINT CR:"CLOSE"
6355 PRINT CR:"OPEN"
6360 PRINT CR:"WRITE"
6365 PRINT CR:"CLOSE"
6370 PRINT CR:"RUN CURR. PROG. PRINCIPAL 01"

```

## SECC. INDIC. ARCHIVO

```

6400 GOTO 6495
6410 NAME
6415 REM == ARCHIVO LIMITE ==
6420 REM == DE LECTURA DE SECCIONES==
6425 NS = 1
6430 IF = CURS (4)
6435 PRINT CR:"OPEN SEC-ZW-01",02,02,01"
6440 PRINT CR:"DELETE SEC-ZW-01"
6445 PRINT CR:"OPEN SEC-ZW-01"
6450 PRINT CR:"WRITE SEC-ZW-01"
6455 PRINT CR:
6460 PRINT CR:"SECCIONES DE SECCIONES TRANSVERSALES"
6465 PRINT CR:
6470 PRINT CR:"OPEN SECCIONES"
6475 PRINT CR:"DELETE SECCIONES"
6480 PRINT CR:"OPEN SECCIONES"
6485 PRINT CR:"WRITE SECCIONES"
6490 PRINT CR:
6495 PRINT CR:"CLOSE"
6500 PRINT CR:"RUN CURR. PROG. PRINCIPAL 01"

```



## A P E N D I C E B

### ANALISIS DE LA FIJACION RE X

#### B.1 Rigidez del sistema de sujeción en dirección vertical

Para determinar la rigidez vertical,  $K_V$ , del sistema de sujeción podemos hacer referencia al diagrama de cuerpo libre que se ilustra en la figura B.1; de aquí se determina lo siguiente:

$$K_V = \frac{F}{\Delta_V} \quad (1)$$

$$F = 4T \operatorname{sen}\phi \quad (2)$$

y

$$\Delta_V = \delta / \operatorname{sen}\phi \quad (3)$$

sustituyendo (2) y (3) en (1) se obtiene

$$K_V = \frac{4T}{\delta} \operatorname{sen}^2\phi \quad (4)$$

pero sabemos que la relación  $T/\delta$  representa la rigidez axial de un perno tirafondo, es decir

$$\frac{T}{\delta} = \frac{EA}{L} \quad (5)$$

finalmente, podemos escribir:

$$K_V = 4 \frac{EA}{L} \operatorname{sen}^2\phi \quad (6)$$

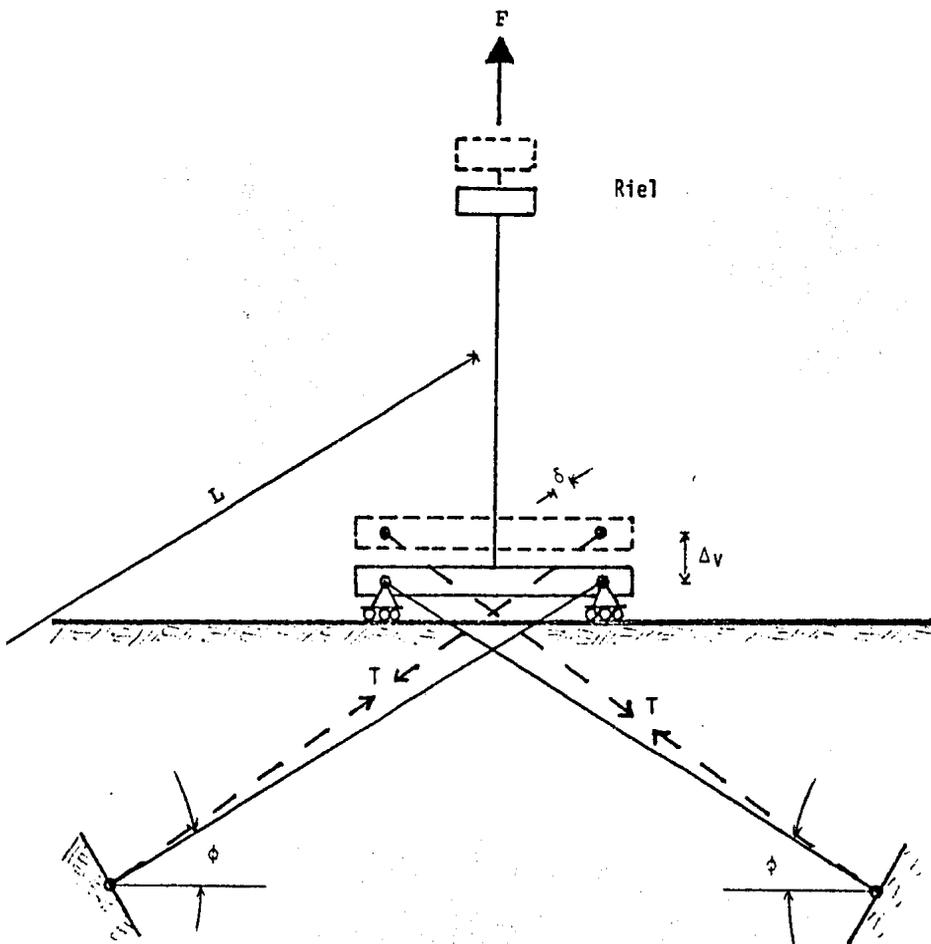


FIG B.1 Diagrama de cuerpo libre para determinar la rigidez vertical del sistema de sujeción

## 8.2 Rigidez del sistema de sujeción en la dirección longitudinal del durmiente

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre que se indica en la fig 8.2 se determina que la rigidez del sistema en la dirección longitudinal del durmiente,  $K_t$ , es

$$K_t = \frac{F}{\Delta_t} \quad (1)$$

$$\text{donde } F = 2T \cos\phi \quad (2)$$

y

$$\Delta_t = \frac{\delta}{\cos\phi} \quad (3)$$

sustituyendo (2) y (3) en (1) tenemos:

$$K_t = \frac{2T}{\delta} \cos^2\phi \quad (4)$$

pero sabemos que la relación  $T/\delta$  es la rigidez axial de una barra la cual también puede expresar como

$$\frac{T}{\delta} = \frac{EA}{L} \quad (5)$$

Así se concluye que la rigidez del sistema de sujeción en la dirección longitudinal del durmiente es:

$$K_t = 2 \frac{EA}{L} \cos^2\phi \quad (6)$$

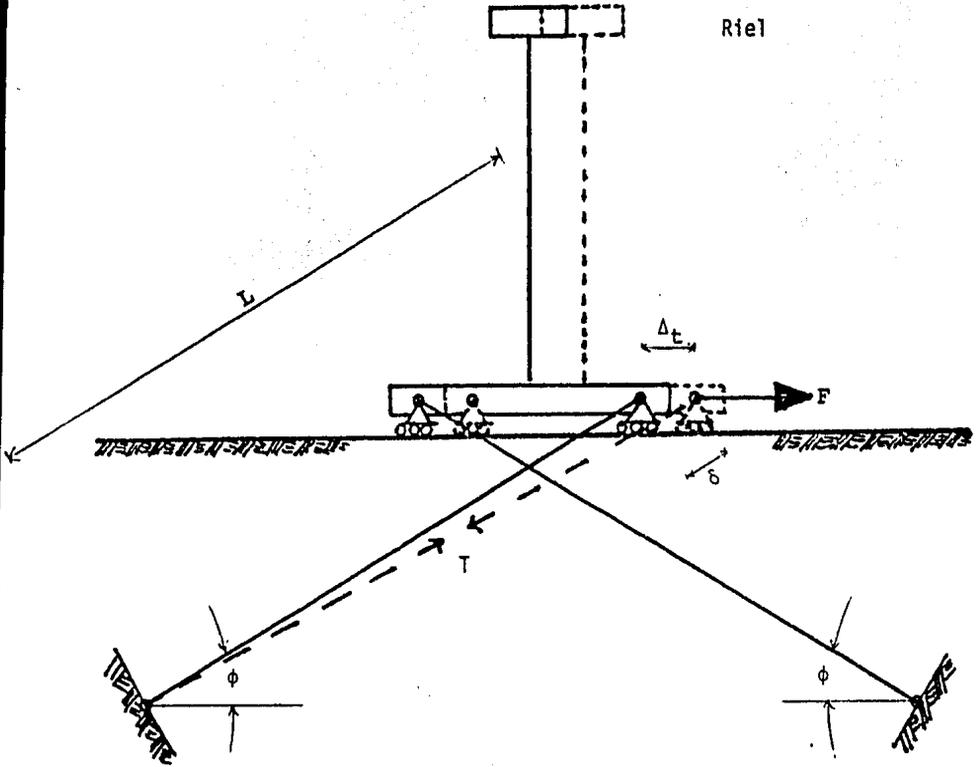


FIG B.2 Diagrama de cuerpo libre para determinar la rigidez transversal de la sujeción

### B.3 Rigidez del sistema de sujeción en la dirección del riel

Esta rigidez,  $K_1$ , se obtiene a partir del diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura B.3, de donde se deriva que:

el alargamiento de un perno tirafondo es

$$\delta = \sqrt{L^2 + \Delta_1^2} - L \quad (1)$$

$$\text{sen} \alpha = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \Delta_1^2}} \quad (2)$$

y

$$\text{cos} \alpha = \frac{\Delta_1}{\sqrt{L^2 + \Delta_1^2}} \quad (3)$$

De acuerdo con la ley de Hooke, en un perno tirafondo

$$T = k \cdot \delta \quad (4)$$

donde  $k$  representa la rigidez axial del tirafondo, es decir,

$$k = EA/L \quad (5)$$

Por otro lado, la fuerza normal que se genera sobre el durmiente es

$$N = (4T \text{ sen} \alpha) \text{ sen} \phi \quad (6)$$

así la fuerza de fricción que se opone al movimiento del riel será

$$F_r = \mu N \quad (7)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre riel y placa de neopreno, y  $\phi$ , es el ángulo oblicuo que forma el perno tirafondo con el eje longitudinal del durmiente (ver figuras B.1 y B.2 )

Dado que los cuatro pernos tirafondo contribuyen a evitar el desplazamiento longitudinal del riel, se establece el equilibrio como sigue:

$$F = 4T \cos\alpha + F_r \quad (8)$$

sustituyendo (1) en (4) resulta

$$T = k(\sqrt{L^2 + \Delta_1^2} - L) \quad (9)$$

por consiguiente

$$N = 4kL\left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + \Delta_1^2}}\right) \sin\phi \quad (10)$$

$$F_r = 4\mu kL\left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + \Delta_1^2}}\right) \sin\phi \quad (11)$$

y

$$F = 4k\Delta_1\left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + \Delta_1^2}}\right)\left(1 + \frac{\mu L}{\Delta_1} \sin\phi\right) \quad (12)$$

dividiendo ambos términos de la igualdad, entre  $\Delta_1$  tenemos que:

$$\frac{F}{\Delta_1} = 4k\left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + \Delta_1^2}}\right)\left(1 + \frac{\mu L}{\Delta_1} \sin\phi\right) \quad (13)$$

finalmente, haciendo unitario el desplazamiento,  $\Delta_1$ , la rigidez,  $K_1$ , del sistema de sujeción en la dirección del riel queda definida como:

$$K_1 = 4 \frac{EA}{L}\left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + 1}}\right)\left(1 + \mu L \sin\phi\right) \quad (14)$$

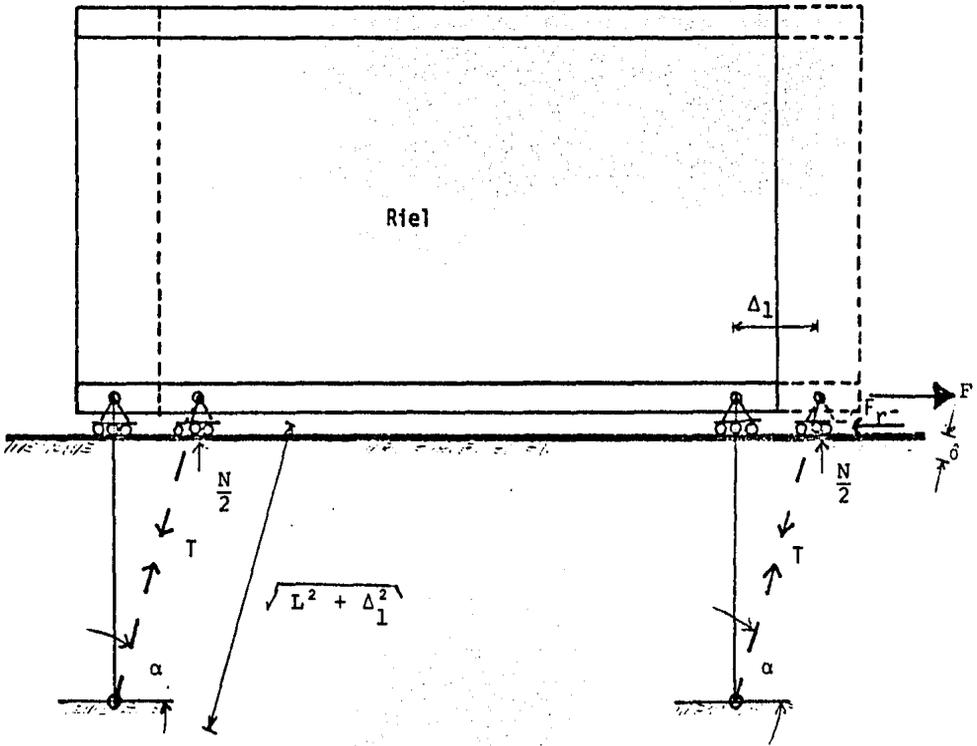


FIG B.3 Diagrama de cuerpo libre para determinar la rigidez de la sujeción en la dirección del riel

#### B.4 FUERZAS INTERNAS EN LOS PERNOS TIRAFONDO

Para determinar las fuerzas en cada uno de los pernos tirafondo se han supuesto las tres condiciones de carga de laboratorio siguientes:

- a) Levantamiento de la fijación
- b) Restricción longitudinal del riel, y
- c) Carga repetida en la fijación

El análisis correspondiente a cada una de estas situaciones, es el que a continuación se realiza:

- a) Levantamiento de la fijación

Si aplicamos una fuerza  $P_s$  que trate de separar al riel del durmiente, como se ilustra en la figura B.1 se establece que la fuerza axial en cada uno de los pernos es:

$$T = \frac{P_s}{4 \operatorname{sen} \phi} \quad (1)$$

- b) Restricción longitudinal del riel

Cuando sobre un riel se ejerce una fuerza en la dirección de éste, según se muestra en la figura B.3, la fuerza axial de tensión en cada uno de los tirafondo se expresa como:

$$T = \frac{EA}{L} \delta \quad (2)$$

donde

$$\delta = \sqrt{L^2 + \Delta_1^2} - L \quad (a)$$

y

$$\Delta_1 = \frac{P_1}{K_1}$$

aquí  $K_1$  representa la rigidez de la fijación en la dirección del riel.

Finalmente, sustituyendo (a) y (b) en (2) tenemos que la fuerza en cada uno de los pernos es:

$$T = \frac{EA}{L} \left( \sqrt{L^2 + \left(\frac{P_1}{K_1}\right)^2} - L \right) \quad (2)$$

c) Carga dinámica en la fijación

El diagrama de cuerpo libre para la fijación sujeta a dicho ensaye se muestra en la figura B.4

Se distinguen dos situaciones extremas; una cuando la fuerza que se aplica sobre la fijación es la máxima en compresión,  $P_{OC}$ , y la otra, cuando la fuerza es la máxima en tensión,  $P_{OT}$ .

El primer caso se representa en dos etapas a través de los diagramas de cuerpo libre de la figura B.5, de la primera de ellas se determina que las reacciones en los apoyos son:

$$\begin{aligned} H_A &= P_{OC} \operatorname{sen} 20^\circ \\ R_A &= \frac{P_{OC}}{P} \left( \frac{P-1}{2} \right) \cos 20^\circ + h \operatorname{sen} 20^\circ \\ R_B &= P \cos 20^\circ - R_A \end{aligned}$$

y con la segunda etapa, se concluye que las fuerzas, en los pernos

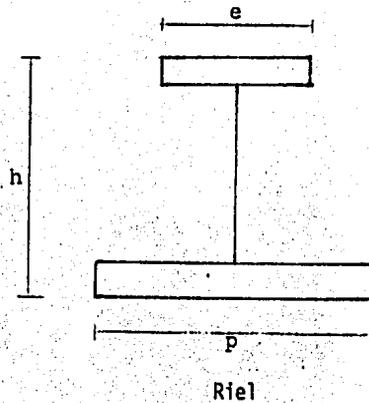
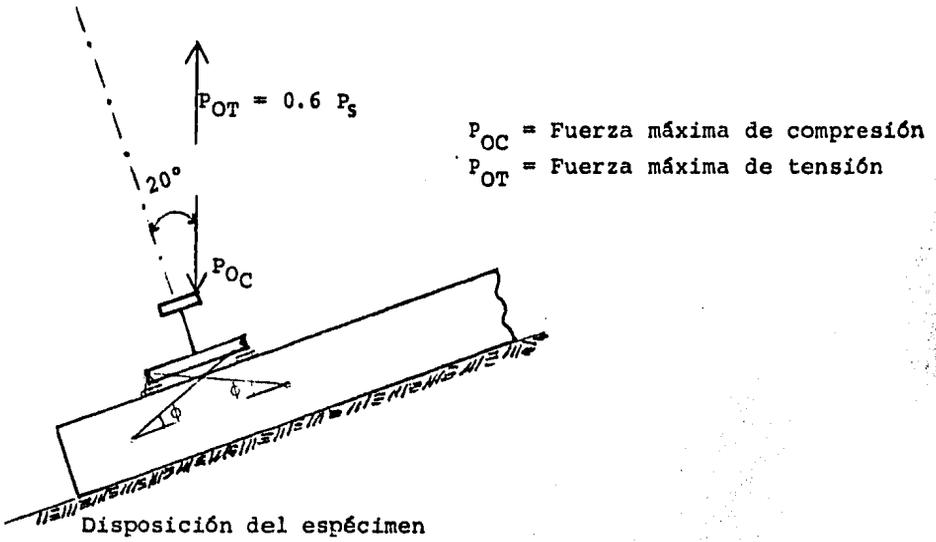
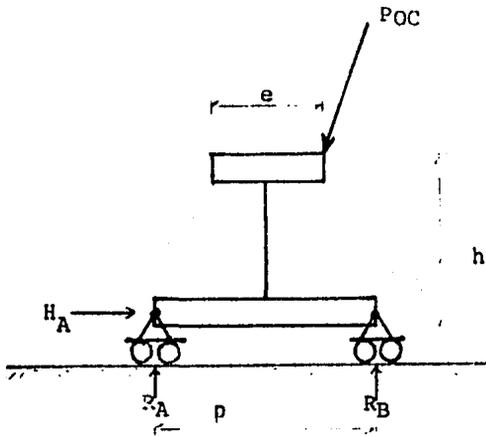
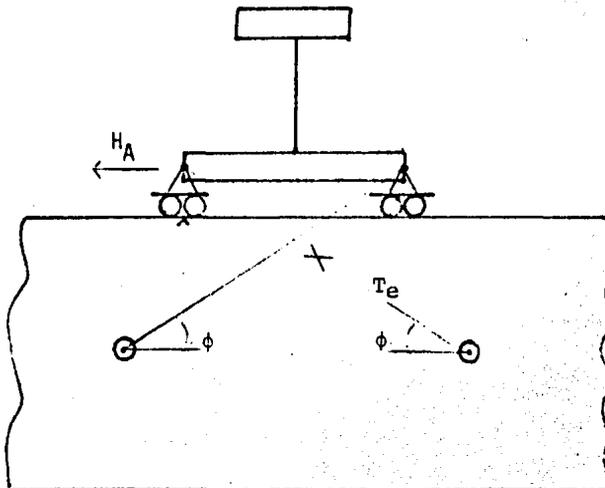


FIG B.4 Diagrama de cuerpo libre del sistema de fijación sujeto al ensayo de carga repetida



Reacciones en apoyos



Fuerzas en los pernos tirafondo

3 B.5 Diagrama de cuerpo libre de la fijación en el instante en que se presenta la carga máxima de compresión,  $P_{OC}$

tirafondo, generadas por las reacciones de los apoyos son:

- En pernos de sujetadores exteriores

$$T_e = \frac{1}{2} \frac{H_A}{\cos \phi}$$

o bien,

$$T_e = \frac{P_{OC}}{2} \left( \frac{\text{sen } 20^\circ}{\text{sen } \phi} \right) \quad (3)$$

- En pernos de sujetadores interiores

$$T_i = 0$$

El segundo caso corresponde con la máxima fuerza de tensión que se aplica a la fijación y también se representa en dos etapas que se muestran en la fig B.6, de la primera, se determinan las reacciones en los apoyos, éstas son:

$$H_B = P_{OT} \text{ sen } 20^\circ$$

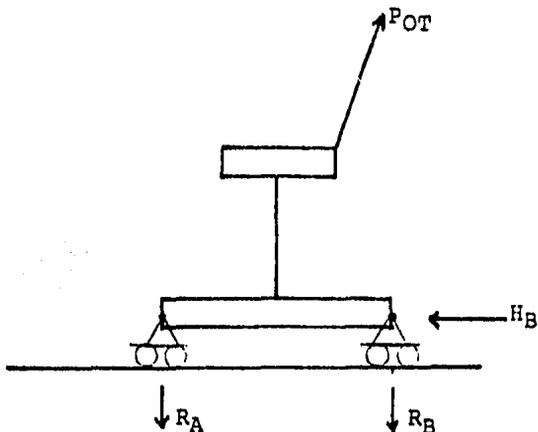
$$R_B = \frac{P_{OT}}{p} \left( \frac{p+e}{2} \right) \cos 20^\circ - h \text{ sen } 20^\circ$$

$$R_A = P_T \cos 20^\circ - R_B$$

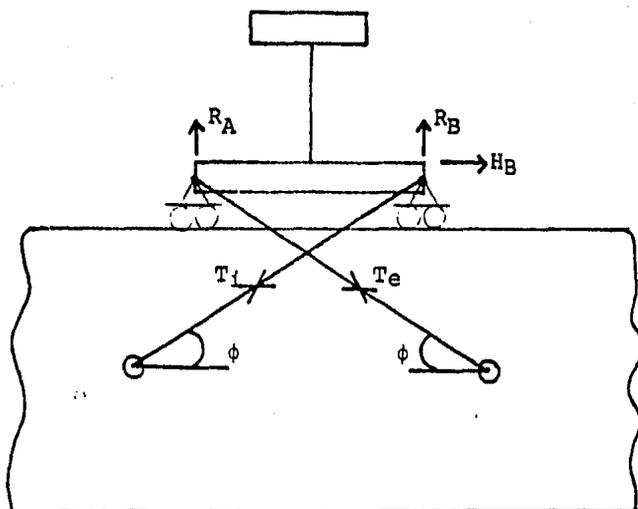
y, finalmente, de la segunda etapa se obtienen las fuerzas en los tirafondo generadas por las reacciones de los apoyos, así tenemos que:

- En pernos de sujetadores exteriores

$$T_e = \frac{P_{OT}}{2 \text{ sen } \phi} \left( \cos 20^\circ - \frac{1}{p} \left( \frac{p+e}{2} \right) \cos 20^\circ - h \text{ sen } 20^\circ \right)$$



Reacciones en apoyos



Fuerzas en los pernos tirafondo

FIG B.6 Diagrama de cuerpo libre de la fijación en el instante en que se presenta la carga máxima de tensión,  $P_{OT}$

- En pernos de sujetadores interiores

$$T_i = \frac{P}{2} \left( \frac{\text{sen } 20^\circ}{\text{cos } \phi} \right) + T_e$$