

**YESIS CON  
FALLAS DE ORIGEN**

*Lij. 157*



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROYECTO DE REHABILITACION DE LA VIA MEXICO-ESPERANZA  
CON RIEL SOLDADO CONTINUO SOBRE DURMIENTE  
DE CONCRETO Y SUJECION ELASTICA**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
**P R E S E N T A**  
**MARIE JEAN PIERRE-CHARLES CASTOR**

**MEXICO, D. F.**

**1986**



## **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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## C A P I T U L O     I

### IMPORTANCIA DEL FERROCARRIL EN LA ECONOMIA Y EL SECTOR TRANSPORTE

Debido a las funciones políticas, económicas y sociales que cumple el transporte, este, tiene una importancia de primer orden en toda sociedad humana, atiende necesidades de desplazamiento y a la vez, es un instrumento de estructuración del espacio geográfico.

Los principales objetivos fijados por el sistema económico, y — que , por medio del sistema de transporte como un elemento básico, se propone alcanzar son:

- I     La integración política y administrativa del territorio nacional, garantizando la adecuada interrelación socioeconómica, entre los diversos asentamientos humanos.
- II    El aprovechamiento integral de los recursos humanos y económicos disponibles.
- III   La adecuada interacción socioeconómica entre los asentamientos humanos del país y el exterior.
- IV   La distribución nacional entre la población y la actividad económica en el territorio nacional.

El ferrocarril como uno de los elementos del sistema de transporte surge como una necesidad de carácter económico, para agilizar la industrialización de los países Europeos desarrollados a principios del siglo - XIX.

Su construcción constituyó una etapa preliminar y absolutamente necesaria para la transformación económica de una sociedad feudal, artesanal, esencialmente agrícola, cuya región de influencia era muy reducida, - a una, de carácter urbana e industrial, de amplia interrelación nacional e internacional.

Esta transformación económica implicó, radicales cambios estructurales en la organización política y social de Europa, cambios que permitieron crear las bases para la existencia de trabajadores asalariados, de capital y de un mercado nacional e internacional.

La industrialización, el desarrollo de lazos económicos internacionales, la expansión e interrelación de la economía mundial, exigieron - el progreso técnico. La modernización de los medios de producción, exigió un avance tecnológico nunca antes visto en la historia de la humanidad y - es en este contexto que se da la revolución industrial.

Las distancias muy largas entre sí, entre los lugares abastecedores de materia prima, los centros de producción y transformación, los de distribución y consumo; hicieron necesaria la existencia de una industria de transporte funcional y eficaz. Mientras más desarrollados estén los medios de transporte, más rápido e intenso es el movimiento de los productos, se acelera más la integración de los mercados locales y nacionales; además crece la economía mundial.

Por sus características en cuanto a volumen transportado y distancia recorrida, el ferrocarril solucionaba el problema.

Inglaterra fué el país pionero en el proceso de industrialización y su tecnología permitió que fuese ahí en donde se diseñaran y operaran los primeros ferrocarriles.

Uno de los principales problemas que afrontaba la tecnología a -

principios del siglo XIX era la baja eficiencia de las máquinas. El físico Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832), ideó una máquina impulsada por vapor o líquido combustible y que producía un rendimiento máximo. Carnot buscaba la generalización de la acción expansiva del vapor. En base a las observaciones de Lavoisier y Dalton respecto a su "Calórico" fluido elástico y sin peso, dedujo que para lograr un trabajo mecánico era necesario -- romper el equilibrio de calórico (Entropía  $Q$ ) de modo que a este calórico correspondiese una intensidad, carga o potencial a la vez que una cantidad. Gracias a esta deducción se pudo llegar al concepto de equivalencia entre trabajo mecánico y calor que fué básico para el posterior desarrollo de todo tipo de máquinas. Sadi Carnot estimó que las máquinas de su época trabajaban con una eficiencia menor al 1%.

George Stephenson, autodidacta e hijo de obrero, fue capaz de -- proporcionar la energía necesaria para que una locomotora pudiera arrastrar los vagones de manera más rápida que los caballos de tiro. Esto lo logro con la caldera tubular y la colocación del tiro del vapor de escape de cilindro al nivel de chimenea.

Stephenson logro imprimir a su locomotora una velocidad de doce millas por hora y lo más importante valoró debidamente la conjunción existente entre el vehículo y el carril. Las primeras locomotoras marchaban por carriles desiguales y desnivelados, combinando la experiencia práctica y sus conocimientos teóricos, Stephenson pudo vencer estos obstáculos y en 1814 terminó su primera locomotora, que tuvo serios problemas, por carecer de muelles amortiguadores. En 1815 presentó otro modelo que por medio de una caldera asentada sobre cilindros verticales, resolvía el problema de los amortiguadores, y de esta manera pudo ser el antecesor de la locomotora "Rocket" que en 1829 realizó el trayecto entre Manchester y Liverpool -- que el propio Stephenson proyectó y construyó.

Stephenson operó por primera vez de manera funcional el ferrocarril, lo hizo recorriendo el trayecto entre Darlington y Stockton el 27 de septiembre de 1825, inaugurando así la era del ferrocarril. Francia conta

ba con el en 1827 y los Estados Unidos de Norteamérica en 1828.

Cabe señalar que en 1825 el comerciante veracruzano Francisco de Arigalla, exministro de guerra y hacienda en los primeros años de vida del México independiente, inició los estudios de localización y trazo para la construcción del ferrocarril entre la Ciudad de México y el Puerto de Veracruz. Debido a la inestabilidad política de la época no fue posible iniciar el proyecto.

Se comenzó a utilizar el ferrocarril en el año de 1835 en Alemania y Bélgica. En 1837 Italia y once años después en España; a su vez en 1880 en Rusia Tzarista.

En nuestro país Don Benito Juárez inauguró el tramo entre México y Puebla en 1867, esta obra se había empezado 36 años antes. Sebastián -- Lerdo de Tejada inauguró la ruta México-Veracruz el 1º de enero de 1873.

La estrecha relación entre la economía mexicana y la expansión -- del mercado norteamericano aceleró la construcción de los ferrocarriles y -- bajo el primer gobierno de Porfirio Díaz; dos antiguos diplomáticos estado -- unidenses ante el gobierno de Lerdo de Tejada promovieron la construcción -- de líneas troncales del centro al norte del país por parte de compañías -- norteamericanas.

El gobierno federal permitió que las grandes compañías ferrovia -- rias norteamericanas se entendieran con los gobiernos locales para atender -- a lo largo del país, dos grandes líneas troncales que se conectaran con -- las de los Estados Unidos de Norteamérica. Asimismo estableció con ellos -- contratos muy ventajosos para las empresas, sobre todo en lo referente a -- las subvenciones, expropiaciones de terreno, importación sin gravámenes, -- exoneración de impuestos, adquisición gratuita de material de construcción -- provenientes de terrenos de propiedad estatal, y condiciones de trabajo -- con los trabajadores nacionales.

De esta manera el sistema ferroviario estuvo mal construido, a efecto de lograr la mayor cantidad posible de subvenciones y dedicado principalmente a transportar minerales hacia los Estados Unidos de Norteamérica; no contemplaba el aspecto de la comunicación ni el de la infraestructura exigida por el mercado nacional.

Después de complicadas y difíciles gestiones por parte del estado mexicano, se fusionaron varias empresas ferrocarrileras para formar los Ferrocarriles Nacionales de México en el año de 1908. Esta maniobra evitó que el transporte ferroviario fuera manejado por un enorme monopolio norteamericano.

Durante el período comprendido entre 1867 y 1910 se construyó -- una parte muy importante de los kilómetros de vía que existen actualmente, poco más del 75%.

En 1910 existían alrededor de 19,200 Kilómetros de vía, a la fecha hay 19,900 kilómetros (81.5%), de vías en que los trenes se manejan -- por horario, andenes de tren o de servicio con señales reglamentarias llamadas vías primarias y 4,500 kilómetros (18.5%), de vías que permiten el movimiento de trenes o equipo, dejando expeditas las primarias, denominadas vías secundarias, dando un total de 24,400 kilómetros de vías ferreas.

La reconstrucción de las vías destruidas durante la Revolución Mexicana, junto con la modernización operativa de los ferrocarriles, constituyeron el eje principal de las administraciones ferroviarias post-revolucionarias. Aún hoy, la modernización operativa, sumada a la administrativa, forma parte de la estrategia del sistema Ferroviario Nacional.

El desplazamiento de personas y el intercambio de bienes es producto del proceso productivo y el aprovechamiento de los recursos, en consecuencia el funcionamiento del sector transporte refleja el grado de desarrollo y evolución de toda economía:

Los diversos sectores de la economía están íntimamente relacionados entre sí, el sector transporte depende de otros sectores económicos y a su vez estos últimos dependen del transporte. Para avanzar en el desarrollo económico de una nación, es necesario aplicar todo un programa de carácter político, que defina la estrategia financiera, agrícola, industrial, comercial, etc.; sin embargo la existencia de una adecuada infraestructura económica es una condición elemental sin la cual sería muy difícil lograrlo.

El sector transporte forma un sistema constituido a su vez por varios subsistemas.

#### **Sistema de Transportes**

Sistema Carretero

Sistema Ferroviario

Sistema Aeroportuario

Sistema Marítimo

Sistema de Transporte Urbano

El ferrocarril representa una solución técnica, económicamente recomendable para condiciones específicas tanto de volúmenes como de distancias y que de una manera u otra se asocia con la industrialización de un país.

El sistema carretero absorbe el 95% del transporte de pasajeros y el 70% del movimiento de mercancías. El sistema ferroviario nacional puede representar una buena alternativa para descongestionar las carreteras, para ello debe lograr dos objetivos:

- 1.- Aumentar su capacidad de transporte
- 2.- Mejorar la calidad de sus servicios

Estas dos metas se lograrán mediante:

- A) La modernización integral de los procedimientos operativos y administrativos.
- B) La capacitación del personal.
- C) La intensificación de los trabajos de mantenimiento de la infraestructura y equipo.
- D) El aumento de la eficiencia en su gasto.
- E) El avance de la autosuficiencia financiera.

La estrategia expuesta anteriormente, aumentará la demanda de transporte por ferrocarril, de todas las mercancías que, dado su volumen y distancia de traslado, hacen de este medio, el más óptimo.

Sin lugar a dudas la modernización del sistema ferroviario repercute positivamente en todo el sistema de transporte y de modo paralelo en la vida económica nacional.

El papel del ferrocarril en el sistema de transporte no ha podido ser el que le corresponde y por ello la demanda de transporte se concentra en el sistema carretero. La importancia del ferrocarril cobra especial interés en la optimización del sistema de transporte.

La red ferroviaria es un factor primordial en el funcionamiento y desarrollo de la economía. Influye de manera determinante en las actividades agropecuarias, mineras, industriales, constructivas y eléctricas.

En 1984.-De un total de 64.1 millones de toneladas, movidas a una distancia media de 696 kilómetros y que generaron 44,592 millones de toneladas-kilómetro.

El 34.78% 22.3 millones de toneladas corresponde a productos industriales.

El 21.84% 14.0 millones de toneladas corresponde a productos minerales.

El 11.54% 7.4 millones de toneladas corresponde a productos -- inorgánicos.

El 6.55% 4.2 millones de toneladas corresponde a productos petroleros y derivados.

El 1.71% 1.1 millones de toneladas corresponde a productos forestales, animales, material de ferrocarriles y embarques en menos de un carro.

Transportó los siguientes porcentajes:

- 44% de la producción nacional de cemento
- 40% de la producción de SIDERMEX
- 95% de las compras realizadas en los Estados Unidos de Norteamérica por parte de la CONASUPO
- 57% de la demanda nacional de transportes de insumos, productos terminados e importaciones de FERTIMEX
- 50% de las compras desembarcadas en puertos marítimos por parte de la CONASUPO
- 37% de las importaciones y exportaciones de PEMEX
- 33% de la demanda de combustóleo para las plantas termoeléctricas de la C.F.E.

Por lo que se refiere a los alimentos:

- 73% del consumo nacional de trigo
- 56% del consumo nacional de azúcar
- 50% del consumo nacional de frijol
- 42% del consumo nacional de semillas y pastas oleaginosas
- 40% del consumo nacional de arroz y sorgo
- 19% del consumo nacional de maíz

Las cifras presentadas son un claro indicativo de la gran importancia del ferrocarril en la economía nacional.

## C A P I T U L O    I I

### ELEMENTOS Y DISEÑO DE LA VIA ELASTICA Y DE LA VIA CLASICA

Para construir una vía férrea, es necesario realizar profundos - estudios en diversas especialidades. El análisis y conocimiento de los aspectos financieros, económicos, sociales y técnicos relacionados con la -- construcción, operación y conservación de la obra permitirán optimizarla.

Una vía férrea esta constituida por un conjunto de elementos que forman un sistema estructural, el cual, debe ser capaz de resistir las cargas actuantes. El tipo de sollicitación que actua sobre la vía, se caracteriza, por la variabilidad de la frecuencia de las cargas, la variabilidad de la magnitud y por su constante repetición.

Para diseñar adecuadamente el sistema estructural de la vía férrea, se debe considerar la cantidad de ejes de los vehículos ferroviarios, la carga que transmiten considerando la vibraciones, el diámetro de las -- ruedas tomando en cuenta las irregularidades en la misma rueda, en los rieles y en sus juntas; el volúmen, velocidad y tipo de tráfico. El clima y sus variaciones; la resistencia, estabilidad, humedad y otras características del suelo. Todas estas consideraciones, incluyen en el perfil y trazo de la vía y en sus elementos constituyentes.

La geometría de la vía, curvas y pendientes, deben reducir al mínimo posible las fuerzas de frenado, permitir una rápida aceleración al salir de las estaciones y aprovechar al máximo las fuerzas de gravedad y locomotriz, para de esta manera, beneficiar la conservación del equipo rodante y del conjunto de la vía.

Los elementos que forman una vía son, el terraplen, el subbalasto, el balasto, el durmiente, el riel, y los elementos de fijación y conexión. Existe entre ellos una estrecha interdependencia.

El terraplen, subbalasto y balasto no estan en función del tipo de vía, tipo de riel, durmiente o elementos de fijación.

### TERRAPLEN

Es una masa terrosa con una geometría transversal específica y - que cumple con una resistencia mecánica determinada. Este elemento es el soporte de la infraestructura férrea y de hecho, liga el sistema de la -- vía al suelo. Su presencia es imperante a lo largo de toda la vía, aún - en las zonas en donde la capacidad de carga es suficiente para soportarla.

La subrasante debe ser capaz de soportar las cargas causadas por el tendido inicial de la vía, cuyo balastado y nivelación final se realizan después.

En las zonas en donde existe peligro de inundaciones, ascención de aguas freáticas o la precipitación pluvial lo amerita, se le debe dar -- un trato especial. Se puede según sea el caso, sellar por riego asfáltico o de arena en varias capas intercaladas, colocando asfalto sobre los dur-- mientes y el contorno exterior del balastro o se puede sellar la subrasante. En ocasiones, se han construido terracerías ferroviarias con normas - similares a las de una carretera de primer orden, empleando base compactada, sello con riego asfáltico, perfilando la sección con bombeo para el escurrimiento transversal del agua con el objeto de lograr una subrasante ca paz de garantizar el valor de soporte necesario para cada tipo de suelo. - La capacidad de carga del terraplen, puede condicionar el espesor de la ca pa de balasto.

### SUBBALASTO

Esta capa de material esta colocada en la parte superior de la - terracería. Proviene del suelo, de depósitos naturales, o de rocas frag-- mentadas que generalmente no requieren ser trituradas, cribadas y/o lava--

das para su utilización. Debe cumplir con características especiales en cuanto a granulometría, contracción lineal, valor relativo de soporte, valor cementante, equivalente de arena y compactación.

## BALASTO

Esta capa se extiende como base de la vía, esta colocada después del subbalasto, grava o piedra triturada, procedente de depósitos naturales, rocas fragmentadas y/o sanas que generalmente requieren ser crivadas y/o lavadas o bien escoria de los altos hornos constituyen este elemento.

Las aristas del balasto, deben ser capaces de soportar la fricción entre ellas al paso de las cargas y también resistir los efectos de abrasión e intemperismo. Este elemento compacto, rodea al durmiente y constituye un fijador, nivelador y ancla de la vía en su posición geográfica. Se opone por medio de su resistencia al esfuerzo cortante a los largo de cada durmiente, a cualquier fuerza que intente desplazarlo.

Otra de las funciones de este elemento, es la de transmitir de modo uniforme las cargas al terraplen. Su espesor debe ser suficiente para que la presión ejercida en la base del durmiente, la transmita con una presión uniforme, admisible por la subrasante.

Los huecos existentes en la capa de balasto, permiten un drenaje casi inmediato, evitando que la humedad perjudique al durmiente y también de modo parcial absorben las vibraciones.

El balasto es pulverizado y contaminado por el tráfico, esta contaminación puede afectar al durmiente. Es necesario limpiar, cribar y colocar balasto fresco con cierta regularidad.

Las principales propiedades que debe poseer estan relacionadas con su granulometría, peso volúmetrico, durabilidad, intemperismo y forma-

de las partículas.

Analizando la vía férrea desde su parte inferior hasta la superior, después del balasto sigue el durmiente. Es a partir de este elemento que pueden manifestarse las diferencias entre una vía clásica y una vía elástica, es este el motivo por el cual a continuación describiremos cada una de ellas.

La vía clásica esta formada por rieles cuya longitud es relativamente corta, varía de 10.05 m. a 11.887 m., durmiente de madera, sistema de fijación a base de clavos de vía, tirafondos y planchela. Este tipo de vía, es bastante rígida y casi todas las vibraciones se transmiten al durmiente y al balasto, afectándolas lo mismo que al riel.

Por su parte, la vía elástica es aquella que esta constituida -- por el riel continuo, largos tramos de riel soldado, convenientemente fijados a los durmientes de madera, acero o concreto mediante un adecuado sistema de fijación elástica que evite el deslizamiento o flexión de los rieles y amortigua sus vibraciones e impactos.

Las cargas que se presentan en la vía férrea sea cual sea su tipo provocan impactos de gran magnitud y fuertes vibraciones de alta frecuencia, aumentando los esfuerzos mecánicos y destruyendo la cohesión molecular del conjunto y de sus elementos. La vibración y el impacto, son problemas que prácticamente nacieron junto con la vía; para dar solución a -- los efectos nocivos de estos fenómenos, la ingeniería ferroviaria observó que el aumento de la longitud del riel ya sea desde su fabricación o bien por medio de la soldadura, implicaba una sensible disminución de las juntas y por ende, mejoraría sustancialmente el comportamiento del sistema estructural. Es en este contexto, que surge la vía elástica.

La vía elástica, largos tramos de riel soldado con su fijación -- doblemente elástica, impide el desplazamiento longitudinal y transversal --

del riel, provocados por sus cambios de temperatura y también, las tendencias a desplazarse quedan contrarestadas por el peso y anclaje de los durmientes dentro del balasto. Esto provoca la presencia de esfuerzos de tensión y compresión en el interior del riel, los cuales, son soportados sin ningún problema por la propia resistencia del acero.

Antes de proseguir con la exposición relativa al durmiente, presentaremos unas consideraciones generales que es necesario conocer.

La estructura de la vía férrea soporta y guía al equipo ferroviario y a la carga que transporta. Debe soportar las cargas laterales, longitudinales y verticales que se presenten. El durmiente recibe las cargas de los rieles o instantáneamente las transmite al balasto y a la terracería, su comportamiento es afectado y altera las características de los otros componentes del sistema.

#### **CARGA LATERAL**

Es aquella, o su vector correspondiente, que actúa en forma paralela al eje longitudinal del durmiente y perpendicular al riel. Es generada por el movimiento del equipo rodante y es aplicada a través de las ruedas. Se presenta cuando el vehículo transita a velocidades diferentes que la estipulada, en las curvas, ya que debido al potencial giroscópico de las ruedas, estas se resisten al cambio de dirección rozando contra el riel exterior de la curva y patinando. La masa del durmiente, su fricción con el balasto, su área de contacto y el volumen del balasto resisten al movimiento.

La magnitud de la carga lateral está en función por una parte, de la dimensión, configuración, peso y velocidad de los vehículos ferroviarios y por otra de la geometría, rectitud, curvatura y pendiente de la vía.

### CARGA LONGITUDINAL

Es la carga que actúa en el eje longitudinal del riel. Se presenta combinada con esfuerzos térmicos a lo largo del riel debido al tráfico y también de modo instantáneo es transmitida al durmiente y al resto del sistema. La longitud del área de contacto del durmiente por unidad de largo del riel. La fricción entre la parte inferior del durmiente y el balasto determinan la resistencia al movimiento longitudinal. La resistencia del movimiento de los rieles, respecto al durmiente, es determinado por las características de la fijación.

### CARGA VERTICAL

Es aquella o su correspondiente vector que actúa de modo perpendicular respecto al eje longitudinal del riel. Es generada por el equiporodante. Igual que las anteriores esta carga es transmitida instantáneamente al resto de la estructura. Su magnitud varía en función de las características del equipo ferroviario, del espaciamiento de los durmientes y sus dimensiones ya que la distribución de este tipo de carga depende de esos factores.

### DURMIENTE

Es el elemento que soporta y fija el riel, lo ancla a la vía, impidiéndole desplazamientos laterales o corrimientos longitudinales. El durmiente recibe las cargas del riel y las transmite al balasto, subbalasto y terraplen. Este componente del sistema, permite considerar el riel como una viga continua, sujeta a una carga rodante que se reparte en un número determinado de ellos. Al analizar un durmiente, se considera que uno o los dos adyacentes a él, pueden fallar por resistencia del material, produciéndose un claro tres veces mayor que el espaciamiento inicial. Este fenómeno, provoca presiones máximas sobre un sólo durmiente, el cual debe reaccionar en su apoyo de balasto sin hundirse y soportar la flexión sin -

deformarse ni romper las planchelas o juntas de riel.

El espaciamento de los durmientes, afecta los esfuerzos flexionantes del riel, el esfuerzo de compresión del balasto y el esfuerzo flexionante generado en el mismo durmiente. El trabajo de laboratorio y la observación de la realidad han permitido sugerir diversas distancias entre durmientes para que los esfuerzos provocados estén en un rango admisible - por parte de los elementos estructurales. En base a esto el Area American Railway Engineering Association recomienda una separación variable entre veinte in = 50 cm. y 30 in = 76 cm.

#### PRESION TRANSMITIDA AL BALASTO

Debido a que la distribución de presiones, no es uniforme a través de la capa de balasto se hace un cálculo del promedio de la presión. - La magnitud de este promedio esta en función del peso del equipo rodante, de un factor de impacto, de la distribución de la carga y el área de carga el balasto respecto al durmiente.

Promedio de la presión sobre el balasto	=	PB (p s i)
Carga transmitida por las ruedas	=	P (libras)
Factor de impacto en %	=	IF
Factor de distribución en %	=	DF
Area de carga	=	A (pulgadas cuadradas)

$$PB = \frac{2P \left(1 + \frac{IF}{100}\right) \left(\frac{DF}{100}\right)}{A}$$

Es recomendable que PB no exeda 85 psi = 6.02 kg/cm<sup>2</sup>

#### FACTOR DE IMPACTO IF

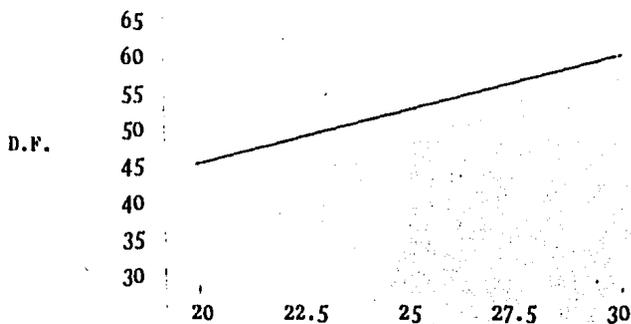
Debido a las irregularidades existentes en las ruedas y otras va

riables de difícil y precisa estimación, se incrementan las cargas verticales estáticas por medio de este factor. El factor de impacto, permite estimar los efectos dinámicos. Se recomienda (AEREA) emplear un valor de -- 150%.

#### FACTOR DE DISTRIBUCION DF

Las cargas ejercidas a través de las ruedas del equipo ferroviario, son aplicadas al riel y se distribuyen respectivamente en los distintos durmientes. La distribución de cargas sobre el durmiente depende del espaciamiento de los durmientes, de la reacción del balasto y terraplen y de la rigidez del conjunto. A través de múltiples investigaciones y de -- pruebas de laboratorio se puede elaborar una gráfica que relaciona la separación entre los durmientes y el porcentaje de carga soportada por un sólo durmiente. Esta gráfica fue elaborada para durmientes de concreto sin embargo ilustra claramente que a medida que aumenta el espaciamiento de los durmientes, aumenta el porcentaje de carga de cada durmiente. Esta observación es válida para todo tipo de durmiente.

#### Porcentaje aproximado de carga soportado por un sólo durmiente



Espaciamiento de centro a centro de los durmientes (Pulgadas).

En México, se emplean actualmente dos tipos de durmiente, el de madera y el de concreto. El uso de uno o del otro, hace variar el tipo de fijación y de conexión del riel, el espaciamiento entre ellos, el costo -- inicial y el de mantenimiento.

#### DURMIENTE DE MADERA

Es el más antiguo, su utilización comenzó desde el nacimiento de la vía férrea. Su resistencia y comportamiento mecánico ante las cargas -- actuantes es muy satisfactorio. Sin embargo, su vida útil no es muy larga y a menudo hay que retirarlo antes que el riel. Además, el aumento de la demanda de productos provenientes de la madera y la disminución de las reservas forestales, influyen en la capacidad de fabricarlos.

De acuerdo a la especie y género del árbol del cual proviene la madera podemos clasificar la madera en dos tipos: Madera dura y madera -- blanda, no es precisamente el grado de dureza que define el uno al otro.

El tiempo de crecimiento del árbol proporciona la diferencia. -- Entre más lentamente se lleve a cabo este crecimiento, la madera tendrá -- una estructura celular más compactada, mayor número de anillos y una densi-  
dad superior. Las maderas duras provienen del roble, ebano y encino entre otros, las blandas de los coníferos como el pino.

La madera esta formada por células compuestas básicamente de ce-  
lulosa y estan unidas por medio de la Lignina. Un árbol, posee varias ca-  
pas en su sección transversal. Del exterior al interior, encontramos, la  
corteza que es un material muerto y seco y funciona como capa protectora, --  
le sigue una capa húmeda y blanda que transmite el alimento a lo largo del  
árbol, le sigue la zona del Cambium donde se origina el crecimiento, luego  
la capa de savia que transporta esta sustancia a las hojas, y finalmente--  
encontramos el núcleo y corazón del árbol.

La madera es severamente perjudicada por diversos parásitos y -- agentes del intemperismo. Entre otros podemos mencionar a los hongos que nienes obtienen el aire, temperatura y alimento que necesitan de la madera. - La humedad excesiva facilita su existencia y pudren la madera. Los hongos se alimentan de la celulosa y la lignina.

Para proteger al durmiente de madera de estos elementos, se le - aplican diversas sustancias protectoras. Estas deben ser estables, tener - un alto grado de permanencia y penetración y desde luego no debe ser dañi- na para la madera. Existen diversos preservativos y métodos de aplicación.

Las dimensiones y la forma del durmiente están en función del peso del tráfico. La carga Máxima, se presenta en donde se apoya el riel. - Debe de ser, lo suficientemente largo para distribuir el peso de la carga- de manera uniforme al balasto y terraplen.

La sección tipo es de 18 cm. de grueso, 21 cm. de ancho y 2.44 m. de largo. Tiene un peso aproximado de 80 kg. lo que permite que 2 perso-- nas puedan maniobrar con él. El espaciamiento de este tipo de durmiente, - entre centro y centro es de 50 cm. obteniéndose en un kilómetro de vía --- 2000 durmientes.

El durmiente de madera puede soportar y fijar tanto una vía con- tramos de riel soldado, como una vía de riel ordinario. La primera impli- ca placas de caucho, grapillas, solera protectora, tirafondo; la segunda - se asocia a clavos y placas metálicas como elementos de fijación y plan- chuela.

El costo inicial del durmiente de madera, es menor que el de con- creto, sin embargo, su menor vida útil y su mayor necesidad de conserva- ción, hacen necesario analizar minuciosamente la conveniencia de colocar - un tipo u otro de durmiente.

## DURMIENTE DE CONCRETO

La idea de utilizar este tipo de durmiente, surgió debido a la escasez de madera, para contribuir de cierta manera a la conservación de las zonas boscosas, para aumentar la vida útil del elemento y disminuir en lo posible su conservación. El durmiente de concreto es ideal para soportar y trabajar con largos tramos de riel soldado, ya que proporciona un adecuado anclaje transversal y longitudinal y proporciona una buena estabilidad vertical. La vida útil de este durmiente debe ser por lo menos igual a la de los tramos de riel soldado, varía de 40 a 50 años.

Al igual que el resto del sistema estructural la evaluación de los esfuerzos generados ante las cargas actuantes es sumamente complicada. En base a la experimentación de laboratorio y la experiencia se ha observado que el durmiente trabaja principalmente a flexión, existiendo por ende esfuerzos de comprensión y de tensión. La existencia de esfuerzos de tensión obliga a que el concreto deba estar armado.

Podemos dividir los durmientes de concreto en 2 tipos. El monolítico que puede ser pretensado o postensado y el biblock simplemente armado.

## DURMIENTE DE CONCRETO BIBLOCK O MIXTO

Esta compuesto por 2 bloques de concreto cuyas dimensiones son de 29 cm. de ancho 22 cm. de grueso y 72 cm. de largo, van ligados entre sí, por una barra de acero estructural. Cada uno de los bloques está reforzado con varillas de acero soldado, colocados en la parte superior e inferior para absorber las tensiones provocadas por las cargas. El área de apoyo de este durmiente, concentra las cargas que va a soportar. La resistencia mínima del concreto debe ser de 360 kg/cm<sup>2</sup>.

Como lo hemos expuesto anteriormente, las cargas que se presen--

tan en la vía férrea son de alta magnitud, corta duración y constante repetición. En el durmiente, bajo el riel, las fibras superiores reciben un esfuerzo de compresión menor que las que se presentan en las fibras inferiores.

Es común proporcionar al durmiente monolítico de concreto un preesfuerzo por medio de cables o varillas de acero. Al momento de incrementarse la flexión, debido a las cargas actuantes, el preesfuerzo lo neutraliza. Manteniendo la sección del durmiente y variando la excentricidad del refuerzo aumenta la resistencia o la flexión logrando una apropiada distribución de esfuerzos dentro del elemento.

#### **DURMIENTE PRETENSADO**

Toda la superficie del acero esta ligada y adherida al concreto. Durante el proceso constructivo, la fuerza de preesfuerzo debe ser constante hasta que el concreto haya fraguado hasta alcanzar una resistencia mínima de 425 kg/cm<sup>2</sup> o 6000 psi.

#### **DURMIENTE POSTENSADO**

El acero de preesfuerzo es cubierto por algún molde, de tal manera que no este en contacto con el concreto. Cuando el concreto alcanza -- cierta resistencia, se retiran los moldes y posteriormente se aplica la -- fuerza de postensión.

#### **DURMIENTE PREEFORZADO MONOLITICO TIPO DYWIDAG**

Existen diversas dimensiones de este tipo de durmiente. Las características referentes a su peso y capacidad de carga y esfuerzos admisibles están en función del equipo que soportarán, su velocidad, al ancho de la vía y la fijación del riel. El acero que conforma el preesfuerzo se caracteriza por tener una alta resistencia a la tensión, ser bastante tenaz,

resistir a la corrosión bajo tensión y fluir muy poco. Su esfuerzo en el límite elástico es de 14 000 kg/cm<sup>2</sup>. el esfuerzo de ruptura 16 000 kg/cm<sup>2</sup>. y el alargamiento de ruptura 6%.

Los elementos de preesfuerzo del durmiente Dywidag están compuestos por 2 barras dobladas en forma de orquilla estiradas en frío con ros--cas roladas en los 4 extremos. Su diseño, permite obtener una capacidad de resistencia al momento flexionante debido a la carga estática, aproximada al doble de la de un durmiente con las mismas dimensiones y sin prees--fuerzos. En caso de tratarse de una carga dinámica, ese valor aumenta al triple.

Un durmiente Dywidag Standar B 58 de 247 kg de peso puede soportar 30 toneladas métricas por eje. Un Dywidag B 58 de 275 kg de peso, soporta cargas de 32.6 toneladas métricas.

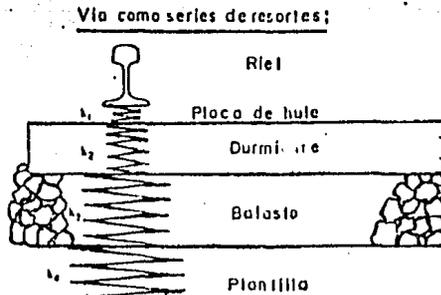
El concreto que emplea este elemento posee una resistencia de --600 kg/cm<sup>2</sup> a compresión y 65 kg/cm<sup>2</sup> a la tensión.

Su fabricación se realiza a través de moldes. Estos moldes contienen la matriz. las cuñas que forman los ductos en el cuerpo del durmiente, las placas del anclaje del perno y las roldanas de campana para el anclaje del sistema de preesfuerzo. La compactación se realiza por medio de mesas vibratorias de alta frecuencia, obteniendo una adecuada resistencia y calidad. El curado se realiza por vapor, gracias a lo cual, se alcanzan altas resistencias a la compresión, en un tiempo relativamente corto. -- Cuando el concreto alcanza determinada resistencia, el preesfuerzo se realiza por medio de máquinas hidráulicas cuádruples, que sujetan al acero en forma de horquillas, introducidas en los ductos, las cuales son tensadas y en sus extremos sujetas por tuercas aplicadas en ellas. Posteriormente, -- se inyectan, y retacan los ductos, de lechada y mortero, finalmente se --- aplica una capa impermeabilizante al durmiente, para protegerlo de la co--rrosión, aumentando su vida útil.



- 1.- La carga vertical se transmite completamente al durmiente.
- 2.- La carga horizontal y el momento producido, son tomados por el anclaje del riel al durmiente. No hay forma precisa de calcular las fuerzas actuantes y los esfuerzos generados en el anclaje. Se estiman estas acciones y reacciones por medio de las pruebas de laboratorio.

En un corte transversal de la vía, podemos considerar a los elementos colocados abajo del durmiente, como materiales que poseen una diferente elasticidad.

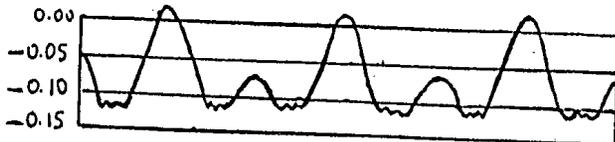
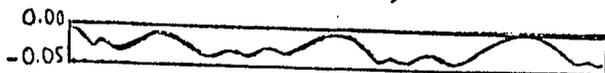


- Placa de hule que distribuye la fuerza al durmiente. Elasticidad =  $K_1$
- Durmiente que transmite la fuerza al balasto. Elasticidad =  $K_2$
- Balasto que transmite la fuerza al subbalasto y terraplen. Elasticidad =  $K_3$
- Terraplen. Elasticidad =  $K_4$

La elasticidad del sistema estructural en su conjunto es  $K$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4}$$

$K$  Variará según sea el durmiente de concreto o de madera. La deformación del durmiente de madera será mayor que la de concreto.



Al deformarse menos el durmiente de concreto, en relación con el de madera, el primero transmite una mayor fuerza y esto permite un mayor espaciamiento entre ellos.

El esfuerzo que absorbe el durmiente, depende de la elasticidad de todo el conjunto y de su separación. Tomando en cuenta lo anterior; -- El factor de Distribución DF nos permite realizar el cálculo de la fuerza de diseño.

$$F \text{ Diseño} = F \text{ Dinámica} \times DF$$

Dado que

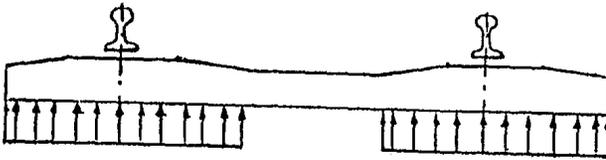
$$F \text{ Dinámica} = F \text{ Estática} \times IF$$

$$F \text{ Diseño} = F \text{ Estática} \times IF \times DF$$

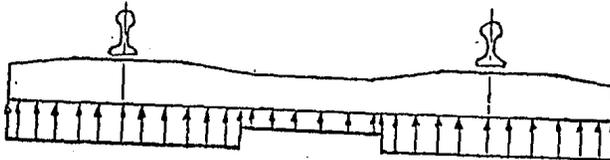
#### ESFUERZOS DE UN DURMIENTE EN SERVICIO

Considerando al durmiente como una viga rígida, las cargas actuantes se transmiten al durmiente a través de una placa de hule que las distribuye, provocando una reacción por parte del balasto. Consideramos 4 casos.

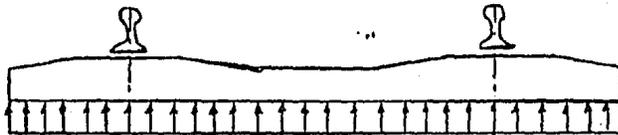
- 1.- Poco después de la colocación del durmiente. La compactación del balasto es prácticamente nula y por consecuencia la reacción de esta capa se concentra en la parte inferior del asiento del riel.



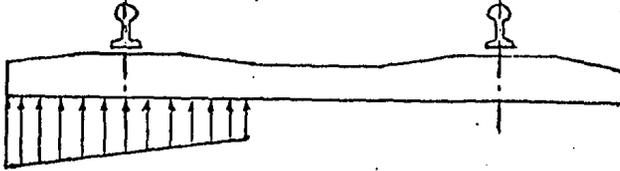
- II .- Después del paso de cierto volúmen de tráfico. El balasto alcanza una compactación normal y las condiciones del servicio prestado -- por el durmiente es también normal. La reacción bajo el asiento - del riel es  $P$  y a la mitad del durmiente  $P/2$



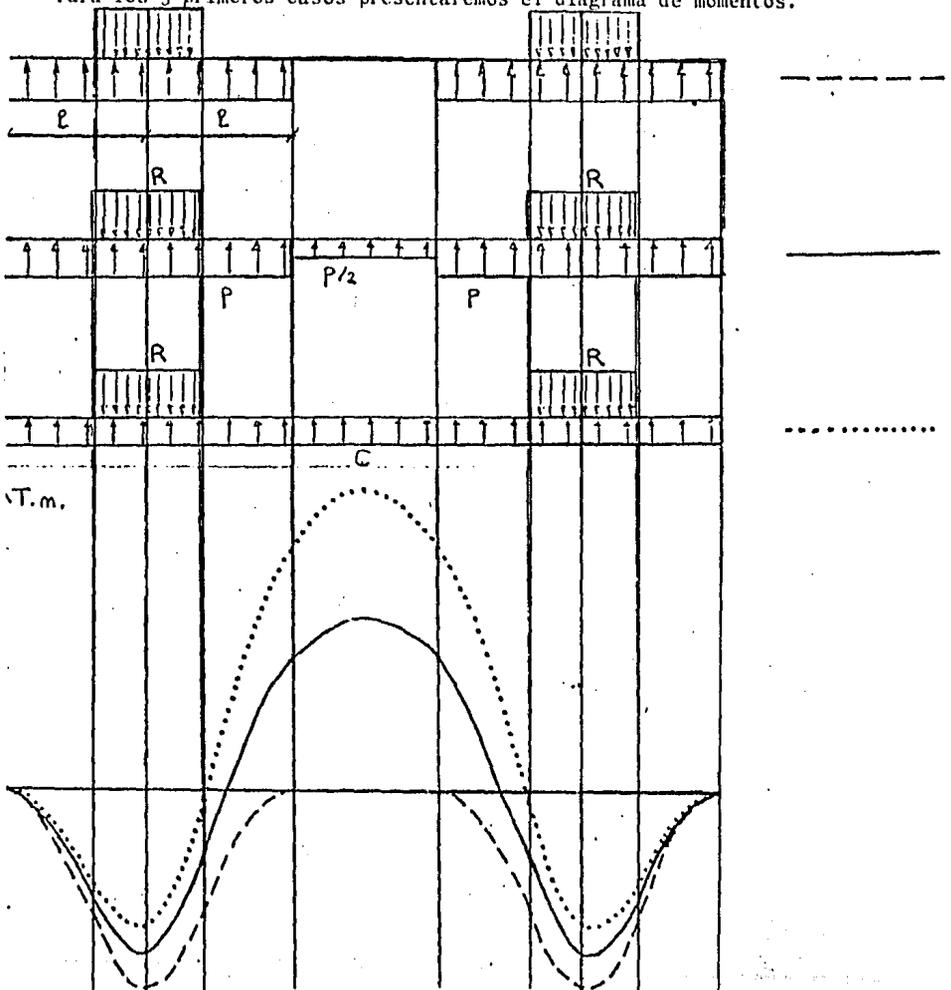
- III.- Después de un servicio intensivo de la vía, sin el adecuado mantenimiento. El balasto está fuertemente compactado y la reacción es tá repartida uniformemente a lo largo del durmiente.



- IV.- La reacción del balasto en curvas. Normalmente la velocidad disminuye y el efecto dinámico también. En este caso las fuerzas laterales son más críticas y es el anclaje quien es sometido a un trabajo más severo.



Para los 3 primeros casos presentaremos el diagrama de momentos.



Existe un momento máximo positivo en el apoyo del riel y un momento máximo negativo en el centro del durmiente. La fibra extrema inferior al asiento del riel trabajará a tensión y a la vez la fibra extrema superior al centro del durmiente.

#### CALCULO DE LOS ESFUERZOS EN EL DURMIENTE DE CONCRETO

Hemos visto que se presentan dos momentos máximos pero con signo contrario. En el asiento del riel el momento flexionante es positivo, por lo que la colocación del centro de preesfuerzo debe estar ubicado por debajo del eje neutro de la sección.

En el centro del durmiente existe un momento flexionante negativo, entonces la colocación del centro de preesfuerzo debe ir por arriba -- del eje neutro.

**RIEL** La función de este elemento es la de soportar y guiar el tránsito del equipo ferroviario y su respectiva carga, cuyas ruedas se manejan sobre la vía. Son dos los rieles y se presentan en forma paralela a una determinada distancia entre sus costados interiores denominado escantillón. El riel requiere de una máxima precisión para su alineación en planta y la nivelación de su perfil longitudinal, asimismo exige adecuadas sobreelevaciones para permitir altas velocidades con suficiente regularidad a un tráfico que lo somete a grandes esfuerzos. Este elemento requiere de sólidas fijaciones para mantenerse sobre el durmiente, a la vez que sirven para -- amortizar los impactos y vibraciones que se presentan.

En su parte superior, el riel presenta un hongo o cabeza que funciona como superficie de rodamiento, esta expuesto a un severo desgaste -- hasta una primera etapa en el que el riel pasa de nuevo a seminuevo. Posteriormente pasa a ser un riel usado y es aprovechado en vías de menor importancia hasta que se deteriorará completamente para su función ferroviaria.

Su vida útil depende de varios factores tales como el tráfico, - las velocidades de tránsito, el número y calidad de los durmientes, el mantenimiento y sobre todo del impacto y vibración a la que es expuesto. El impacto producido por las ruedas del vehículo en los extremos del riel las aplana produciendo deformaciones que con el tiempo llegan a ser críticas.

En base a su longitud existen 3 diferentes tipos de riel.

### **I Riel ordinario**

Es aquel cuya longitud varía de 10.050 m. a 11.887 m. en cual---quier calibre. Para formar la vía se unen entre sí por medio de planche--las.

### **II Riel largo**

Su longitud varía de 23.77 m. a 35.66 m. o más. Se obtiene al -soldar 2 o más rieles ordinarios.

### **III Riel continuo (largos tramos de riel soldado L.R.S.)**

Su longitud varía de 250 a 1200 m, o más. Se obtiene al soldar--por cualquier procedimiento varios tramos de riel largo.

Otro parámetro de clasificación del riel es su calibre. El cali--bre indica el peso promedio del elemento, por unidad de largo, generalmen--te se expresa en libras por yarda.

El riel esta constituido por acero. Los elementos químicos que--forman el acero son el carbono, el manganeso, el silicio, el fósforo y el--azufre. La función de algunos de estos elementos es la siguiente. El car--bono le proporciona la dureza, por ello en los tramos de riel en que el --desgaste es más severo por ejemplo las curvas, se puede aumentar su propor--

ción. El manganeso dá la tenacidad y el silicio facilita las reacciones químicas que se presentan en el proceso de fabricación del acero.

En México el riel más usado es el tipo Vignole. En un corte transversal se asemeja a una viga "T" invertida. El patín mayor es la base del riel y el hongo equivaldría al patín menor y se ubica en la parte superior, el alma une estas dos partes.

### SOLDADURA

Para garantizar la seguridad del servicio con velocidades máximas admisibles y peso máximo en los (L.R.S.) es necesario que:

- El terraplen no este sujeto a deformaciones y no existan cantidades fuertes de arcilla en el balasto. La sección del balasto este consolidado hasta la cabeza del durmiente y que sea permeable.
- En México que las curvas tengan un máximo comprendido de 12° y 14° con un radio de giro de 501.89 m.
- Los durmientes sea cual sea el material del cual esten formados (concreto armado, protensado, postensado o de madera) esten colocados con un espaciamiento adecuado.
- El calzado y la conservación de la vía deben mantener el perfil transversal y longitudinal de la vía.

El aumento de la longitud del riel por medio de la soldadura puede lograrse por diversos métodos. Entre otros podemos citar el proceso Aluminotérmico, el de arco eléctrico, el oxiacetilénico.

### SOLDADURA ALUMINOTERMICA

Se realiza por medio de la fusión. Consiste en vertir un metal en estado líquido conocido como el metal de aportación, con una temperatura comprendida entre 2000 y 2500°C sobre un molde refractario que rodea los extremos de los rieles que se van a unir. La elevada temperatura --- transmitida por el metal de aportación funde los extremos dando lugar a la soldadura. Generalmente antes de realizar la operación se calientan los extremos del riel a una temperatura aproximada a los 900°C (color rojo cereza claro).

El metal de aportación se obtiene de la reacción del óxido de -- hierro y aluminio los cuales pulverizados, reaccionan a 1200°C. La reacción química es de carácter exotérmico y se obtiene un acero de gran resistencia y escoria de óxido de Aluminio:  $FeO + Al_2 = Al_2O_3 + 2Fe$ .

Realizada la soldadura se corta el excedente y por esmerilado se rehace el perfil del hongo del riel de la zona soldada.

### SOLDADURA ELECTRICA

Este procedimiento se basa en el calentamiento de los extremos - del riel por medio de corriente eléctrica y aplicación de presión. En los extremos de los rieles se colocan dos conductores conectados respectivamente a dos polos eléctricos. Por medio de un corto circuito controlado e intermitente, se calientan y fusionan. Este procedimiento es eficaz sin embargo el equipo usado es bastante costoso y su transportación no es sencilla.

### SOLDADURA OXIACETILENICA

Por medio de la flama oxiacetilénica se calientan los extremos - de los rieles a soldar. La unión se realiza a una temperatura inferior al

punto de fusión del acero. Desde el punto de vista metalúrgico se presenta una defusión y recristalización del acero mientras se encuentra en estado sólido.

El procedimiento más empleado es el aluminotérmico. Para que una soldadura este bien realizada es necesario que no aparezca ningun defecto ni porosidad en la zona de unión del metal fundido con el laminado ni en las uniones del alma con el hongo y el patín. Ninguna incrustación de escoria corindón o de arena vitrificada en el hongo del riel, ninguna grieta, en toda la superficie del acero fundido y ninguna deformación en el reborde.

Para garantizar la correcta realización del trabajo, se realizan pruebas que detecten eventuales fallas y aseguren, la resistencia y calidad de la soldadura.

Un fenómeno que se presenta en todo riel es el de la dilatación. Debido a la variación de la temperatura en riel modifica su longitud. Se alarga proporcionalmente al esfuerzo de tensión o bien se acorta bajo los esfuerzos de compresión.

En el riel ordinario, las juntas funcionan como válvulas y evitan contracciones elevadas.

Por su parte los L.R.S. necesitan dispositivos especiales ya que las contracciones alcanzan valores elevados debido a su mayor longitud. Los posibles riesgos que se presentan son fundamentalmente la ruptura y el pandeo.

Las dilataciones son aceptables en cierto rango. En los L.R.S. por ejemplo uno de mil metros de largo, existen tres partes. Los dos extremos que tienen una dilatación parcialmente contraria y la parte central que no sufre variaciones de longitud.

La parte central de 800 m. de longitud. El movimiento del riel es nulo y las contracciones son máximas, aunque esten equilibradas.

Los dos extremos de 100 m. de longitud, denominadas zonas de respiración, en donde las contracciones son variables y pueden moverse los rieles en una mayor proporción cuanto más se acerquen a la junta de dilatación. La longitud de estas zonas de respiración varía de acuerdo con la resistencia de la vía a su deslizamiento longitudinal, el área de la sección transversal de los rieles y a la variación de la temperatura.

El cálculo del alargamiento de los L.R.S. se realiza en función del coeficiente de dilatación lineal del riel, de su longitud y de las variaciones de temperatura.

En la colocación de los L.R.S. intervienen distintos tipos de temperatura.

#### TEMPERATURA DE COLOCACION

Es la temperatura existente en los rieles al momento de fijarlas al durmiente. Lo ideal es una temperatura de equilibrio entre las temperaturas máximas y mínimas que se presentan en la zona. De modo general en México las temperaturas varían de 10°C a 60°C pudiéndose emplear como temperatura de equilibrio 25°C. La tolerancia es de  $\pm 11^\circ\text{C}$  esto es la temperatura de colocación oscila entre 14°C y 36°C.

#### TEMPERATURA DE LIBERACION

Cuando un L.R.S. es colocado a una temperatura distinta a la de equilibrio, se requiere repetir la fijación a una temperatura próxima a ella. La tolerancia es de  $\pm 7^\circ\text{C}$  para la fijación definitiva.

## RIEL EMPLANCHELADO

En la vía ordinaria se emplea la planchuela como elemento de --- unión entre los extremos de los respectivos rieles. De modo paralelo a la evolución de la vía ferrea la planchuela ha tenido su propio desarrollo, - los primeros diseños consistían simplemente en 2 bloques de madera atornilladas en los extremos del riel. Los últimos tipos de planchuela de basan en la tecnología de los adhesivos que ha logrado una alta eficiencia. El uso del pegamento en la unión de los rieles requiere de una cuidadosa aplicación, similar al manejo de la soldadura, sin embargo los resultados obtenidos lo justifican. Una correcta aplicación produce una buena sujeción y apoyo en los extremos del riel, una mayor absorción de los impactos producidos por las ruedas y una menor oscilación.

La planchuela debe soportar las fuertes cargas transmitidas por los ejes de rueda y ofrecen una continua superficie de rodamiento. En la actualidad la planchuela es de acero.

Desde el nacimiento de la vía ferrea, hasta nuestros días el peso de los diversos tipos de locomotora ha variado considerablemente entre 50 y 60 ton. para las cargas transmitidas por las ruedas, relativamente no han cambiado mucho, han oscilado de 30 000 libras = 13 607 kg a 40 000 libras = 18 143 kg.

El estudio mecánico del riel y en particular de la planchuela es bastante complejo e intervienen factores de difícil cuantificación, sin embargo al analizarla es necesario tomar en cuenta 4 aspectos fundamentales.

- I El esfuerzo producido por el frenado o aceleración de las locomotoras.
- II Las contracciones y expansiones térmicas producidas por los cambios-

de temperatura. El efecto de las elongaciones o acortamientos, resultan desastrosos para la planchuela ya que provocan una fatiga del material que acorta sustancialmente su vida útil.

- III Las cargas laterales que, aunque no se considera que provoquen fallas hacen trabajar fuertemente a la planchuela. Estudios recientes indican que en zonas curvas este tipo de carga alcanza 50 000 LB = 22 680 kg.
- IV Esfuerzos longitudinales provocadas por el movimiento ondulatorio del riel. La carga de los ejes de rueda provoca deflexiones en el riel y en su movimiento que tiende a ser ondulatorio. Este movimiento ondulatorio provoca en el riel y en la planchuela esfuerzos en 2-direcciones; una es hacia abajo de las ruedas y la otra hacia arriba.

La vía ordinaria puede recurrir al empleo de la combinación soldadura planchuela como elementos de unión. La soldadura une 2 o 3 tramos de riel ordinario y posteriormente es la planchuela quien realiza la unión.

#### CALCULO DE ESFUERZOS EN EL RIEL Y LA PLANCHUELA

Las expresiones que se emplean para la realización del cálculo están basados en los trabajos de experimentación y laboratorio del American Railway Engineering Association AREA, American Society of civil Engineers ASCE y del "Comite especial de esfuerzos en la vía".

Momento flexionante máximo en el riel bajo la carga de una sola-rueda  $M_o$  (Libras Pulgadas)

$$M_o = 0.318 P X_1$$

P = Carga de la rueda en libras

$X_1$  = Distancia desde la rueda de carga hasta el punto de momento flexionante cero en pulgadas. Su valor depende de la rigi-

dez y de la resistencia del riel, esta dado por la siguiente expresión:

$$X_1 = \frac{11}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{u}}$$

En que:

- E = Modulo de elasticidad del riel 30 000 Libras/pulgadas<sup>2</sup>  
 I = Momento de Inercia del riel en pulgadas<sup>4</sup>  
 U = Modulo de resistencia del riel en Libras/pulgada. Representa las libras por pulgada lincal de riel que se requieren para averiar al propio riel una pulgada. Experimentalmente se han determinado los siguientes valores:

Sección del riel	U
136	3 000
115	3 000
100	1 500
90	1 250

La variación de los valores de "U" entre 1000 y 3000 no tiene un efecto considerable en los esfuerzos del riel, variandolas en 10%.

Cuando 2 o más ejes de rueda se encuentran poco espaciados, el momento flexionante bajo una sola rueda es influenciada por los demás. El efecto relativo de las ruedas cercanas al punto bajo la rueda en cuestión se determina con la tabla de coeficientes de los momentos flexionantes.

Se emplea la expresión  $\frac{X}{X_1}$  para cada rueda en que X = Distancia - de una sola rueda a los demás.

## FACTOR DE IMPACTO IF

Experimentalmente se ha adaptado un valor de 1 milla por hora de velocidad para ruedas de 33 pulgadas = 83.82 cm. y que varía inversamente-según sea el diámetro de la rueda. Para 38 pulgadas = 96.52 cm. El valor de IF es de 0.87 por milla, por hora de velocidad.

Los valores de IF son consecuencia de haber observado una tendencia de aumento de esfuerzos con relación al aumento de velocidad.

## ESFUERZOS EN LA PLANCHUELA

Alrededor de 1980 el Dr. A. H. Talbot trabajando para la Asociación de Ferrocarriles Americanos dedujo las bases teóricas para el estudio y diseño de las planchuelas que hoy día se utilizan.

Tomando como base las especificaciones del AREA la planchuela debe tener una resistencia de  $100\ 000\ \text{LB/Pulg}^2 = 7084\ \text{kg/cm}^2$  y alcanzar el esfuerzo de fluencia a  $70\ 000\ \text{LB/pulg}^2 = 4959\ \text{kg/cm}^2$  (Estos datos han sido comprobados en el laboratorio). Si no se presentan esfuerzos anormales el límite de resistencia a la fatiga de una planchuela debe ser menor que  $50\ 000\ \text{LB/pulg}^2 = 3542\ \text{kg/cm}^2$  con una variación del momento actuante de nulo a máximo.

Las mediciones realizadas indican que existe una relación de esfuerzos aproximada entre la compresión y la tensión. Los esfuerzos de compresión son la mitad de los que se presentan a tensión. Si la planchuela es sometida a una fuerza de tensión que produzca un esfuerzo de  $50\ 000\ \text{LB/pulg}^2 = 3542\ \text{kg/cm}^2$  o bien a una fuerza de contracción que provoque un esfuerzo de  $25\ 000\ \text{LB/pulg}^2 = 1771\ \text{kg/cm}^2$  el material fallará con 1000 000 de ciclos de carga, siendo el límite de su resistencia a la fatiga  $35\ 000\ \text{LB/pulg}^2 = 2480\ \text{kg/cm}^2$ .

Experimentalmente se ha comprobado que los esfuerzos de diseño equivalen a más de 650 veces los límites de carga que inducen la fluencia. Tomando como base un esfuerzo de fluencia de  $70\ 000\ \text{LB/pulg}^2$ , el límite del esfuerzo de diseño será de  $45\ 000\ \text{LB/pulg}^2 = 3188\ \text{kg/cm}^2$ .

El AREA dictamina como momentos resistentes para las diferentes planchuelas según el tipo de riel, los siguientes valores:

Tipo	I/C (pulg3)	Momento (pulg libra)
90 RA	6.66	299 700
100 RE	8.02	360 900
115 RE	8.50	382 500
132 RE	11.30	508 500
140 RE	13.00	585 000

El trabajo de laboratorio no siempre coincide con los resultados obtenidas en las condiciones reales de servicio. La planchuela tipo polypor ejemplo 115 RE utiliza poliuretano para el aislamiento y una alma de acero tratado total y termicamente. Bajo momentos de 40 000 libras pulg. positivo (Deflexión hacia abajo de las ruedas) y 200 000 libras pulg. negativo, en ciclos de 2 000 000, siendo de 44 400 Libras = 20 139.5 kg. la carga de las ruedas y el tramo de planchuela de 36 pulg = 91.44 cm. La planchuela falla en el laboratorio, pero no en condiciones de servicio.

El esfuerzo calculado para esta planchuela bajo un momento actuante de 350 000 Lb-Pulg. es de  $47\ 059\ \text{Lb/pulg}^2 = 3334\ \text{kg/cm}^2$ , que excede la resistencia a la fatiga de  $35\ 000\ \text{Lb/pulg}^2 = 2480\ \text{kg/cm}^2$ , explicandose la falla en el laboratorio, pero no la efectividad en el servicio.

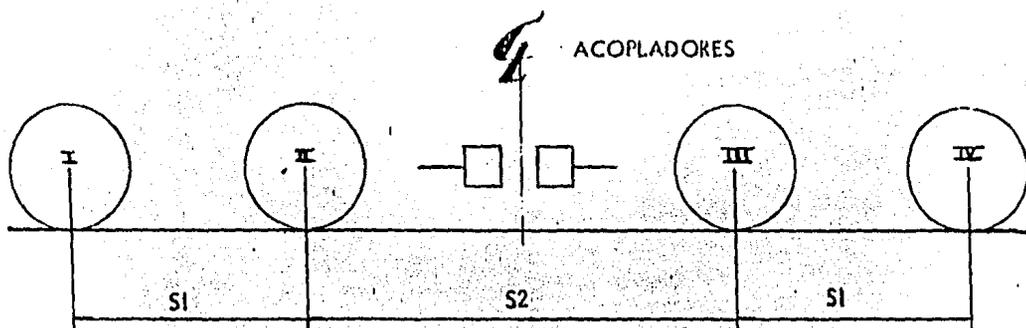
Para analizar este fenómeno en 1970 se realizarón pruebas en condiciones reales de servicio (Leabord Coast Lines Railroad). Se observó que únicamente un pequeño porcentaje de las ruedas que pasaron sobre las -

planchuelas produjeron esfuerzos máximos. De un total de 4084 ruedas que habían pasado sólo el 0.12% produjo esfuerzos de 0 a 50 000 Lb/pulg<sup>2</sup> = 3542 kg/cm<sup>2</sup>, o.86% de 0 a 40 000 Lb/pulg<sup>2</sup> = 2834 kg/cm<sup>2</sup>. De 4 000 ruedas sólo 40 produjeron esfuerzos superiores a los límites de diseño. Posteriormente se regreso al trabajo de laboratorio produciendo las pruebas de campo empleandose iguales límites de esfuerzo e iguales ciclos en cada límite de esfuerzo que la planchuela, experimentaría durante 10 años, es decir el equivalente a 300000000 de toneladas brutas y no se presento falla alguna.

Para correlacionar el límite de resistencia de la planchuela de acero en servicio y en laboratorio se ha intentado establecer ciertas normas para el diseño de planchuelas de 90 a 140 RE. Se consideró la carga estática igual para todos los tamaños de planchuela, pero los momentos flexionantes estáticos y los momentos flexionantes máximos disminuyen a medida que disminuye el tamaño del riel.

Como las pruebas de laboratorio y de servicio, realizadas en la planchuela para el riel 115 RE, demostraron que el momento de 350 000 Libras-Pulgadas, con un esfuerzo del elemento de 45 000 Lb/ Pulg = 3188 kg/cm<sup>2</sup> es eficaz para un buen rendimiento de la vía, este valor se empleará para el diseño de todo tipo de planchuelas.

#### ESFUERZOS EN EL RIEL



RIEL (LBS)	MODULO DE LA VIA	CARGA	ESPACIAM.		RUEDAS			MOMENTO	ESFUERZO
			S1	S2	DIAMETRO	VELOC.	IMPAC.	FLEXOR DEL RIEL	FLEXOR DEL RIEL
136	3000	40,000	72	108	40	80	65	485,563	20,316
115	3000	35,000	66	96	40	70	56	361,000	20,000
100	1500	32,500	66	84	38	50	44	299,000	21,800
90	1250	30,000	66	84	38	50	44	276,000	21,800

Para realizar el cálculo del momento flexionante en el riel y de su respectivo esfuerzo debemos contar con los siguientes datos.

#### Propiedades geométricas del riel

Calibre  
Modulo de la vía (u)  
Modulo resistente de la (I/C)  
Momento de Inercia (I)  
Distancia del eje neutro a la fibra superior (C)  
Modulo de Elasticidad del acero (E)

#### Propiedades del equipo rodante

Diámetro de la rueda  
Carga transmitida por la rueda  
Espaciamento entre los ejes de rueda considerados  
Velocidad de tránsito (V)  
Factor de Impacto IF

#### Calculo del momento flexionante y esfuerzo en el riel

Calibre de riel 136

Diámetro de la rueda 40 pulg.

u = 3000 LB x pulg. pulg.

Carga = 40 000 LB

I/C = 23.9 pulg.<sup>3</sup>

S<sub>1</sub> = 72 pulg. S<sub>2</sub> = 108 pulg.

I = 94.9 pulg.<sup>4</sup>

V = 80 m p h

C = 3.97 pulg.

IF = 65%

E = 30 000 000 Lb/pulg<sup>2</sup>.

De acuerdo a las formulas expuestas:

$$M_o = P^4 \sqrt{\frac{EI}{64u}} = P^4 \sqrt{\frac{30.000\ 000 \times 94.9}{64 \times 3000}}$$

$$M_o = 11.03 P$$

$$X_1 = \frac{11}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{U}} = \frac{11}{4} \sqrt[4]{\frac{4 \times 30\,000\,000 \times 94.9}{3\,000}}$$

$$X_1 = 34.64$$

### Momento flexionante bajo la rueda II

Coefficientes de Momentos Flexionantes en el riel debido a la cercanía de ejes vecinos (Tabla 1)

Efecto de	I	$X = \frac{72}{X_1} = \frac{72}{34.64}$	=	2.08	- 0.207
Efecto de	II	$X = \frac{0}{X_1} = \frac{0}{34.64}$	=	0	1.000
Efecto de	III	$X = \frac{108}{X_1} = \frac{108}{34.64}$	=	3.12	-0.122
Efecto de	IV	$X = \frac{168}{X_1} = \frac{168}{34.64}$	=	4.84	0.004

Coefficiente total = 0.667

Momento Flexionante

Momento Estático =  $0.667 \times 11.03 \times 40\,000 = 294\,280$  Lb - Pulg.

Momento de Impacto =  $294\,280 \times 0.65 = 191\,283$  Lb - Pulg.

Momento Flexionante =  $485\,563$  Lb - Pulg.

Esfuerzo del Riel  $485\,563 \div 23.9 = 20\,316$  Lb/pulg<sup>2</sup>

Coefficientes de Momentos Flexionantes en el Riel, Contenidos en la Página 070 del Volumen 19 de la Asociación Americana de Ingenieros de Ferrocarriles

$x/x_1$	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
00	1.000	.985	.970	.955	.940	.925	.910	.895	.880	.865
.10	.851	.837	.823	.803	.795	.781	.766	.752	.750	.724
20	.709	.696	.683	.670	.657	.644	.631	.610	.605	.592
30	.578	.567	.556	.544	.533	.522	.510	.499	.488	.476
.40	.465	.455	.445	.435	.425	.416	.405	.395	.385	.375
50	.365	.356	.347	.338	.329	.320	.311	.292	.293	.284
.60	.275	.267	.259	.251	.243	.235	.227	.219	.211	.203
70	.196	.189	.182	.175	.168	.161	.154	.147	.140	.133
.80	.125	.119	.112	.106	.099	.093	.086	.080	.073	.067
90	.060	.054	.040	.042	.036	.030	.024	.018	.012	.006
1.00	.000	-.005	-.010	-.015	-.020	-.025	-.030	-.035	-.040	-.045
1.10	-.050	-.055	-.058	-.062	-.066	-.070	-.074	-.078	-.082	-.086
1.20	-.090	-.093	-.096	-.100	-.103	-.106	-.110	-.113	-.116	-.120
1.30	-.123	-.125	-.128	-.130	-.133	-.135	-.138	-.140	-.143	-.145
1.40	-.147	-.149	-.151	-.153	-.155	-.157	-.159	-.161	-.163	-.165
1.50	-.167	-.169	-.170	-.172	-.173	-.175	-.176	-.178	-.179	-.181
1.60	-.183	-.184	-.185	-.186	-.187	-.188	-.190	-.191	-.192	-.193
1.70	-.195	-.196	-.197	-.197	-.198	-.199	-.199	-.200	-.201	-.201
1.80	-.202	-.203	-.203	-.204	-.204	-.205	-.205	-.206	-.206	-.207
1.90	-.207	-.207	-.208	-.208	-.208	-.208	-.208	-.208	-.208	-.208
2.00	-.208	-.208	-.208	-.208	-.208	-.207	-.207	-.207	-.207	-.207
2.10	-.206	-.206	-.206	-.205	-.205	-.205	-.204	-.204	-.204	-.203
2.20	-.203	-.202	-.201	-.201	-.200	-.200	-.199	-.199	-.198	-.198
2.30	-.197	-.196	-.195	-.195	-.194	-.194	-.193	-.193	-.192	-.192
2.40	-.191	-.191	-.190	-.189	-.188	-.187	-.187	-.186	-.185	-.184
2.50	-.183	-.182	-.181	-.180	-.179	-.178	-.178	-.177	-.176	-.175
2.60	-.174	-.173	-.172	-.171	-.170	-.169	-.169	-.168	-.167	-.166
2.70	-.165	-.164	-.163	-.162	-.161	-.160	-.159	-.158	-.157	-.155
2.80	-.155	-.154	-.153	-.152	-.151	-.150	-.150	-.148	-.147	-.146
2.90	-.145	-.144	-.143	-.142	-.141	-.140	-.139	-.138	-.137	-.136
3.00	-.134	-.133	-.132	-.131	-.130	-.129	-.128	-.127	-.126	-.125
3.10	-.123	-.122	-.121	-.120	-.119	-.118	-.117	-.116	-.115	-.114
3.20	-.112	-.111	-.110	-.109	-.108	-.107	-.106	-.105	-.104	-.103
3.30	-.101	-.100	-.099	-.098	-.097	-.096	-.095	-.094	-.093	-.092
3.40	-.080	-.080	-.080	-.080	-.080	-.080	-.080	-.080	-.080	-.080
3.50	-.080	-.079	-.078	-.077	-.076	-.076	-.075	-.074	-.073	-.072
3.60	-.072	-.071	-.070	-.069	-.068	-.068	-.067	-.066	-.065	-.064
3.70	-.064	-.063	-.062	-.061	-.060	-.060	-.059	-.058	-.057	-.056
3.80	-.056	-.055	-.054	-.054	-.053	-.052	-.052	-.051	-.050	-.050
3.90	-.049	-.048	-.047	-.047	-.046	-.046	-.045	-.045	-.044	-.044
4.00	-.043	-.042	-.041	-.041	-.040	-.039	-.039	-.038	-.037	-.037
4.10	-.036	-.036	-.035	-.035	-.034	-.033	-.033	-.033	-.032	-.032
4.20	-.031	-.031	-.030	-.030	-.029	-.029	-.028	-.028	-.027	-.027
4.30	-.026	-.026	-.025	-.025	-.024	-.024	-.023	-.023	-.022	-.022
4.40	-.021	-.021	-.020	-.020	-.019	-.019	-.018	-.018	-.017	-.017
4.50	-.016	-.016	-.015	-.015	-.014	-.014	-.014	-.013	-.013	-.012
4.60	-.012	-.012	-.011	-.011	-.010	-.010	-.010	-.009	-.009	-.008
4.70	-.008	-.008	-.007	-.007	-.007	-.006	-.006	-.006	-.005	-.005
4.80	-.005	-.005	-.004	-.004	-.004	-.003	-.003	-.003	-.002	-.002
4.90	-.002	-.002	-.002	-.002	-.002	-.001	-.001	-.001	-.001	-.001
$x_1$	00	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
6.00	.000	.002	.004	.006	.007	.008	.009	.009	.009	.008
6.00	.008	.008	.008	.008	.008	.007	.007	.007	.006	.006
7.00	.006	.006	.005	.005	.005	.004	.004	.004	.003	.003

## SUJECION DOBLEMENTE ELASTICA

La vía elástica se fundamenta en el equilibrio de la vía a través del anclaje que ofrece el peso de los durmientes y su empotramiento dentro del balasto, con las tendencias de su movimiento provocados por la dilatación o contracción de L.R.S. a consecuencia de la variación de temperatura. Este tipo de vía permite que los incrementos o decrementos longitudinales del riel sean convenientemente repartidos con puntos de dilatación especiales.

Debido al anclaje de los durmientes en el balasto y la fijación del riel al durmiente por medio de las grapas elásticas RN, sólo se posibilita la variación longitudinal del riel en los extremos y en dirección a ellas, la parte central permanece inmóvil.

La junta de dilatación esta formada por 2 rieles en forma de agujas que se deslizan entre sí, van guiadas de tal modo que se mueven dentro del alineamiento de la vía.

La diferencia esencial entre la fijación elástica del riel al durmiente con la fijación rígida consiste en que la primera permite que con el paso de las cargas ferroviarias se produzcan pequeñas oscilaciones verticales del riel amortiguandose de esta manera el impacto y la vibración.

Las grapas elásticas deben funcionar como muelles para que las oscilaciones verticales del riel se verifiquen sin juego entre el durmiente y el riel. Si las grapas no actuaran como muelles la deformación elástica desaparecería ya que trabajarían como una fijación rígida.

La sujeción doblemente elástica esta integrada por dos elementos elásticos. El primero de ellos lo constituyen las placas acanaladas de hule, que van colocadas entre el patín del riel y el durmiente. La finali-

dad de estas placas es la de absorber las vibraciones.

Por otra parte las grapas y grapillas elásticas construídas de acero al cromomanganeso conforman el segundo elemento de la fijación doblemente elástica. Junto con los pernos de anclaje o "tornillo-tirafondo" fijan elásticamente el riel al durmiente firmemente, pero le permiten movimientos elásticos.

Los accesorios que se utilizan en la colocación de este tipo de sujeción con el cojinete amortiguador, la tuerca, casquillo aislante y perno. Cuando el durmiente es de madera se emplea la grapilla elástica, cuando lo es de concreto se utiliza la grapa elástica.

#### VIA CLAVADA

La sujeción del riel al durmiente, en este tipo de vía esta constituido por clavos y una placa de fierro colocada entre la base del riel y la parte superior del durmiente.

El durmiente de madera es capaz de aceptar al clavo y proporcionarle una gran fuerza de unión. En algunos casos la cabeza del clavo se oxida antes que se le pueda extraer. En gran medida la resistencia a la extracción esta en función del método usado para la penetración. Esta puede realizarse a golpes por medio de marro, empujando el clavo en un pequeño barreno cuyo diámetro es ligeramente menor, o bien con este último sistema atornillado el elemento de penetración y sujeción. En la actualidad la operación es realizada por máquinas, con el objeto de no causarle ningún daño al durmiente de madera.

Un clavo hincado resiste la mitad de la fuerza de extracción de un clavo empujado y la cuarta parte de un tirafondo.

La placa de fierro solidamente clavada al durmiente de madera --

sirve para aumentar considerablemente el área de contacto entre el riel y durmiente distribuyendo mejor la carga. Por otra parte también sirve para sujetar con la cabeza del clavo la base del patín del riel al resto de la estructura férrea.

La situación más crítica para el clavo se presenta en las curvas. En ellas la fuerza lateral tiende a volcar el riel y este a su vez intenta extraerlo con una fuerza de tensión oscilante entre 1.2 y 1.5 ton. por cada eje de rueda. Estos valores aumentan si las condiciones de alineamiento y nivelación no son correctas. La vía clavada tiene una alta rigidez.- El paso de las cargas provocan en el clavo la presencia de un esfuerzo cor tante y su gradual aflojamiento que lo inutiliza cuando parcialmente es ex traído 2 milímetros a partir de su posición original.

## CAPITULO III

### CALCULO DE PRESUPUESTOS

La Vía México-Esperanza forma parte de la línea "S" de los Ferrocarriles Nacionales de México en la División del Mexicano. Inicia en la terminal del Valle y culmina en el Puerto de Veracruz, cuenta con una longitud de 419.265 kilómetros y cruza los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Cuenta con 3 Distritos de Supervisión y en base al horario No. 4 que rige esta línea, otras 3

#### DISTRITOS DE SUPERVICIOS

##### 1.- Apan

De Xalostoc (0+000) a Apizaco (143+000) cuenta con riel de fabricación norteamericana con calibre de 112.3 RE laminado en 1953 y 1956.

##### 2.- Maltrata

De Acocotla (143+000) a Nogales (290+000) cuenta con el mismo tipo de riel que en el Distrito anterior hasta Esperanza (244+365) a partir de donde cambia el riel a calibre de 100 ARA laminado en 1966 de fabricación canadiense.

##### 3.- Paso del Macho

De Orizaba (290+000) a Veracruz (419+265). Existen en este tramo 3 tipos de riel 100 ARA, 112.3 RE y 110 RE su ubicación varía. La fecha de laminación es muy variable dependiendo del número de Sección del Distrito, las hay de 1925 riel 110 RE, 1941 y 1947 riel 112.3. RE y finalmente 1966, 1964 y 1963 para riel 100 ARA.

A lo largo de la línea "S" tenemos 168+847 kilómetros de vía con riel 100 ARA, 1+031 kilómetros de vía con riel 110 RE, 251+285 kilómetros de vía con riel 112.3 RE. Obteniendo un total de 421+190 kilómetros de vía.

La vía México Esperanza (245+000) atraviesa el primer distrito y parte del segundo. Prácticamente sólo tiene riel americano calibre 112.3 RE laminado en su mayor parte en 1956. En Esperanza existe un tramo de 635 m. de riel canadiense 100 ARA laminado en 1966.

Por su parte el horario No.4 define los siguientes distritos:

1.- Distrito Tenayuca

Abarca a partir del empalme División Mexicano a Teotihuacan, su longitud es 44.8 km.

2.- Distrito Apizaco

De Teotihuacan a Esperanza su longitud es de 200.2 km.

3.- Distrito Orizaba

De Esperanza a Veracruz con una longitud de 174.3 km.

La rehabilitación de la vía México Esperanza se llevará a cabo con el riel de las siguientes características.

Calibre	115 LB/yd	=	57.047	3490 kg/m
Hongo		=	2-23/32	in
Altura		=	6-5/8	in
Patín		=	5-1/2	in
Alma		=	5/8	in
Extremo del riel				
al centro primer taladro		=	2-1/2	in
Longitud del riel		=	11.8872	metros
Peso		=	678.133	kilogramos
Número de pieza por km.		=	168.25	
Peso total del riel x km.		=	114.095	kg.





Para realizar el cálculo del presupuesto de la vía elástica, consideráramos la utilización de durmientes de madera en los tramos cuyo grado de curvatura sea mayor a 4°. Esto se debe al mejor comportamiento mecánico a tensión de este material en relación al concreto, sin embargo de -- las 74 curvas existentes en el tramo México-Esperanza la de mayor grado de curvatura es de 3° 50. El avance anual de rehabilitación de vía es considerado de 80 kilómetros.

Los conceptos que intervienen en el cálculo del costo por kilómetro de rehabilitación con riel nuevo son 4.

#### 1 Operarios de la maquinaria

Concepto	Cantidad	Sueldo mensual 1986. \$	Sueldo mensual con prestaciones 40.4% \$	Total \$	Total x km. \$
1) Grúa de vía	1	56 994.8	73 000.7	876 008.4	10 950.1
2) Ayudante	1	45 702.8	64 166.7	770 000.8	9 625.0
3) Multicalzadora Niveladora	1	58 847.1	82 621.3	991 455.9	12 393.2
4) Ayudante	1	54 202.2	76 099.9	913 198.7	11 415.0
5) Alisadora de vía	1	58 847.1	82 621.3	991 455.9	12 393.2
6) Ayudante	1	59 402.2	83 400.7	1000 808.3	12 510.1
7) Reguladora de balasto	1	54 265.9	76 189.3	914 271.9	11 428.4
8) Ayudante	1	45 702.8	64 166.7	770 000.8	9 625.0
9) Compactadora de balasto	1	54 265.9	76 189.3	914 271.9	11 428.4
10) Ayudante	1	45 702.8	64 166.7	770 000.8	9 625.0
11) Abanderados	6	44 974.8	63 144.6	4546 412.6	56 830.2
				13 457 885.9	168 223.6

## 2 Mano de obra

Concepto	Cantidad	Sueldo mensual 1986. \$	Sueldo mensual con - prestaciones 40.4% \$	Total \$	Total x km. \$
1) Ingeniero residente	1	203 060.0	285 096.2	3 421 154.9	42 764.4
2) Inspector de materiales	1	109 514.6	153 758.5	1 845 102.0	23 063.8
3) Mayordomo general	1	82 435.6	115 739.6	1 388 875.0	17 360.9
4) Mayordomo de cuadrillas	5	44 912.4	63 057.0	3 783 420.6	47 292.8
5) Reparadora de vía	125	43 522.7	61 105.9	91 658 806.2	1 145 735.1
6) Motorista	2	47 092.5	66 105.9	1 586 828.2	19 835.1
7) Ayudante de motorista	2	45 418.1	63 767.0	1 530 408.3	19 130.1
				105 214 595.2	1 315 182.44

## 3 Maquinaria de vía

Concepto	Cantidad	Vida útil en años	Depreciación total	Precio unitario 1986	Total	Depreciación por Km.
1) Grúa de vía	1	18	4 225 944.4	76 067 000.0	76 067 000.0	950 837.5
2) Multicalzadora niveladora	1	10	12 076 467.5	120 764 675.0	120 764 675.0	1509 558.0

3) Alineadora de vía	1	5	14 862 604.0	74 313 020.0	74 313 020.0	928 912.8
4) Reguladora de balasto	1	7	7 617 257.1	53 320 800.0	53 320 800.0	666 510.0
5) Compactadora	1	7	7 617 257.1	53 320 800.0	53 320 800.0	666 510.0
6) Desatornilladora de planchuela.	2	4	1 000 000.0	2 000 000.0	4 000 000.0	50 000.0
7) Desclavadora	2	4	3 068 050.0	6 136 100.0	12 272 200.0	153 402.5
8) Atornilladora y desatornilladora de fijación	1	4	415 702.9	1 662 810.0	1 662 810.0	20 755.1
9) Taladro durmiente.	2	4	2 657 400.0	5 314 800.0	10 629 600.0	132 870.0
10) Clavadora	2	4	3 813 025.0	7 626 050.0	15 252 100.0	190 651.3
			53 540 682.7		421 603 005.0	5 270 037.6

#### 4 Materiales

Concepto	Cantidad	Precio unitario 1986 \$	Total \$
Riel nuevo 115 Lb/Yd	114 095 Kg.	167 700.0	19 133 731.5
Durmiente de concreto	1 666	17 482.0	29 125 012.0
Cojinetes	3 332	200	666 400.0
Grapas elásticas No.7	6 664	532.61	3 431 960.0
Pernos SL	6 664	444.0	2 958 816.0
Placas de hule de 6 mm	3 332	470.0	1 566 040.0
Soldadura Aluminotérmica	21	10 370.0	217 770.0
Herrajes de cambio No.10	24/245	6 720 000.0	658 285.8
Juegos de madera para cambios No.10	24/245	500 000.0	48 979.6

Balasto en M3.	1000	1 800.0	1 800 000.0
			596 069 94.88

## Resumiendo:

Operario maquinaria de vía	168 223.6
Mano de obra	1 315 182.44
Depreciación maquinaria de vía	5 270 037.6
Materiales	59 606 994.89

Costo por kilómetro de rehabilitación con riel nuevo y durmiente de concreto: 66 360 438.33

Por lo que respecta al costo por kilómetro rehabilitado con riel nuevo en vía clásica los 3 primeros conceptos no varían. sólo el renglón referente a materiales se modifica.

## Materiales:

Concepto	Cantidad	Precio unitario 1986	Total
		\$	\$
1) Riel nuevo 115 Lb/yd	114 095 kg	167 700	19 133 731
2) Durmientes de madera	2028	4 930.0	9 998 040
3) Anclas	2028	460.0	932 880
4) Clavos de vía	8112	150.0	1 216 800
5) Placas de asiento	4056	2 534.0	10 277 904
6) Soldadura Aluminotérmica	21	10 370.0	2 177 70
7) Herrajes de cambio No.10	24/245	6 720 000.0	658 285.8

8) Juegos de madera cambio No.10	24/245	500 000.0	48 979.6
9) Balasto en M3.	1200	1 800.0	2 160 000
10) Planchuela	169	1 873	316 537

44 960 927.31 \$/km

Para vía clásica

I Operario maquinaria de vía	168 223.6
II Mano de obra	1 315 182.44
III Depreciación maquinaria de vía	5 270 037.6
IV Materiales	44 960 927.31
<b>Total</b>	<b>51 714 370.95</b>

Comparando costos la vía elástica es alrededor de 22% más cara que la clásica.

Esto significa que la vía México-Esperanza costaría :

Vía elástica  $1.659\ 011 \times 10^{10}$  \$

Vía clásica  $1.267\ 0021 \times 10^{10}$  \$

Costos de conservación de la vía elástica (V.E) y vía clavada (V.C.). De acuerdo a la siguiente gráfica un riel de 115 Lb/yd de calibre posee una vida útil de aproximadamente 24 años para la V.E y alrededor de 18 para la V.C. Por lo tanto respecto al tráfico obtenemos 220 000 000 ton.- para V.E. y V.C. respectivamente.

8) Juegos de madera cambio No.10	24/245	500 000.0	48 979.6
9) Balasto en M3.	1200	1 800.0	2 160 000
10) Planchuela	169	1 873	316 537

44 960 927.31 \$/km

Para vía clásica

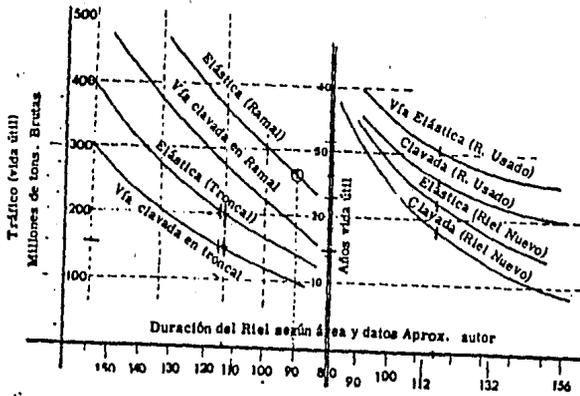
I Operario maquinaria de vía	168 223.6
II Mano de obra	1 315 182.44
III Depreciación maquinaria de vía	5 270 037.6
IV Materiales	44 960 927.31
<b>Total</b>	<b>51 714 370.95</b>

Comparando costos la vía elástica es alrededor de 22% más cara que la clásica.

Esto significa que la vía México-Esperanza costaría :

Vía elástica	$1.659\ 011 \times 10^{10}$	\$
Vía clásica	$1.267\ 0021 \times 10^{10}$	\$

Costos de conservación de la vía elástica (V.E) y vía clavada (V.C.). De acuerdo a la siguiente gráfica un riel de 115 Lb/yd de calibre posee una vida útil de aproximadamente 24 años para la V.E y alrededor de 18 para la V.C. Por lo tanto respecto al tráfico obtenemos 220 000 000 ton.- y 180 000 00 ton. para V.E. y V.C. respectivamente.



Se planea en el futuro transportar por la línea México-Esperanza la mitad del tráfico que actualmente se mueve de México a Veracruz vía Jalapa. Esto significa que la línea que nos ocupa movilizará del orden de - 659 550 ton/mes y 7 914 600 ton/año. Considerando un crecimiento anual de 4% en la demanda, se transportarán los siguientes valores:

Año	Incremento (ton)	Tonelaje Bruto	Tonelaje bruto acumulado
1		7 914 600	7 914 600
2	316 548	8 231 184	16 145 784
3	329 247	8 560 431	24 706 215
4	342 417	8 902 848	33 609 063
5	356 114	9 258 962	42 868 025
6	370 358	9 629 321	52 497 346
7	385 173	10 014 494	62 511 840
8	400 580	10 415 074	72 926 914
9	416 603	10 831 677	83 758 591
10	433 267	11 264 944	95 023 535
11	450 598	11 715 542	106 739 077
12	468 622	12 184 164	118 923 241

13	487 367	12 671 531	131 594 772
14	506 861	13 178 392	144 773 164
15	527 136	13 705 528	158 478 692
16	548 221	14 253 749	172 732 441
17	570 150	14 823 899	187 556 340
18	592 956	15 416 855	202 973 195
19	616 674	16 033 529	219 006 724
20	621 341	16 674 870	235 681 594

Para realizar el cálculo del costo de conservación tomamos en --  
cuenta 4 conceptos. Materiales, maquinaria, operarios de maquinaria y ma-  
no de obra.

#### I Materiales V.E.

Elemento	Cantidad por kilómetro	Vida útil (años)	Reposición Anual
1) Riel	114.095 kg	24	4.75 kg
2) Durmiente	1 666 pzas.	50	34 pzas.
3) Balasto	2 000 m3	20	100 m3.
4) Cojinetes	3 332 pzas.	20	167 pzas.
5) Placas de hule de 6mm	3 332 pzas.	20	167 pzas.
6) Grapas elásticas No7	6 664 pzas.	50	134 pzas.
7) Pernos	6 664 pzas.	50	134 pzas.
8) Herrajes de cambio	0.09 pzas.	24	0.003 pzas.
9) Juegos de madera para cambio NO.10	0.09 pzas.	20	0.0045 pzas.

Precio unitario \$	Total \$/km/año
167 700	797 239
17 482	594 388
1 800	180 000
200	33 320
570	78 490
532.61	71 370
444	59 496
6 720 000	25 200
500 000	2 250

Total 1 841 753

I' Materiales V.C.

Elemento	Cantidad por km	Vida útil años	Reposición anual	Precio Unitario
1) Riel	114.095	18	6.34	167 700
2) Durmiente	2028 pzas.	20	1 02	4 930
3) Balasto	2400 m3	20	1 20	1 800
4) Anclas	2028 pzas.	20	1 02	460
5) Clavos de vía	8112 pzas.	20	4 06	150
6) Placas de asiento	4056 pzas.	20	2 03	2 534
7) Herrajes de cambio	0.09 pzas.	18	0.005	6720000
8) Juegos de madera para cambio No.10	0.09 pzas	20	0.0045	500 000
9) Planchuela	169 pzas.	18	10	1 873

Total \$/km/año

1 063 218  
 502 860  
 216 000  
 46 920  
 60 900  
 514 402  
 33 600  
 2 250  
 18 730

Total 2 463 235

Por materiales, costo de conservación \$/km/año V.E.= 1 841 753  
 V.C.= 2 463 235

## II Maquinaria V.E.

Elemento	Cantidad	Vida útil (años)	Depreciación \$
1) Multicalzadora de vía	1	10	12 076 468
2) Alineadora de vía	1	5	14 862 604
3) Regularizadora de balasto	1	7	7 617 257
4) Compactadora de balasto	1	7	7 617 257
	<b>Total</b>		<b>42 173 586</b>

## II' Maquinaria V.C.

Sumado a los elementos 1,2,3 y 4 anteriores obtenemos:

Elemento	Cantidad	Vida útil años	Depreciación \$
5) Desatornilladora de plan- chuela	2	4	1 000 000
6) Desclavadora	2	4	3 068 000
7) Atornillador desatornilla dor	1	4	415 710
8) Taladro durmiente	2	4	2 657 400
9) Clavadora	2	4	3 813 025
	<b>Total</b>		<b>53 127 721</b>

Por maquinaria, costo de conservación \$/km/año V.E. = 172 137

V.C. = 216 847

En cuanto a los conceptos relativos al costo de los operarios de maquinaria y mano de obra en V.E. y V.C. no existen diferencias.

## III Operarios de maquinaria

Elemento	Cantidad	Sueldo con prestaciones (anual)\$
Multicalzadora-Niveladora	1	991 456
Ayudante	1	913 199
Alineadora de vía	1	991 456
Ayudante	1	1 000 808
Reguladora de balasto	1	914 272
Ayudante	1	770 000
Compactadora de balasto	1	914 272

Ayudante	1	770 000
Abanderado	2	1 515 470
	<b>Total</b>	<b>8 780 934</b>

Por operarios de maquinaria, costo de conservación \$/km/año V.E. y V.C.=35 840

#### IV Mano de obra

Elemento	Cantidad	Sueldo con prestaciones (anual) \$
Ingeniero residente	1	3 421 155
Inspector de materiales	1	1 845 102
Mayordomo general	1	1 388 875
Mayordomo de cuadrilla	1	756 684
Reparador de vía	25	18 331 761
Motorista	1	793 414
Ayudante	1	765 204
	<b>Total</b>	<b>27 302 195</b>

Por mano de obra, costo de conservación \$/km/año V.E. y V.C. = 111 438

Costo total de conservación por kilómetro de vía al año

Concepto	V.E.	V.C.
Materiales	1 841 753	2 463 235
Maquinaria	172 137	216 847
Operarios de maquinaria	35 840	35 840
Mano de obra	111 438	111 438
<b>Total</b>	<b>2 161 168</b>	<b>2 827 360</b>

Inversión inicial	V.E. = 66 360 440	\$/km
Gasto de conservación	V.E. = 2 161 168	\$/año
Inversión inicial	V.C. = 51 714 370	\$/km
Gasto de conservación	V.C. = 2 827 360	\$/año

Año	Factor de actualización	V.E.		V.C.	
		Costo de conservación	Costo acumulado	Costo de conservación	Costo acumulado
0	1	0	66 360 440	0	51 714 370
1	0.892	1 927 762	68 288 202	2 522 005	54 236 375
2	0.797	1 722 451	70 010 653	2 253 406	56 489 781
3	0.711	1 536 590	71 547 243	2 010 253	58 500 034
4	0.635	1 372 342	72 919 585	1 795 374	60 295 408
5	0.567	1 225 382	74 144 967	1 603 113	61 898 521
6	0.506	1 093 551	75 238 518	1 430 644	63 329 165
7	0.452	976 848	76 215 366	1 277 967	64 607 132
8	0.403	870 951	77 086 317	1 139 426	65 746 558
9	0.36	778 020	77 864 337	1 017 850	66 764 408
10	0.321	693 735	78 558 072	907 583	67 671 991
11	0.287	620 255	79 178 327	811 452	68 483 443
12	0.256	553 259	79 731 586	723 804	69 207 247
13	0.229	494 907	80 226 493	647 465	69 854 713
14	0.204	440 878	80 667 371	576 781	70 431 494
15	0.82	393 333	81 060 704	514 580	70 946 074
16	0.163	352 270	81 412 974	460 860	71 406 934
17	0.145	313 369	81 726 343	409 967	71 816 901
18	0.130	280 952	82 007 295	367 557	72 184 458
19	0.116	250 695	82 257 990	327 974	72 512 412
20	0.103	222 600	82 480 590	291 218	72 803 650
21	0.092	198 827	82 679 417	260 117	73 063 767
22	0.082	177 216	82 856 633	231 844	73 295 611



0.62            70            32 500.4            66 221.6            49            76.2

Los valores expuestos anteriormente están en función de la pendiente y son válidos para cualquier tipo de vía.

Para poder comparar el costo de operación entre las 2 vías necesitamos transitar a una velocidad mayor que la estipulada en el horario. Actualmente con vía clásica la velocidad máxima permisible por el horario es de 53.2 km./h. Si contamos con la vía elástica tentativamente esa velocidad podría aumentar a 75 km/h. Al aumentar la velocidad aumenta el porcentaje de trabajo de las locomotoras, disminuye el tiempo de recorrido y también el número de laderos necesarios

Tipo de Vía	Velocidad máxima por horario km/h	Porcentaje de trabajo bajo de las locomotoras.	Tiempo de tránsito	Número de laderos.
Vía Clásica	53.2	69.8	4 h 36mm	16
Vía Elástica	75	98.4	3 h 16mm	12

Una vez considerados todos los factores anteriores podemos exponer los elementos específicos propios de los costos de operación. Estos son:

- Costo de amortización normal por hora de la locomotora (constante durante la vida útil) CAN.
- Costo de amortización por carro CAC.
- Costo por pago de la tripulación. Costo total hora C.P.T.H.
- Costo por reparaciones adicionales CRA.
- Costo por consumo de combustible y lubricante transitando y holgando.  $CCL_T$  y  $CCL_{II}$

Sumados forman. Costo total por hora CTH

Costo de amortización normal CAN

$$CAN = \frac{CCL + FRF \left(1 + \frac{ti}{100}\right)^N \frac{ti}{100}}{365 \times 24 \times FUN \left(1 + \frac{ti}{100}\right)^{N-1}}$$

En que:

CCL = Costo de compra de la locomotora en el año de compra 1 108 902 Dólares

FRF = Factor de reserva de la fuerza tractiva. 1.15

ti = Tasa de interés del capital invertido 12%

N = Número de años de vida útil de la locomotora 20 años

FUN = Factor de utilización normal de la fuerza 0.6 del tiempo

365 = Número de días al año

24 = Número de horas al día

CAN 1 locomotora = 32 dólares/hora.

CAN<sub>4</sub> = 63 052.8 \$/hora

Costo de amortización por carro CAC

$$CAC = \frac{\left(1 + \frac{ti}{100}\right)^N \frac{ti}{100} \frac{1}{Fre} \sum_{I=1}^{NTIC} NTI \quad CCI}{365 \times 24 \times NTOC \left(1 + \frac{ti}{100}\right)^{N-1}}$$

En que:

Fre = Factor de tránsito del carro. 0.15

NTOC= Número total de carros día sistema

NTIC= Número de tipos de carros

NTI = Número de carros del tipo furgon

CCI = Costo de compra del carro tipo 10 278 592. \$

CAC 1 carro = 157.09 \$/hora

CAC 45 = 7069.05 \$/hora

Costo por pago de la tripulación Hora CPT.II.

Para operar la formación expuesta requerimos de:

2 maquinistas  
 2 ayudantes de maquinista  
 1 conductor  
 3 garroteros

Sujetas a las siguientes cuotas de tripulación por kilómetro:

2 maquinistas	22.4313	sumando	44.8626
2 ayudantes de maquinistas	18.1711		36.3422
1 conductor	19.9233		19.9233
3 garroteros	14.5147		43.5441
		Total	144.6722

C.K.T. = 144.6722 \$/km.

Este renglón lo conforman:

- Pago anual por concepto de vacaciones a tripulaciones C.V.T.
- Costo anual por pago de séptimo día a tripulaciones C.S.D.
- Costo anual por kilometraje C.K.L.
- Costo total pagado al año a tripulaciones C.T.T.

- C.V.T. = 37.92 DTD NTD CKT

En que:

37.92 = Factor que considera las semanas del año, número de días hábiles semanales y días del año.

DTD = Distancia recorrida por los trenes directos 245 km.

NTD = Número diario de trenes directos 10

C.V.T. = 13 440 626.00 \$

- CSD = 9 730 NTD DTD CKT

En que:

DTD = Número total de distritos 1

CSD = 14 076 605.00 \$

-C.K.L. =  $365 \times (160 + (D.T.-160) (2))$  NTD CKT

En que:

160 = Kilometraje por jornada

D.T. = Distancia total recorrida

CKL = 174 257 660 \$

- CTT = F.A. C.K.L.

En que:

F.A. =  $\frac{1.3 \text{ CKL} + \text{CSD} + \text{CVT}}{\text{CKL}} = 1.457$

CTT = 253 893 418

- Para integrar el C.T.H. es necesario ponerlo en función del horario medio y es donde surgen las diferencias entre la vía clásica y elástica.

En V.C. el horario medio es 6.75 y 4.86 en V.E.

$$\text{C.T.H.} = \frac{\text{C T T}}{365 \text{ (NTD) H.M.}}$$

$$\text{V.C. CPTH} = \frac{253\,893\,418}{365 \text{ (10)(6.75)}} = 10\,305 \text{ \$/hora}$$

$$\text{V.E. CPTH} = \frac{253\,893\,418}{365 \text{ (10)(4.86)}} = 14\,283.33 \text{ \$/hora}$$

Costo por reparaciones adicionales CRA

$$\text{C R A} = (\text{CRL FRL PMHP NLC}) + (\text{CRC FRL } \frac{\text{NCT}^2}{50})$$

En que:

- CRL = Costo de referencia para locomotoras: 18
- FRL = Factor de costo relativo a la línea de referencia: 0.88
- TMHP = Potencia de la locomotora en miles de caballos: 3
- NLC = Número de locomotoras conectadas: 4
- CRC = Costo de referencia por unidad de carro: 8
- NCT = Número de carros arrastrados por las locomotoras: 45
- C R A = 475.2 \\$/hora

- Costo por consumo de combustible y lubricante transitando y holgando

$$\text{CCL}_t \text{ y } \text{CCL}_h$$

$$\text{CCL} = \frac{(\text{LHC CTL} + \text{CRL}) \text{ P.T.}}{\text{RCL}}$$

- LHC = Litros consumidos por hora
- A plena carga (transitando) : 720
- Holgando : 24

CTL = Costo total de combustible y lubricante a precio internacional: 60.62

CRL = Costo de referencia usados para lubricante en pesos por litro: 303.1  
 RCL = Relación de consumo combustible lubricante locomotora Diesel : 130  
 PT = Porcentaje de trabajo de la locomotora  
 $CCL_t = 45\ 325.11\ \text{h/loc.}$   
 $CCL_H = 1510.84\ \text{h/loc.}$

Para las 4 locomotoras tendremos:

$CCL_t = 181\ 300.43\ \text{P.T.}$   
 $CCL_H = 6\ 043.36\ \text{P.T.}$

Dado que el porcentaje de trabajo varía en las vías, tenemos

V.C. 69.8% entonces  $CCL_t = 181\ 300.43 (0.698) = 126\ 547.71\ \text{\$/hora}$   
 $CCL_H = 6\ 043.36\ \text{\$/hora}$   
 V.E. 98.4 entonces  $CCL_t = 181\ 300.43 (0.984) = 178\ 399.63\ \text{\$/hora}$   
 $CCL_H = 6\ 043.36\ \text{\$/hora}$

Una vez calculados los anteriores conceptos podemos integrar el costo total por hora CTH

	V.C.	V.E.
CAN	63 052.8 \$/hora	63 052.8 \$/hora
CAC	7 069.05 \$/hora	7 069.05 \$/hora
CPH	10 305 \$/hora	14 283.33 \$/hora
CRA	475.2 \$/hora	475.2 \$/hora
$CCL_t$	126 547.71 \$/hora	178 399.63 \$/hora
$CCL_H$	6 043.36 \$/hora	6 043.36 \$/hora
CTH Transitando	207 449.92 \$/hora	263 280.01 \$/hora
CTH Holgando	86 945.57 \$/hora	90 923.74 \$/hora

Costo total en el tramo México-Esperanza CTH Méx.-Esp.

Este concepto será la suma de los productos del Costo Total por hora. Transitando y Holgando por sus respectivos tiempos:

## V.C.

207 449.92	(4.61)	=	956 344.45
86 945.57	(2.14)	=	186 063.51
	Total	=	1 142 407.96

## V.E.

263 280.01	(3.27)	=	860 925.63
90 923.74	(1.60)	=	145 477.98
	Total	=	1 006 403.61

Costo de la Tonelada Bruta en el tramo México-Esperanza CTB Méx.-Esp.

$$\text{CTB Méx.-Esp.} = \frac{\text{CTH Méx.-Esp.}}{\frac{\text{Tonelaje del Tren Norte} + \text{Tonelaje del Tren Sur}}{2}}$$

$$\text{VC} = \frac{1\ 142\ 407.96}{\frac{3230 + 3183}{2}} = 356.27 \text{ \$/Ton./Km.}$$

$$\text{VE} = \frac{1\ 006\ 403.61}{\frac{3230 + 3183}{2}} = 313.86 \text{ \$/Ton./Km.}$$

## C A P I T U L O    I V

### DIFERENCIAS OPERATIVAS ENTRE VIA CLASICA Y VIA ELASTICA

Dada la diferente estructura presentada por la vía elástica respecto a la vía clásica, existen notables diferencias operativas que desde luego la favorecen ampliamente. Podemos plantear esas diferencias a 3 diferentes niveles. Primero, el referente al equipo rodante, segundo el relacionado con el riel y finalmente el aspecto relativo a la sujeción.

En la vía clásica, la existencia de rieles cuya longitud es relativamente corta, implica la presencia de un elevado número de uniones entre sus extremidades. Al transitar una formación ferroviaria se produce un fuerte choque entre la extremidad del segundo riel y las respectivas --ruedas de los vehículos ferreos. El impacto rueda riel tiene diversas --consecuencias.

#### EQUIPO RODANTE

El impacto en sí y la vibración provocada afectan las ruedas, --ejes, muñones y otros elementos constituyentes del vehículo. Dada la constante repetición del choque, a la larga, este tiene un efecto nocivo para las locomotoras y carros ferroviarios. En la vía elástica, evidentemente desaparece esa transmisión del impacto al equipo rodante ya que no hay impacto rueda-riel. Obviamente la conservación y la vida útil de la maquinaria ferrea se benefician considerablemente.

Otro aspecto que diferencia a estos 2 tipos de vía es el constante ruido provocado también por el choque rueda-riel. La formación ferroviaria transita a una cierta velocidad y existen 2 ejes de rueda en cada -

extremidad del vagón, el resultado es que se presentan a lo largo de todo el trayecto 4 golpes ruedas-riel en cada unión entre los rieles.

Es de suponer para el caso de un tren de pasajeros, lo desagradable que resulta el oír constantemente el ruido producido por el choque rueda-riel, también pueden llegar a sentir la transmisión del impacto. Este tipo de ruido desaparece en la vía elástica.

La velocidad de horario puede aumentar en función de uno u otro tipo de vía. El incremento o decremento de la velocidad del equipo rodante se manifiesta en un óptimo aprovechamiento o desperdicio respectivamente de su potencia. Para una misma formación y mismas condiciones de pendiente y curvatura, la velocidad aumenta en la vía elástica.

En lo referente a equipo rodante podemos afirmar que básicamente son 3 los aspectos en que se manifiestan las diferencias entre la vía clásica y elástica:

- Transmisión del impacto y vibración al mecanismo del vehículo ferroviario
- Confort de los pasajeros
- Aumento de la velocidad de horario y mejor aprovechamiento del equipo tractivo.

## RIEL

Este elemento guarda particular importancia en las diferencias operativas entre los 2 diferentes tipos de vía que analizamos. Esta singular importancia es producto de la existencia o no de unión con extremidades separadas.

La vía clásica utiliza el riel emplanchelado y por ello es la existencia del choque rueda-riel. Al igual que en el equipo rodante este impacto tiene nocivos efectos en el riel, dada su repetición, la geometría

de sus extremidades sufre cambios hasta el punto en que se vuelve inoperante. El choque aplana las extremidades, reduciendo la utilidad del riel.

En la vía elástica prácticamente podemos hablar de riel continuo. La soldadura, sea cual sea su tipo permite obtener una superficie continua de rodamiento, por lo que desaparece el choque y la modificación geométrica de las extremidades del riel.

El comportamiento mecánico del riel en una u otra vía es distinta. La distribución de esfuerzos es más homogénea en la vía elástica dada la continuidad del riel y su mayor longitud. En cambio la vía clásica presenta en el riel una concentración de esfuerzos en las extremidades generada por la fuerza de impacto. El comportamiento de los esfuerzos entre una carga estática, dinámica o de impacto difiere.

A excepción de las uniones emplanchueladas, los esfuerzos del riel ante una carga estática son similares. En la vía clásica la planchuela presenta esfuerzos provocados por la carga estática, a diferencia de la vía elástica en donde el riel absorbe en su totalidad sus esfuerzos correspondientes.

La carga dinámica provoca el mismo fenómeno en cuanto a repartición de esfuerzos. Por su parte la carga de impacto no existe en la vía elástica debido a la continuidad del riel.

La variación de la temperatura genera comportamientos diferentes del riel en la vía clásica y en la vía elástica. Como anteriormente lo hemos expuesto el descenso o ascenso de la temperatura provoca una contracción o dilatación según sea el caso, de la longitud del riel. La elongación o acortamiento se presenta en ambas vías sin embargo en la vía clásica, dado que los tramos de riel son relativamente cortos, se puede dejar a determinadas distancias un espacio libre para que los movimientos longitudinales del riel se realicen sin ningún problema. Por su parte la vía --

elástica al contar con tramos de riel de una considerable longitud, experimenta grandes variaciones en su longitud. Esta condición imposibilita la existencia de un espacio libre expofeso por ello se presentan en este tipo de vía juntas de dilatación especiales. Estas juntas permiten que el riel varíe libremente su longitud, ya que su respectiva extremidad cuenta con un espacio lateral al riel siguiente.

#### SUJECION

La sujeción del riel al durmiente y al resto de la estructura ferroviaria, presenta diferente constitución y también un comportamiento distinto en lo referente a la distribución de cargas y los consecuentes esfuerzos.

La vía clásica también llamada vía clavada, utiliza como lo hemos mencionado anteriormente, una placa metálica y un clavo como elementos que aseguran el anclaje del riel al durmiente. Este tipo de sujeción, presenta una elevada rigidez y por ende una menor deformación resultando una mayor concentración de esfuerzos en estos elementos. Debido a la rigidez de la sujeción clavada, se presenta una vibración mayor ya que no existe ni absorción ni amortiguamiento alguno. La cohesión molecular de la placa metálica, clavo, durmiente, balasto y terraplen son afectados por la vibración.

La vía elástica se caracteriza precisamente por su sujeción que es como su nombre lo indica elástica. La presencia de una placa de hule vuelve a esta sujeción mucho muy flexible, ya que este elemento absorbe y amortigua satisfactoriamente las vibraciones y el impacto. Resultan beneficiadas por la existencia de la placa de hule, todos los elementos de sujeción ya que disminuyen los esfuerzos. Por su parte el balasto y terraplen también se ven favorecidos.

La vía clásica utiliza forzosamente durmientes de madera, en tan

to la vía elástica ofrece la posibilidad de emplear durmientes de madera o de concreto. La presencia de uno u otro tipo de durmiente modifica la separación entre ellas y también la distribución de carga en estos elementos, consecuentemente la distribución de esfuerzos de los durmientes varían en la vía clásica y elástica.

## C A P I T U L O     V

### EVALUACION ECONOMICA Y CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente podemos presentar las siguientes costos;

En el aspecto concerniente a la rehabilitación de vía

Vía clásica

51 714 370.95 \$/km                      total    12 670 021 000 \$

Vía elástica

66 360 438.53 \$/km                      total    16 258 307 000 \$

Diferencia

14 646 067.58 \$/km                      total    3 588 286 557 \$

Por lo que la inversión marginal es:

3 588 286 557 \$

Las relacionadas con la conservación de la vía

Vía clásica

2 827 360 \$/km/año                      total    692 703 200 \$/año

Vía elástica

2 161 168 \$/km/año                      total    529 486 160 \$/año

Diferencia

666 192 \$/km/año                      total    163 217 040 \$/año

Lo referente a la operación

Vía clásica

356.27 \$/ton.

Vía elástica

313.27 \$/ton.

Diferencia

42.41 \$/ton.

Tonelaje bruto por día 16 254 ton/día

Tonelaje bruto al año 16 254 ton/día x 365 = 5 932 710 ton/año

Diferencia 5 932 710 x 42.41 \$/ton. = 251 606 231 \$/año

Con los anteriores datos podemos elaborar la siguiente tabla:

AÑO	F.A.	INCREMENTO	T.B.	AHORRO EN OPERACION	CONSERVACION CTTE	Y CONSERVACION	Y CONSERVACION	CONSERVACION ACTUALIZADA	Y CONSERVACION ACTUALIZADA	INDICE DE RENTABILIDAD I.R.	TASA INTERNA DE AHORRO T.I.R.
0											
1	0.892	234 058	5 851 440	248 159 570	163 217 040	411 376 610	421 302 993	411 376 610	411 376 610	0.114	0.114
2	0.797	243 420	6 085 498	258 085 953	"	431 626 449	431 626 449	375 002 270	787 178 880	0.210	0.210
3	0.711	253 157	6 328 918	268 409 409	"	442 362 829	442 362 829	344 006 280	1 131 185 160	0.315	0.315
4	0.635	263 283	6 582 075	279 145 789	"	453 528 673	453 528 673	314 519 971	1 445 705 131	0.402	0.402
5	0.567	273 814	6 845 358	290 311 033	"	465 141 124	465 141 124	287 990 707	1 733 695 839	0.483	0.483
6	0.506	284 767	7 103 939	301 924 084	"	477 218 093	477 218 093	263 735 018	1 997 430 856	0.556	0.556
7	0.452	296 158	7 403 939	314 001 053	"	489 778 135	489 778 135	241 472 355	2 238 903 211	0.623	0.623
8	0.403	308 004	7 700 097	326 561 095	"	502 840 598	502 840 598	221 379 717	2 460 282 928	0.685	0.685
9	0.360	320 324	8 008 101	339 623 558	"	516 425 541	516 425 541	202 644 761	2 662 927 689	0.742	0.742
10	0.321	333 137	8 328 425	353 208 501	"	530 553 881	530 553 881	185 913 195	2 848 840 884	0.793	0.793
11	0.287	346 462	8 661 562	367 336 841	"	545 247 354	545 247 354	170 307 796	3 019 148 680	0.841	0.841
12	0.256	360 321	9 008 024	382 030 314	"	560 528 567	560 528 567	156 485 991	3 175 634 670	0.885	0.885
13	0.229	374 734	9 368 345	397 311 527	"	576 421 028	576 421 028	143 495 313	3 319 129 983	0.924	0.924
14	0.204	389 723	9 743 079	413 203 988	"	592 949 187	592 949 187	132 000 415	3 451 130 399	0.961	0.961
15	0.182	405 312	10 132 802	429 732 147	"	610 138 458	610 138 458	120 961 634	3 572 092 033	0.995	0.995
16	0.163	421 525	10 538 114	446 921 418	"	628 015 311	628 015 311	111 045 199	3 683 137 232	1.026	1.026
17	0.145	438 386	10 959 639	464 798 271	"	646 607 262	646 607 262	102 366 496	3 785 503 728	1.054	1.054
18	0.130	455 921	11 398 025	483 390 222	"	665 942 890	665 942 890	93 758 053	3 879 261 781	1.081	1.081
19	0.116	474 158	11 853 946	502 725 850	"	686 051 924	686 051 924	86 572 576	3 965 834 357	1.105	1.105
20	0.103	493 124	12 328 104	522 834 884	"	706 965 326	706 965 326	79 582 023	4 045 416 380	1.127	1.127
21	0.092	512 849	12 821 228	543 748 286	"	728 715 251	728 715 251	72 817 429	4 118 233 809	1.147	1.147
22	0.082	533 363	13 334 077	565 498 210	"	751 335 174	751 335 174	67 041 803	4 185 275 612	1.166	1.166
23	0.073	554 698	13 867 440	588 118 134	"	774 859 895	774 859 895	61 609 484	4 246 885 096	1.183	1.183
24	0.065	576 886	14 422 138	611 642 857	"	799 325 627	799 325 627	56 584 772	4 303 449 868	1.199	1.199
25	0.058	599 961	14 999 024	636 108 587	"	824 769 992	824 769 992	51 956 166	4 355 406 034	1.213	1.213
26	0.052	623 959	15 598 985	661 552 952	"	851 232 112	851 232 112	47 836 660	4 403 242 694	1.227	1.227
27	0.046	648 918	16 222 944	688 015 072	"	878 752 697	878 752 697	44 264 070	4 447 506 764	1.239	1.239
28	0.041	674 874	16 871 862	715 535 657	"	907 374 134	907 374 134	40 422 624	4 487 929 388	1.250	1.250
29	0.037	701 869	17 546 736	744 157 094	"	937 140 397	937 140 397	37 202 339	4 525 131 727	1.261	1.261
30	0.033	729 944	18 248 605	773 923 357	"	968 097 312	968 097 312	34 676 195	4 559 805 922	1.270	1.270
				804 880 272	"			31 947 211	4 591 753 133	1.774	1.774

24.26%

T.I.R. = 1.774 (12%) = 24.26%

## CONCLUSIONES

En base a lo expuesto a lo largo de este trabajo, podemos realizar algunas observaciones finales.

- Dada la importancia económica que tiene la región comprendida entre el Puerto de Veracruz y la Ciudad de México, es una necesidad optimizar el sistema de transporte que opera en la zona. La modernización de los ferrocarriles juega un papel decisivo y fundamental para lograr el óptimo servicio de transporte. Por el motivo anterior la rehabilitación de la vía México-Esperanza es un verdadero imperativo.
- La utilización de la vía con riel continuo y sujeción doblemente elástica, con durmientes de concreto es una alternativa que desde el punto de vista técnico tiene un comportamiento satisfactorio, que le favorece -- con respecto a la vía clavada. Esto se manifiesta en un beneficio para el equipo rodante y una modificación de la distribución de cargas y esfuerzos que se presentan en el riel y en el resto de la estructura ferroviaria favoreciéndolas considerablemente.

En cuanto a la obtención de los elementos estructurales de la -- vía, hasta la fecha, desgraciadamente, la situación productiva y económica del país obliga a importar el riel. Por lo que respecta al durmiente, es importante mencionar que el de concreto representa una posible solución para los países con problemas en el razonable uso de los recursos forestales. México posee buenos constructores de durmientes de concreto que inclusive los exportan a varios países.

- Desde el punto de vista económico y financiero podemos observar que a -- pesar que la inversión inicial es muy elevada en la vía elástica, los -- costos de operación y conservación son menores, de tal modo que a par--

tir de la prestación de servicio de 15 años el proyecto es rentable. -  
A medida que el horizonte de utilidad de la obra aumenta, también lo hace el índice de rentabilidad.

Los resultados obtenidos en la evaluación económica justifican plenamente el proyecto.

Integrando estas observaciones finales podemos concluir que:

- Por la importante contribución que hará, la rehabilitación del tramo México-Esperanza con vía elástica, el sistema de transporte regional, por las ventajas técnicas que trae consigo y por su factibilidad económica, en la medida de las posibilidades del país el proyecto debe y puede realizarse.

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

- \* EL PERFIL DE MEXICO EN 1980  
LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE  
DANIEL DIAZ DIAZ  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES U N A M  
SIGLO XXI EDITORES.
  
- \* ENSAYO SOBRE HISTORIA DEL MOVIMIENTO OBRERO MEXICANO 1823-1912  
TOMO I  
RAFAEL CARRILLO AZPEITA  
EDIT. CENTRO DE ESTUDIOS HISTORICOS DEL MOVIMIENTO OBRERO MEXICANO
  
- \* INFORME DE LABORES 1984  
SISTEMA FERROVIARIO NACIONAL  
FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO
  
- \* JUNTAS PARA RIELES, SU HISTORIA, APLICACION Y DISEÑO  
W.R. HAMILTON  
PORTER INC, OAK BROOK, ILLINIOS
  
- \* RIEL TENDIDO EN LINEAS TRONCALES Y RAMALES DEL SISTEMA  
FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO  
1982
  
- \* NORMAS PARA LA CONSTRUCCION Y CONSERVACION DE LA VIA ELASTICA  
FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO  
INSTITUTO DE CAPACITACION

\* SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE VIA ELASTICA  
FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO  
INSTITUTO DE CAPACITACION

\* FERROCARRILES  
FRANCISCO M. TOGNO  
REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERIA S.A. 1982