



Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

**TITULO: Modelación y Análisis Estructural de un
Puente Metálico Ferroviario.**

**Caso de estudio: Puente Km 9.578 de Cenizas de
vigas de plancha.**

Autora:

Joceliny Gomes Paquete D'alva Lima

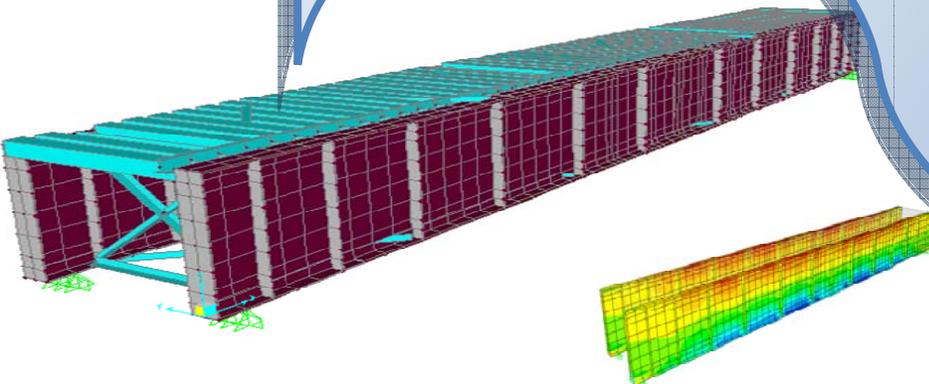
Tutores:

Dr. Ing. Miguel Pino Rodríguez

Ing. Alejandro Fernández Brito

Dr. Ing. Carlos A. Recarey Morfa

2008-2009





Pensamiento 1

*Valen, al final,
los que se imponen retos a sí
mismos porque saben que lo
que hagan
sin esfuerzo y con presteza,
durar no puede ni tener
belleza.*

Plutarco



Pensamiento 2

*El éxito es fácil de obtener, lo
difícil es merecerlo,*

Jocelyn Gomes



Agradecimientos

Quisiera agradecerles en especial:

A Jesucristo por iluminar siempre mi camino.

*A mis padres María do Ceu y Arlindo por su apoyo emocional.
Principalmente, a mi Mama, por ser ella y todo lo que
representa para mí...*

*A mi familia, por haberme apoyado en
todas mis decisiones...*

*A Prof. Milagros y su familia, a Lucy y Maydolis
por sus ayuda y paciencia incondicional...*

*A mi tutor y cotutor, sin el cual este
trabajo no hubiera visto el día.*

*A todos los maestros y profesores
que han contribuido con el día a día a
mi formación profesional.*

*A mis amigos y compañeros de estudios
y a aquellos que han compartido
estos últimos cinco años
de mi vida estudiantil.*

Muchas gracias que Dios vos Bendiga.



Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado en su totalidad a quien yo mas amo, que me ha traído al mundo y que ha depositado toda su confianza, mi querida madre, María do Céu.

A mi familia que me espera ansiosamente y que siempre estuvo a mi lado.

Resumen

Este trabajo introduce la motivación por los beneficios del enlace del Análisis por Elementos Finitos con los Ensayos en estructuras. En él aparece una aplicación típica en el campo del análisis estático y dinámico de estructuras, específicamente a un puente de ferrocarril metálico. Se aplica el desarrollo de la modelación en el programa SAP2000 para obtención de las tensiones y deformaciones que facilite la definición de tipos de reparación y rehabilitación de la estructura del puente a realizar.

Se presenta un procedimiento para la calibración del modelo tanto a través del análisis de sensibilidad o convergencia como por ensayo de diagnóstico realizado, de forma tal que mejore la correspondencia entre ambos procedimientos.

Se determina el factor de evaluación de los elementos de la estructura del puente para la carga C-30-7, con el mismo modelo calibrado obtenido, permitiendo así la comparación del elemento con la carga.

Summary

This study introduces the motivation for the benefits of linkage by Analysis of Finite Elements with testing in structures. Use was made of typical application in the field of static analysis and structural dynamics, with particular reference to metallic rail bridge. We applied the development of a model with the SAP2000 in order to detect tensions and deformations that will facilitate the definition of the type of repairs and rehabilitations necessary in the bridge structure.

We presented a procedure for the calibration of the model through sensibility or convergence analysis much as the diagnostic test earlier realized, such that improvement can made within the two procedures.

Factorial evaluation was made of the structural elements of the bridge for weight of C-30-7 train, with the same calibrated model obtained in the study, in order to enhance comparis within the element of the weight.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I “Estado del arte de la modelación de puente de ferrocarril”.	
1.1 Introducción y Fundamentación Metodológica.....	5
1.2 Generalidades.....	5
1.3 Clasificación general de los puentes.....	6
1.3.1 Clasificación de los puentes metálicos de ferrocarril en Cuba.....	6
1.3.2 Características de puentes de viga de alma llena (Superestructura).....	6
1.3.2.1 Puentes de vigas de alma llena tablero superior.....	7
1.3.2.1.1 Puentes de tablero superior con cama de madera sin tablero.....	7
1.3.2.1.1.1 Descripción.....	7
1.4 Patologías en los puentes metálicos de ferrocarriles.....	8
1.4.1 Patologías de Acero	8
1.4.1.1 Patología más frecuente en los puentes metálicos de ferrocarril.....	9
1.5 Instrumentación y ensayos.....	10
1.5.1 Equipos de instrumentación.....	11
1.6 Diagnostico patológico.....	12
1.6.1 Métodos generales de diagnóstico.....	13
1.7 Modelación numérica aplicada.....	14
1.7.1 Introducción.....	14
1.7.2 Clasificación del esquema general de los análisis de la modelación.....	17
1.7.3 Modelación con manifestaciones patológicas.....	19
1.7.4 Calibración del modelo.....	21
1.8 Método de Elementos Finitos (MEF).....	21
1.8.1 Descretización del modelo.....	22
1.8.2 Pasos para el Análisis del Elementos Finitos.....	22
1.8.3 Mallado adaptativo.....	22
1.8.4 Estimación del error.....	22
1.9 Pruebas de carga no destructivas para la evaluación de puentes.....	24
1.9.1 Introducción.....	24
1.9.2 Pruebas de carga.....	24
1.9.3 Evaluación de Puentes.....	24
1.9.4 Métodos de Ensayos de carga.....	25
1.9.4.1 Ensayos de Diagnóstico.....	26
1.9.4.2 Ensayos de Pruebas.....	26
1.10 Ensayos realizado para caracterizar los materiales del puente ferroviario km 9.568.....	27
1.11 Determinación del factor de evaluación de los elementos del puente.....	28
1.11.1 Métodos de evaluación de puente.....	29
1.11.1.1 El factor de evaluación por el esfuerzo permisible.....	29

1.11.1.2 El factor de evaluación por el estado limite.....	30
1.12 Conclusiones Parciales.....	30

Capítulo II “Modelación del puente metálico del ferrocarril km 9.568 del Ramal Santa Clara – Cenizas”

2.1 Introducción y fundamentación metodológica.....	32
2.2 Descripción del Puente Km 9.568.....	32
2.2.1 Geometría.....	33
2.3 Patologías existentes en el puente metálico del ferrocarril km 9.568.....	36
2.4 Ensayo de diagnósticos realizado en el puente km 9.568.....	38
2.4.1 Instrumentación o proyecto de colocación de los sensores en el.....	38
2.4.2 Interpretación y presentación de los resultados de desplazamiento obtenidos en el ensayo de la prueba realizada por la UEB de Placetas.....	39
2.5 Modelación Numérica de Modelo.....	41
2.5.1 Validación del modelo mediante análisis de sensibilida.....	43
2.5.2 La modelación geométrica de los modelos en Plano (2D) y Espacial (3D).....	47
2.5.2.1 Modelo Plano (2D).....	47
2.5.2.1.1 Distribución de esfuerzos de los elementos en 2D.....	47
2.5.2.2 Modelo Espacial (3D).....	48
2.5.2.2.1 Distribución de esfuerzos de los elementos en 3D.....	49
2.5.3 Corrida de software SAP 2000 (versión-12).....	49
2.5.4 Análisis de resultados.....	50
2.5.5 Validación o Calibración del Modelo.....	50
2.5.5.1 Calibración Geométrica.....	51
2.5.5.2 Calibración de las condiciones de apoyo.....	51
2.6 Conclusiones Parciales.....	52

Capítulo III “Análisis de los resultados de la modelación con las mediciones por sensores. Determinación de la capacidad portante del puente Km. 9.568”

3.1 Fundamentación metodológica.....	53
3.2 Diferencias entre el análisis por el MEF y mediante los Sensores.....	53
3.3 Comparación de los resultados de la prueba de carga y del modelo calibrado.....	54
3.4 Determinación del factor de evaluación del elemento del puente.....	56
3.4.1 Ejemplo de cálculo para el factor de evaluación de puente en doble tracción.....	57
3.4.1.1 El factor de evaluación por el Esfuerzo Permisible.....	57
3.4.1.2 El factor de evaluación por el Estado Limite.....	59
3.4.2 Interpretación y comparación de los resultados obtenidos de desplazamiento y de los factores de evaluación en relación a posición de carga y su influencia en la capacidad del puente.....	60
3.4.2.1 Comparación de los resultados obtenidos del modelo y el valor permisible con la d	

desplazamiento en relación a posición de carga.....	61
3.5 Conclusiones Parciales.....	62
Conclusiones Generales.....	63
Recomendaciones.....	64
Referencias bibliográfica.....	64
Bibliografía.....	66
Anexo 1.....	69
Anexo 2.....	71
Anexo 3.....	73

Introducción

Antecedentes o fundamentación:

En los últimos 50 años se ha incrementado en Cuba la red vial ferroviaria y carreteras propiciado por el desarrollo económico del país en las décadas del 70 y 80 principalmente conllevando a la construcción de innumerables puentes para ambos tipos de vías en todo el país.

En estudios en la región central del país se ha podido determinar que existen estados de deterioros avanzados en 493 puentes en sus vías férreas, de ellos 28% están evaluados de regular o mal, lo que corresponde a 33% de la longitud total de los puentes.

Con respecto al estado de los puentes de carretera en los últimos tiempos han revelado que existen más de 800 puentes con estados de averías menores y averías avanzadas, lo cual ha estado determinado por la poca atención a la conservación de los puentes y dentro de lo cual se manifiesta el casi nulo mantenimiento en sus diferentes formas.

La situación económica de los últimos 15 años en Cuba no ha permitido desarrollar un régimen de conservación adecuado lo que unido a la avanzada edad de los puentes, ha contribuido a agravar la situación con el aumento de los deterioros en muchos de ellos y por lo tanto el detrimento de su estado técnico y su condición estructural.

En relación con esta problemática se tratará de enfrentar el estudio integral del puente ferroviario, que fue construido alrededor de 1906, que une a las ciudades de Santa Clara y Placetas, que ha estado sometido al impacto además de varias perturbaciones ciclónicas, presenta hoy al igual que otros puentes de acero, un estado de deterioros avanzado y un alto grado de corrosión en gran partes de sus elementos estructurales.

Planteamiento del problema:

Actualmente los puentes metálicos de ferrocarril en Cuba presentan un estado de deterioro avanzado. En relación con esta problemática este trabajo presenta un enfoque integral para el estudio del puente ferroviario del km 9.568, construido alrededor de 1906 que une a las ciudades de Santa Clara y Placetas. Presentando un alto grado de corrosión en gran parte de sus elementos estructurales, debido a causas diversas que es necesario definir junto al estado de deformación y

de esfuerzos, que permita establecer el factor de la evaluación de los elementos de la estructura del puente.

Interrogantes:

¿Cuál será el valor cuantitativo de los estados de tensiones y deformaciones de los elementos estructurales del puente ferroviario, para el nivel de daños y deterioros existente?

¿Cómo aplicar un método de modelación numérica efectiva a la situación de los elementos deteriorados del puente?

¿En cuánto se recupera la capacidad portante del puente para la carga de la locomotora C-30?

Hipótesis:

Realizando la modelación numérica en 2D y 3D basada en la aplicación de los métodos numéricos, combinada con la valoración del estado de puente, las características de sus materiales, su geometría, las cargas que realizan operaciones en ella, incluyendo la instrumentación (Pruebas de carga in situ), se puede evaluar el puente y realizar un análisis de las posibles variantes con vistas a solucionar la rehabilitación efectiva del mismo, y dotarlo de su capacidad portante definitiva.

Objetivo general:

Realizar un estudio integral del puente de acero a través de la modelación estructural y numérica que combine el modelo de las cargas, de los materiales, de la estructura y de los deterioros producidos, que permita la obtención de los estados tensionales y deformacionales con vistas a su rehabilitación.

Objetivos específicos:

1. Recopilar y organizar el conocimiento teórico y práctico existente sobre el cálculo de puentes utilizando técnicas computacionales.
2. Desarrollar una modelación matemática de puentes metálicos ferroviarios en 2D y 3D, realizando la simulación y el análisis por Elemento Finito mediante software SAP2000 (versión 12) que combinada con la instrumentación (prueba de carga in-situ) permita determinar la capacidad portante del mismo.

3. Evaluar los elementos del puente metálico ferroviario en causa que incluya la valoración del estado físico de puente estudiado, un correcto análisis del régimen de explotación a que esté sometida, su forma de modelación matemática basada en la aplicación de los métodos numéricos la cual combinada con pruebas de carga in-situ permitan determinar el factor de evaluación de los elemento (raiting) del puente.

Novedad científica:

A partir de la aplicación de una metodología que combina varias técnicas como: Auscultación, Levantamiento estructural y Patológico, Ensayos e instrumentación (pruebas de carga in-situ) y modelación se obtendrá parámetros necesarios para determinar la capacidad de carga en condiciones de servicio y la evaluación del estado técnico para un puente metálico ferroviario.

Estructura del trabajo.

Resumen: Se plantean los aspectos fundamentales de la temática del trabajo.

Introducción:

Se realiza un análisis de los antecedentes en cuanto a la problemática del estado patológico general de los puentes en Cuba, realizando una breve reseña histórica, y sobre esta base se establece el diseño de la investigación.

Capítulo I: Estado de arte de la temática.

Se realiza un amplio estudio bibliográfico y se obtiene el análisis del estado del objeto de la temática, lo que posibilita el desarrollo de la investigación. En el mismo se expondrán los antecedentes sobre estudios generales, términos, definiciones, tipológicos, clasificación, deterioros existente en los puentes de acero, ensayos y diagnósticos haciéndose un análisis de la bibliografía al respecto y destacándose los fundamentos teóricos principales.

Capítulo II: “Modelación del puente metálico del ferrocarril km 9.568 del Ramal Santa Clara - Cenizas”.

Comprenderá la modelación estructural del puente a partir de la información del Levantamiento Estructural y patológico, se analizarán diferentes variantes de modelación y los modelos

Calibrados. Proveer un breve repaso de la actividad relacionada con la evaluación experimental de los puentes además, los detalles básicos de los dos tipos de ensayos de prueba (ensayos de diagnóstico y ensayos de prueba) para la evaluación de los puentes. En este capítulo se analizará los resultados obtenidos de los ensayos de prueba de carga realizados. En el mismo se realizará un análisis comparativo a nivel cualitativo entre los resultados de la modelación y los ensayos (ensayos de campo e instrumentación).

Capítulo III: “Análisis de los resultados de la modelación con las mediciones por sensores. Determinación de la capacidad portante del puente Km. 9.568”.

En este capítulo, con el modelo calibrado se realizara el análisis y estudio de las tensiones y deformaciones obtenidas de capítulo anterior. Se analiza el efecto de la carga de las locomotoras TEM-4 y C-30-7 sobre el modelo con el efecto de la carga dinámica. Se estiman la pérdida de la capacidad portante de puente y además se establecen las condiciones de explotación actuales y futuras (después de reparado).

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos.

Capítulo I**“Estado del arte de la Temática”****1.1 Introducción y Fundamentación Metodológica.**

Los puentes metálicos son el tipo de obra de fábrica, que predomina en las vías férreas de Cuba, exceptuando la Línea Central. La mayoría de los puentes metálicos fueron construidos en las primeras décadas del siglo XX y tuvieron un amplio campo de aplicación utilizándose desde luces pequeñas a Grandes Luces y lo mismo se puede decir para la longitud total.

Actualmente en Cuba su mayor campo de aplicación es en la sustitución de alcantarillas dañadas total o parcialmente por fenómenos climatológicos, debido a que este tipo de obra (PM) se construye rápidamente y se pueden utilizar elementos reciclados, lo que permite que se restablezca el tráfico ferroviario en poco tiempo, con bajos costos, además se aumenta la capacidad de la sección transversal del cauce lo que disminuye el riesgo de daño por crecidas. En este capítulo se hace un análisis del estado actual del conocimiento de la aplicación de los métodos numéricos basado en el método de elementos finitos, en especial la modelación matemática, como herramienta de solución de los problemas tensión-deformacionales presentes en una estructura de puente ferroviario metálico y fundamentalmente como vía para establecer parámetros de los materiales que componen el puente en el momento que se realiza la evaluación y con estos poder definir la capacidad portante de las mismas. Finalmente se hace comentario de los ensayos realizados para determinar la clasificación de los materiales de puente.

1.2 Generalidades.

Los puentes son estructuras de importancia singular dentro del sistema vial de un país. Tanto los puentes de carreteras como los de ferrocarril son estructuras que requieren ser conservados, porque son vitales para el buen funcionamiento del sistema vial. De esta manera su estudio dentro del campo de la ingeniería civil es un aspecto imprescindible.

Concepto general del *Puente*:

Obra de fábrica destinada a salvar obstáculos naturales (ríos, valles, lagos o brazos de mar) u obstáculos artificiales (vías férreas, carreteras, etc.) con el fin de unir caminos de viajeros, animales y mercancías.

1.3 Clasificación General de los puentes.

A través de la Historia los puentes han evolucionado dando a lugar a numerosas tipos de estructuras como consecuencia de necesidades concretas y en correspondencia con el desarrollo científico técnico y económico de cada lugar o país. Esto ha dado lugar a que exista una gran diversidad de tipologías y como consecuencia que la clasificación tipológica se pueda realizar atendiendo a diferentes aspectos.

Concentrándonos en dos aspectos: utilización y material de construcción. Este estudio se centrara en los puentes metálicos ferroviarios, que se presentara posteriormente.

1.3.1 Clasificación de los puentes metálicos de ferrocarril en Cuba.

Los puentes de ferrocarril en Cuba se clasifican según la (NRMT, 1999) donde primero se dividen en función del tipo de material de la superestructura y luego se subdividen atendiendo al tipo de elemento principal (de la superestructura) y a la posición de la cama o tablero respecto al elemento

Los puentes metálicos de ferrocarril *se pueden clasificar (o diferenciar)* atendiendo a:

- Tipo de construcción.
- Posición del tablero.
- Tipo de Cama.
- Características estáticas de las estructuras principales.
- Método de unión de los elementos que conforman las estructuras.

En este se profundizará cuanto al tipo de construcción en el estudio de los puentes de viga de alma llena tablero superior.

1.3.2 Características de puentes de viga de alma llena (Superestructura).

Los Puentes de Viga de Alma Llena, son aquellos que el elemento principal de la superestructura lo constituyen vigas de sección I conformadas. Cada Viga Principal está formada por: el alma, una plancha vertical; las alas por perfiles de angulares de alas iguales o desiguales. Las alas también pueden estar reforzadas con una o más platabandas que son planchas horizontales que generalmente sobresalen de los extremos de los angulares de 1cm a 2cm, el número y longitud de las platabandas está determinada por los requerimientos de

diseño. Todos los elementos que conforman la viga están unidos entre sí en la mayoría de los casos mediante remaches y en menos casos soldadura. El peralte de estas vigas se fija entre $1/7$ y $1/11$ de la luz de cálculo y puede variar según la altura constructiva requerida (tiene que ver con la rasante) y la rigidez necesaria. Otro elemento que forma parte de estas vigas son los rigidizadores verticales elementos unidos al alma de la viga mediante remaches el espaciamiento se fija por cálculos y generalmente en los apoyos se utilizan angulares unidos o espaciados 0,2m hasta 0,55m sobre los apoyos y entre 0,7m y 2,0m en el resto de la viga. Los rigidizadores verticales junto son el que garantiza la estabilidad del alma.

Atendiendo a la posición de la cama podemos decir que estos puentes se dividen en dos tipos fundamentales:

1. De tablero superior.
2. De tablero inferior.

Se presentara posteriormente una breve descripción y característica de puente de vigas de alma llena tablero superior con cama de madera sin tablero, por ser tipo de puente en causa.

1.3.2.1 Puentes de vigas de alma llena tablero superior.

Estos puentes pueden ser de tres tipos atendiendo al tipo de cama y la presencia o no de tablero propiamente dicho.

- 1- Puentes de tablero superior con cama de madera sin tablero.
- 2- Puentes de tablero superior con cama de madera con tablero superior (un sistema de vigas longitudinales y transversales).
- 3- Puentes de tablero superior con cama de balasto (cajón de hormigón sobre las vigas).

1.3.2.1.1 Puentes de tablero superior con cama de madera sin tablero.

La estructura principal de los puentes de alma llena de tablero superior con cama de madera está formada por dos vigas **I** con traviesas de madera apoyadas directamente sobre las platabandas superiores, es el tipo de puente de viga de alma llena que mas existe debido a su sencillez, facilidad y rapidez de ejecución y la de menor peso. Sin embargo genera alturas constructivas grandes por lo cual no siempre se pueden utilizar (tema de la rasante), además solo son aplicables a simple vía.

1.3.2.1.1.1 Descripción.

Como habíamos dicho este tipo de puente la estructura principal la constituyen dos vigas **I** que pueden ser remachadas o soldadas. Las remachadas abundan más y se logran luces mayores. La distancia entre las vigas es de 1,80m a 2,20m y en casos excepcionales 2,5m si se aumenta la distancia entre las vigas se hace necesario colocar traviesas más resistentes (mayor sección), se dificultan las uniones, aumenta el ancho de la subestructura. Pero para grandes luces (en el límite de la tipología) y puentes en curva esta distancia al aumentar favorece la estabilidad transversal y la rigidez lateral. Además de las vigas principales existe un sistema estructural secundario que es el sistema de arriostramiento que une a las vigas de forma tal que garantiza la rigidez en la superestructura. Este sistema está constituido por el arriostramiento longitudinal y por en arriostramiento transversal.

Los arriostramientos longitudinales se pueden lograr de dos formas en cruz o triángulos. Arriostramiento transversal, se hace por sistemas cruz en diagonal y por tirantes, distribuidos a lo largo de la viga en los apoyos más cercanos se colocan a un menor espaciamiento para lograr una mayor rigidez transversal en estas zonas.

Otro elemento que no es común y que puede presentarse son ménsulas en las cabezas de las vigas que apoyan sobre los estribos y en estos casos se colocan angulares en las alas superiores para evitar el corrimiento de la cama de la vía.(NC, 1984)

1.4 Patologías en los puentes metálicos de ferrocarriles

Las *patologías* que se desarrollan en los elementos de los puentes son las diferentes manifestaciones de deterioro y de daños de los mismos como resultado de la acción de las cargas, del intemperismo y de otros agentes agresivos a lo largo de la vida útil de la estructura.

Todas las obras durante su explotación están expuesta a la acciones del medio ambiente que las rodea. De igual manera los puentes de vías férreas se encuentran expuesto a situaciones como: el viento, los cambios de temperatura, las cargas rodantes sobre él, las sustancias agresivas que puedan afectarlo y el envejecimiento. La patología puede afectar directamente el comportamiento estructural de los elementos que componen el puente afectando así la capacidad de carga de este, o influir en elementos que no tienen una responsabilidad estructural pero si de seguridad del puente.

1.4.1 Patologías de Acero

Se llama *corrosión* a la alteración que causa el ambiente en un elemento metálico, excluyendo los efectos puramente mecánicos como el desgaste por frotación y la ruptura por impacto. Los ejemplos más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa de aire, como la herrumbre del hierro y de acero.

La oxidación y la corrosión de los metales es un fenómeno natural. En efecto salvo raras excepciones los metales están presentes en la tierra en forma de óxido, en los minerales (como la bauxita si es aluminio, la hematina si es Hierro). Desde de la pre-historia, toda la metalurgia a consistido reducir los óxidos en bajos hornos, luego en alto hornos para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal al estado natural, el óxido.

La corrosión es una reacción química oxidorreducción en la que intervienen dos actores:

-La pieza

-El ambiente

Además, el material del que está hecha la pieza no es el único parámetro. La forma de la pieza y los tratamientos a los que se la somete (conformación, soldadura, atornillado) tiene un papel primordial. Así, un montaje de dos metales diferentes (por ejemplo, dos variedades de acero, o el mismo acero con tratamientos diferentes) puede dar pie a una corrosión acelerada; además, a menudo se ven trazas de herrumbre en las tuercas. Asimismo, si la pieza presenta un intersticio (por ejemplo, entre dos placas), ahí puede formarse un medio confinado que evolucionara de un modo diferente del resto de la pieza y por lo tanto, podrá llegar a una corrosión local acelerada. De hecho, toda heterogeneidad puede desembocar en una corrosión local acelerada, como, por ejemplo, en los cordones de soldadura, por eso hay que evitar las zonas de confinamiento, los contactos entre los materiales diferentes y las heterogeneidades en general. Hay que prever también la importancia de la corrosión y el tiempo en el que se habrá que cambiar la pieza, mantenimiento preventivo.

La *corrosión* es, pues, un fenómeno que depende del material utilizado, de la concepción de la pieza (forma, tratamiento, montaje) y del ambiente. Se puede influir entonces en estos tres parámetros; se puede influir también en la reacción química del mismo.(Islain, 2005)

1.4.1.1 Patología más frecuente en los puentes metálicos de ferrocarril

En los puentes metálicos de vías férreas los daños más frecuentes debido a esta patología son fácilmente reconocibles en las *platabandas superiores*, siendo en estos elementos planos y en posición horizontal donde apoyan las traviesas de madera causando una concentración de *humedad* en esta zona que con el tiempo *deteriora* las planchas de acero y varia la sección del elemento en gran parte del área afectada. Esto se hace frecuente además en las *uniones* de los rigidizadores superiores horizontales con las platabandas, destruyendo con el tiempo dicho unión. Esto provoca una *pérdida de rigidez* en las *vigas* del puente.

Cama del puente

Se comenzará especificando los daños en la cama de los puentes válidos para todas las tipologías a tratar, aunque puede no influir directamente en el comportamiento estructural, si es un aspecto importante en el análisis.

La falta de clavos en las *guarderas* es frecuente, debido a su mala colocación o simplemente no colocado. Provocando el desplazamiento de las traviesas y la unión de estas formando espacios sin apoyo dando lugar a un bache en la vía.

En el *guardacarril* se encuentra generalmente la ausencia de los clavos encargados de la fijación, separación en la punta de diamante, provocando posibles desplazamientos que pueden impedir su correcto funcionamiento en casos de descarrilamiento.

En *carriles* podemos encontrar falta de platinas y tornillos, tuercas y arandelas, juntas mal apretadas, la ausencia parcial o total de la fijación provocando desplazamiento y flechas que se traducen en inseguridad de la vía.

Entre los defectos mas observados en las *traviesas* encontramos, muchas sin la altura suficiente provocando una separación entre la silla y el carril, el descenso y ascenso de esta saca el clavo de la madera y deshace la fijación, además de crear baches. Debido a la mala calidad de la madera es frecuente encontrar que las traviesas se esponjan con la humedad y se encuentran alabeadas, torcidas, fisuradas o rajadas, esto trae consigo la rotura de la fijación.

(Cardona, 2007)

Aparatos de apoyo

Estos se ven afectados por la acumulación de suciedad, cuerpos extraños además es un punto donde hay una gran concentración de humedad por tanto se manifiesta mucho la corrosión, todo estos agentes externos provocan el deterioro de los elementos que constituyen el sistema

de apoyo y por consiguiente afecta el buen funcionamiento de los mismos y además se generan esfuerzos adicionales (no previstos) en la estructura (Pino, 2009).

1.5 Instrumentación y ensayos.

La instrumentación de la estructura consiste, básicamente, en la colocación en puntos prefijados en el proyecto de prueba de carga, de aparatos de medida de flechas, deformaciones, giros, aceleraciones, etc.

La instrumentación y caracterización del comportamiento de los materiales y deterioros, es una técnica que posibilita estudiar fenómenos patológicos y vínculos de interrelación entre ellos, cuantificándose las variables de respuesta de forma puntual. Como es lógico, antes de realizar un proceso de modelación encaminado a estudiar y validar las causas que propician las patologías, manifestaciones, fenómenos y procesos patológicos, es necesario efectuar, al menos, el diseño e instrumentación de la estructura del puente, con el objetivo de obtener las variables de respuesta o control, son cuantificadas a través de las diversas técnicas de instrumentación. Una buena instrumentación combinada con otras técnicas como la modelación, inspección y levantamiento patológico permite dar un adecuado diagnóstico, el mismo que conduzca a dar las soluciones más fiables y eficientes desde el punto de vista técnico.

Para este caso de estudio se le realizó la instrumentación a todo el puente por tener una sola luz extendiéndola a los arriostramientos y rigidizadores.

1.5.1 Equipos de instrumentación.

Extensómetro: si el material es isótropo y homogéneo y no se sobrepasa su límite elástico entonces la relación es lineal y se cumple la Ley de Hooke. [Chagoyén, 2005].

Basándose en este principio, la extensometría es el método que tiene por objeto la medida de las deformaciones superficiales de los cuerpos, que como se hace referencia anteriormente solo es aplicable en materiales que se encuentren en comportamiento elástico y mediante el uso de galgas extensométricas.

Galgas extensométricas: de entre los diferentes procedimientos que existen para convertir las deformaciones en señales eléctricas proporcionales, el más extendido es el que utiliza elementos cuya resistencia eléctrica varía en función de pequeños cambios de longitud. Estos elementos van adheridos a la superficie del material de prueba, formando un conjunto y

reciben el nombre de galgas extensométricas. Existen dos tipos fundamentales de galgas: Galgas metálicas y galgas semiconductores.

Clasificación de las medidas extensométricas:

Tomando como criterios la evolución de los esfuerzos a medir según [Chagoyén, 2005] se puede tener:

- *Medidas estáticas*, que comprenden el estudio de esfuerzos que varían lentamente en función del tiempo, como es el caso de la estructura de una presa cuando crecen las aguas.
- *Medidas estáticas - dinámicas*, que consiste en la mediada simultánea de esfuerzos sujetos a variación rápida y de esfuerzos de desarrollo lento. En el caso de un puente cuando soporta el paso de un vehículo.
- *Medidas dinámicas*, que se limitan a la componente de variación rápida. Un caso típico es la medida de vibraciones en el equilibrado de rotores.

Además de las galgas extensométricas según (Alonso E., 1989) existen otros equipos de instrumentación, entre los cuales anotamos los siguientes:

Censores Láser - con este equipo de registro continuo se obtienen mediciones de desplazamiento y velocidad en un punto determinado del puente. El empleo de este equipo es de gran utilidad en aquellos casos en que se imposible utilizar los instrumentos de medición antes reseñados.

Transductores magnéticos - se utilizan en la medición de desplazamientos. Constan de una base fija directamente apoyada en el terreno y de un núcleo móvil unido a la fibra interior de las vigas con un alambre de acero, que se mantiene tenso mediante un resorte.

Acelerómetros - Para las pruebas dinámicas, se puede disponer de varios servo acelerómetros con y sin compensación interna de 1 g para el registro de aceleraciones verticales y horizontales. (Alonso E., 1989)

1.6 Diagnostico patológico.

El proceso de diagnóstico, es imprescindible dado que va a permitir conocer la enfermedad, determinar el estado en que se encuentra el enfermo, es decir, evaluar sus reservas o su capacidad resistente, y basándose en todo esto poder realizar un pronóstico que puede ser optimista, en cuyo caso el enfermo evolucionará favorablemente mediante la aplicación de una terapia adecuada. Nuestra estructura podrá recuperar sus características resistentes

mediante una reparación o el pronóstico o tendrá que sufrir amputaciones o en el último caso su demolición.

Las causas que pueden provocar lesiones en una estructura pueden ser muchas y muy variadas y pueden estar relacionadas con el propio proyecto, con los materiales, con la ejecución y con el uso o explotación de la estructura

Los orígenes de los fallos o lesiones, pueden proceder de acciones de tipo mecánico, físico, químico, electroquímico o biológico. Por supuesto que las lesiones producidas a edades cortas suelen tener su origen en acciones de tipo mecánico y físico. Las de origen químico precisan del paso del tiempo para que sus efectos se manifiesten, aunque también es cierto que una vez que han aparecido éstos, es mucho más difícil encontrar soluciones de reparación.

El concepto del diagnóstico patológico o diagnóstico técnico según **(Olivera Ranero, 2003b)** puede definirse más exactamente como: Conjunto de actividades de revisión, pruebas y ensayos que se realizan sobre la estructura para conocer las características de su estado patológico, esclarecer sus causas probables y decidir las acciones correctivas a ejecutar para llevarla a la normalidad.

Los objetivos que se persiguen con el diagnóstico patológico son los siguientes:

- Determinar la manifestación, alcance y gravedad de los deterioros que afectan a la estructura.
- Determinar las causas del proceso patológico que se desarrolla en la estructura.
- Esclarecer la evolución que ha sufrido el proceso patológico de la construcción y pronosticar su evolución probable futura.
- Precisar la posible intervención y las acciones técnicas principales a realizar en la edificación para eliminar las causas y restituir las condiciones perdidas a los elementos afectados. **(Recarey Morfa Carlos A., 2009)**

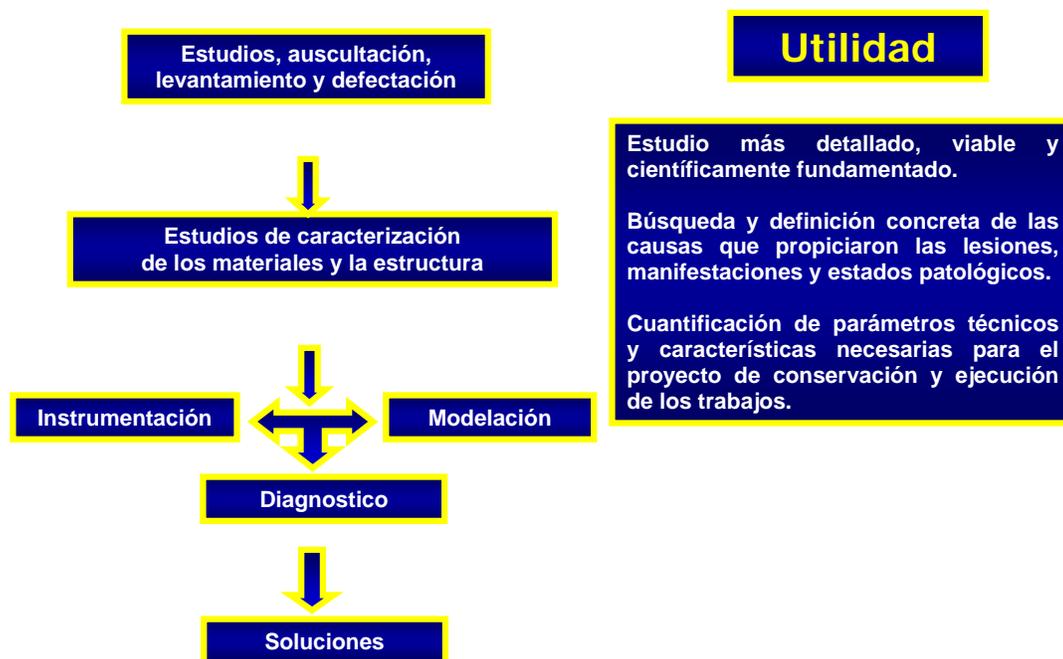


Figura 1.1: Esquema general de diagnóstico.

1.6.1 Métodos generales de diagnóstico.

Según (Olivera Ranero, 2003b) en la actividad del diagnóstico patológico se aplican tres métodos generales de indagación, análisis y formulación de conclusiones, los cuales pueden identificarse como:

- Intuitivo o directo
- Diferencial
- Inductivo-deductivo

El **método intuitivo**: radica en el análisis primordial de los signos externos o visibles del deterioro, la suposición de determinados esquemas del principio y la aplicación de la experiencia y capacidad de discernimiento de las personas que realizan el diagnóstico.

El **método diferencial**: se basa en concentrar el diagnóstico en el análisis de los deterioros que por su gravedad, extensión e importancia, sean decisivos o determinantes en el estado patológico de la edificación. Se realizan este método en las partes básicas de la edificación:

cimentaciones, estructura y cubiertas, derivando de tal estudio la situación patológica esencial del inmueble.

El método inductivo-deductivo: permite no solo el análisis específico de los desperfectos en su ámbito local, sino de la obra integralmente y de otros factores influyentes, logrando así la interpretación de un amplio conjunto de datos e informaciones que permitan la ratificación o el descarte de juicios provisionales que van surgiendo en el transcurso del diagnóstico.

En este proceso, no solo se aplican procedimientos visuales u organolépticos, sino que se complementan con diversos estudios tecnológicos y de instrumentación, acorde con las necesidades del diagnóstico.

Aunque hay especialistas que reconocen la existencia de un cuarto método, denominado el **método hipotético**, que está presente en cualquiera de los otros tres métodos generales. **(Olivera Ranero, 2003a)**

Se deben tener en cuenta que existen elementos que pueden afectar la seguridad sin que afecte la capacidad portante propiamente dicha. Además con el diagnóstico se permite predecir si puede o no pasar algún tipo de vehículo, a la velocidad que puede circular, todo esto sin ocasionarle daño al puente. Con esto se puede además establecer medidas emergentes, (reducción de velocidad, prohibición del paso a algún tipo de tren), en general tomar medidas para no poner en riesgo ni al puente ni a los usuarios del mismo.

1.7 Modelación numérica aplicada.

1.7.1 Introducción

La realización de proyectos de investigación con la utilización de las nuevas técnicas de modelación mediante los Elementos Finitos en la comprobación, construcción y/o diseño posibilita un ahorro de tiempo al dar los resultados y por tanto son más económicos.

Además la modelación proporciona grandes ventajas; pues se puede simular las condiciones más críticas y con ellos buscar el diseño más adecuado para eliminar o evitar el fallo del objeto de estudio sin tener que dañarlo. Facilita la dirección y la atención en el momento de realizar los experimentos. Con gran frecuencia son utilizados en el chequeo de los puentes de ferrocarriles que trabajan en condiciones, adversas y debido a esto se hace necesario un chequeo constante en las estructuras metálicas.

Según el Dr. Meli Piralla el diseño estructural, es una frase que se ha modificado con el paso del tiempo y el desarrollo consecuente de la ciencia que trae consigo mayor entendimiento de la razón y ser de las estructuras:

“EL DISEÑO ESTRUCTURAL ES EL ARTE DE USAR MATERIALES QUE EN REALIDAD NO CONOCEMOS PARA FORMAR ESTRUCTURAS QUE EN REALIDAD NO PODEMOS ANALIZAR, DE MANERA QUE RESISTAN CARGAS QUE EN REALIDAD NO PODEMOS EVALUAR, TODO ESTO DE MODO TAL QUE EL PUBLICO NO SE DE CUENTA DE NUESTRA IGNORANCIA”.(Piralla, 1987)

La modelación es el recurso que ha usado el hombre durante el transcurso de los años para lograr llevar a objeto de estudio la situación o el problema real que se le presenta en casi todos los problemas ingenieriles, es capaz de dar una solución aproximada a casos que por su complejidad matemática requiera de la aplicación de cálculos utilizando ordenadores.

La definición de modelación está ligada al término: “*modelo*”, el cual se puede definir como, *el cuerpo de información, relativa a un sistema, recabado para fines de estudiarlo.*

En el campo de la ingeniería, el hombre ha tenido que enfrentarse a un grupo de fenómenos donde por limitaciones del conocimiento o por la carencia de una infraestructura técnica adecuada, no ha podido encontrar la respuesta en el “*problema real*”. Esto ha propiciado que tenga que realizar “*modelos*” sobre los cuales se trabajan buscando una respuesta analítica, que por muy precisa que ella sea, los resultados obtenidos serán indicativos del “problema real” en la medida que el “modelo” represente fielmente sus propiedades esenciales [Recarey, 1999].

Los modelos y los métodos de modelación pasan así a ser herramientas importantes del trabajo.

A medida que se desarrolla el proceso investigativo se perfecciona el método de modelación, lo común del modelo y del objeto modelado. Es decir, se modifica, cambiando su interpretación, pero se mantiene siempre una correlación objetiva entre el “*modelo*” y el “*objeto*” modelado, de forma que este proceso tenga un sentido racional. Es por eso que la condición fundamental de la modelación es la presencia de una correlación, en determinada

relación, entre el modelo y el objeto modelado, aspecto objetivo de la fundamentación de la modelación.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede definir la *modelación* como:

El método que opera de forma práctica o teórica con un “objeto”, no de forma directa, sino utilizando cierto sistema intermedio auxiliar (natural o artificial), el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el “objeto” modelado y está en condiciones de sustituir el “objeto” que se estudia, en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener determinada información susceptible de comprobación experimental [Recarey, 1999], siendo de estricto cumplimiento la existencia de:

- Una concordancia objetiva con el propio sistema, es decir, una determinada correspondencia objetiva con el objeto mismo de la investigación.
- En cierta etapa de la investigación, está en condiciones de sustituir, en determinada relación, al objeto mismo que se estudia.
- La propiedad de suministrar información sobre el sistema que nos interesa.
- Contar con determinadas reglas, mediante las cuales la información del modelo pueda transformarse en información de sistema u objeto.

La *relevancia* se refleja en el proceso de modelación, debido a que el modelo solo debe incluir los aspectos del sistema más relevantes al objeto de estudio. Aunque la información irrelevante no perjudica, se debe excluir debido a que aumenta la complejidad del modelo y genera más trabajo en la solución del mismo.

Generalmente el proceso de modelación se trata de dividir en forma genérica en dos tareas o fases: la determinación de la estructura del modelo y el suministro de los datos o información del comportamiento del sistema. La primera fase establece la frontera del sistema e identifica las entidades, atributos y actividades del mismo. En la segunda, la información o datos proporcionan los valores que los atributos pueden tener y definen las relaciones involucradas en la actividad, ambas tareas se deben definir más como componentes de una tarea más compleja que como componentes separados; esto ocurre debido a que, por lo general, están tan íntimamente relacionada que no se pueden llevar a cabo una sin ejecutar la otra.

Se ha vuelto imprescindible la obligada atención que la construcción de modelos acarrea, ya que: *primero*, requiere de una rigurosa adherencia a propósito; el objetivo a estudiar debe estar constantemente presente en el proceso de modelación a fin de que el modelo apropiado salga a la luz, *segundo*, la construcción de modelos es un balance armonioso de oposiciones; por una parte el modelo debe ser lo suficientemente simple de manipular, lo que significa que debe ser necesariamente una abstracción de la realidad y por otra, debe ser lo bastante complejo como para parecer un espejo del sistema que representa. Al alcanzar finalmente el balance armónico requiere de astucia y conocimiento. [Recarey, 1999]

Se han establecido diferentes esquemas para tratar de explicar el proceso de modelación de los problemas ingenieriles, pero uno de los más completos consultados se encuentra en anexos. Se presenta uno de los ejemplo en la Fig. 1.2.



Figura 1.2: Esquema del análisis de la modelación.

1.7.2 Clasificación del esquema general de los análisis de la modelación a partir de subdividirlo en diferentes etapas:

- 1º) La primera etapa en la modelación es la *definición del problema*, la cual, pretende definir la problemática a resolver. Esta es la de fenómeno físico real que en sí, es el problema físico que se desea resolver tal y como se presenta, con todas sus particularidades, especificaciones y detalles, desechando aquellas cuestiones de menor significación para el problema a modelar.
- 2º) La segunda etapa de la modelación es el *modelo físico*, está relacionado con el estudio de requisitos, atributos, aspectos físicos reales y agentes actuantes entre otros aspectos

de interés (fenómeno físico real). Una vez identificado y conocidos estos aspectos se hace necesario la construcción de un modelo del problema a resolver. Este modelo físico está estructurado en varios sub-modelos referidos en la figura 1.

Modelos del material

Para los *materiales* se han utilizado diversos *modelos* constitutivos hasta hoy, unos más alejados y otros mucho más acertados entre los que se encuentran los siguientes.

- Modelo elástico lineal y no lineal
- Modelo plástico
- Modelo viscoso
- Modelo elasto-plástico
- Modelos de Daño
- Modelos reológicos
- Modelo visco-elástico
- Modelo visco-elástico-plástico

Existen varias alternativas para dar solución a todos los modelos matemáticos que pueden estar presentes, cada una constituye un método, los que se pueden agrupar en *empíricos*, *analíticos* y *numéricos*.

Este último ha tenido una amplia difusión en el campo de la ingeniería con la aparición de computadoras cada vez más potentes y programas de computación más modernos que implementan dichos métodos, esto permite al ingeniero analizar problemas cuya solución analítica es inabordable por su complejidad y la empírica es dudosa. En la actualidad, con la aplicación del *Método de los Elementos Finitos* y el *Método de Diferencias Finitas*, entre otros se obtienen respuestas apropiadas a problemas que por presentar un elevado grado de dificultad, estos tengan que empezar a jugar su papel. En estos tiempos es normal la integración del cálculo por elementos finitos (Finite Element Analysis - FEA) y el dibujo asistido por computadora (Computer Aided Design - CAD), siempre con el objetivo de reducir los tiempos de proyectos o de puesta de producto en el mercado. Todo esto vinculado con el desarrollo de la industria de la computación y la programación ha favorecido la aparición en el mercado de sistemas profesionales basados en estos métodos numéricos con grandes potencialidades para el análisis de los problemas tensión – deformación asociados

con los sólidos, entre los cuales se destacan: ANSYS 10.0, SDRC/IDEAS, ABAQUS, COSMOS, SAP2000, STAAD, etc (**Broche Lorenzo, 2005**).

Al recurrir a procedimientos automatizados de cálculo se libera al proyectista de esas tareas rutinarias y se le permite dedicar su atención a los problemas fundamentales de la concepción de la estructura y de la solución de sus aspectos básicos, así como a la revisión de los resultados.

Con el desarrollo y el uso de la computación el especialista ha encontrado en los Elementos Finitos una vía rápida para la solución a las problemáticas que frecuentemente se enfrenta. Ellos brindan grandes ventajas como: dar soluciones rápidas y seguras, hacer comparaciones entre materiales, comportamiento de piezas, modelar el comportamiento de estructuras a construir o en explotación y de esta forma se hacen los diagnósticos para poner en práctica la solución más aceptada y económica posible.

3º) La tercera etapa consiste en que al modelo físico de la estructura representado a través del esquema de análisis puede ser estudiado por **diferentes modelos matemáticos** de uno u otro tipo y de diversas complejidades. El modelo matemático queda perfectamente expresado cuando se define sus elementos, es decir, la región, las condiciones iniciales, de contorno o borde y de vínculos; además de las ecuaciones que describen el modelo físico. En el caso de ese último elemento está muy íntimamente relacionado con el tipo de modelo matemático.

4º) La cuarta etapa permite al ya haber establecidos los modelos, la integración y resolución de los mismos a través de diferentes **métodos de solución**, luego se realizan los procedimientos de diseño para obtener la solución del modelo del problema real, introduciendo en esta solución, de alguna forma, un margen de seguridad que garantice que la solución obtenida sea lo más representativa posible de la real. [**Recarey, 1999**]

5º) La quinta etapa de la modelación corresponde al **Análisis de los resultados**.

6º) La sexta etapa corresponde a la solución a través de diferentes **Métodos de diseño y seguridad** para obtener la solución del modelo del problema real, que no es idéntica a la que se obtendría si se pudiera analizar el mismo de forma directa, por lo que resulta evidente que en dicho proceso es necesario introducir de alguna forma un margen de

seguridad, que garantice que la solución obtenida sea lo más representativa posible de la real y que siempre las posibles diferencias puedan ser tomadas por la seguridad introducida.

7º) Y la séptima y última etapa de la modelación sería la *Solución al problema real.* (Cardona, 2007)

1.7.4 Modelación con manifestaciones patológicas.

Después de haber creado el modelo se identifican y se escogen las zonas características a investigar, las cuales deben coincidir con las que presentan manifestaciones patologías graves o donde se generan los mayores esfuerzos. Este estudio permite a la hora de realizar un proyecto de restauración tomar soluciones consecuentes con la causa o las causas que provocaron dichas patologías. Para la modelación de las manifestaciones patológicas se emplean técnicas de teoría de daño, discontinuidades fuertes, o la modelación del daño o patologías a través modelar geoméricamente las discontinuidades o desperfectos que presenta la manifestación patológica en sí.

En el caso puntual de la modelación primeramente se procede a modelar la estructura en su estado original y con posterioridad se realiza la simulación de las patologías estructurales detectadas, para contraponer los mismos con las diferentes lesiones y manifestaciones patológicas existentes en el puente.

En este caso se modela la estructura con sus manifestaciones patológicas empleando técnicas avanzada de macro modelación y se combinan estas con simulaciones que se desarrollan a escala micro. En este proceso combinado de la macro y micro escala de modelación se emplean ensayos virtuales para la obtención de las propiedades constitutivas de las manifestaciones patológicas la cual se denomina *la extrapolación.*

Análisis de los resultados

El dominio de la técnica operatoria para la representación y ordenamiento de los resultados, es un proceso de conocimiento previo en el proceso de modelación estructural, pero el *procesamiento e interpretación de los resultados* tiene un especial significado e importancia, porque la comprensión de los resultados y su correspondencia con el fenómeno físico real, es la clave del éxito en el proceso de modelación. [Recarey, 1999]

Finalmente podemos afirmar que la modelación es uno de los métodos que ha evolucionado el ámbito ingenieril y sin lugar a duda permite afirmar la evolución del diseño estructural junto con ella, por lo tanto resulta más apropiado decir que:

“EL DISEÑO ESTRUCTURAL ES EL ARTE DE USAR MATERIALES QUE CADA DÍA CONOCEMOS MEJOR, PARA FORMAR ESTRUCTURAS ESTUDIADAS A PARTIR DE MODELOS QUE CADA VEZ SE ASEMEJAN MÁS A ELLAS, DE MANERA QUE RESISTAN CARGAS QUE ESTIMAMOS CON MAYOR EXACTITUD, TODO ESTO EN MODO TAL QUE EL PUBLICO SE DE CUENTA QUE NOS ACERCAMOS MÁS A LA RESPUESTA REAL DEL PROBLEMA ESTUDIADO.” [Quevedo 2006]

1.7.5 Calibración del modelo.

En el modelo calibrado se puede realizar un sin número de modelos que posibiliten estudiar y validar las causas que propician las patologías y a su vez dictaminar las posibles variantes de solución. En estos estudios es muy importante que el modelo este bien calibrado con respecto a los ensayos reales y que a su vez estos últimos estén perfectamente instrumentados ya que con el modelo se pueden estudiar situaciones de explotación que no se han estudiado previamente a través de las técnicas de instrumentación. Este aspecto posibilita abaratar considerablemente los estudios de diagnóstico e instrumentación de los puentes ya que se explotan al máximo las bondades de la modelación siempre y cuando exista un proceso de calibración numérica a partir de un estudio de estabilidad numérica y, como es lógico contraponiendo el modelo con respecto a una respuesta física.

1.8 Método de Elementos Finitos (MEF).

Las bases y los principios del MEF se conocen desde hace aproximadamente dos siglos. Aunque su uso no se difunde y se arraiga hasta la última década del pasado siglo debido al rápido desarrollo de las técnicas computacionales. En la actualidad goza de una amplia gama de aplicabilidad, la que abarca desde resolver cualquier problema de la física, entre otros.

El *método de los Elementos Finitos* es un método de solución numérico que se utiliza para realizar la modelación de la estructura. Algunos de sus principales aspectos teóricos y de aplicación, citados por (Luali, 2002; Mora, 2003 Y Álvarez, 2006), en el presente trabajo se retoman y se hace un resumen de las consideraciones más importantes, las cuales permiten

entender el por qué de su aplicación para la modelación estructural y comprender mejor el tema que se analiza:

- El MEF es un método de solución numérico, que a partir de un modelo matemático da solución a determinados problemas ingenieriles y permite dar respuestas rápidas, eficientes y con exactitud.
- Resuelve los problemas de análisis del modelo del material con comportamiento lineal y no lineal de las estructuras continuas.
- El MEF puede analizar el modelo propuesto cuando es sometido a diversas acciones con infinitos grados de libertad.
- Su principio reside en *discretizar* la estructura total o parte de ella en pequeños platos, denominados elementos finitos, solamente conectados entre sí a través de los llamados puntos nodales (o nodos de borde del elemento finito). De esta forma la estructura real se reproduce lo más ajustadamente posible, y se pasa de una estructura de infinitos grados de libertad a una de un número finito, hasta que en el límite el tamaño de estos elementos tiende a cero. Esta acción depende de una decisión ingenieril.
- A partir del principio del MEF, es posible abordar el estudio del comportamiento de una estructura por los métodos conocidos o por los enfoques matriciales mediante el empleo de programas computacionales. **(FORNONS, 1982)**

1.8.1 Discretización del modelo.

Como ayuda para definir las “*discretizaciones del modelo*” se emplea una malla que estará confeccionada en dependencia a los requerimientos y necesidades del modelo. Una malla de elementos finitos para la solución de un problema debe tener en cuenta lo esencial de la geometría de la estructura.

Las discretizaciones del mallado deben confeccionarse considerando los siguientes aspectos que se mencionarán:

1. Todas las simetrías compatibles con el problema mecánico (geometría, condiciones límites, cargas) deben ser utilizadas a fin de reducir el tamaño del sistema estudiado.

2. La malla debe ser suficientemente fina en las zonas más solicitadas, es decir, en las zonas donde existan grandes variaciones de los desplazamientos y las tensiones y menos fina donde se aleja de la zona de interés.
3. El tamaño de los elementos debe estar en la medida de lo posible de tal forma que la relación entre la mayor dimensión del elemento y la menor dimensión esté cercana a la unidad.

1.8.2 Pasos para el Análisis del Elementos Finitos en el software:

- 1º) Discretización o modelado de la estructura.
- 2º) Definir las propiedades del elemento.
- 3º) Ensamblar las matrices de rigidez de los elementos.
- 4º) Aplicación de las cargas.
- 5º) Definir las condiciones de frontera.
- 6º) Solucionar el sistema de ecuaciones algebraicas lineales o no lineal.
- 7º) Calcular los esfuerzos.

1.8.3 Mallado adaptativo.

La importancia de disponer de un medio para evaluar el error que se comete en el cálculo radica en que permite el refinamiento de los mismos. La finalidad es conseguir obtener resultados por debajo de un error marcado. En un elemento continuo la cantidad de interconexiones es infinito por lo que mientras más amplio sea el número de interconexiones más exacto será el método. No obstante con una elevada cantidad de elementos imposibilita la obtención de resultados de forma computacional.

1.8.4 Estimación del error.

Debido al carácter de la aproximación de elementos finitos la solución está afectada por diversas fuentes de error, siendo estas los más usuales.

1. Errores de modelización:
 - En la modelización de cargas exteriores
 - Modelización de condiciones de contorno.

2. Errores en la discretización:

- Errores en la aproximación de la geometría: Por falta de capacidad de las funciones de forma geométrica de representar con exactitud la geometría real. Este problema se resuelve aumentando el mallado o refinándolo en las zonas conflictivas para evitar este problema.
- Errores en la discretización: Relacionados con el tamaño del elemento y la función de forma de los corrimientos de los nodos. Como norma general se emplean elementos pequeños en las zonas de variación rápida de la solución, y elementos grandes en las zonas de variación lenta.

3. Errores de computación.

- Error en el cálculo de las integrales sobre los elementos: el cálculo analítico de las integrales del elemento puede revestir cierta dificultad y se recomienda utilizar integración numérica o polinomio de Legendre. Es necesario escoger el orden de integración adecuado o se cometerá un error al evaluar por defecto estas integrales.
- Errores en la resolución del sistema de ecuaciones: la principal causa del mal condicionamiento se debe a la existencia de un elemento o grupo de elementos de gran rigidez conectados a otro u otros elementos de baja rigidez.

La forma exacta de determinar los errores asociados a la solución del problema, es conocer la solución exacta y restarle el valor obtenido.

La dificultad estriba en que nunca se conocen los valores reales. Por ello la única manera que se ha encontrado de evaluar la bondad de solución es mediante estimadores de errores que comparan la solución de tensión calculada obtenida respecto a una solución obtenida interpolando con funciones N del mismo tipo que las empleadas para representar el campo de corrimiento calculado. (Valero, 2004)

Comparación de los resultados.

El objetivo de realizar la comparación es definir las ventajas de los modelos así como decidir cuál es el más adecuado para dar respuesta al problema real. El hecho de que los esfuerzos obtenidos proporcionarán valores aproximados, aseguran que el resultado esté en el intervalo correcto.

Antes de hacer la simulación del puente se realiza un ensayo de carga no destructivo para evaluar el comportamiento del mismo y establecer la comparación pertinente.

1.9 Pruebas de carga no destructivas para la evaluación de puentes.

1.9.1 Introducción

Numerosas pruebas de carga han indicado ciertos atributos del comportamiento que influyen favorablemente a la resistencia de algunos puentes existentes. Las guías de diseño muchas veces desestiman la verdadera capacidad de un puente existente, lo cual causa que algunos puentes tengan señales de límite de carga o en otros casos sean cerrados al tráfico sin necesidad. Como resultado se ha adoptado métodos de ensayo de carga no destructivos para obtener una predicción más precisa de la capacidad de los puentes.

Esta prueba fue realizada por una organización con experiencia en este tipo de trabajos, y dirigida por un técnico competente.

1.9.2 Pruebas de carga.

Se distinguen dos tipos de pruebas de carga en puentes:

Puentes de nueva construcción: En estos puentes se realizará una prueba de carga antes de su puesta en servicio definitiva.

Puentes en servicio: Se realizarán pruebas de carga de control de la obra en servicio, cuando el resultado de la inspección principal así lo aconseje.

1.9.3 Evaluación de Puentes.

Existen dos métodos de evaluación de carga que se presentara a seguir en el nomograma.

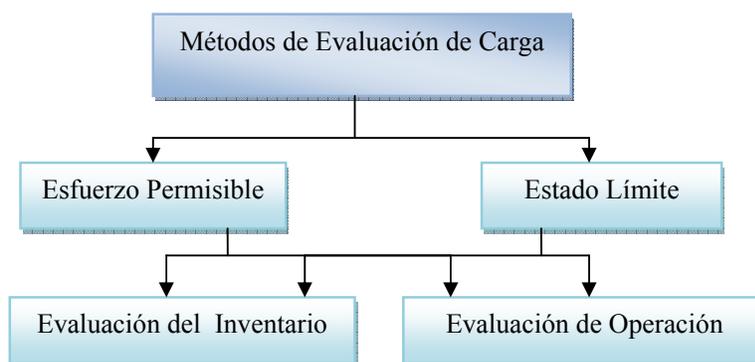


Figura 1.3: Esquema de los métodos de evaluación de carga.

El factor de evaluación se determina por la siguiente fórmula:

$$RT = \frac{Rc - \gamma d * D}{\gamma L * L(1 + I)}$$

Donde:

Rc: resistencia calculo

γd : factor de carga muerta

D: efecto nominal de carga muerta

γL : factor de carga activa

L: carga nominal ocasionada por la locomotora de evaluación

I: factor de impacto de carga activa

El factor de evaluación (RT) representa la multiplicidad de los vehículos de clasificación que el puente pueda soportar con seguridad.

Si $RT < 1$: los efectos de la carga activa ocasionada por el vehículo de evaluación excede la capacidad menos los efectos de la carga muerta.

En los dos métodos, los puentes son evaluados en una clasificación al nivel de inventario y a la operación.

- La *evaluación del inventario*: es el valor inferior entre los dos niveles de clasificación y corresponde a la carga más pesada que el puente puede ser utilizado con seguridad sobre una base continua.
- La *evaluación de la operación*: es la máxima carga permisible que el puente puede soportar, pero bajo una situación menos frecuente.

1.9.4 Métodos de ensayo de carga

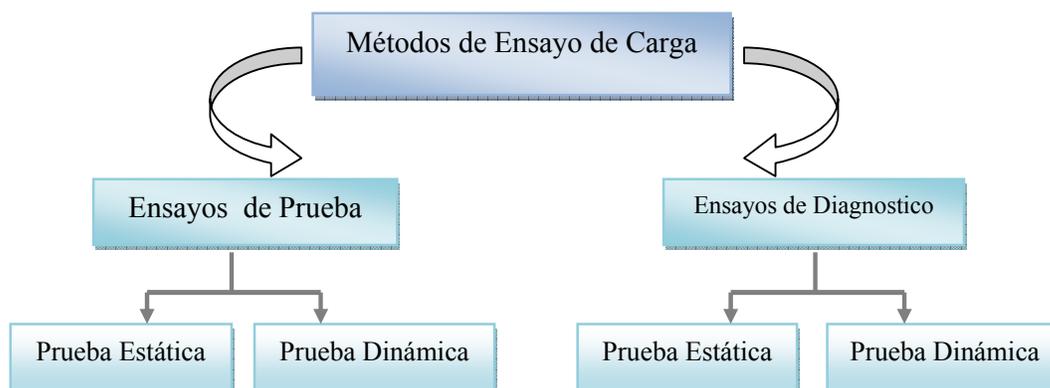


Figura 1.4: Esquema de los métodos de ensayo no destructivo.

1.9.4.1 Ensayos de Diagnóstico.

Los ensayos de diagnóstico son generalmente empleados cuando no existe información real del puente para crear un modelo analítico y representativo. La maquina rodante usado para el ensayo es de un tren de carga. El puente es cargado a un nivel abajo de su límite elástico de una manera estática o cuasi-estática. En el caso anterior, el tren de ensayo se mantiene estacionario en una posición específica mientras los datos son adquiridos.

En el otro caso, los datos son adquiridos en diferentes puntos transversales a lo largo del puente cuando el tren de ensayo es conducido a una baja velocidad. Las medidas de deformación y deflexión son tomadas en varios puntos para determinar la distribución de la carga y las características de rigidez del puente. En algunos casos se aplican altas velocidades para determinar los efectos de impacto dinámico.

1.9.4.2 Ensayos de Prueba.

Un ensayo de prueba representa un intento para determinar experimentalmente que un puente puede resistir con seguridad una carga de un cierto tren de evaluación. En situaciones donde un modelo analítico no puede ser desarrollado como resultado de la inexistencia de planos de diseño o cuando el puente ha sufrido un deterioro severo, el ensayo de prueba es preferido. Esta forma de ensayo también se emplea para evaluar diferente tipos de puentes que son difíciles para analizar con modelos lineales y/o problemáticos para la instrumentación en el campo.

Antes que un ensayo de prueba sea ejecutado, una carga de prueba es determinada; lo cual produce los efectos del tren de la evaluación incrementado por el factor de la carga activa y factores de impacto. La carga de prueba puede ser aplicada sola o en secuencia. La primera opción puede ser ejecutada más rápidamente pero es más susceptible causar daños al puente. La segunda opción provee un ensayo de carga más controlada porque las deformaciones y deflexiones máximas pueden ser monitoreadas durante cada incremento de carga para asegurar que el ensayo de la carga proceda como ha sido planeado. El ensayo es terminado cuando la carga fijada ha sido alcanzada o la reacción del puente llega a ser no lineal.

Después del ensayo, los datos de campo son comparados con los resultados del modelo analítico para determinar el comportamiento del puente y estimar su capacidad. Típicamente los datos de deformaciones y deflexiones son menores que los resultados analíticos como

resultado de la dificultad de modelar precisamente la rigidez actual y las condiciones de borde de la estructura.

Los dos métodos se diferencian desde el punto de vista del nivel de carga aplicada al puente, la cantidad y el significado de las medidas tomadas, y la manera como se usan los resultados experimentales para determinar la evaluación de carga. (Lozano, 2002)

1.10 Ensayos realizado para caracterizar los materiales del puente ferroviario km 9.568

El puente analizado, fue construido alrededor de 1906. No existe en la actualidad información de las características mecánicas de los materiales que lo componen que es imprescindible para llevar a cabo la simulación del puente, por lo que fue necesario determinar experimentalmente las características de los materiales del mismo. Las mismas fueron determinadas por medio de una serie de ensayos. Se realizó un diseño de experimento y a partir de él se confeccionaron las probetas para la realización de los ensayos mecánicos, también se elaboraron probetas para la realización de ensayos metalográfico y químico.

El acero brinda a los fabricantes la posibilidad de: soportar grandes cargas y a la vez tener una alta resistencia; de poseer tenacidad, para poder aguantar los efectos dinámicos y de choque; debido a su resistencia a la fatiga, puede soportar cargas alternativas; brinda oposición a la acción del roce de las piezas, demostrando su resistencia al desgaste; además de contar con buena resistencia a la corrosión, a la fluencia y a otras acciones constantes.

Estas altas propiedades del acero están dadas por el carbono u otras sustancias que se encuentran en su estructura. Para considerar un acero como aliado debe tener contenidos en sus elementos límites superiores al 0.8Mn; 0.5Si; 0.05P y 0.05S en %.

Para comprobar estos valores en las planchas y angulares del puente se realizaron los análisis anteriormente mencionados para determinar la composición química de estos materiales. Los resultados del mismo se presentan a continuación, con más detalle en el anexo.

Todos estos ensayos aportaron las siguientes características:

1. El material del angular posee mayor contenido de carbono, manganeso, fósforo y azufre que la plancha.

2. El material de la plancha es similar a un acero **AISI 1008** mientras que el material del angular es similar a un acero **AISI 1015**. [12 Tesis de David]

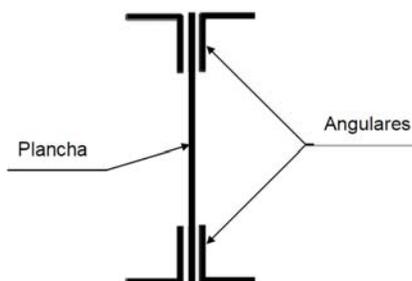


Figura 1.5: Sección transversal del Puente.

Tabla 1.1: Resultado de los ensayos.

Característica Mecánica	Plancha	Angular
Tensión Máx. a Tracción (MPa)	352	372
Tensión de Rotura (MPa)	289	334
Tensión de Fluencia (MPa)	240	325
Modulo de Elasticidad (MPa)	$2 \cdot 10^5$	$2.05 \cdot 10^5$
Elongación (%)	31	26
Coefficiente de Poisson	0.29	0.29
Dureza Vickers (HV)	147	165
Resiliencia (kgf-m/cm^2)	7.2	3.7

A continuación se puede apreciar la diferencia en (%) existente entre las Tensiones Máximas determinadas experimentalmente y las determinadas mediante MEF del ensayo a tracción.

Componente de la viga	Tensiones máximas		Diferencia, %
	Experimentales	Modelo	
Plancha	352	365.2	3.34
Angular	372	384.3	3.20

A estos resultados anteriores y los que aparecen en la tabla 2.3 llegó otro estudiante en su Trabajo de Diploma. (Martínez, 2007)

1.11 Determinación del factor de evaluación de elemento del puente.

Por existir, en la actualidad, la aparición de nuevos equipos con mayor carga por eje, incremento de las velocidades y aumento de la intensidad de tráfico de las cargas que ha producido grandes cambios en la explotación del puente se hace necesario realizar un análisis y estudio investigativo del mismo, para así determinar la capacidad portante en los elementos de las estructuras por el método ruso. La metodología de la determinación de evaluación es el método de chequear el elemento del puente por el factor de evaluación.

Consiste en el cálculo del factor de evaluación en puentes de ferrocarril, en elementos de acero estructural. Para ello utilizaremos los métodos de Tensiones Admisibles y de Estados Límites. Pero una incógnita que todos debemos suponer es que las estructuras no solo fallan por las tensiones normales (M_f), sino que en los apoyos también se ven grietas debido a la acción de las tensiones tangenciales que ellos deben soportar, y se nos hace necesario evaluar el elemento ante la fuerza a cortante, para llegar a resultados más convincente en la hora de tomar alguna medida. (Lorenzo, 2005)

1.11.1 Métodos de evaluación de puente. (NC, 1984)

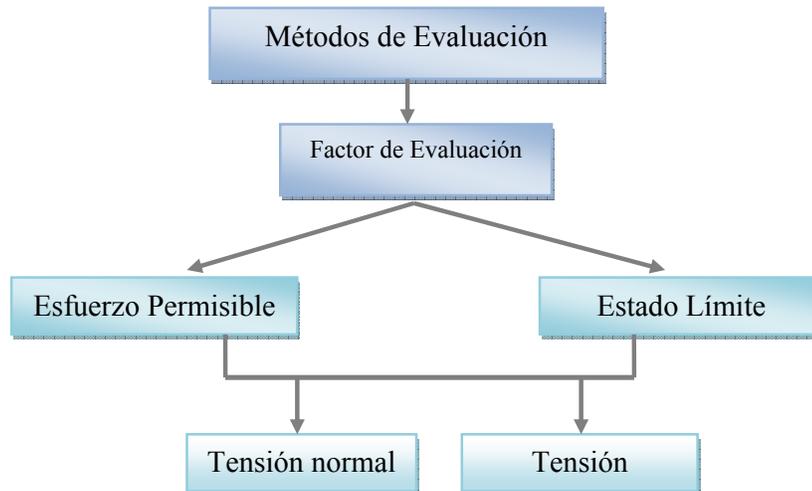


Figura 1.6: Esquema de métodos de evaluación de puente.

1.11.1.1 El factor de evaluación por el esfuerzo permisible:

$$RT = \frac{Rn - D}{L(1 + I)}$$

Donde:

Rn: resistencia nominal

L: carga nominal ocasionada por la locomotora de evaluación

D: efecto nominal de carga muerta

I: factor de impacto de carga activa

1.11.1.2 El factor de evaluación por el estado limite:

$$RT = \frac{Rc - \gamma d * D}{\gamma L * L(1 + I)}$$

Donde:

Rc: resistencia calculo

γd : factor de carga muerta

D: efecto nominal de carga muerta

γL : factor de carga activa

L: carga nominal ocasionada por la locomotora de evaluación

I: factor de impacto de carga activa

Si $RT < 1$: los efectos de la carga activa ocasionada por el tren de evaluación excede la capacidad menos los efectos de la carga muerta.

Si $RT > 1$: el puente tendrá capacidad para soportar los efectos de la carga activa ocasionada por el vehículo de evaluación.

Si el elemento no es capaz de soportar la carga actuante, y habrá que tomar decisiones que podrán ser:

- Suspender el movimiento vehicular y reparar la estructura y reconstruirla.
- Disminución de la carga actuante.
- Disminución de la velocidad de los vehículos, para disminuir el coeficiente dinámico o de impacto.

1.12 Conclusiones parciales del capítulo I

Del estudio de los nichos de conocimiento vinculado a la temática de la Modelación y Análisis del Puente Metálico Ferroviario, se han extraído un grupo de ideas que permiten entender a profundidad las bases teóricas de estas temáticas y su implicación en el estudio y análisis de los elementos del puente. Dentro de ellas se destacan las siguientes:

- Los métodos experimentales no destructivos, permiten tener una predicción más precisa del comportamiento estructural y combinados con la modelación permiten estimar la capacidad de carga de los puentes siendo el método de ensayo diagnóstico el más apropiado para la evaluación de los puentes metálicos de ferrocarril en Cuba.
- En la actualidad hay una tendencia a combinar las técnicas de inspección, instrumentación y modelación, sin olvidar que cada una independientemente brinda grandes beneficios, aunque mucho mayor son los mismos al hacer uso de todas en conjunto.
- En los trabajos de ingeniería al realizar los ensayos a los probetas de los materiales es recomendable tomar en cuenta los defectos de las mismas. La diferencia entre los procedimientos de la probeta (experimental y MEF) están en el orden del 3.4 %, debido a no considerar en el modelo los defectos (poros, corrosión, etc.)
- Para la evaluación de la capacidad de carga de los dos métodos comentados es suficiente el empleo del MEL.

Capítulo II

“Modelación del puente metálico de ferrocarril km 9.568 del Ramal Santa Clara - Cenizas”

2.1 Introducción y fundamentación metodológica.

La modelación y el análisis estructural, como proceso más abarcador, son dos pasos fundamentales que deben ser llevados a cabo para poder realizar el diseño estructural o revisión de los elementos que soportarán las acciones a las cuales están sometidas las estructura.

En el presente capítulo se expone como se realizó la modelación numérica para el análisis del puente metálico ferroviario con el fin de determinar el comportamiento estructural de puente.

Primero, es muy importante destacar que el puente en cuestión a modelar es una estructura compuesta de dos vigas principal y se realizaron dos modelos uno en 2D y otro en 3D para analizar y comparar el comportamiento estructural en los dos casos y ver cuál de los dos proporcionaba mejores resultados comparándolo con los resultados experimentales. Todas las informaciones presentadas de los sensores empleados y los resultados de las variables experimentales fueron obtenidas a través del informe de puente Km. 9,578 de Línea Cenizas.

A continuación se expone las características y geometría de puente para la realización del modelo.

2.2 Descripción del puente km 9.568.

Para dar una mayor información del puente km 9.568 del ramal Santa Clara-Ceniza, se exponen en la tabla 2.1 las principales características del mismo.

Tabla 2.1: Características fundamentales del puente km 9.568

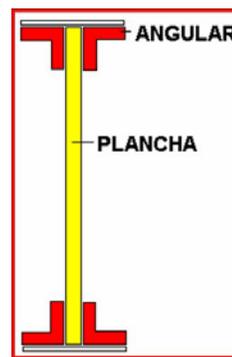
Tipo de puente	Acero (Tablero superior)
Estribos	Muros de cantos
Longitud total	18.30m
Numero de luces	1
Distancia entre ejes	2.14 m
Altura de la estructura	1.875 m
Tipo de traviesas	Madera dura mejicana y piso soviético
Clasificación del puente	Corto
Tipo de carriles	Principal P-50
Guarda carril y Guarderas	80 lb/m
Ramal a que pertenece	Santa Clara-Cenizas

2.2.1 Geometría.

La geometría del puente y alguno de sus datos aparecen en las figuras y tablas. El puente de km 9.568 es un puente tipo Girder en acero y de viga maestra múltiple. Está compuesto por dos vigas las cuales están construidas básicamente por una plancha y cuatro angulares, además de otros elementos.



Puente km 9.568



Componentes básicos de la viga

La geometría del puente analizado aparecen en las diferentes vistas que se muestran en las figuras siguientes, permitiendo una comprensión de cómo están distribuidos los elementos del puente.

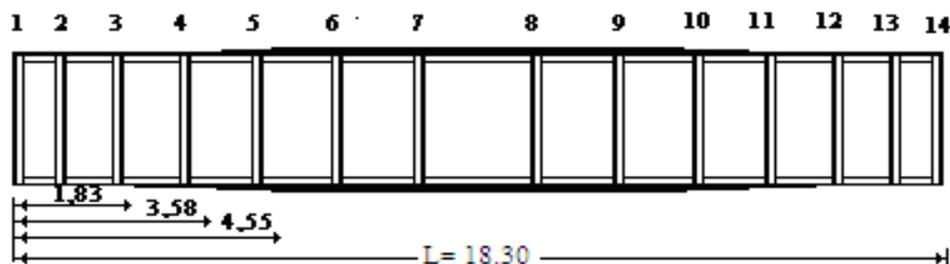


Figura 2.1: Vista lateral del puente (posición entre los rigidizadores y las planchas que se encuentran entre estos y posición y comienzo de platabandas).

Tabla 2.2: Posición entre rigidizadores y plancha intermedia.

Distancia entre los rigidizadores y plancha intermedia (mm)												
1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14
550	975	1375	1475	1775	1775	2500	1775	1775	1475	1375	975	550

Tabla 2.3: Descripción, dimensiones, ubicación y cantidad.

Descripción	Dimensión (mm)	Ubicación	Cant.
Angulares	1800 x 127 x 100 x 10	Rigidizador	56
Plancha Intermedia	1516 x 100 x 15	Entre Rigidizador y Placha Vert.	56

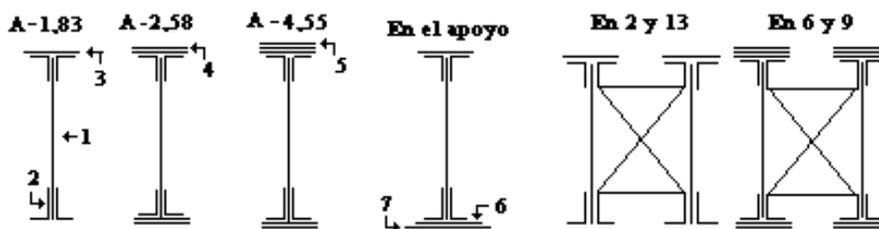


Figura 2.2: Secciones transversales de la viga y del puente, las planchas de apoyo, los angulares y ubicación de los arriostres verticales.

Tabla 2.4: Descripción, dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman la viga y los arriostres verticales inclinados.

N	Descripción	Dimensión (mm)	Ubicación	Cant.
1	Plancha vertical	18270 x 1800 x 10	Alma del perfil I	2
2	Angulares	18270 x 150 x 150 x 15	Dan la forma al perfil I	8
3	Plancha horizontal	18270 x 310 x 10	Platabanda Primera	2
4	Plancha horizontal	14610 x 310 x 10	Platabanda Segunda	4
5	Plancha horizontal	11110 x 310 x 10	Platabanda Tercera	4
6	Plancha horizontal	9170 x 310 x 10	Platabanda Cuarta	4
7	Plancha horizontal	610 x 450 x 25	Plancha de Apoyo Uno	4
8	Plancha horizontal	610 x 540 x 25	Plancha de Apoyo Dos	4
9	Plancha vertical	200 x 200 x 10	Unión de los Arriostres Verticales	4
10	Plancha vertical	300 x 200 x 10	Unión de los Arriostres Verticales	16
11	Angulares	2200 x 89 x 89 x 10	Arriostre Vertical	8

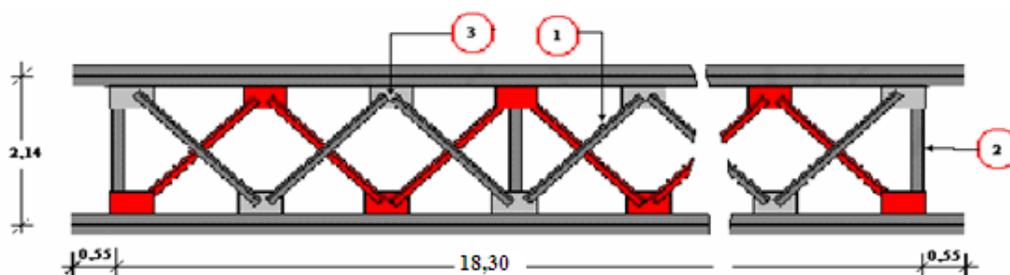


Figura 2.3: Ubicación de los arriostres horizontales.

Tabla 2.5: Dimensión, ubicación y cantidad de arriostres.

No	Descripción	Dimensión (mm)	Ubicación	Cant
1	Angulares	89 x 89 x 10 x 2574	Arriostre Horizontal Inclinado	18
2	Angulares	89 x 89 x 10 x 2574	Arriostre Horizontal	8
3	Plancha Horizontal	720 x 360 x 10	Apoyo de Arriostres Horizontales	28

2.3 Patologías existentes en el puente metálico del ferrocarril km 9.568.

Por los estudios de auscultación realizados los especialistas estiman el puente en un estado de deterioro avanzado, presentando alto grado de corrosión en gran parte de sus elementos, lo que compromete la seguridad del mismo. Además presenta arriostres verticales y horizontales sueltos de la estructura, las traviesas deterioradas pero en este trabajo no se tendrán en cuenta las traviesas con sus patologías, se asumen las traviesas nuevas. (López, 2005)

Las principales patologías detectadas durante la investigación son:

Arriostramiento: Desprendimientos y partiduras de los angulares en los arriostramientos por el efecto de la corrosión.



Planchuelas de enlaces: Tiene muy corroídas las planchuelas de enlace de los arriostramientos horizontales superiores a las vigas principales.



Platabandas: Disminuciones parciales del espesor de las platabandas superiores e inferiores por el efecto de la corrosión. Los remaches han perdido prácticamente las cabezas, sobre todo en la parte superior.



Platos de asientos: Corrosión en los platos de asiento de las vigas sobre los estribos, los tornillos están muy corroídos, algunos partidos y otros con disminución del diámetro. Tiene además muy oxidados los angulares extremos de las vigas que conforman los rigidizadores en la misma zona.



Pintura: Falta de pintura general.



Figura 2.4: Patologías. Puente de Ceniza km 9.568.

2.4 Ensayo de diagnósticos realizado en el puente km 9.568.

Para el desarrollo del trabajo es necesaria la información de pruebas de carga que permita a partir de estos resultados hacer una correlación con la modelación física del puente y además realizar la calibración del modelo. Las pruebas de carga fueron realizadas por la Estación Comprobadora de Puentes UEB Placetas en una investigación hecha al puente en causa. (López, 2005)

Para disponer de una buena base de datos que recoja con fiabilidad el estado técnico del puente de ferrocarril, se hizo necesario e imprescindible combinar las técnicas de:

- Auscultación, levantamiento de patologías y defectos.
- Modelación, Simulación numérica, Ensayo e Instrumentación del Puente con previa calibración matemática y física tomando como patrón los resultados del sistema de instrumentación.
- Evaluación del Estado Técnico tomando como bases los resultados que arrojan las actividades anteriores.

La prueba de carga se realizó en las siguientes etapas:

1. Características fundamentales del puente.
2. Levantamiento de los defectos (patologías).
3. Proyecto del sistema de instrumentación, según las patologías.
4. Análisis teórico.
5. Pruebas de carga y mediciones efectuadas a dos tipos de locomotoras, la soviética TEM-4 y la C-30 de procedencia Norteamericana, que incluyen:
 - a) Estática.

- b) Dinámica.
- c) Frenado.
- 6. Comparación de los resultados teóricos con los obtenidos en el ensayo.
- 7. Interpretación de los resultados.

2.4.1 Instrumentación o proyecto de colocación de los sensores en el puente km. 9.568.

El método de medición de esfuerzos se realizó mediante un sistema técnico automatizado denominado SG, utilizando un equipo de adquisición de datos del tipo HBM MGC PLUS, de fabricación Alemana. Las galgas extensométricas se colocaron en parejas en un mismo sentido, conectadas a medio puente de inducción. En la figura 2.5 se puede apreciar la ubicación de los sensores empleados. (López, 2005)

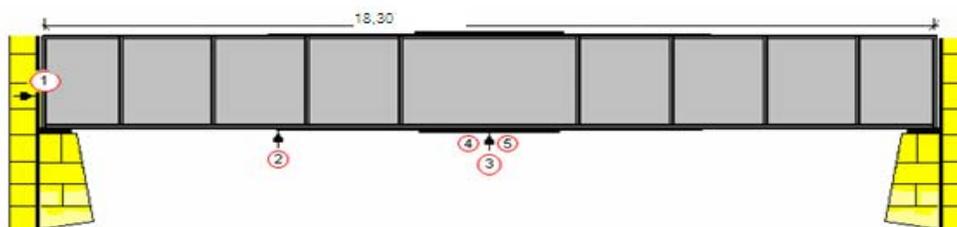


Figura 2.5: Localización de los SG en el puente.

Tabla 2.6: Sensores colocados en el puente.

Nº	Tipo	Modelo	Ubicación en el puente
1	Sensor de desplaz. horizontal	WA-10 mm	En la mitad de la altura de la viga
2	Sensor de desplaz. vertical	PA-5	A un cuarto de la longitud de la viga
3	Sensor de desplaz. vertical	PA-5	En la mitad de la longitud de la viga
4	SG, en dirección longitudinal	Hbm,120 $\Omega, K=2.07$	En la mitad de la longitud de la viga
5	SG, en dirección transversal	Hbm,120 $\Omega, K=2.07$	En la mitad de la longitud de la viga

2.4.2 Interpretación y presentación de los resultados de desplazamiento obtenidos en el ensayo de la prueba realizada por la UEB de Placetas.

Tabla 2.7: Resultados obtenidos del ensayo de la prueba estática.

Deformaciones	Posición	Estática		
		Ensayo		
		I	II	III
Deformación – f (mm)	0.50 L	4.96	5.98	6.04
Deformación – f (mm)	0.25 L	3.58	4.26	4.31

➤ **Interpretación de los resultados de las pruebas estática:**

De acuerdo a los resultados obtenidos de la instrumentación del puente podemos afirmar que:

- 1.- Los valores máximos se producen en la tercera posición que es cuando coinciden los centros de la locomotora y la viga respectivamente debido a que en las posiciones I y II no se producen los máximos esfuerzos.
- 2.- A un cuarto de las vigas, bajo las cargas estáticas, no ocurren desplazamientos verticales homogéneos, lo que demuestra que la viga derecha se deforma ligeramente más que la izquierda. Al extrapolar los valores de deformación hacia el centro de la viga ocurre lo mismo.
- 3.- Se confirman con estos resultados y el alto grado de corrosión de los enlaces a las vigas principales y en estas propiamente dichas, la situación que se describe en los defectos que presentan los arriostramientos transversales y longitudinales

Tabla 2.8: Resultados obtenidos del ensayo de la prueba dinámica.

Deformaciones	Posición	Dinámico		
		Ensayo		
		I	II	III
f (mm)	0.50 L	6,01	5.98	6,21
f(mm)	0.25 L	4,288	4,29	4,39

➤ **Interpretación de los resultados de las pruebas dinámica:**

Las pruebas dinámicas se realizaron en tres velocidades, caso # 1 (10 km/h), caso # 2 (30 km/h) y caso # 3 (50 km/h).

- Como se observa en los gráficos de los aspectos de aceleración en la medida que aumenta la velocidad del tren incrementa también los valores de aceleración en correspondencia con la dinámica.
- Las aceleraciones observadas son muy bajas y tiene una respuesta satisfactoria frente a la carga dinámica en la grafica de comportamiento del acelerómetro.
- Durante el ensayo se corrobora que a medida que aumenta la velocidad incrementa también la flecha y las tensiones tanto normal como tangencial en la grafica de comportamiento vs posición.

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo, o sea, el comportamiento real de la estructura en cuanto a las tensiones y las deformaciones, podemos afirmar que a medida que aumentan las velocidades aumentan las deformaciones por encima de la teórica. Existe un comportamiento cercano de las tensiones normales obtenidas en el ensayo al de los valores teóricos, siendo mayores en las tensiones tangenciales. En todos los casos estos son menores que los valores de los cálculos teóricos permisibles, por lo que se desprende que no se presentan dificultades en el comportamiento de la misma al paso de la locomotora TEM-4 utilizada para el ensayo. Solamente existen comportamientos anormales registrados, en los lugares donde las vigas principales coinciden con los arriostramientos que se encuentran en mal estado por estar muy afectada por la corrosión, con pérdida de las planchuelas de unión y algunos elementos partidos.

A la hora de modelar la estructura se consideraron los mismos puntos en el proyecto de colocación de los sensores, pruebas estáticas y dinámicas realizadas y se interpretó las graficas obtenidas del ensayo para las dos pruebas.

2.5 Modelacion Numérica del Modelo.

El problema real consiste en modelar la estructura, con el comportamiento del material del elemento señalado y las acciones externas e internas que actuarán sobre la estructura. Para la modelación fisico-matemática de la investigación se emplea el comportamiento del material lineal - elástico basado en el Método de Elementos Finitos, con un módulo de elasticidad del material de 2.1×10^5 MPa, un coeficiente de Poisson de 0.3 y los

modelos establecidos que requiere el problema real de un Puente Ferroviario. El proceso de modelación se ejecuta utilizando el software profesional SAP 2000 (version-12), el cual ofrece ventajas necesarias para la realización del trabajo.

El modelo de Elementos Finitos consta de restricciones y cargas que serán descritas a continuación.

Restricciones

Este puente posee los cuatro extremos inferiores apoyados sobre los estribos que son construidos para tal efecto. La unión entre los elementos están remachados (restringidas en los tres sentidos).

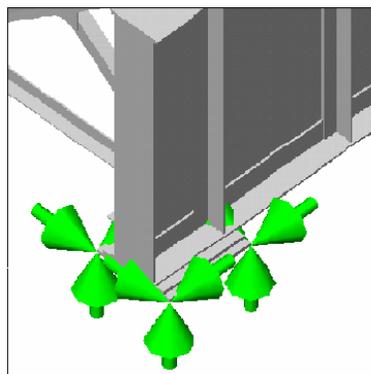


Figura 2.6: Detalle de la restricciones de apoyo.

Cargas

Para realizar la prueba estática y con ella las mediciones mediante SG y sensores de desplazamiento ubicados convenientemente en el puente, se utilizaron las locomotoras del tipo TEAM-4 con un peso de 122.4 toneladas (1200334 N) y C-30-7 (modificada a 144 toneladas) que fueron ubicadas en tres posiciones utilizando fundamentalmente la posición en el centro del puente. Durante la prueba estática estos pesos fueron considerados como una carga puntual sobre el puente (ver figura 2.8). Además está presente la carga de la cama, la cual es generada por el peso de los guarda carriles, los estribos, las mordazas, presillas, clavos, tornillos, tuercas y arandelas. El peso de este conjunto es un valor aproximado de 1.167 ton/m² como carga muerta.

En la siguiente figura se presenta la locomotora TEM-4 en la posición más desfavorable que es en el centro del puente.

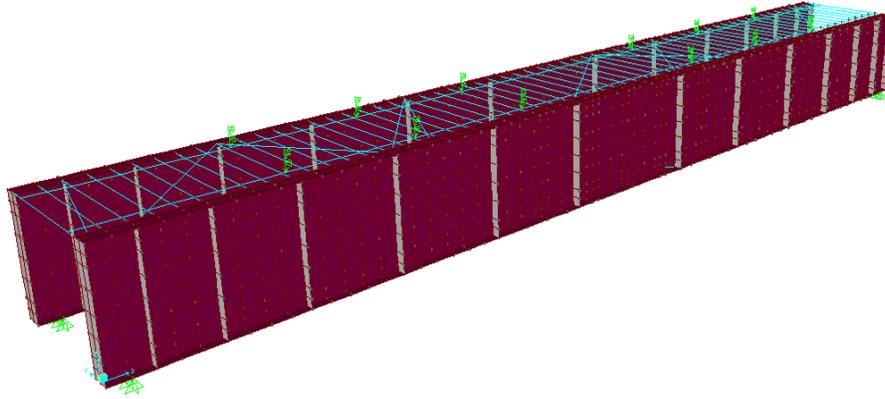


Figura 2.7: Vista isométrica del modelo del puente con las cargas aplicadas.

2.5.1 Validación del modelo mediante análisis de sensibilidad.

Para asegurar y validar la precisión del modelo frente las variables tal como la tensión, la deformación o el desplazamiento se procede a realizar el Análisis de Sensibilidad o Convergencia, realizando la discretización del modelo mediante el método de elementos finitos para diferente densidad de malla, considerando para el análisis dos variables (tensión y desplazamiento) y utilizando las cargas que se tuvieron en cuenta para la técnica de los SG.

El modelo se corrió varias veces con diferente densidad en el mallado y los puntos de control situados en la platabanda inferior izquierda del puente, hasta que el valor de la variable analizada convergiera sin un error específico considerable entre dos análisis consecutivos. Se obtuvieron los valores de las dos variables en ambos lugares distintos y distantes pertenecientes a dicha plancha, específicamente en $L/2$ (centro del puente) y en $L/4$ (en un cuarto de la longitud total) que además son los puntos donde se tienen resultados experimentales. A continuación se muestran imágenes de las cuatro densidades de malla utilizadas para el análisis de sensibilidad (figura 2.8). A modo de ejemplo estos resultados se encuentran ploteados en las curvas de la (figura 2.9).

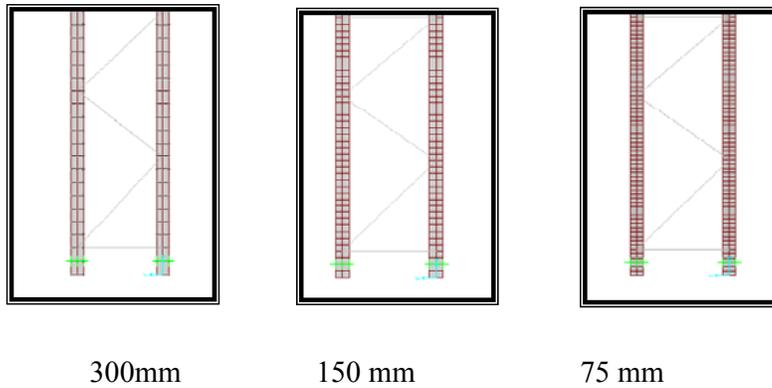
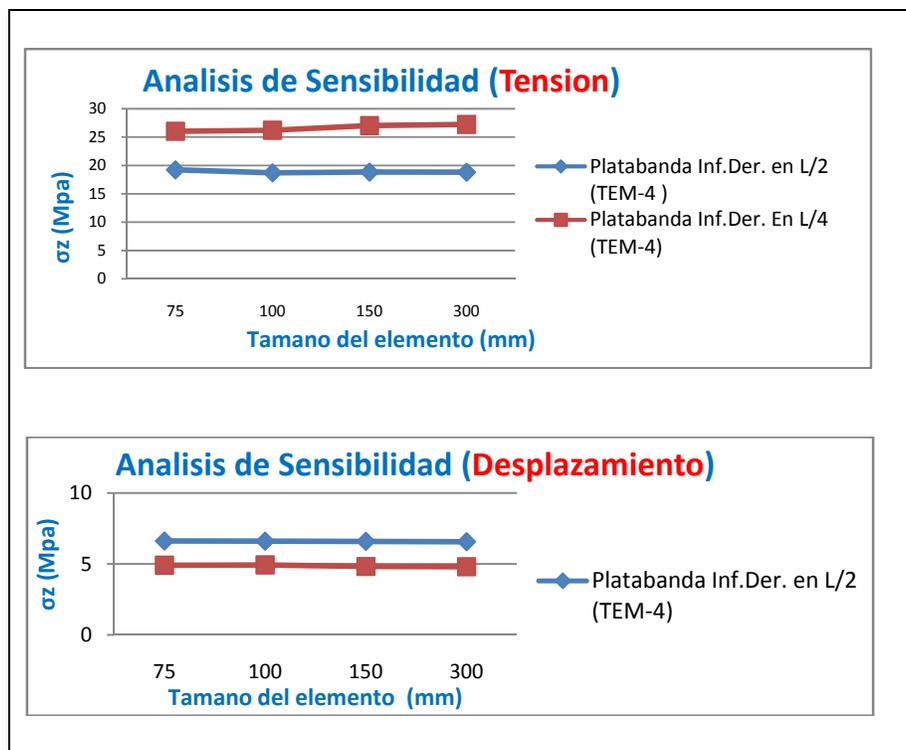


Figura 2.8: Tamaños de malla realizados para el análisis de sensibilidad.



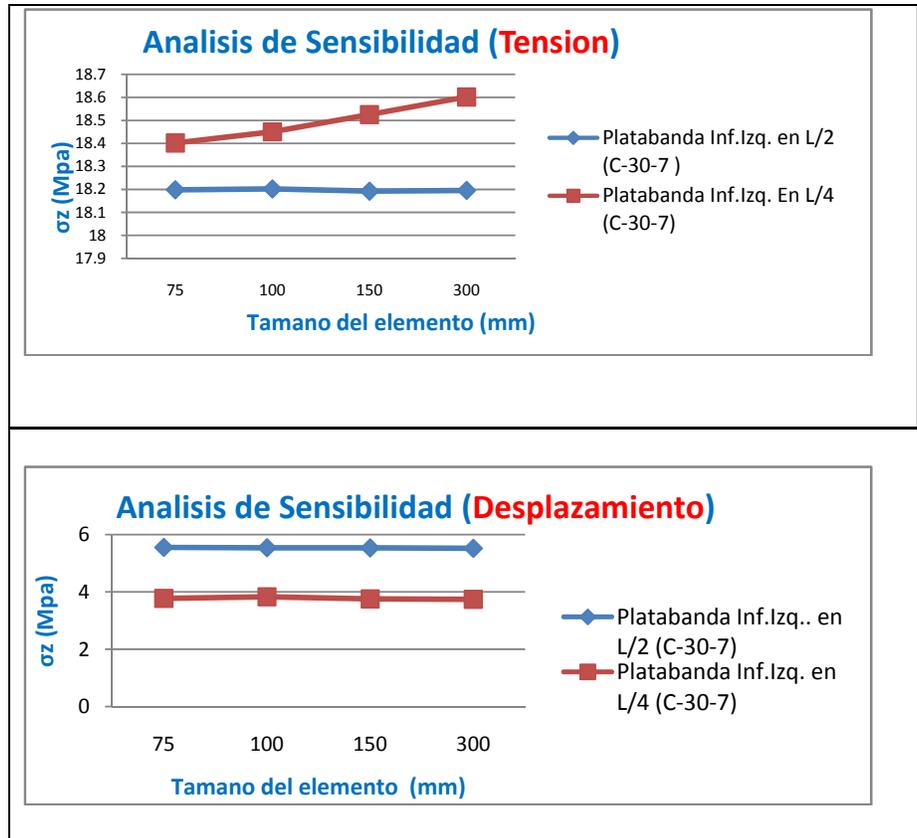


Figura 2.9: Curvas del Análisis de Sensibilidad.

A continuación se muestran las Tablas con los valores obtenidos para las dos variables, en ambos lugares, con diferente densidad de malla.

Tabla 2.9: Valores de Tensión para la locomotora TEM-4

Modelon 3D	Tamaño del Elemento mm (número de elementos)	σ (Mpa)		Diferencia (%)	
		L\2	L\4	L\2	L\4
Malla Muy Fina	75 (2904896)	19.2274	26.0269	2.690	0.745
Malla Fina	100 (1411952)	18.7102	26.2222	0.640	2.982
Malla Media	150 (780296)	18.8307	27.0283	0.101	0.780
Malla Gruesa	300 (353690)	18.8117	27.2408		

Tabla 2.10: Valores de **Desplazamiento** para la locomotora TEM-4

Modelo en 3D	Tamaño del Elemento mm (número de elementos)	δy (mm)		Diferencia (%)	
		L\2	L\4	L\2	L\4
Malla Muy Fina	75 (2904896)	6.6185	4.9126	0.189	0.472
Malla Fina	100 (1411952)	6.606	4.9359	0.271	2.253
Malla Media	150 (780296)	6.5881	4.8247	0.325	0.417
Malla Gruesa	300 (353690)	6.5667	4.8046		

Tabla 2.11: Valores de **Tensión** para la locomotora C-30-7

Modelo en 3D	Tamaño del Elemento mm (número de elementos)	σz (Mpa)		Diferencia (%)	
		L\2	L\4	L\2	L\4
Malla Muy Fina	75 (2904896)	18.1987	18.402	0.020	0.263
Malla Fina	100 (1411952)	18.2023	18.4506	0.053	0.404
Malla Media	150 (780296)	18.1926	18.5255	0.018	0.411
Malla Gruesa	300 (353690)	18.1958	19.602		

Tabla 2.12: Valores de **Desplazamiento** para la locomotora C-30-7

Modelo en 3D	Tamaño del Elemento mm (número de elementos)	δy (mm)		Diferencia (%)	
		L\2	L\4	L\2	L\4
Malla Muy Fina	75 (2904896)	5.5537	3.7759	0.252	1.425
Malla Fina	100 (1411952)	5.5397	3.8305	0.094	1.950
Malla Media	150 (780296)	5.5345	3.7558	0.258	0.343
Malla Gruesa	300 (353690)	5.5202	3.7429		

En las tablas anteriores se observa que todas las mallas realizadas ofrecen buenos resultados, pues la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre dos análisis consecutivos fue menor de 2.982 %, indicando esto que la precisión es adecuada. Por tanto, en este caso particular de análisis, se empleará la Malla media, con un tiempo de cálculo razonable y da una precisión adecuada.

2.5.2 La modelación geométrica de los modelos en Plano (2D) y Espacial (3D).

2.5.2.1 Modelo Plano (2D).

Para realizar este modelo consideramos una sola viga sin considerar los rigidizadores verticales y horizontales de forma plana con el propósito de simplificar el modelo en 3D para un análisis más específico. En la figura 2.10 se muestra el modelo 2D geométrico de la estructura discretizada por el MEF.

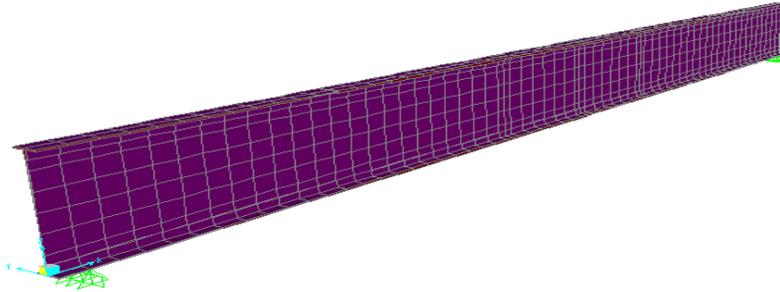


Figura 2.10: Modelo 2D.

2.5.2.1.1 Distribución de esfuerzos de los elementos en 2D.

El análisis de las distribuciones de esfuerzos como se ve en la siguiente figura 2.11, muestra las áreas menos comprimidas con el color carmelita y el área más comprimida con color rojo, estos valores están señalados en la escala de la parte inferior de la figura. El área más crítica tiene esfuerzos que varían entre 6.50 N/mm² y 37.00 N/mm² (colores verde y azul respectivamente) y esta área se encuentra en la zona inferior de la viga, aunque se pueden encontrar puntos aislados que están sometidos a esfuerzos superiores, dichos puntos de concentración se deben a la aplicación de la carga de la locomotora (de color violeta).

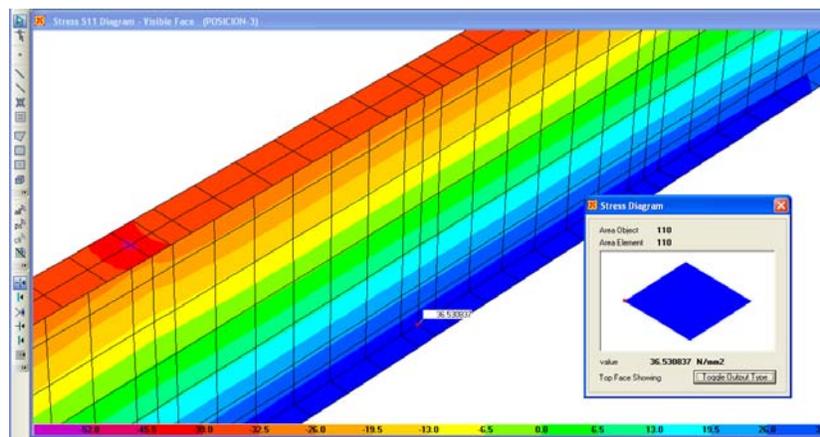


Figura 2.11: Distribución de esfuerzo en 2D.

2.5.2.2 Modelo Espacial (3D).

El propósito del modelo 3D es para realizar un análisis más profundo y completo, que permitirá analizar la distribución de esfuerzos interiores de la estructura, el comportamiento de los elementos y uniones en cuanto a sus desplazamientos o posibles fallos, bajo las sollicitación de cargas externas. El análisis de desplazamiento para el 3D fue realizado teniendo en cuenta la estructura completa, los principales o mayores desplazamientos se encuentran en el centro de la viga en la platabanda inferior.

En la siguiente figura 2.12 se muestra el modelo 3D geométrico de la estructura discretizada por el MEF.

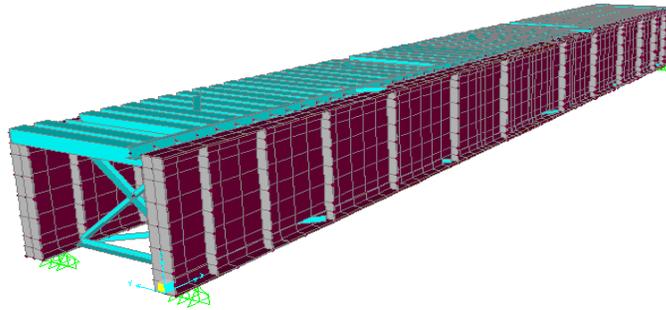


Figura 2.12: Modelo 3D.

Los desplazamientos de ambos modelos son efectos de la carga de la locomotora aplicada que tiene en cuenta las acciones gravitatorias. Se hace una comparación de los resultados de ambos análisis para ver cual da una respuesta más adecuada al objetivo de estudio. De este análisis se puede concluir que las soluciones de uniones entre los elementos estructurales propuestas se comportan razonablemente bien ante las sollicitaciones de cargas a la cual fueron sometidas. A partir de los resultados que obtuvimos de desplazamiento y tensión en los dos modelos, observamos que las mismas son casi iguales.

2.5.2.2.1 Distribución de esfuerzos de los elementos en 3D.

Para las distribuciones de esfuerzos (ver figura 2.13), del modelo 3D en la platabanda inferior de la viga se muestran las áreas menos traccionada con el color verde, el área más traccionada con color azul, la escala aparece señalada en la parte inferior de la misma. El color azul de parte inferior muestra la zona más cargada que varía entre 6.00 N/mm² y 36.00 N/mm².

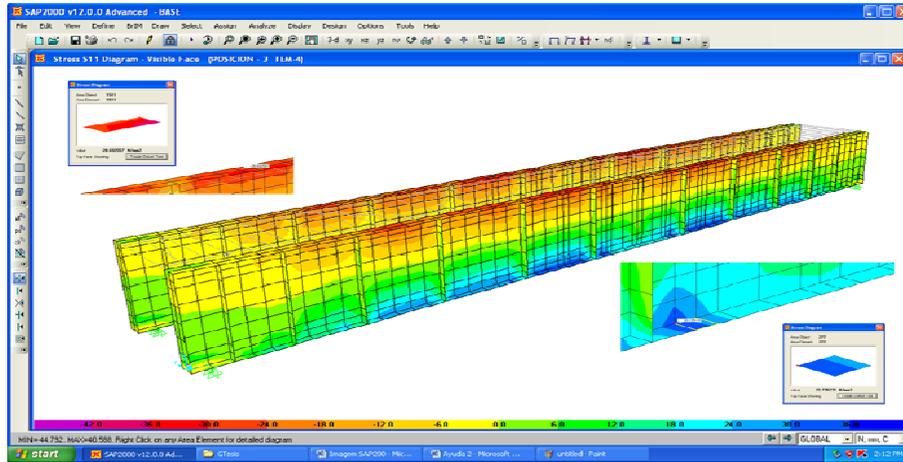


Figura 2.13: Distribución de esfuerzos en 3D.

2.5.3 Corrida de software SAP 2000 (versión-12).

Una vez conformados todos los modelos, se procede a la corrida del análisis del puente para obtener la respuesta de la estructura ante las distintas posiciones de la cargas de la locomotora TEM-4 y C-30-7 como estados tensionales y desplazamientos, a los cuales están sometidos las vigas principal en L/2 y L/4 de la platabanda inferior. A continuación se muestra en la (figura 2.14) los resultados de una corrida del modelo de la estructura.

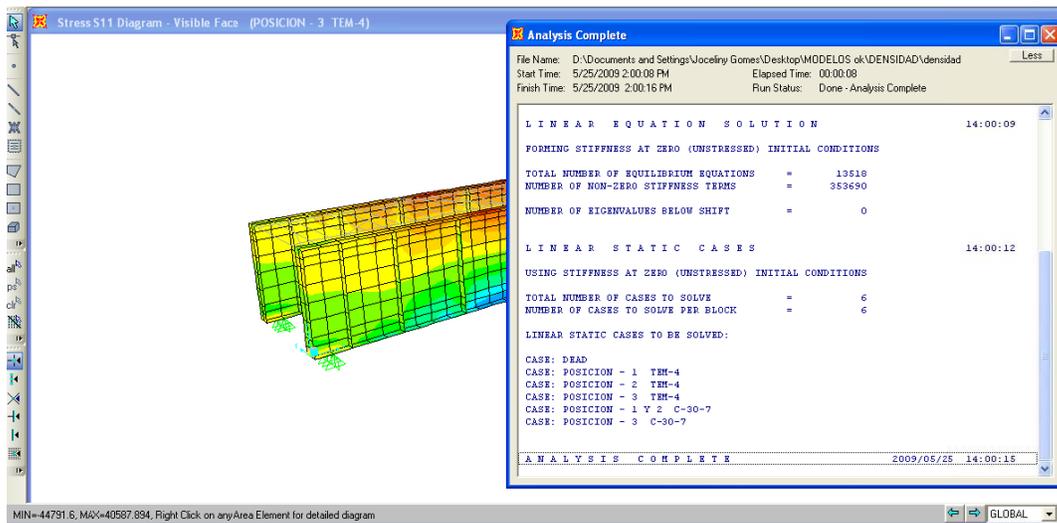


Figura 2.14: Análisis completo de la corrida del programa.

2.5.4 Análisis de resultados.

Para organizar metodológicamente el análisis de los resultados y tener una mayor comprensión, se comparan los diferentes puntos de los elementos estructurales en ambos modelos (2D y 3D), para lograr una mayor profundidad en el conocimiento de las deformaciones a las que está sometida la estructura, las comparaciones se realizan atendiendo a su respuesta en términos de tensiones y desplazamiento en 3D. A pesar de ser el mismo elemento analizado en ambos modelos se puede apreciar un ligero aumento de los esfuerzos en el modelo 2D. Sin embargo al comparar el resultado de la instrumentación el modelo con un mejor comportamiento es el 3D porque los valores de las variables se acercan más al de los ensayos.

2.5.5 Validación o calibración del Modelo

Al haber realizado ensayos al acero contamos con las propiedades constitutivas del material. Como el modelo del material es elástico lineal tenemos las propiedades necesarias, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, por lo que la calibración en este caso se realizó para la geometría y para las condiciones de apoyo con el objetivo de determinar con exactitud y precisión, los parámetros constitutivos degradados (por efectos de las diferentes patologías) que delimitan las variables de respuesta que arroja el modelo y que a su vez se acercan con la mayor exactitud posible a las variables de respuesta que aportan los ensayos y pruebas.

Se realiza un proceso de validación del modelo tomando como variables de control las que aporta el sistema de ensayos de laboratorio e in-situ de caracterización de los materiales y comportamiento estructural de los elementos. Este aspecto posibilita abaratar considerablemente los estudios de Diagnóstico e Instrumentación de los puentes, explotando al máximo las bondades de la modelación siempre y cuando exista un proceso de calibración numérica a partir de un estudio de estabilidad numérica y como es lógico contraponiendo el modelo con respecto a una respuesta física.

2.5.5.1 Calibración Geométrica.

Como en el cordón superior las vigas están afectadas por corrosión tipo picadura y corrosión entre las platabandas, los espesores efectivos de estas zonas varían mucho, por lo que la calibración geométrica estaba orientada a obtener espesores tales en el cordón

superior que dieran un comportamiento similar al de los ensayos. La calibración geométrica consistió fundamentalmente en considerar varios espesores del cordón superior y por tanteo obtener los espesores en el modelo que mejor se ajustaran al comportamiento del ensayo tomando como variable de control los desplazamientos a $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de la viga izquierda para la locomotora TEM-4 en las tres posiciones de cargas del ensayo.

2.5.5.2 Calibración de las condiciones de apoyo.

La calibración de las condiciones de apoyo consistió en variar interactivamente la cantidad de nodos de las zonas apoyos vinculados a tierra hasta que el modelo diera una respuesta lo más próxima a las situaciones ensayadas. Tomando, al igual que en la calibración geométrica, como variable de control los desplazamientos a $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de la viga derecha para la locomotora TEM-4 en las tres posiciones de cargas del ensayo.

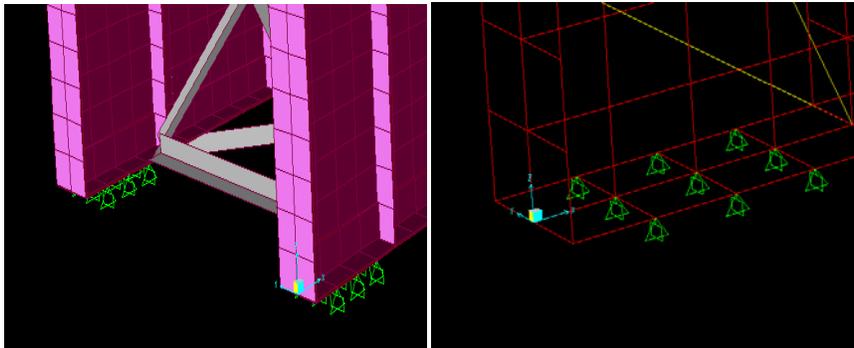


Figura 2.15: Condiciones de apoyo calibrado.

En el anexo se encuentra la tabla con los valores de los espesores de los elementos obtenidos del modelo calibrado, fueron necesarias 56 interacciones para los resultados.

La calibración nos proporciona el modelo necesario que puede ser utilizado con diferentes condiciones de carga para la obtención de diferentes variables, se hará la comparación de los resultados de ambos métodos en el próximo capítulo.

2.6 Conclusiones Parciales.

- Los resultados obtenidos por el modelo no están influenciados por el mallado debido a que el comportamiento de las variables tensión y desplazamiento es similar para mallados diferentes, en ningún caso sobrepasa el 3%.
- Los valores resultados del análisis en modelo 3D son menores que los del modelo 2D, debido a la redistribución de los esfuerzos que permite el modelo espacial, una de la ventajas que tiene sobre el modelo plano. El valor máximo de un modelo en 2D es de 37 N/mm^2 y en 3D es de 33.00 N/mm^2 .
- Al realizar la modelación de un problema real con el beneficio que brindan las herramientas computacionales, es necesario conocer los modelos de las geometrías, de los materiales y las cargas que son inherentes al software como herramienta para el proceso de modelación, y ajustarse lo mejor posible a la estructura a analizar.
- En la calibración de modelos en 2D y 3D fue factible a través de modificación de la geometría de los elementos y de los apoyos sin modificación de las propiedades de los materiales, a partir del comportamiento físico de los elementos reales del puente.
- El método de elementos finitos se puede utilizar a la hora de conocer más detalladamente el comportamiento estructural del puente, su flujo y transmisión en términos de esfuerzo y desplazamientos.

Capítulo III

“Análisis de los resultados de la modelación con las mediciones por sensores. Determinación de la capacidad portante del puente Km. 9.568”.

3.1 Fundamentación metodológica.

En este capítulo se realiza una comparación, entre los resultados obtenidos en las pruebas de carga y el modelo calibrado y se determina si los elementos de la estructura del puente con las locomotoras C-30-7 y TEM 4 resisten. En el análisis de la modelación se consideraron los mismos puntos donde se colocaron los sensores para medir las variables del desplazamiento.

Se determina el factor de evaluación del elemento mas critico del puente empleando los métodos de esfuerzo admisible y estado límite, para las locomotoras TEM y C-30-7 y para la formación de tren más crítica C-30-7 doble tracción.

3.2 Diferencias entre el análisis por el MEF y mediante los Sensores.

Los dos tipos de análisis empleados en este trabajo tienen métodos totalmente diferentes y por ello poseen diferentes fuentes de errores. Los sensores son útiles cuando se desconoce algún dato necesario para el análisis o para confirmar valores encontrados en el análisis de la modelación y el MEF que es usado cuando hay superficies muy complejas [Méndez DICAC].

Las ventajas del MEF son:

- No hay ninguna limitación en cuanto a la complejidad de los elementos o cuerpos a analizar.
- En la mayoría de los casos el costo es menor.
- El cálculo es posible en condiciones en que la medición mediante SG sea difícil o costosa su aplicación, como son: las altas temperaturas, cargas dinámicas, áreas inaccesibles, etc.

Las ventajas de los Sensores son:

- Pueden realizar las mediciones bajo condiciones de trabajo.
- Para su empleo no hay que conocer las cargas ni las propiedades del material.
- Es más exacto que el MEF.

Es importante considerar que una medición mediante sensores hecha en un elemento complejo, sin el conocimiento previo de la distribución de las tensiones y las deformaciones, no tendrá buenos resultados y por ello debe preceder un análisis, el cual indicará la ubicación correcta de los sensores.

3.3 Comparación de los resultados de la prueba de carga y del modelo calibrado.

En la actualidad para acometer cualquier trabajo de modelación se necesita validar sus resultados con los resultados de ensayo. En la tabla se realiza la comparación de los desplazamientos entre los ensayos de carga y los resultados del modelo. La posición de carga analizada en esta comparación es con respecto a la posición simétrica al centro de la viga con la locomotora la C-30-7. No se analizaron los resultados de las tensiones debido a que el tipo de circuito empleado no da una respuesta lineal que proporcione realizar la comparación entre ambos métodos.

Tabla 3.1: Resultados obtenidos del modelo calibrado y de los ensayos para el tren C-30-7.

Deformaciones	Posición	Estática					
		Ensayo			Modelo		
		I	II	III	I	II	III
f (mm)	0.50 L	6.198	6.189	5.593	5.840	5.840	5.39
f (mm)	0.25 L	4.115	4.199	4.188	3.70	3.70	3.82

Los resultados del modelo y las mediciones con los sensores se mostrarán en la tabla 3.2 donde se realizan las comparaciones entre los dos métodos para validar el modelo calibrado obtenido.

Tabla 3.2: Resultados obtenidos de los desplazamientos para el tren TEM-4.

Deformaciones	Posición	Estática					
		Ensayo			Modelo		
		I	II	III	I	II	III
f (mm)	0.50 L	4.969	5.976	6.04	5.420	5.440	6.65
f (mm)	0.25 L	3.577	4.256	4.31	3.56	3.84	4.494

La diferencia entre los métodos no sobrepasa el 10 % por tanto el modelo es válido.

Precisión del análisis en Modelo

Si los datos proporcionados son correctos y el modelo se adapta adecuadamente al caso real, la precisión es muy alta. Al comparar los resultados obtenidos por la modelación con los de sensores obtenidos con la carga y la diferencia fue de aproximadamente 10%. En resumen, ambos métodos se complementan.

En las Figuras aparecen imágenes de los resultados gráficos (escala de colores que brinda el SAP 2000 versión 12) y numéricos de la corrida del modelo para obtener los desplazamientos en los mismos puntos y direcciones donde se colocaron los sensores en el puente.

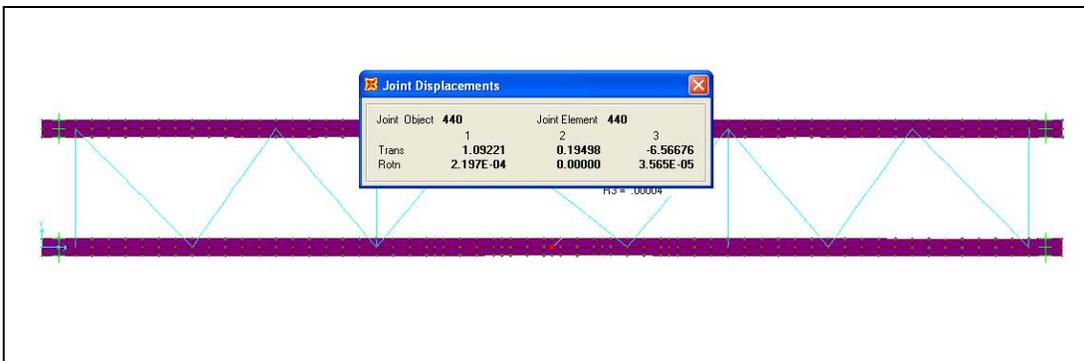


Figura 3.1: Imagen del modelo del que se obtuvo el desplazamiento vertical en el punto donde se colocó el Sensor PA-5 a $\frac{1}{2} L$ (1).

En las Figuras siguientes aparecen imágenes de los resultados gráficos y numéricos de la corrida del modelo para obtener las tensiones en los mismos puntos y direcciones donde se colocaron los sensores en el puente.

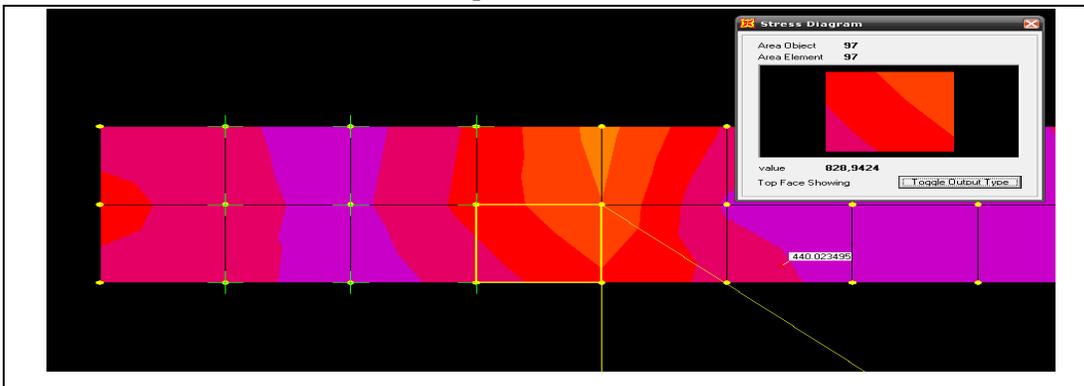


Figura 3.2: Imágenes del modelo de EF del que se obtuvo la tensión tangencial en los puntos y direcciones en que se colocaron los sensores (0.0L) Viga Izquierda.

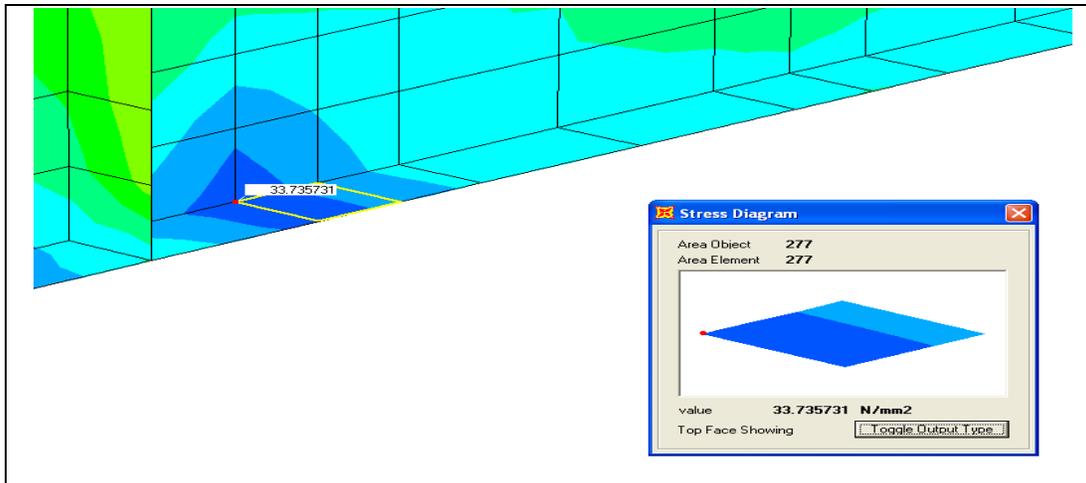


Figura 3.3: Imágenes del modelo de EF del que se obtuvo la tensión normal en los puntos y direcciones en que se colocaron los sensores ($\frac{1}{2} L$) Viga Izquierda.

Como había abordado posteriormente los valores de las tensiones solo se considero para determinar la capacidad portante del elemento del puente.

3.4 Determinación del factor de evaluación del elemento del puente.

Para la evaluación del elemento del puente se mide la variable de desplazamiento y tensiones empleando los métodos de tensión permisible basa en una resistencia normativa y estado limite se basa en una resistencia ultima evaluados en una clasificación a nivel operacional, donde su metodología es conocer la máxima carga permisible que el puente puede soportar, pero bajo una situación menos frecuente. En el método de tensión admisible, los factores de carga muerta y activa son tomados como unidad mientras que la capacidad nominal es determinada basándose en los esfuerzos permisibles para evaluación operacional, mientras que en el método de estado límite, el factor de la carga muerta es tomado como 1.1 mientras el factor de la carga activa es tomado como 1.3 para una evaluación de operación.

Para determinar el factor de evaluación de los elementos se emplea la carga de la locomotora C-30-7, sobre el modelo matemático analizado con sus posibles afectaciones y patologías existentes, lo que quiere decir en su estado real.

Se presenta una destrucción de las cargas más críticas en doble tracción con efecto dinámico.

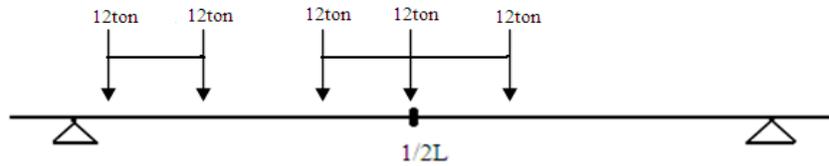


Figura 3.4: Posición de la carga dinámica \$P_5\$ en \$1/2L\$ de doble tracción.

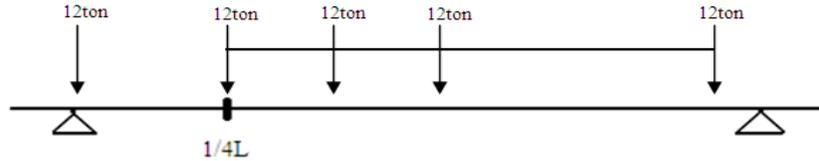


Figura 3.5: Posición de la carga dinámica \$P_6\$ en \$1/4L\$ de doble tracción

3.4.1 Ejemplo de cálculo para el factor de evaluación de puente en doble tracción.

El factor de evaluación se determina con el cociente de dividir la capacidad permisible del elemento por la carga móvil vertical de evaluación afectado por su correspondiente coeficiente dinámico o de impacto. El mismo representa la multiplicidad de los trenes de clasificación que el puente pueda soportar con seguridad. El coeficiente dinámico depende de la longitud del puente y del tipo de tracción o locomotora.

3.4.1.1 El factor de evaluación por el Esfuerzo Permisible.

En tensión normal

$$RT = \frac{Rn - D}{L(1 + I)}$$

Donde:

Rn: resistencia nominal

L: carga nominal ocasionada por la locomotora de evaluación

D: efecto nominal de carga muerta

I: factor de impacto de carga activa

Según la norma cubana, para los trenes con tracción diesel o eléctrica, así como también para cargas de vagones con velocidades de 60km/h y mayores, el coeficiente dinámico se obtiene de la siguiente formula:

$$I = \frac{21}{30 + \lambda} = \frac{21}{30 + 18.30} = 0.37 \quad \text{Coeficiente dinámico}$$

- Posición-1 en $\frac{1}{2}L$

$$RT = \frac{1700kg/cm^2 - 49.25kg/cm^2}{206.06kg/cm^2 * (1+0.37)} = 5.85 \Rightarrow \text{El elemento no presenta problemas}$$

activa.

ante los efectos de la carga

- Posición - 2 en $\frac{1}{4}L$

$$RT = \frac{1700Kg.cm^2 - 61.63Kg/cm^2}{303.04Kg/cm^2 * (1.37)} = 3.95 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

En tensión tangencial

$$RT = \frac{0.75Rn - D}{L(1+I)}$$

- Posición -1 en 0.0L

$$RT = \frac{(0.75)1700Kg/cm^2 - 3.8599Kg/cm^2}{504.78Kg/cm^2 * (1.37)} = 1.84 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

- Posición -1 en $\frac{1}{4}L$

$$RT = \frac{(0.75)1700Kg/cm^2 - 1.7636Kg/cm^2}{94.121Kg/cm^2 * (1.37)} = 9.87 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

- Posición -2 en 0.0L

$$RT = \frac{(0.75)1700Kg/cm^2 - 3.8599Kg/cm^2}{422.43Kg/cm^2 * (1.37)} = 2.20 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

- Posición - 2 en $\frac{1}{4}L$

$$RT = \frac{(0.75)1700Kg/cm^2 - 1.7636Kg/cm^2}{116.24Kg/cm^2 * (1.37)} = 8.00 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

3.4.1.2 El factor de evaluación por el Estado Limite.

En tensión normal

$$RT = \frac{Rc - \gamma d * D}{\gamma L * L(1+I)}$$

Donde:

Rn: resistencia de calculo

γd : factor de carga muerta

D: efecto nominal de carga muerta

γL : factor de carga activa

L: carga nominal ocasionada por la locomotora de evaluación

I: factor de impacto de carga activa

- Posición -1 en $\frac{1}{2}L$

$$RT = \frac{2100Kg/cm^2 - 58.46Kg/cm^2}{(1.3) * 206.06Kg/cm^2 * (1.37)} = 5.56 \Rightarrow \text{El elemento no presenta.}$$

- Posición -2 en $\frac{1}{4}L$

$$RT = \frac{2100Kg/cm^2 - 73.54Kg/cm^2}{(1.3) * 303.04Kg/cm^2 * (1.37)} = 3.75 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

En tensión tangencial

$$RT = \frac{0.75Rc - \gamma d * D}{\gamma L * L(1 + I)}$$

- Posición -1 en 0.0L

$$RT = \frac{(0.75)2100Kg/cm^2 - 4.507Kg/cm^2}{(1.3) * 504.78Kg/cm^2 * (1.37)} = 1.75 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

- Posición -1 en $\frac{1}{4}L$

$$RT = \frac{(0.75)2100Kg/cm^2 - 2.1319Kg/cm^2}{(1.3) * 94.121Kg/cm^2 * (1.37)} = 9.38 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

- Posición -2 en 0.0L

$$RT = \frac{(0.75)2100Kg/cm^2 - 4.507Kg/cm^2}{(1.3) * 422.43Kg/cm^2 * (1.37)} = 2.09 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

- Posición -2 en $\frac{1}{4}L$

$$RT = \frac{(0.75)1700Kg/cm^2 - 2.1319Kg/cm^2}{(1.3) * 116.24Kg/cm^2 * (1.37)} = 7.60 \Rightarrow \text{No presenta problemas.}$$

Los valores obtenidos de los cálculos se encuentran resumidos en la tabla 3.3, más otros puntos de posición de carga analizados.

3.4.2 Interpretación y comparación de los resultados obtenidos de desplazamiento y de los factores de evaluación en relación a posición de carga y su influencia en la capacidad del puente.

Tabla 3.3: Resumen de los valores del factor de evaluación con efecto dinámico.

Descripción	Posición	Locomotora TEM-4				Locomotora C-30-7			
		Por Tensión Admisible		Por Estado Limite		Por Tensión Admisible		Por Estado Limite	
		1/2L	1/4L	1/2L	1/4L	1/2L	1/4L	1/2L	1/4L
Tensión normal	P-I	5.91	5.98	5.62	5.69	5.56	5.53	5.28	5.26
	P-II	5.91	4.30	5.62	4.08	5.56	5.53	5.28	5.26
	P-III	5.55	3.40	5.28	3.23	8.30	4.02	7.89	3.83
		0.0L	1/4L	0.0L	1/4L	0.0L	1/4L	0.0L	1/4L
Tensión tangencial	P-I	2.69	9.12	2.56	8.67	2.59	8.43	2.46	8.01
	P-II	2.33	10.95	2.21	10.4	2.59	8.43	2.46	8.01
	P-III	1.93	7.67	1.84	7.29	2.39	9.74	2.27	9.25

Descripción	Posición	Locomotora C-30-7 en (doble tracción)			
		Por Tensión Admisible		Por Estado Limite	
		1/2L	1/4L	1/2L	1/4L
Tensión normal	P ₅ en 1/2L (doble tracción)	5.85	3.38	5.56	3.22
	P ₆ en 1/4L (doble tracción)	7.08	3.95	6.74	3.75
		0.0L	1/2L	0.0L	1/2L
	P ₄ en 0.0L (doble tracción)	6.70	5.58	6.37	5.31
	P ₄ en 1/2L (doble tracción)	9.45	5.79	8.98	5.51
		0.0L	1/4L	0.0L	1/4L
Tensión tangencial	P ₅ en 1/2L (doble tracción)	1.84	9.87	1.75	9.38
	P ₆ en 1/4L (doble tracción)	2.20	8.00	2.09	7.60
	P ₄ en 0.0L (doble tracción)	2.64	9.74	2.51	9.25
	P ₄ en 1/2L (doble tracción)	2.14	6.45	2.04	6.13

Interpretación de los resultados de la tabla.

Todos los valores obtenidos son mayores que uno, es decir, que los efectos de la carga activa ocasionada por la locomotora de evaluación no exceden la capacidad de carga.

Para condiciones de tensiones tangenciales se observa que la posición de apoyo es la más desfavorable, tanto para doble tracción como para tracción simple.

Además se demuestra por los resultados que los factores de evaluación para los estados tensionales son mayores para las posiciones del tren con respecto al centro de la luz lo que está en correspondencia con el comportamiento real.

Para el caso de doble tracción la posición más crítica es P_5 en $\frac{1}{2} L$.

3.4.2.1 Comparación de los resultados obtenidos del modelo y el valor permisible con la d desplazamiento en relación a posición de carga.

Valor de desplazamiento permisible.

$$[f] = \frac{L}{650} = \frac{1830\text{cm}}{650} = 2.82\text{cm}$$

Tabla 3.4: Valores de desplazamiento obtenidos del modelo (cm).

Posición	TEM-4			C-30-7					
	P-I	P-II	P-III	P-I y II	P-III	P5 - $\frac{1}{2}L$ (DT)	P6 - $\frac{1}{4}L$ (DT)	P4 - 0L(DT)	P4 - $\frac{1}{2}L$ (DT)
$\frac{1}{2}L$	0.542	0.544	0.665	0.540	0.439	0.56	0.484	0.58	0.56
$\frac{1}{4}L$	0.356	0.384	0.449	0.370	0.382	0.420	0.411	0.36	0.42

Interpretación de los resultados.

Estas pruebas, como anteriormente explicamos, se realizaron en tres posiciones, obteniéndose los siguientes resultados y comportamientos:

Al comparar los resultados de desplazamiento obtenidos por modelo calibrado con el permisible se concluye que los valores están dentro del rango permisible, es decir, que el efecto de la carga activa de la locomotora no provoca acciones negativas en la estructura.

Resumiendo toda la comparación presentada anteriormente se concluye que la estructura está en condiciones de soportar dichas cargas en efecto dinámicas.

3.5 Conclusiones parciales.

Una vez concluido este análisis se pueden arribar a un grupo de conclusiones desde el punto de vista de estudio y análisis que le permite al ingeniero tomar decisiones en

cuanto a la variante de metodología a realizar. Según los resultados de este capítulo, se ha logrado definir que:

- Utilizando la simulación se puede llegar a conocer los valores de tensión alcanzada por la estructura que permitan valorar el régimen de explotación del puente con seguridad.
- El éxito de los resultados de la modelación depende que los instrumentos de modelación estén correctamente calibrados, lo que se ha demostrado a lo largo del desarrollo del trabajo.
- La comparación entre los resultados de la prueba de carga y modelo revelan resultados similares. No sobrepasan el 10%, siendo este valor aceptado para los cálculos en ingeniería.
- En el cálculo de factor de evaluación todos los valores obtenidos son mayores que uno, es decir, que los efectos de la carga activa ocasionada por la locomotora de evaluación no exceden la capacidad de carga. El rango de valores en ambos casos han estado entre 1.75 y 10.95.
- Es factible la utilización de la locomotora C-30-7 con 24ton por eje para la realización de los cálculos correspondientes, ya que esta locomotora ha sido modificada a este valor total.

Conclusiones Generales

1. Los métodos experimentales no destructivos, permiten tener una predicción más precisa de la condición estructural y capacidad de carga de los puentes siendo el método de ensayo diagnóstico el más apropiado para la evaluación de los puentes metálicos de ferrocarril en Cuba.
2. En los trabajos de ingeniería al realizar los ensayos a las probetas de los materiales es recomendable tomar en cuenta los defectos de las mismas. La diferencia entre los procedimientos de la probeta (experimental y MEF) están en el orden del 3.4 % en el caso analizado, debido a no considerar en el modelo los defectos (poros, corrosión, etc.)
3. Al realizar la modelación de un problema real con el beneficio que brindan las herramientas computacionales, es necesario conocer los modelos de las geometrías, de los materiales y las cargas que son inherentes al software como herramienta para el proceso de modelación, y ajustarse lo mejor posible a la estructura a analizar.
4. La calibración de modelos en 2D y 3D es factible a través de modificación de la geometría de los elementos y de los apoyos, sin cambios de las propiedades de los materiales, a partir del comportamiento físico de los elementos reales del puente. El método de elementos finitos se puede utilizar a la hora de conocer más detalladamente el comportamiento estructural del puente, su flujo y transmisión en términos de esfuerzo y desplazamientos.
5. El éxito de los resultados de la modelación depende que los instrumentos de modelación estén correctamente calibrados, lo que se ha demostrado a lo largo del desarrollo del trabajo.
6. La comparación entre los resultados de la prueba de carga y modelo revelan resultados similares. No sobrepasan el 10%, siendo este valor aceptado para los cálculos en ingeniería.
7. Se demuestra la factibilidad de tomar medidas rápidas y seguras para puentes averiados en nuestras vías férreas, sin tener que cerrar el paso a las locomotoras, con puentes que aun tenían cierta capacidad, a partir de un análisis exacto de su comportamiento estructural.

Recomendaciones.

- Realizar una investigación cuyo objeto de estudio sea el análisis dinámico de la estructura.
- Realizar investigaciones similares a otros puentes metálicos para expandir esta experiencia.
- Realizar una metodología que valide con mayor precisión los deterioros reales para su uso en la modelación y calibración de los puentes.

Referencia bibliográfica

- ALONSO E., G., A. (1989) Instrumentación de obras. Universidad Politécnica de Cataluña.
- BROCHE LORENZO, J. L. (2005) Conceptualización del comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales aisladas aplicando técnicas de modelación numérica. Santa Clara, Marta Abreu.
- CARDONA, R. D. P. M. (2007) Propuesta de metodología para el diagnóstico patológico de puentes metálicos de ferrocarril. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
- FORNONS, J. M. (1982) El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras, Barcelona, Universidad Politécnica de Barcelona.
- ISLAIN, G. C. (2005) Estudio preliminar para el establecimiento de una metodología de investigación integral y sistémica para el diagnóstico de puentes metálicos de ferrocarril. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
- LÓPEZ, G. B. A. (2005) Investigación del Puente Km. 9,578 de Línea Cenizas". Estación Comprobadora de Puentes UEB Placetas.
- LORENZO, G. Y. S. (2005) Caracterización de la capacidad portante en vigas de hormigón estructural en puentes de ferrocarriles y carreteras. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
- LOZANO, N. (2002) Una reseña de pruebas de carga in-situ usados en los estados unidos para la evaluación de puentes. México, Departamento de Ingeniería Civil y Geológica. Universidad Estatal de Nuevo México.
<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/37/36>
- MARTÍNEZ, D. G. (2007) Modelación del puente metálico del ferrocarril km 9.568 del Ramal Santa Clara-Cenizas mediante el Método de los Elementos Finitos. Santa Clara, Universidad Central de las Villas.
- NC (1984) Puentes y Alcantarillas" Especificaciones de proyecto y métodos de cálculo. NC-53-125.

- NRMT (1999) Vías y puentes para el transporte ferroviario. Inspección a obras de fábrica. Organización. . IN TRANSPORTE, M. Y. (Ed.) 235:86.
- OLIVERA RANERO, A. (2003a) Apuntes sobre diagnostico patológico y la evaluación del estado técnico de edificaciones. Santa Clara, Universidad Central de las Villas.
- OLIVERA RANERO, A. (2003b) Apuntes sobre el diagnóstico patológico y la evaluación del estado técnico de edificación. Folleto de maestría. Santa Clara, UCLV.
- PIRALLA, R. M. (1987) Diseño Estructural, La Habana, Edición Revolucionaria.
- RECAREY MORFA CARLOS A., J. L. P. Y. G. A. L. (2009) Desarrollo de Técnicas de Avanzada para la Investigación de Puentes y la Experiencia Cubana en su Aplicación. Santa Clara, UFC-UCLV.
- VALERO, E. F. (2004) El Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM). Departamento de Ingeniería Electrica.UPC www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1214104-114808//12Efv12de23.pdf

Bibliografía

1. LONSO E., G., A. (1989) Instrumentación de obras. Universidad Politécnica de Cataluña.
2. ALONSO, Y. M. (2006) Caracterización de los materiales del puente de ferrocarril Km. 9.568 Departamento de Mecánica Aplicada y Dibujo. Santa Clara, UCLV.
3. AVELLANEDA, T. G. Y. E. V. (1987) Puentes I, La Habana, Pueblo y Educación.
4. AZIZINAMINI, A. (2001) Steel Bridge System, Simple for Dead Load and Continuous for Live load. Former Graduate Student and Associate Professor in University of Nebraska – Lincoln.
5. BAMBA, B. (2006) Propuesta de un catálogo de deterioros para puentes Metálicos de Ferrocarril. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de las Villas.
6. CARDONA, R. D. P. M. (2007) Propuesta de metodología para el diagnostico patológico de puentes metálicos de ferrocarril. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
7. CUBILLOS, A. (2006) Introducción al Método de los Elementos Finitos. Ibagué, Prog. Ingeniería Mecánica. <http://almec.files.wordpress.com/2007/10/resumen.pdf> 15 de Febrero.
8. EDWARDS, T. (2008) Modelación y análisis de plano espacial de una edificación de sistema gran bloque. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
9. FARHEY, D. N. (2005) Bridge Instrumentation and Monitoring for Structural Diagnostics. <http://shm.sagepub.com/cgi/content/abstract/4/4/301>. 22 de Enero.
10. FHECOR (2008) Reparación de puentes ferroviarios en el Macizo del Garraf. Sitges en Barcelona. IN CONSULTORES, I. (Ed.). Barcelona, http://www.fhecor.es/files/ARW/ES_GARRAF.pdf. 22 de Enero.
11. FORNONS, J. M. (1982) El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras, Barcelona, Universidad Politécnica de Barcelona.
12. IMAC (2003) Puentes tensados de Madera. Departamento de Ing. Civil. Universidad de Concepción. [http://www.62-65%20PUENTESde madera.pdf](http://www.62-65%20PUENTESde%20madera.pdf). 15 de Febrero.

13. INDECOPI (2004) Metrología ¿QUÉ ES CALIBRACIÓN Y CUÁL ES SU IMPORTANCIA? , <http://www.indecopi.gob.pe/servicios-Metrologia-importancia.jsp> 08 de Abril.
14. ISLAIN, G. C. (2005) Estudio preliminar para el establecimiento de una metodología de investigación integral y sistémica para el diagnóstico de puentes metálicos de ferrocarril. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
15. LÓPEZ, G. B. A. (2005) Investigación del Puente Km. 9,578 de Línea Cenizas”. Estación Comprobadora de Puentes UEB Placetás.
16. LORENZO, G. Y. S. (2005) Caracterización de la capacidad portante en vigas de hormigón estructural en puentes de ferrocarriles y carreteras. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
17. LOZANO, N. (2002) Una reseña de pruebas de carga in-situ usados en los estados unidos para la evaluación de puentes. México, Departamento de Ingeniería Civil y Geológica. Universidad Estatal de Nuevo México. <http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/37/36> 12 de Enero.
18. MARTÍNEZ, D. G. (2007) Modelación del puente metálico del ferrocarril km 9.568 del Ramal Santa Clara-Cenizas mediante el Método de los Elementos Finitos. Santa Clara, Universidad Central de las Villas.
19. MÉNDEZ, C. A. C. (2006) La vinculación del Análisis por Elementos Finitos y los Ensayos. Santa Clara, Estación Comprobadora de Puentes y UCLV.
20. MÉNDEZ., D. I. C. A. C. (2006) Introducción a la medición mediante SG. Santa Clara, Departamento de Mecánica Aplicada y Dibujo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
21. MMELGAR (2005) Anexos 05 y 06 - Defectos y pruebas en puentes. Ministerio de Transportes y Comunicaciones., http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/Inspeccion-Puentes/Anexos05y06-Defectos-y-pruebas-en-puentes.pdf. 12 de Abril.

22. NA (1994) Reglamento argentino para el proyecto y construcción de puentes ferroviarios de acero remachado.
<http://www.cnrt.gov.ar/viayobra/Reg%20Ptes%20Acero%20Index.htm>
23. NC (1984) Puentes y Alcantarillas” Especificaciones de proyecto y métodos de cálculo. NC-53-125.
24. NRMT (1999) Vías y puentes para el transporte ferroviario. Inspección a obras de fábrica. Organización. . IN TRANSPORTE, M. Y. (Ed.) 235:86.
25. NRMT (1999) Vías y puentes para el transporte ferroviario. Mantenimiento a camas de puentes. 273:87.
26. OLIVERA RANERO, A. (2003) Apuntes sobre diagnostico patológico y la evaluación del estado técnico de edificaciones. Santa Clara, Universidad Central de las Villas.
27. OLIVERA RANERO, A. (2003) Apuntes sobre el diagnóstico patológico y la evaluación del estado técnico de edificación. Folleto de maestría. Santa Clara, UCLV.
28. PÉREZ, L. G. (2008) Evaluación de pistas aéreas de pavimentos flexibles basándose en el método acn-pcn con la combinación de las técnicas de modelación e instrumentación. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
29. PIRALLA, R. M. (1987) Diseño Estructural, La Habana, Edición Revolucionaria.
30. RANGER, B. R. (2008) Estudio Estructural y Patológico de Puentes Metálicos Ferroviarios. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de Las Villas.
31. RE CAREY MORFA CARLOS A., J. L. P. Y. G. A. L. (2009) Desarrollo de Técnicas de Avanzada para la Investigación de Puentes y la Experiencia Cubana en su Aplicación. Santa Clara, UFC-UCLV.
32. ROJAS, A. (2008) Perfeccionamiento de las Asignaturas de las Actividades de Vías Férreas para el Plan D. Ingeniería Civil. Santa Clara, Universidad Central de las Villas.
33. UANL (2008) Aplicación del método de elemento finito al análisis nodal. Revista Ingenierías
http://ingenierias.uanl.mx/3/pdf/3_Martha_Guerrero_et_al_Aplicacion_metodo.pdf.
34. VALERO, E. F. (2004) El Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM). Departamento de Ingeniería Electrica.UPC

www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1214104-114808//12Efv12de23.pdf

11 de Febrero.

Anexo 1

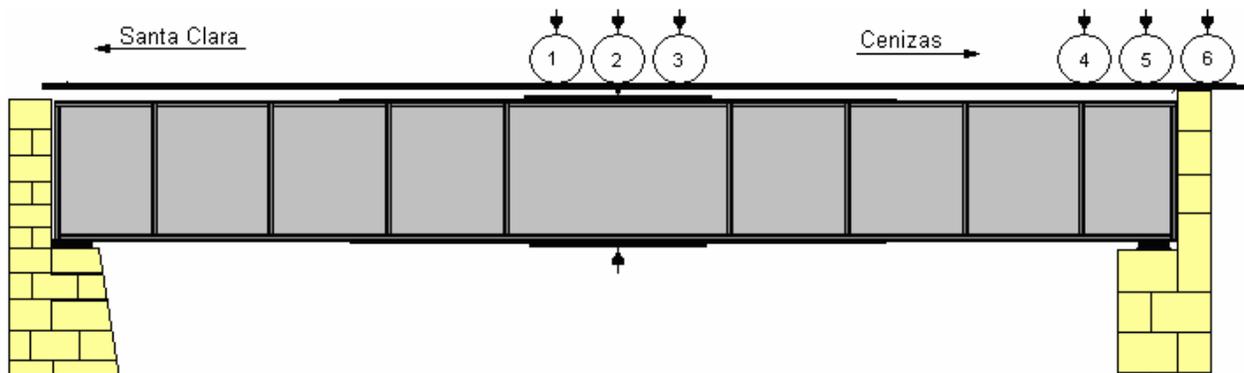
Posiciones Estáticas de la locomotora TEM-4.

Locomotora TEM-4 número 51001, con las siguientes características:

Las pruebas estáticas se realizaron en tres posiciones de la locomotora sobre el puente.

Posición No. I

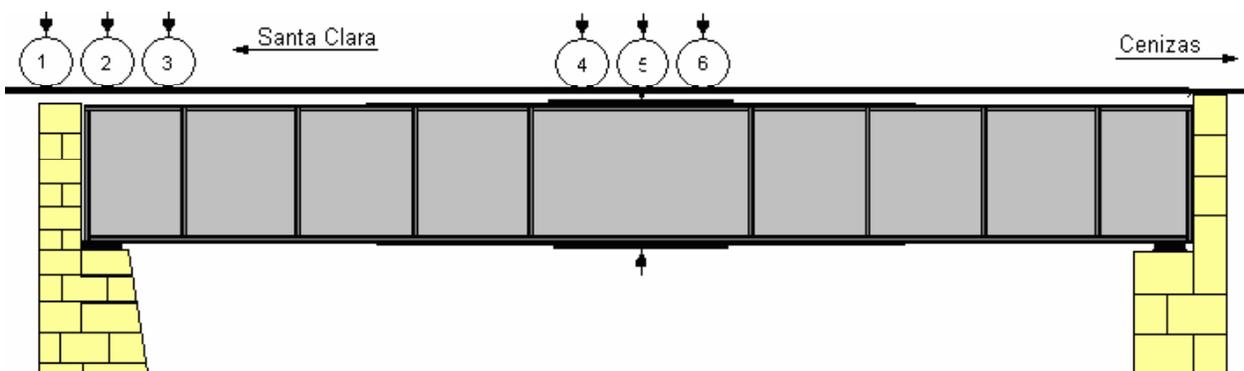
La rueda No. 2 del truck delantero sobre el centro de la viga (ver esquema N° 2)



ESQUEMA No. 2

Posición No. II.

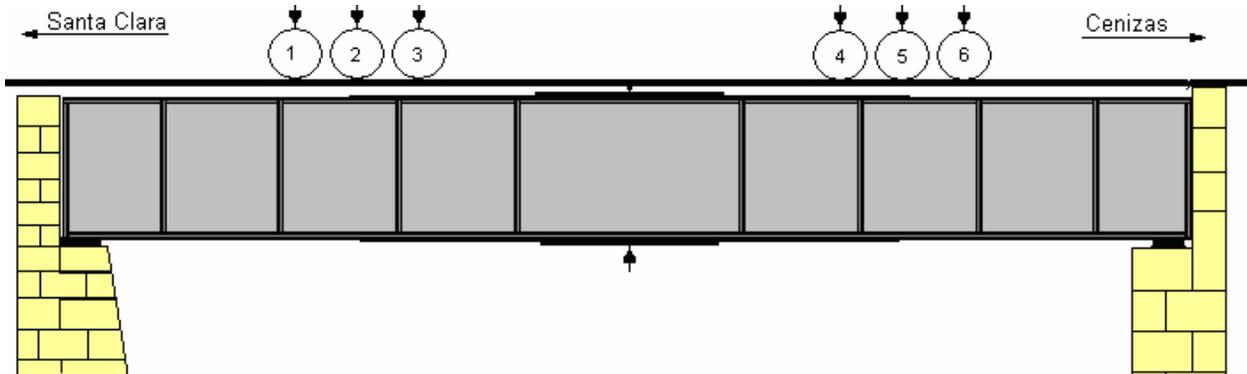
La rueda No. 5 del truck trasero sobre el centro de la viga (ver esquema N° 3)



ESQUEMA No. 3

Posición No. III

El centro de la locomotora sobre el centro de la viga, o sea, los trenes de ruedas equidistantes del centro de la viga (ver esquema N° 4).



ESQUEMA No. 4

Anexo 2

IV- Para obtener un modelo calibrado fueron necesarias 56 iteraciones obteniéndose los siguientes resultados de los espesores de elementos:

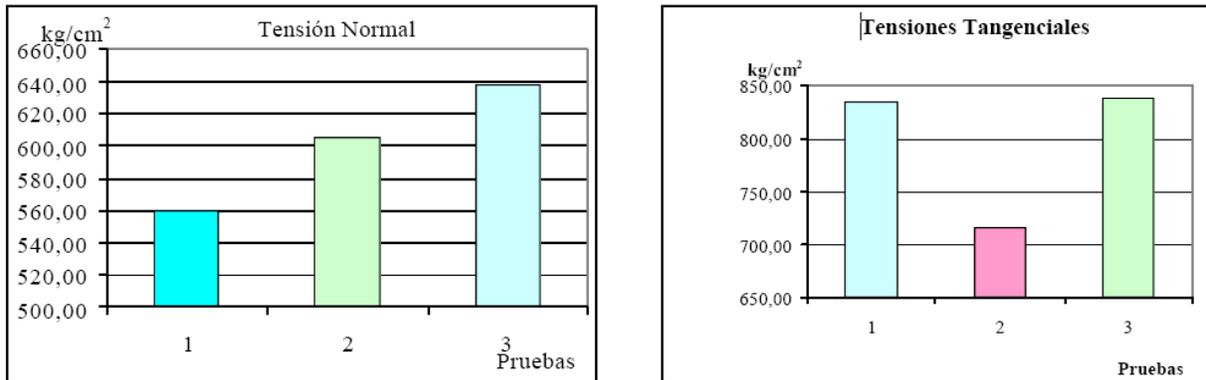
Cordón Superior Viga Derecha		
Piezas	Espesor Real sin Corrosión (mm)	Espesor en el modelo calibrado (mm)
1Platabanda+ Angular	32	15
2 Platabandas + Angular	42	30
3 Platabandas + Angular	52	40
4 Platabandas + Angular	68	45
4 Platabandas + Angular + Cubrejuntas Horizontal	84	65
Cordón Inferior Viga Derecha		
Piezas	Espesor Real sin Corrosión (mm)	Espesor en el modelo calibrado (mm)
Angular	16	15
1Platabanda+ Angular	32	30
2 Platabandas + Angular	42	40
3 Platabandas + Angular	52	50
4 Platabandas + Angular	68	60
4 Platabandas + Angular + Cubrejuntas Horizontal	84	80
Alma Viga Derecha		
Piezas	Espesor Real sin Corrosión (mm)	Espesor en el modelo calibrado (mm)
Alma	10	8
Alma + Angular	42	38
Alma + Angular + Cubrejuntas Horizontal	70	68
Alma + Angular + Cubrejuntas Vertical	30	28
Cordón Superior Viga Izquierda		
Piezas	Espesor Real sin Corrosión (mm)	Espesor en el modelo calibrado (mm)

1Platabanda+ Angular	32	30
2 Platabandas + Angular	42	40
3 Platabandas + Angular	52	50
4 Platabandas + Angular	68	65
4 Platabandas + Angular + Cubrejuntas Horizontal	84	80
Cordón Inferior Viga Izquierda		
Piezas	Espesor Real sin Corrosión (mm)	Espesor en el modelo calibrado (mm)
Angular	16	15
1Platabanda+ Angular	32	30
2 Platabandas + Angular	42	40
3 Platabandas + Angular	52	50
4 Platabandas + Angular	68	65
4 Platabandas + Angular + Cubrejuntas Horizontal	84	80
Alma Viga Izquierda		
Piezas	Espesor Real sin Corrosión (mm)	Espesor en el modelo calibrado (mm)
Alma	10	10
Alma + Angular	42	40
Alma + Angular + Cubrejuntas Horizontal	70	70
Alma + Angular + Cubrejuntas Vertical	30	30

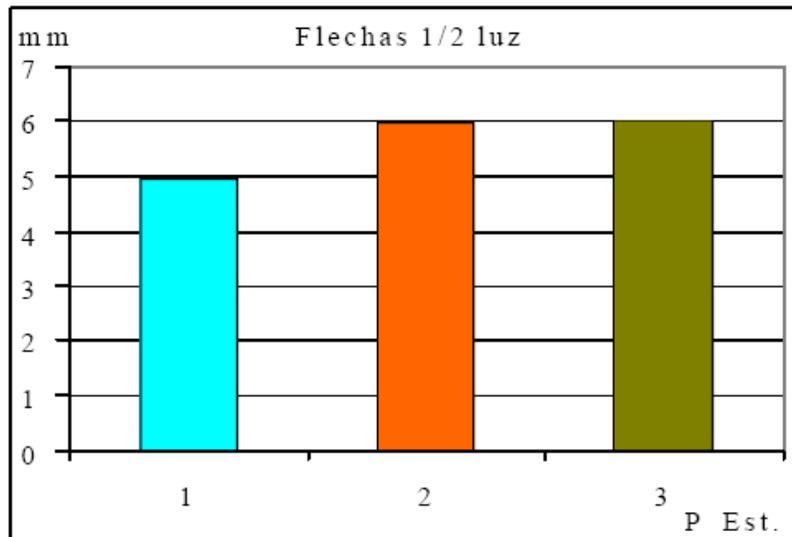
Anexo 3

V - Grafica de las pruebas estáticas obtenidas por ensayo de carga.

V.I - Comportamiento de los resultados de las tensiones normales y tangenciales de acuerdo a las posiciones de las cargas registradas por las galgas extensométricas en las pruebas estáticas.



V.II - Comportamiento de los desplazamientos verticales de acuerdo a las posiciones de la carga en el centro de la longitud de la viga izquierda.



V.II - Comportamiento de los desplazamientos verticales de acuerdo a las posiciones de la carga a un cuarto de la longitud de la viga izquierda y derecha.

