

**Ministerio de Educación Superior  
Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
UEB Vías y Puentes de Placetas**

**Facultad de Ingeniería Mecánica  
en colaboración con  
Estación Comprobadora de Puentes**



**Título: “Modelación y Simulación del Mecanismo de Giro del “Puente de Hierro” de calle 11 y 26 en Playa, Ciudad Habana”**

## **Trabajo de Diploma**

**Autores:**

**Yumar Acosta García**  
[yacosta@uclv.edu.cu](mailto:yacosta@uclv.edu.cu)

**Yandry Rodríguez Toledo**  
[yrtolledo@uclv.edu.cu](mailto:yrtolledo@uclv.edu.cu)

**Tutores:**

**Dr. Ing. César A. Chagoyén Méndez**  
**Ing. Gregorio Aragón López**

**Ciudad de la Habana  
Julio, 2009**

## Agradecimientos

A mis padres Rebeca y Jose Antonio, por su confianza incondicional y porque siempre me alentaron y dieron fuerza cada vez que la necesité.

A mi tutor el Dr. Ing. César A. Chagoyén Méndez, ya que gracias a su apoyo y asesoramiento fue posible la realización de este trabajo.

A los Ingenieros Aragón y Alejandro de la Estación Comprobadora de Puentes por su gran ayuda durante toda la investigación.

A mi tía Nena, por su inspiración y ejemplo.

A mis tíos Elena y Andrés por su apoyo y carisma familiar.

A mi novia Yadira, por su comprensión, compañía y amor.

A toda mi familia por su apoyo y cariño en todo momento.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica que han contribuido con el día a día a mi formación profesional.

A todas las personas que de una forma u otra han contribuido al desarrollo de este trabajo.

¡MUCHAS GRACIAS!

*Dedicatoria*

*El presente trabajo va dedicado muy en especial a homenajear a mi abuela Martha, quien me ha sabido guiar por los caminos de la superación profesional, orientándome en la vida con su ejemplo, sacrificio y dedicación.*

## Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados del análisis realizado a los mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro de calle 11 y 26 del municipio Playa en Ciudad de La Habana, como parte inicial de un proyecto más amplio que abarcaría la reparación de todo el puente. El mismo cuenta con más de 100 años de explotación y con un mantenimiento casi nulo, lo que ha traído como consecuencia un considerable deterioro. Se describen las principales características y patologías de los mecanismos mencionados anteriormente, así como las recomendaciones para lograr su puesta en marcha. Se presentan además, los planos de pieza y modelos en 3D con sus correspondientes normativas de soldadura para acometer la construcción de los elementos deteriorados o que hoy están ausentes. Además se efectúa la simulación por Elementos Finitos de los tres mecanismos, haciendo énfasis en los Apoyos, al cual se realiza su validación y finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

## Abstract

In this project show the results of the analysis to support, locking and turning mechanisms of the Iron Bridge on 11 and 26 Street of the municipality of Playa in Havana City, as the initial part of a larger project that would cover the repair the bridge completely. It has over 100 years of exploitation and with almost zero maintenance, which has resulted in a considerable deterioration. It describes the main features and pathology of the mechanisms mentioned above, as well as recommendations for their implementation. We present also the piece of 3D models and their corresponding regulations to carry out welding construction elements that are now damaged or missing. Besides effectuate the Finite Element Simulation of the three mechanisms, with an emphasis on the support, which is realized the validation and finally an analysis of the results.

**Indice**

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo I “Acerca de los puentes metálicos”</b> .....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Generalidades sobre los puentes.....	5
1.3 Acerca de la Modelación de puentes .....	6
1.4 Características a considerar para realizar el diseño de mecanismos en un puente.....	6
1.5 El acero utilizado en la construcción de puentes, sus características....	7
1.6 Sobre los aceros navales de grado A .....	9
1.7 Algunas características y patologías del puente mixto de calle 11 y 26	10
1.8 Conclusiones Parciales.....	20
<b>Capítulo II “Modelación y Análisis Metalográfico. Tecnología de Soldadura”</b> .....	21
2.1 Introducción.....	21
2.2 Descripción y modelación de los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de 11 y 26.....	22
2.2.1 Mecanismo de Apoyo.....	22
2.2.2 Mecanismo de Cierre.....	25
2.2.3 Mecanismo de Giro.....	28
2.3 Resultados del análisis de material del Mecanismo.....	32
2.3.1 Determinación de la composición química.....	33
2.3.2 Determinación de las propiedades mecánicas.....	35
2.3.3 Análisis Metalográfico.....	36
2.4 Establecimiento de la Tecnología de Soldadura.....	37
2.4.1 Introducción.....	37
2.4.2 Tecnología de soldadura del Apoyo Base.....	38
2.4.3 Análisis preliminar de las características del conjunto soldado.....	39
2.4.4 Descripción del ensamble.....	40
2.4.5 Preestablecimiento de la secuencia de ensamble.....	40
2.4.6 Establecimiento de los procesos de soldadura.....	42
2.4.7 Determinación de la geometría de la unión soldada.....	44
2.4.8 Calculo del numero de pasadas.....	47
2.4.9 Llenado de los Modelos de Procedimiento de Soldadura.....	50
2.4.10 Determinación de los costos de la realización de la soldadura.....	51
2.5 Conclusiones Parciales.....	55
<b>Capítulo III “Simulación de los Mecanismos. Análisis de los resultados”</b> .....	56
3.1 Introducción.....	56
3.2 Acerca del MEF y la modelación.....	57
3.3 Descripción del modelo de los apoyos a partir de la utilización del acero ASTM 3694.....	59
3.4 Validación o Calibración del modelo de los apoyos.....	64
3.4.1 Análisis de sensibilidad o convergencia.....	64

3.5 Simulación de los Mecanismos de Giro y Cierre.....	66
3.6 Conclusiones Parciales.....	70
<b>Conclusiones Generales</b> .....	71
<b>Recomendaciones</b> .....	73
<b>Referencias</b> .....	74
<b>Bibliografía</b> .....	75
<b>Figuras</b>	
1.1 Motor, reductores y árboles con acoplamientos y chumaceras.....	12
1.2 Mecanismo de transmisión hasta las cuñas del centro del puente....	13
1.3 Mecanismo de transmisión hasta las cuñas de los extremos del puente.....	13
1.4 Apoyos y cuñas.....	13
1.5 Mecanismo de transmisión hasta el cierre central en los extremos del puente.....	16
1.6 Corona Superior, Árbol, Chumaceras, Piñón, Cremallera inferior, planchas y vigas.....	17
1.7 Soportes y ruedas.....	17
1.8 Apoyo (Pivote) Central.....	17
2.1 Apoyo y mecanismo tensor acoplado en 3D.....	23
2.2 Piezas que componen mecanismo tensor (Unión y soporte).....	23
2.3 Vista general del Mecanismo de Fijación.....	24
2.4 Vistas parciales de la base empotrada y de la rueda mascisa.....	25
2.5 Vistas parciales de los acoples al resorte y al soporte.....	26
2.6 Vistas parciales del resorte y el eje principal.....	26
2.7 Vistas parciales del brazo unión entre el árbol y el resorte y la unión entre el árbol y los tensores.....	27
2.8 Vista General del Mecanismo de Cierre.....	27
2.9 Vistas parciales de la base inclinada y la rueda.....	30
2.10 Vistas parciales del apoyo superior y un detalle de uno de los tornillos que va fijado a la viga principal del puente.....	31
2.11 Vista completa de los apoyos laterales.....	32
2.12 Probetas del puente con las huellas del análisis químico.....	34
2.13 Fotos de la estructura obtenida del microscopio electrónico de las probetas del Mecanismo de Apoyo y del Ala de la Viga.....	36
2.14 Elementos de la base del mecanismo de apoyo.....	38
2.15 Apoyo base.....	41
2.16 Apoyo base invertido.....	41
2.17 Secuencia de realización de los cordones.....	49
3.1 Mallado de los Apoyos.....	60
3.2 Análisis tensional del apoyo bajo una presión uniforme crítica.....	61
3.3 Análisis de Desplazamiento resultante de cada uno de los nodos....	62
3.4 Factor de Seguridad de acuerdo a la tensión de fluencia del material.....	63
3.5 Tamaños de maya realizados para el análisis de sensibilidad.....	65
3.6 Tensiones en la ruedas laterales.....	67
3.7 Desplazamiento y Factor de Seguridad	67

3.8	Tensiones del Mecanismo de Cierre.....	69
3.9	Desplazamientos y Factor de Seguridad.....	69

**Tablas**

1.1	Características fundamentales del puente de 11 y 26.....	10
2.1	Descripción, dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman el Mecanismo de Apoyo.....	24
2.2	Descripción, dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman el Mecanismo de Cierre.....	28
2.3	Parámetros del motor ruso MAP.....	29
2.4	Descripción, dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman el Mecanismo de Giro.....	32
2.5	Resultados del análisis químico.....	33
2.6	Aceros soviéticos con composición química similar.....	34
2.7	Comparación entre las composiciones químicas.....	35
2.8	Propiedades mecánicas.....	35
2.9	Comparación entre las propiedades mecánicas.....	
2.10	Resumen del análisis metalográfico de ambas probetas.....	37
2.11	Composición química del Acero ASTM-3694.....	39
2.12	Propiedades mecánicas del Acero ASTM-3694.....	39
2.13	Procedimiento de Soldadura.....	50
2.14	Resumen de la determinación de los costos de la soldadura para el apoyo base.....	53
2.15	Resumen de la determinación de los costos de la soldadura para cada uno de los elementos que requieren el proceso.....	53
2.16	Resumen Total de la determinación de los costos de la soldadura para cada mecanismo en general según la cantidad de elementos...	54
3.1	Valores de tensión, desplazamiento y deformación con diferentes mayados para el mecanismo de apoyo.....	64

**Anexos**

1	Especificación Técnica de los planos de pieza y de ensamble de los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro de 11 y 26
2	Especificaciones del Procedimiento de Soldadura
3	Planos de Pieza y de Ensamble del Mecanismo de Apoyo
4	Planos de Pieza y de Ensamble del Mecanismo de Cierre
5	Planos de Pieza y de Ensamble del Mecanismo de Giro
6	Planos de Ensamble del Pivote Central

## Introducción

Mientras iban siendo desplazados por los dominicos desde El Vedado, los carmelitas (colaboradores de Finlay en esta comunidad costera), levantaron su convento con capilla de Santa Teresa en 13 y 22, y su iglesia de Línea y 16, beneficiada en este caso por su vecina inmediata desde “la Casa Jardín“, otra devota de la Virgen del Carmen: Mercedes Muñoz “Mita”, la madre de Dulce María Loynaz, familia que trasciende al ambientalismo y a toda la cultura cubana entre tantas otras personalidades que para todas las esferas de la cultura y la sociedad en El Carmelo han nacido, residido, estudiado, trabajado o visitado.

Desde el Carmelo desde el siglo XVI se define la Calle línea que se perfila en 1857 como la que determinará al este el casco histórico del Vedado (1860-1892) mientras la tracción animal es sustituida en 1883 desde el Prado y San Lázaro por la maquineta de vapor que el historiador Roig de Leuchsenring llamó “cucarachita” hasta que el 27 de enero de 1901, la ruta Vedado-San Juan de Dios del primer tranvía eléctrico cubano inaugura su paradero del vedado en Línea y 18, con planta de la Habana Electric Co., a orillas del Río, aún en 26 entre 11 y 13, aledaña a la chimenea que todavía resta de la Manicería y Fábrica de Aceites El Cocinero (1904); antecedió allende el río, al Puente de Pote (de Ibáñez, 1883), o Puente de Hierro, hoy en calle 11, al puente Aubert o de 23 (1909) al Sur y al Norte, a los túneles de Calzada (1953) y el de Línea (1958). [1]

En Cuba existen varios puentes de acero con diferentes usos y formas, pero cabe destacar que este es único de su tipo en el país debido a que posee un Mecanismo de Giro, el cual lo convierte en una joya de la Ingeniería Mecánica en Cuba, además de ser un puente centenario que ha trascendido hasta hoy a lo largo de más de un siglo de cercanía al mar, lo cual conspira en contra de su durabilidad debido a la oxidación y dentro de otras causas al cambio de funcionalidad a que ha estado expuesto. Inicialmente fue diseñado para el paso de tranvías y posteriormente fue rediseñado y adaptado para la circulación de vehículos hasta la actualidad.

Como perspectiva de trabajo se pretende analizar bibliográficamente el tema para adquirir la debida actualización y conocer las causas y desafíos a que se irá a enfrentar la investigación en lo adelante. Es necesario realizar un levantamiento a pie de obra del Mecanismo de Fijación que a su vez está compuesto por los mecanismos de Apoyo y de Cierre, siguiendo el Mecanismo de Giro. Posteriormente se procede al dimensionamiento de las piezas de dichos mecanismos, las que se proyectan con sus dimensiones en planos de piezas y en dibujos en tres dimensiones, usando para ello software especializados. Estos planos de piezas serán reelaborados en dependencia de su comportamiento a determinadas cargas, las cuales serán aplicadas y finalmente se determinará cual será el diseño resistente y económico. Se presentarán además las correspondientes tecnologías de soldadura para las piezas que lo requieran. Al finalizar el proceso de diseño se procederá a la entrega del proyecto de reparación de acuerdo a la documentación y especificaciones técnicas y de calidad para la fabricación de las piezas que serán colocadas en el puente.

El **Objeto** de esta investigación son los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro de calle 11 y 26 en Playa, Ciudad Habana.

Como **Preguntas de Investigación** pueden destacarse las siguientes:

¿Es posible Modelar los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro de un Puente metálico?

¿Qué tipo de Proceso de Soldadura será confiable y económico emplear a partir de la utilización de nuevos aceros de construcción como son los Aceros Navales?

El **Problema de Investigación** se define como:

Los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro se encuentran deteriorados y hoy no se dispone de la documentación técnica necesaria para acometer su restauración y puesta en marcha.

Mientras que la **Hipótesis**:

Es posible restaurar los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro construyendo las piezas deterioradas y las piezas que hoy están ausentes a partir de la elaboración de la documentación técnica necesaria.

El **Objetivo General** es el siguiente:

Modelar y Simular los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro aplicando técnicas de Diseño e Ingeniería Asistida por Computadoras (CAD-CAE) y de Ingeniería Inversa para establecer las correspondientes normativas para acometer su fabricación.

Los **Objetivos Específicos**:

1. Recopilar y organizar el conocimiento teórico y práctico existente sobre puentes metálicos.
2. Confeccionar los planos de piezas de los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro, utilizando el software AutoCAD.
3. Modelar los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro en 3D, utilizando el software Mechanical Desktop.
4. Realizar la simulación y el análisis por Elementos Finitos del modelo de los Apoyos mediante el software COSMOSDesignSTAR.
5. Analisis de los resultados de las Tensiones, Desplazamientos y Factor de Seguridad.

El presente trabajo, esta formado por tres capítulos:

- En el **Capítulo I** se aborda el tema de los puentes metálicos, la modelación de puentes de acero así como las características y patologías del Puente de 11 y 26.
- El **Capítulo II** comprende la descripción detallada del puente, la elaboración de los planos de pieza y la realización del modelo en 3D. Se presentan los resultados del Análisis Metalográfico de las muestras tomadas del puente,

además se presenta la tecnología de soldadura de cada una de las piezas a elaborar por este proceso.

- En el **Capítulo III** se realiza una comparación entre los resultados obtenidos a partir de la simulación mediante el MEF del Mecanismo de Apoyo.

La realización de este trabajo tiene **Repercusiones** de gran impacto, las que se pueden calificar de la siguiente manera:

En lo **Tecnológico**:

El uso del Diseño asistido por computadoras (CAD) ofrece la ventaja de obtener los resultados rápidamente, disminuyendo el tiempo de trabajo, brindando una mayor precisión e información sobre los aspectos esenciales de las piezas.

En lo **Social**:

Mejora las condiciones de transportación y de seguridad de la población de Ciudad de la Habana que transita por el puente, debido a que se encuentra situado en una posición clave, en el enlace de dos municipios de gran densidad poblacional.

En lo **Económico**:

Ofrece numerosas ventajas económicas a la provincia y al país, debido a que el giro del puente permite la circulación de barcos para su reparación en el Astillero y la evacuación aguas arriba en tiempo de Catástrofe, así como otras ventajas estratégicas para la Defensa del país.

El gran significado **Cultural y Patrimonial** para la vida de la Ciudad de la Habana, debido a su centenaria presencia y la historia que ha sido testigo a lo largo de los años.

## Capítulo I “Acerca de los puentes metálicos”

### 1.1 Introducción

Para el presente trabajo se realizó una revisión bibliográfica apoyada fundamentalmente en artículos e investigaciones realizadas por especialistas nacionales y foráneos en el tema de la construcción y mantenimiento de puentes metálicos, de los que se recopiló valiosa información para el análisis y estudio del mecanismo en cuestión, cuyos aspectos más generales se abordan a continuación.

### 1.2 Generalidades sobre los puentes

Los puentes son estructuras concebidas por el hombre para salvar un obstáculo o depresión natural o artificial como: ríos, cañones, brazos de mar, vías férreas o carreteras, además de permitir la unión de islas entre sí o con tierra firme. Es en la naturaleza donde hay evidencia de los primeros puentes, los que se ocasionaban por la caída de un árbol sobre una deformación del terreno o por el propio capricho de la madre natura. El hombre en su desarrollo natural por la vida se percató de la necesidad de construir él mismo sus puentes y no depender de la providencia del natío; a partir de este momento y en lo adelante, el hombre empezaría a construirlos similares a los que se había encontrado a su paso, luego mejoraría los diseños y los materiales a emplear.

Estas estructuras son de vital importancia dentro del sistema vial de un país; porque la rotura o deterioro severo de uno de ellos puede ocasionar daños a la economía de la región o de, en algunos casos, hasta la de la nación, por lo que no importa si son de carreteras o de ferrocarril, ellos requieren de una conservación periódica, pues son vitales para el buen funcionamiento del sistema de vías. De esto se deriva la gran necesidad de su estudio dentro del campo de la ingeniería.

En la actualidad son realizados de disímiles materiales y formas los que se integran a los ya existentes que de hecho abarcan también una gran cantidad de materiales. Los metálicos son usados desde antaño y todavía se fabrican dado a

su versatilidad, diseños de grandes luces, su rápida construcción, aunque son caros de construir.

### 1.3 Acerca de la modelación de puentes

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.

Con la caída del puente de Tacoma [2] el hombre se empezó a preocupar entre otros, por los fenómenos aeroelásticos. Las tres variantes de como enfrentar estos fenómenos son: el experimental, el de análisis por elementos finitos y el híbrido, recomendado como el más óptimo. El último método es parecido al que se propone en este trabajo, aunque hay una diferencia sustancial entre ambos, basada en a quien se le realiza el mallado. En el artículo referenciado se realiza la malla a la zona que rodea al perfil del puente, sin tener en cuenta el comportamiento de la estructura, mientras que en este trabajo se analiza la estructura y no la zona circundante.

### 1.4 Características a considerar para realizar el diseño de mecanismos en un puente

Resistencia: Oposición que ofrece una pieza de acero a ser deformada cuando es sometida a la acción de fuerzas externas. Bajo la acción de esas fuerzas externas y dependiendo de la magnitud, el acero se comporta de dos maneras diferentes, elástica y plástica. Un comportamiento elástico significa que la pieza retornará a su forma original, una vez que se suspenda la acción de la fuerza. Un

comportamiento plástico significa que la pieza permanecerá deformada luego de cesar la acción de la fuerza.

Cuando una pieza de acero se somete a la acción de una fuerza en constante aumento, se comportará de manera elástica mientras ésta sea de baja magnitud hasta cierto punto —límite elástico—, después del cual se comporta de manera plástica.

Para la construcción de puentes los diseñadores harán uso de esa característica elástica cuidándose de no someter al acero a solicitudes cercanas al Límite Elástico, si no que usualmente utilizan aproximadamente la mitad de ese valor. Esto es lo que se denomina Factor de Seguridad (o Factor de Ignorancia), que se utiliza para compensar eventos imprevistos que puedan surgir durante el servicio.

Dureza: Resistencia a la penetración. Se vincula con la capacidad del material a ser conformado en piezas o partes.

Tenacidad: Capacidad de un metal de absorber energía. Esta propiedad se ve afectada negativamente a medida que la temperatura disminuye pudiendo ocurrir, algunas veces, fallas catastróficas. Este comportamiento es considerado por los diseñadores al seleccionar el grado de acero más adecuado para las condiciones de servicio.

Resistencia a la corrosión atmosférica: Capacidad del acero a resistir la corrosión de la atmósfera. La resistencia de un acero a este tipo de ataque, determinará el tipo de mantenimiento necesario para asegurar un servicio seguro, lo que a su vez se reflejará en los costos de mantenimiento. [3]

En el caso particular del Puente de Hierro, este se encuentra muy expuesto a este fenómeno, debido a que está muy cercano al mar y por tanto la corrosión actúa fuertemente, es por esto que se requiere un mayor mantenimiento, ya que en la actualidad el cero mantenimiento del puente provoca una mayor exposición a este tipo de ataque.

## 1.5 El acero utilizado en la construcción de puentes, sus características

El acero se empezó a fabricar industrialmente a partir de 1850. Sus características y utilidad se conocían por los artefactos y utensilios que se producían antes de ese tiempo, mediante el uso de materiales parecidos al acero o el poco acero que se fabricaba de manera artesanal. Pero se tenía muy escaso conocimiento acerca de las características técnicas del acero y probablemente no superaba al resultado de una mera comparación empírica con otros materiales.

Durante los siglos XVIII y XIX, algunos puentes se construyeron en Europa con hierro, donde algunos todavía se mantienen en pie. Luego de 1850 se empezó a producir mayores cantidades de acero y se mejoraron los métodos de fabricación, así como a comprender las características de este material, lo que llevó a la producción de diferentes tipos o calidades.

El acero como material indispensable de refuerzo en las construcciones, es una aleación de hierro y carbono, en proporciones variables, y pueden llegar hasta el 2% de carbono. Con el fin de mejorar su dureza, maleabilidad u otras de sus propiedades, puede contener también otros elementos. Una de sus características es admitir el temple, con lo que aumenta su dureza y su flexibilidad.

En las décadas recientes, los ingenieros y arquitectos han estado pidiendo continuamente aceros cada vez más resistentes, con propiedades de resistencia a la corrosión; aceros mejor soldables y otros requisitos. La investigación llevada a cabo por la industria del acero durante este período ha conducido a la obtención de varios grupos de nuevos aceros que satisfacen muchos de los requisitos por lo que existe ahora una amplia variedad cubierta gracias a las normas y especificaciones actuales.

Como se dijo anteriormente la proporción de carbono influye sobre las características del metal. Se distinguen dos grandes familias de acero: los aceros aleados y los no aleados. [4] En la construcción del Puente de Hierro se empleó el acero CT.4c, el cuál es un acero al carbono con propósito especial para la construcción de barcos con una estructura Ferrítico-Perlítica.

## 1.6 Sobre los Aceros Navales grado A

### Características y usos específicos del acero naval ASTM-A36:

1.- Acero al carbono-manganeso estructural de mediana resistencia y buena soldabilidad adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, estructuras atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes, fabricación de depósitos de granos, depósitos de combustible, estructuras para túneles, disponible en espesores de 0.0180" hasta 0.500" por colada continua.

2.- Este acero en forma natural presenta tamaño de grano fino ya que se vacía por colada continua con un aluminio de 0.015% mínimo.

3.- Este acero hasta 0.500" de espesor se maneja con manganeso libre, sin embargo se trata de manejar una relación de 2.5 veces de manganeso /carbono mínimo.

4.- Por cada reducción de 0.01% de carbono, se puede incrementar el manganeso en 0.06%, llegando hasta 1.35% máximo.

5.- La prueba de impacto se maneja como requerimiento suplementario por lo que debe haber un acuerdo entre cliente y fabricante para determinar los parámetros de esta prueba que son:

- Temperatura de prueba.
- Energía absorbida promedio mínima.
- Colocación de la probeta para el ensayo.

6.- La prueba de flexión se maneja como requerimiento suplementario a 180° con probeta transversal de acuerdo a lo siguiente:

Espesor	Diametro de Perno
0.180" - 0.500"	3 veces el espesor

7.- El proceso de fabricación puede ser en siemens-martin, horno eléctrico y BOF, en AHMSA se utiliza BOF ya sea vía lingote o colada continua.

### Grados Equivalentes:

El acero naval ASTM-A36, posee los siguientes grados equivalentes en las distintas normas a nivel mundial como son:

BS 10025 S275- Acero al carbono manganeso estructural bajo norma europea con características similares al A36 en propiedades físicas y composición química.

CAT 1E 650- Acero de mediana resistencia adecuado para la fabricación de partes de traxcavo, camión de volteo, etc., similar en las propiedades mecánicas.

JIS G3132 SPHT-400- Acero al carbono manganeso estructural bajo norma japonesa similar en propiedades físicas y composición química.

## 1.7 Algunas características y patologías del puente mixto de calle 11 y 26

El puente en cuestión se encuentra ubicado en el municipio Playa en Ciudad de la Habana en la calle 11 y 26, para dar una mayor información del mismo se presentan en la siguiente tabla las principales características del mismo.

**Tabla 1.1** Características generales del puente de 11 y 26

Tipo de Puente:	Mixto (Acero-Hormigón)
Estribos y Pilas:	Muros, Cabezales y Pilotes de hormigón.
Longitud total:	84,10 m.
Longitud parte metálica:	50,47 m.
Distancia e/ejes Vigas Principales:	6,39 m.

Este puente está diseñado para las siguientes dos condiciones de trabajo:

- Cuando da servicio a cargas rodantes sobre él.
- Cuando gira para dar paso al transporte fluvial por el río Almendares.

Para cumplir estas condiciones de trabajo, el puente posee los siguientes mecanismos:

**A. Mecanismo de Fijación**, que a su vez está compuesto por los siguientes mecanismos:

A1. Mecanismo de Apoyo.

A2. Mecanismo de Cierre.

**B. Mecanismo de Giro del puente.**

A continuación se describen los elementos que componen cada uno de ellos, su estado técnico actual y se dan recomendaciones para su reparación.

#### **A1. Elementos que componen el Mecanismo de Apoyo:**

Cuando el puente trabajaba para dar servicio a cargas rodantes sobre él, las vigas principales se apoyan sobre 6 puntos: 2 en el centro y 2 en cada extremo. Al accionar cierto mecanismo, es que se logra el apoyo del puente. Este Mecanismo está compuesto por los siguientes elementos: un Motor Eléctrico, un Reductor cilíndrico de dos pasos, un árbol con un piñón cónico que por un extremo posee un acoplamiento al reductor y por el otro apoya en una chumacera, un árbol en voladizo con una corona cónica que apoya en una chumacera, un reductor sinfín cuya entrada es el árbol anterior, otros dos árboles con acoplamientos y sus correspondientes 4 chumaceras, un mecanismo de transmisión hasta las cuñas del centro del puente y otro mecanismo de transmisión hasta las cuñas de los extremos del puente, 6 Apoyos con sus respectivas cuñas.

En las siguientes figuras se pueden apreciar imágenes de estos elementos.



Motor eléctrico



Reductor cilíndrico de dos pasos



Árbol con piñón cónico, chumacera y corona cónica



Árbol con corona cónica, chumacera



Reductor Sinfín



Corona



Árboles con acoplamiento y chumaceras



Figura 1.1 Motor, reductores y árboles con acoplamientos y chumaceras



**Figura 1.2** Mecanismo de transmisión hasta las cuñas del centro del puente



**Figura 1.3** Mecanismo de transmisión hasta las cuñas de los extremos del puente



**Figura 1.4** Apoyos y cuñas

Estado Técnico y Recomendaciones para su Reparación:

1. **Motor Eléctrico:** los técnicos suponen que esté en buen estado. Se recomienda revisión, limpieza, mantenimiento a sus componentes y comprobación de su estado técnico por especialistas.
2. **Reductor cilíndrico de dos pasos:** los técnicos suponen que esté en buen estado. Se recomienda revisión, limpieza, mantenimiento a sus

componentes (sobre todo los rodamientos), cambio de lubricante y comprobación de su estado técnico en general.

3. **Árbol con piñón cónico - acoplamiento - chumacera:** se aprecian en buen estado. Requiere desarme, limpieza y engrase. Para el desarme de las chumaceras de algún modo habrá que cortar sus tornillos debido al grado de oxidación que presentan. Si las superficies de la chumacera no están en buen estado será necesario elaborar los planos para mandar a construir las chumaceras al igual que los tornillos. De igual manera es necesario definir el material y el tratamiento térmico. Si las superficies están en buen estado es necesario verificar la forma de lubricación y acometer la misma.
4. **Árbol con corona cónica - chumacera:** se aprecia en buen estado. Requiere desarme, limpieza y engrase. Para la chumacera se aplica lo mismo que en el elemento anterior.
5. **Reductor sinfín:** se recomienda revisión, limpieza, mantenimiento a sus componentes (sobre todo los rodamientos), cambio de lubricante y comprobación de su estado técnico en general.
6. **2 árboles con acoplamiento y 4 chumaceras:** exteriormente se aprecian en buen estado. Es necesario desarme, limpieza y verificar el estado de su superficie así como su rectitud y coaxialidad. Si estos parámetros no son los adecuados se recomienda construirlos, para lo cual es necesario definir el material y elaborar los planos para su construcción. Para la chumacera se aplica lo mismo que en los elementos anteriores.
7. **Mecanismo de transmisión hasta las cuñas del centro del puente:** de forma general se aprecia bastante deteriorado. Lo que queda del mecanismo requiere de limpieza y mantenimiento. Se debe comprobar el

estado de las superficies de las partes rodantes, las cuales deben ser correctamente lubricadas. El extensor entre el mecanismo y la cuña así como otros componentes se encuentran ausentes o deteriorados en varios puntos, por lo que es necesario su construcción de acuerdo a los planos de pieza que se presentan en los anexos.

8. **Mecanismo de transmisión hasta las cuñas de los extremos del puente:** de forma general se aprecia bastante deteriorado. Las varillas que existen se encuentran empatadas por soldadura y en bastante mal estado y fuera de su eje, se deben sustituir completamente.
9. **6 Apoyos con sus respectivas cuñas:** el sistema apoyo-cuña hoy se encuentra sumamente deteriorado, sólo se conserva 1 de las seis cuñas y los apoyos están oxidados y deteriorados. Es obligatoria la construcción total de sus componentes de acuerdo a los planos de pieza que se presentan en el anexo 3.

## **A2. Elementos que componen el Mecanismo de Cierre:**

Este Mecanismo permite el cierre de seguridad del puente cuando da servicio a las cargas rodantes sobre él y se libera previamente a la puesta en funcionamiento del mecanismo de giro. El mismo está compuesto por dos dispositivos iguales que se encuentran localizados en el centro de los dos extremos del puente, cada dispositivo está compuesto por 8 elementos que permiten su funcionamiento, ellos son: una base empotrada a la superficie, un soporte, un resorte, una rueda mascisa, dos acoples al soporte y uno al resorte, un brazo unión entre el árbol y el resorte y una unión entre el árbol y los tensores. En las siguientes figuras se pueden apreciar imágenes de estos elementos.



**Figura 1.5** Mecanismo de transmisión hasta el cierre central en los extremos del puente.

Estado Técnico y Recomendaciones para su Reparación:

Todos los elementos que componen el Mecanismo de Cierre se encuentran deteriorados. En estos momentos se encuentran fuera de su posición y no funcionan. Se recomienda, a partir de su limpieza y revisión, desechar los que no sirvan y construirlos nuevamente a partir de los planos de pieza que se presentan en el anexo 4.

**B. Elementos que componen el Mecanismo de Giro del puente:**

Para lograr seguridad en el funcionamiento del mecanismo de giro éste puente se encuentra diseñado de forma tal, que tanto la parte izquierda como la derecha así como sus extremos, mantengan el equilibrio y por consiguiente deben tener el mismo peso. Por estos motivos se está en presencia de un puente compensado en su funcionamiento ante el proceso de giro. Es por ello que se utilizan en distintos puntos del puente, algunos contrapesos que hoy se encuentran fuera de la posición adecuada para cumplir tal función.

El Mecanismo de Giro está compuesto por los siguientes elementos: Motor Eléctrico, Reductor cilíndrico de dos pasos, Corona Cónica Superior, Árbol, Chumaceras, Piñón, Cremallera inferior, Planchas y vigas donde se fijan todos los elementos anteriores, Soportes, Ruedas y Apoyo Central.

En las siguientes figuras se puede apreciar imágenes de estos elementos:



**Figura 1.6** Corona Superior, Árbol, Chumaceras, Piñón, Cremallera inferior, planchas y vigas



**Figura 1.7** Soportes y Ruedas



**Figura 1.8** Apoyo (Pivote) Central

Estado Técnico y Recomendaciones para su Reparación:

1. **Motor Eléctrico 220 Volt:** los técnicos suponen que esté en buen estado. Se recomienda revisión, limpieza, mantenimiento a sus componentes y comprobación de su estado técnico por especialistas.
2. **Reductor cilíndrico de dos pasos:** los técnicos suponen que esté en buen estado. Se recomienda revisión, limpieza, mantenimiento a sus componentes (sobre todo los rodamientos), cambio de lubricante y comprobación de su estado técnico en general.
3. **Corona Cónica Superior:** se aprecia en buen estado. Requiere desarme, limpieza y engrase.
4. **Árbol:** exteriormente se aprecia en buen estado. Es necesario extraerlo, limpiarlo y verificar el estado de su superficie así como su rectitud y coaxialidad. Si estos parámetros no son los adecuados se recomienda construirlo, para lo cual es necesario definir el material, el tratamiento térmico y elaborar los planos para su construcción.
5. **Chumaceras:** es necesario su desarme total y limpieza para conocer el estado de sus superficies. Para realizar el desarme es muy probable se tenga que cortar de alguna forma los 10 tornillos que fijan las chumaceras a las planchas y vigas estructurales del puente debido al alto grado de oxidación que poseen.  
Si las superficies no están en buen estado será necesario elaborar los planos para mandar a construir las chumaceras al igual que los tornillos. De igual manera hay que definir el material y el tratamiento térmico.  
Si las superficies están en buen estado se debe verificar la forma de lubricación y acometer la misma.

6. **Piñón:** a pesar del buen estado en que se aprecia, después de su limpieza se debe revisar completamente para comprobar que las superficies de los dientes se encuentren en buen estado, sobre todo en la zona de contacto. Después del montaje debe ser engrasado.
7. **Cremallera Inferior:** a pesar del buen estado en que se aprecia, después de su limpieza se debe revisar completamente para comprobar que las superficies de los dientes se encuentren en buen estado, sobre todo en la zona de contacto. Después de la revisión debe ser engrasado.
8. **Planchas y vigas donde se fijan todos los elementos anteriores:** como se pudo apreciar en las imágenes anteriores, estos elementos se encuentran con un alto grado de oxidación, por lo que deben ser reemplazados en su totalidad.
9. **Soportes, Ruedas y Apoyo Central:** al liberar el mecanismo de cierre del puente y aflojar las cuñas, las vigas quedan liberadas para realizar el giro. En este instante la estructura del puente descansa en el apoyo central y sobre 10 ruedas, 6 en la pila central que giran sobre una superficie circular de acero y 2 en cada extremo que descansan sobre un patín en cuña. Con estas últimas ruedas se logra, cuando el puente se va a colocar en la posición de servicio a cargas rodantes sobre él, la altura necesaria para accionar las cuñas de apoyo y el mecanismo de cierre.  
Por error de operación y explotación el puente hoy trabaja como estacionario. Este sistema de apoyo para el giro presenta, entre otros, los siguientes problemas:
  - La base de apoyo de las ruedas, compuesta por paquetes de planchas metálicas de 20 milímetros de espesor, se encuentra muy oxidada y presenta en estos momentos deformaciones propias de fatiga y de las malas condiciones de explotación. Se recomienda elaborar estas bases nuevamente.

- Es necesario limpiar, revisar, medir y quizás rectificar las ruedas. Si no pueden ser vueltas a utilizar éstas mismas ruedas, será necesario construirlas a partir de los planos que se presentan en el anexo 5.
- Algunos elementos de estos apoyos hoy no están presentes y será necesario construirlos a partir de los planos del anexo 5.

## 1.8 Conclusiones Parciales

1. El Puente esta diseñado para cumplir dos objetivos fundamentales: uno para dar paso a cargas rodantes sobre él y otro después del giro, para dar paso al transporte fluvial por el río Almendares.
2. El puente posee dos Mecanismos principales, el de Fijación y el de Giro, el primero es el encargado de soportar el peso del mismo que se compone a su vez por los mecanismos de Apoyo y de Cierre y el segundo el encargado de girar el puente.
3. Según el estado técnico actual de las piezas que componen los mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del puente, es obligatorio construir los elementos deteriorados o ausentes según los planos de piezas señalados en la Especificación Técnica que se adjunta en el anexo 1.
4. Es necesario la revisión, limpieza, mantenimiento a sus componentes y comprobación del estado técnico por especialistas, de los dos motores y los tres reductores que intervienen en el giro, debido a que estos no necesitan ser reconstruidos o comprados.

## Capítulo II “Modelación y Análisis Metalográfico. Tecnología de Soldadura”

### 2.1 Introducción

Debido al elevado interés económico e histórico de mantener en funcionamiento los puentes metálicos y debido a su alto costo inicial de fabricación estos se tratan de explotar al máximo, dichos puentes adquieren mayor valor cuando poseen un mecanismo de giro y en este caso para Cuba se presenta dicho puente como único de su tipo. Para alargar su vida útil hay que tener en cuenta un aspecto principal, el paso seguro sobre el mismo y la estabilidad en el momento del giro.

El puente en cuestión como premisa fundamental, tiene que ser muy rígido y seguro debido a que es una estructura destinada en este caso al paso de vehículos de pasajeros y de carga. Para lograr su control se realizan inspecciones sistemáticas y se debe dar un mantenimiento adecuado para lograr una buena conservación. Cuando fallan estas revisiones y los mantenimientos en el tiempo recomendado, comienza una aceleración del deterioro del puente y de sus mecanismos principales, por lo que los daños pueden llegar a convertirse en severos.

Para llevar a cabo la modelación del puente es imprescindible conocer las características de los materiales que lo componen. Los documentos que avalan los materiales del puente de calle 11 y 26 no existen por lo que fue necesario determinar las características del mismo por medio de una serie de ensayos.

En este Capítulo se aparece una descripción geométrica de los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro, los cuales son el objeto de estudio de esta investigación; donde aparecerán las dimensiones exactas, ubicación, denominación y cantidades de cada elemento. También se encontrará el modelo en 3D del mecanismo, así como las correspondientes Tecnologías de Soldadura de cada una de las piezas que serán elaboradas, en las cuales se detallan todos los parámetros a tener en cuenta a la hora de acometer el proceso de fabricación.

## 2.2 Descripción de los modelos de los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de 11 y 26

En este epígrafe se muestran los modelos en tres dimensiones de los mecanismos mencionados anteriormente, sobre los cuales se basa su simulación, por lo que fueron tomadas en cuenta las características externas a que están sometidas cada una de las piezas que conforman los ensambles. A continuación se describen las características fundamentales de los tres mecanismos, así como de sus elementos y se resumen en una tabla para una mejor organización y comprensión.

### 2.2.1 Mecanismo de Apoyo

Los modelos de éste mecanismo aparecen representados en las diferentes vistas de los ensambles en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3, permitiendo una mejor comprensión del conjunto y de cómo están distribuidos sus elementos. En la Tabla 2.1 aparece el nombre y las dimensiones fundamentales de las piezas.

Es necesario realizar algunas aclaraciones de piezas que por su complejidad lo meriten, es el caso del tensor y de la viga del apoyo superior.

El tensor es una pieza compleja en su construcción, cuya función principal es mantener tensionado el sistema, para el cual cuenta con una barra cilíndrica regulable para su ajuste.

En cuanto a la viga del apoyo superior, su función es lograr el acople inclinado con la cuña y de esta forma mantener la fijación a la viga del puente con lo que lograría transmitir la carga del mismo hasta el soporte. En el caso de que el mecanismo de Apoyo no quede exacto entre la base empotrada y la viga, es necesario colocar las planchas macizas que se adjuntan en el plano de pieza de la viga del apoyo superior con el objetivo de lograr una mayor precisión y un completo apoyo de la estructura.

En los dibujos no aparecen los tornillos con las tuercas de las piezas que lo requieren para su fijación.

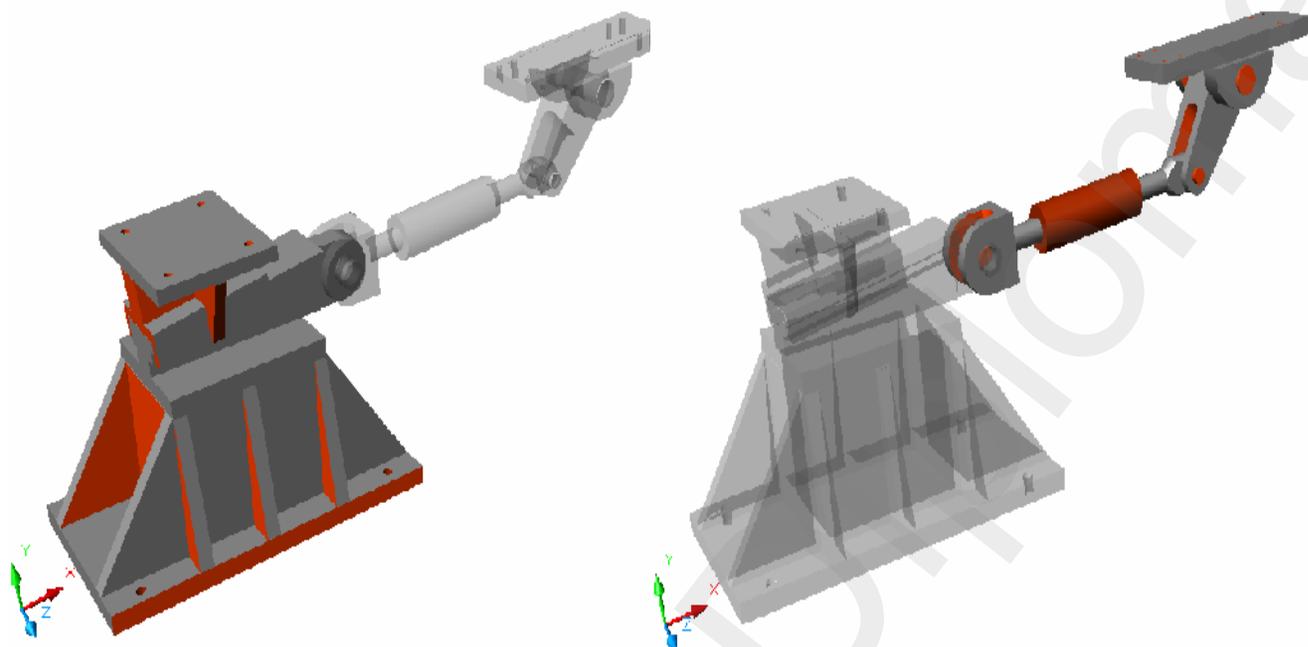
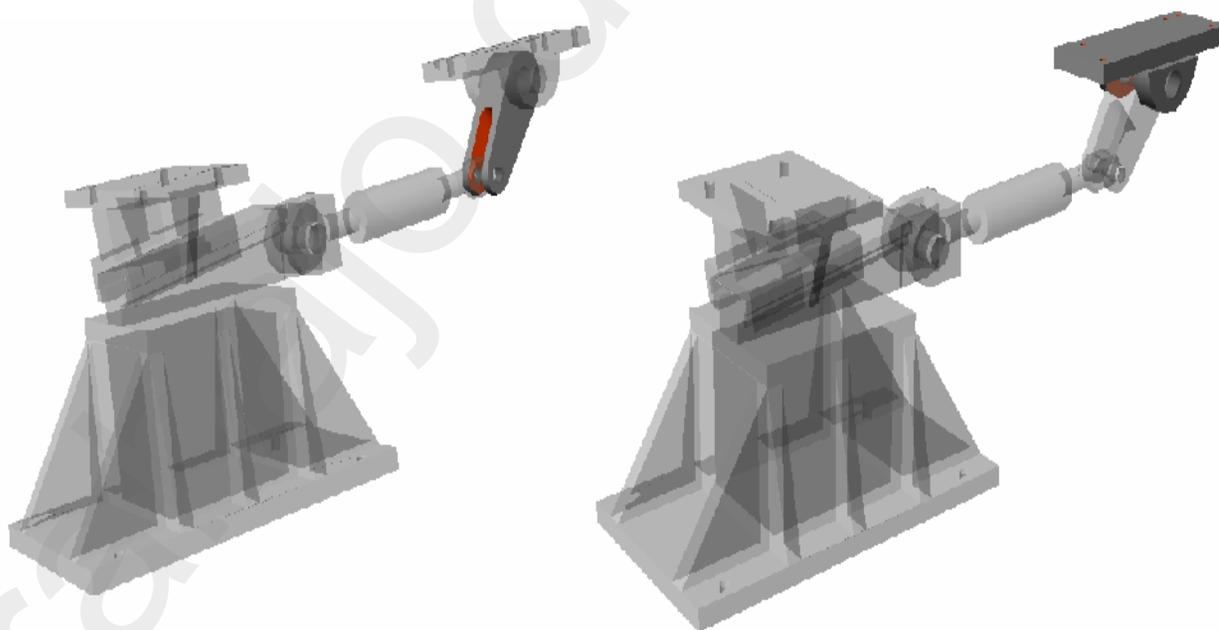
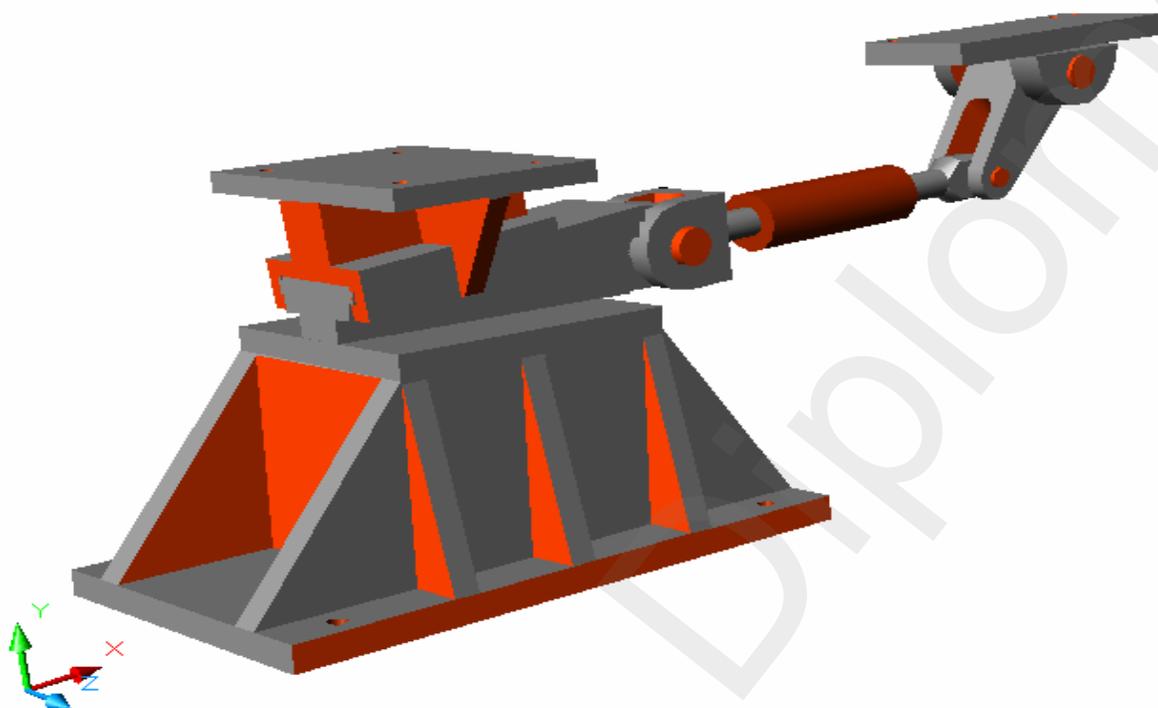


Figura 2.1. Apoyo y mecanismo tensor acoplado.



Figuras 2.2. Piezas que componen mecanismo tensor (Unión y soporte).



**Figura 2.3.** Vista general del Mecanismo de Fijación.

**Tabla 2.1** Dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman el Mecanismo de Apoyo.

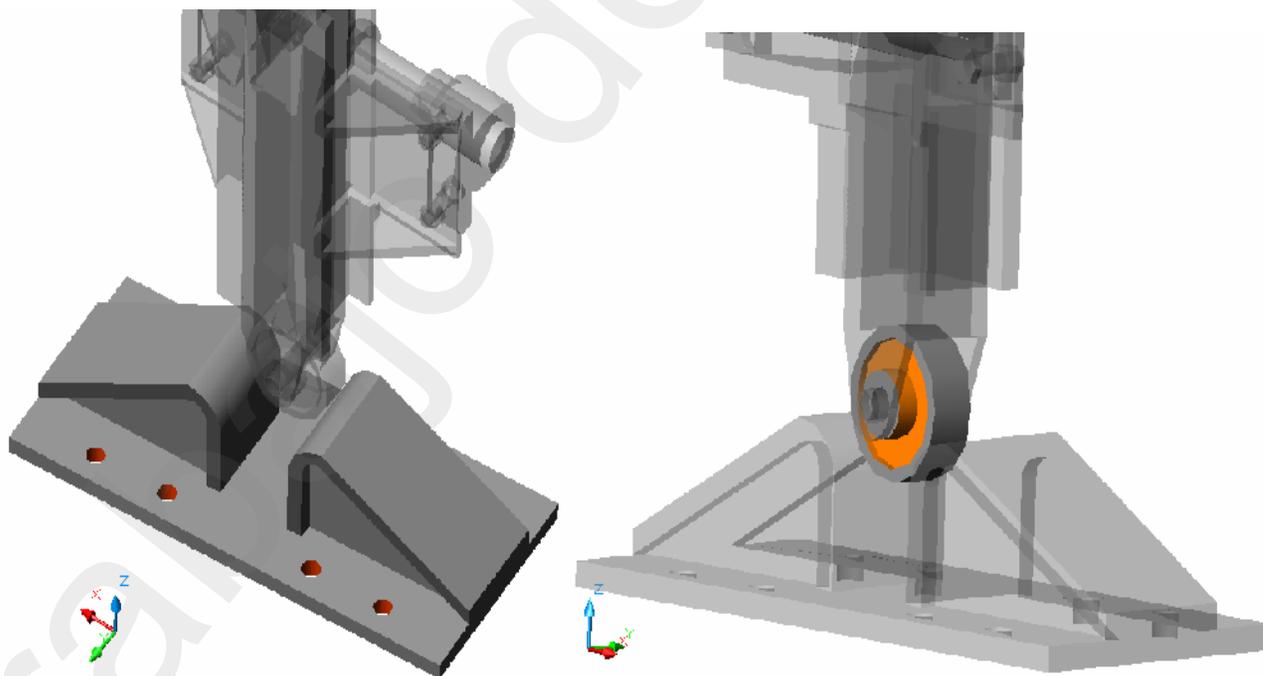
Nº	Descripción	Dimensiones (mm)	Ubicación	Cant
1	Apoyo Superior	530 x 590 x 200 x 30	Atornillado a la viga principal	6
2	Cuña	750 x 192 x 208	Entre el apoyo superior y la Base	6
3	Base	1090 x 360 x 280 x 30	Empotrado a la plataforma de Hormigón por tornillos	6
4	Tensor	1400 x 140	Acoplado entre la Cuña y la Unión por pasadores	6
5	Unión	350 x 120 x 150	Entre el Tensor y el Soporte	6
6	Soporte	510 x 240	Atornillado a la viga principal	6
7	Pasador diámetro 100	140 x 100	Entre el Soporte y la Unión	1
8	Pasador diámetro 50	140 x 50	Entre el tensor, la Cuña y la Unión	2

En el Anexo No. 1 (Especificación Técnica), las piezas del 1 a la 6 corresponden al Mecanismo de Apoyo. En el Anexo No. 3 aparecen los planos de de cada una de las 6 piezas que componen este Mecanismo, con todos los detalles y normativas

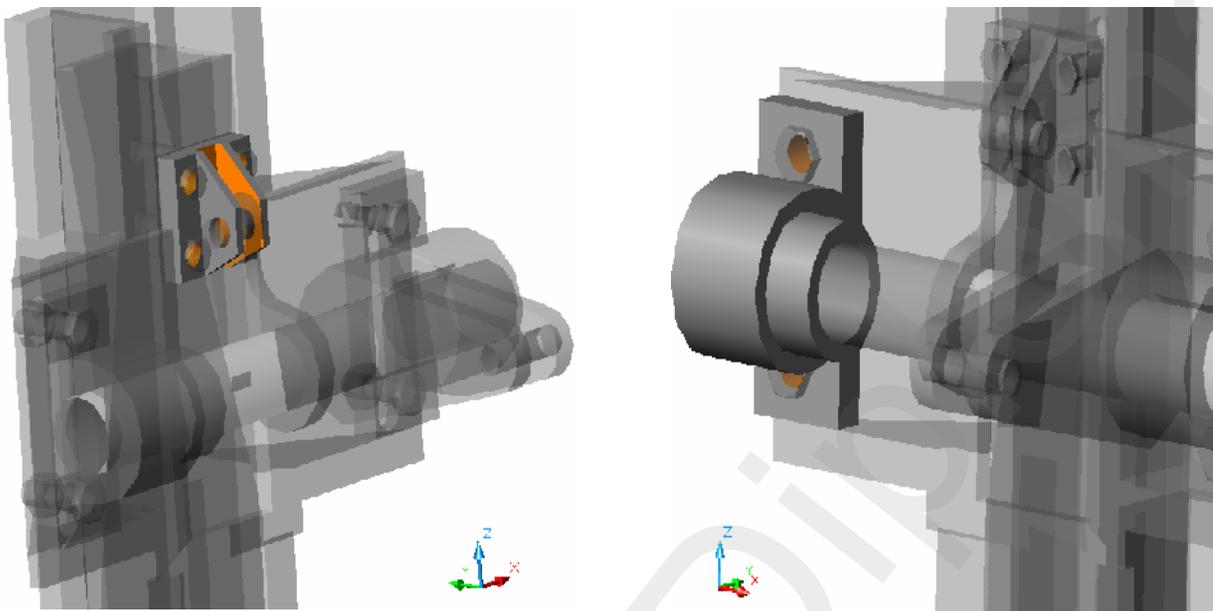
de soldadura para acometer su construcción. Además se anexa un esquema cinemático del sistema de extracción de cuñas donde se señalan los elementos y dispositivos que intervienen, así como las direcciones de movimiento.

### 2.2.2 Mecanismo de Cierre

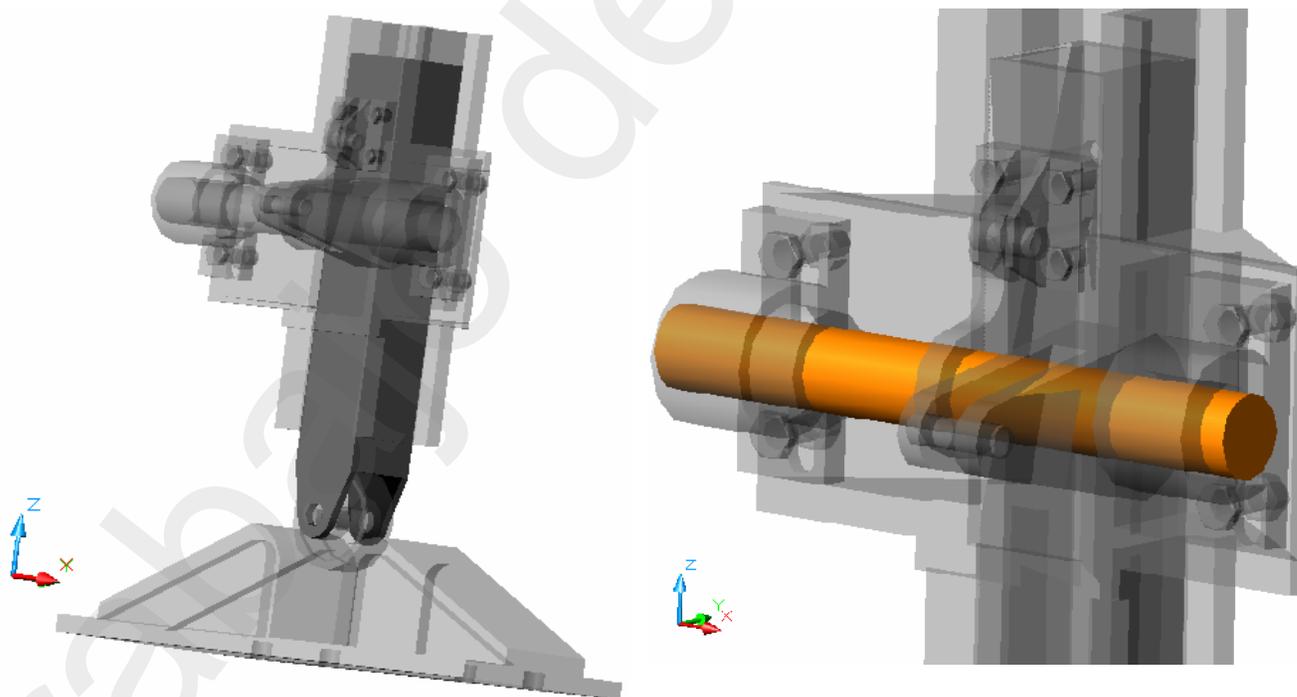
Este Mecanismo permite el cierre de seguridad del puente cuando da servicio a las cargas rodantes sobre él y se libera previamente a la puesta en funcionamiento del mecanismo de giro. El mismo está compuesto, como se dijo anteriormente, por dos dispositivos iguales que se encuentran localizados en el centro de los dos extremos del puente. Cada dispositivo está compuesto por 8 piezas, ellas son: una base empotrada a la superficie, un soporte, un resorte, una rueda maciza, dos acoples unidos al soporte y otro al resorte, un brazo unión entre el árbol y el resorte y una unión entre el árbol y los tensores. En las siguientes imágenes se puede apreciar el resultado de la modelación del mecanismo en 3D.



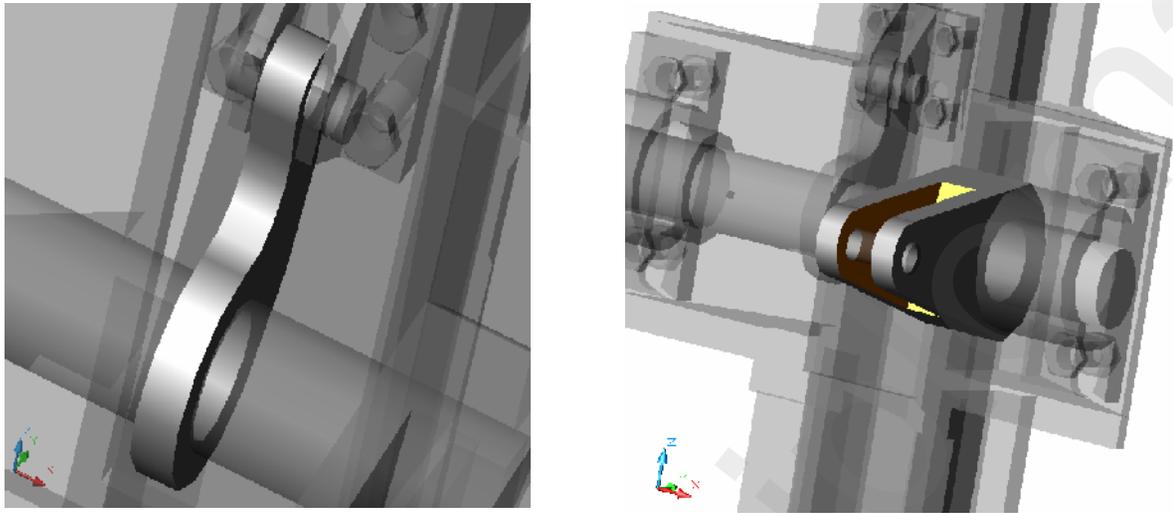
**Figura 2.4** Vistas parciales de la base empotrada y de la rueda maciza.



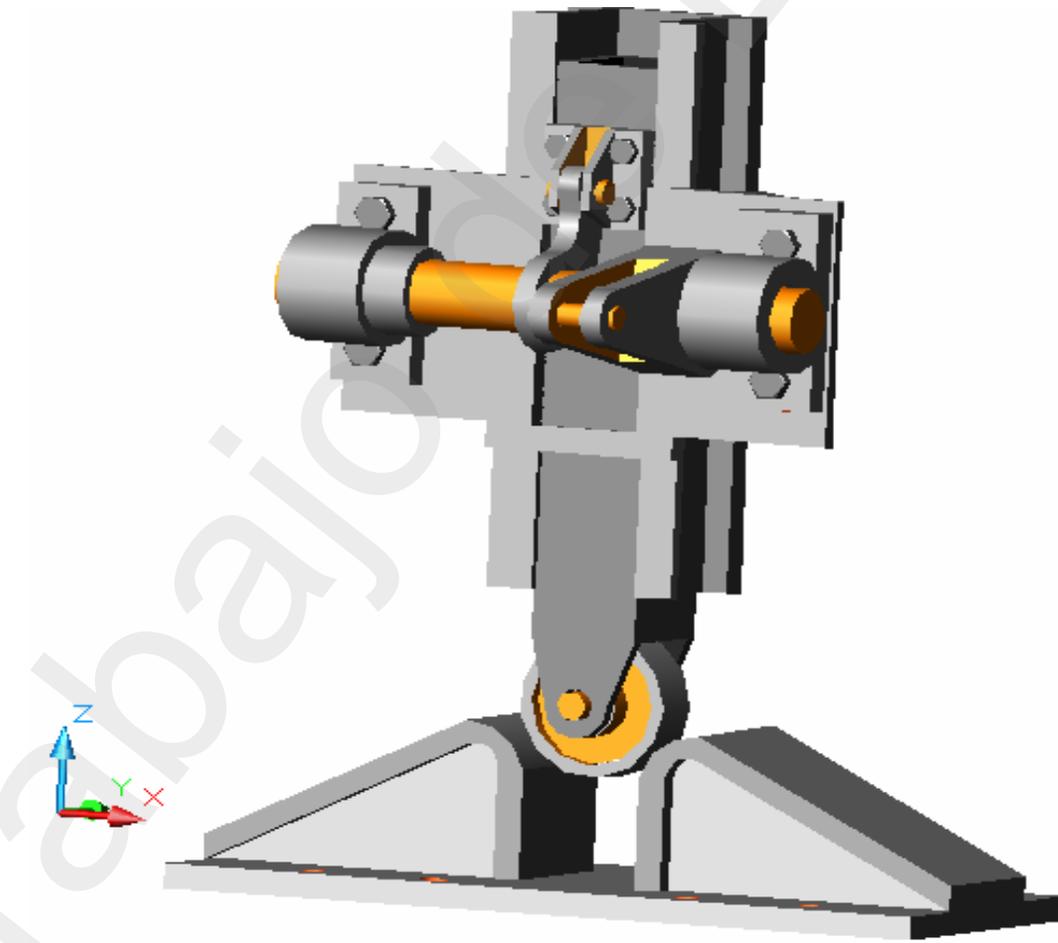
**Figura 2.5** Vistas parciales de los acoples al resorte y al soporte



**Figura 2.6** Vistas parciales del resorte y el árbol principal



**Figura 2.7** Vistas parciales del brazo unión entre el árbol y el resorte y la unión entre el árbol y los tensores.



**Figura 2.8** Vista General del Mecanismo de Cierre.

**Tabla 2.2** Dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman el Mecanismo de Cierre

Nº	Descripción	Dimensiones (mm)	Ubicación	Cant
1	Base empotrada	800 x 600 x 220 x 30	Empotrada a la plataforma de Hormigón por tornillos	2
2	Soporte del resorte	1140 x 840 x 210 x 20	Entre la plataforma de Hormigón y la viga inferior del puente	2
3	Resorte	1040 x 178 x 160 x 20	Acoplado dentro del soporte	2
4	Rueda maciza	264 x 76	Acoplada por un pasador en la parte inferior del resorte	2
5	Acople al resorte	170 x 170 x 100	Atornillado al resorte en su parte centro-superior	2
6	Acople al soporte	400 x 160 x 220	Atornillado al soporte en las ranuras laterales	4
7	Brazo unión entre el árbol y el resorte	500 x 150 x 34	Acoplado entre el árbol por un fijador y el resorte por un acople	2
8	Unión entre el árbol y los tensores	432 x 120 x 200	Acoplado al árbol por un fijador y unido por el otro extremo a un tensor	2
9	Árbol central	900 x 100	Acoplado en los dos extremos del soporte	2
10	Pasador macizo diámetro 50	240 x 50	Entre el soporte y la rueda	2
11	Pasador macizo diámetro 20	70 x 20	Entre el acople y el brazo unión	2

En el Anexo No. 1 (Especificación Técnica), las piezas del 1 a la 8 corresponden al Mecanismo de Cierre. En el anexo No. 4 aparecen los planos de de cada una de las 8 piezas que componen el Mecanismo, con todos los detalles y normativas de soldadura para acometer su construcción.

### 2.2.3 Mecanismo de Giro

Como se dijo anteriormente, debido a que el puente se encuentra compensado en su funcionamiento ante el proceso de giro, se utilizan en distintos puntos del puente, algunos contrapesos que hoy se encuentran fuera de la posición adecuada para cumplir tal función. El Mecanismo de Giro del puente se compone por los siguientes elementos: Motor Eléctrico, Reductor cilíndrico de dos pasos, Corona Cónica Superior, Árbol, Chumaceras, Piñón, Cremallera inferior, Planchas y vigas donde se fijan todos los elementos anteriores, Soportes, Ruedas y Apoyo Central.

Los dos reductores y los dos motores son iguales, lo que los diferencia es su utilización, debido a que uno es empleado para el sistema de extracción de cuñas y el otro empleado en el mecanismo de giro. Sus datos técnicos se muestran a continuación:

#### Reductores cilíndricos de dos pasos:

Hecho en la URSS

Año: 1975

Reductor: PUA-350T1

Relación de transmisión: 40:1

Momento máx.: 175

#### Motores:

Motor de corriente trifásica 220 volts, 50 HZ.

Hecho en la URSS

Tipo: MAP

Serie: TA-339013

Año: 1965

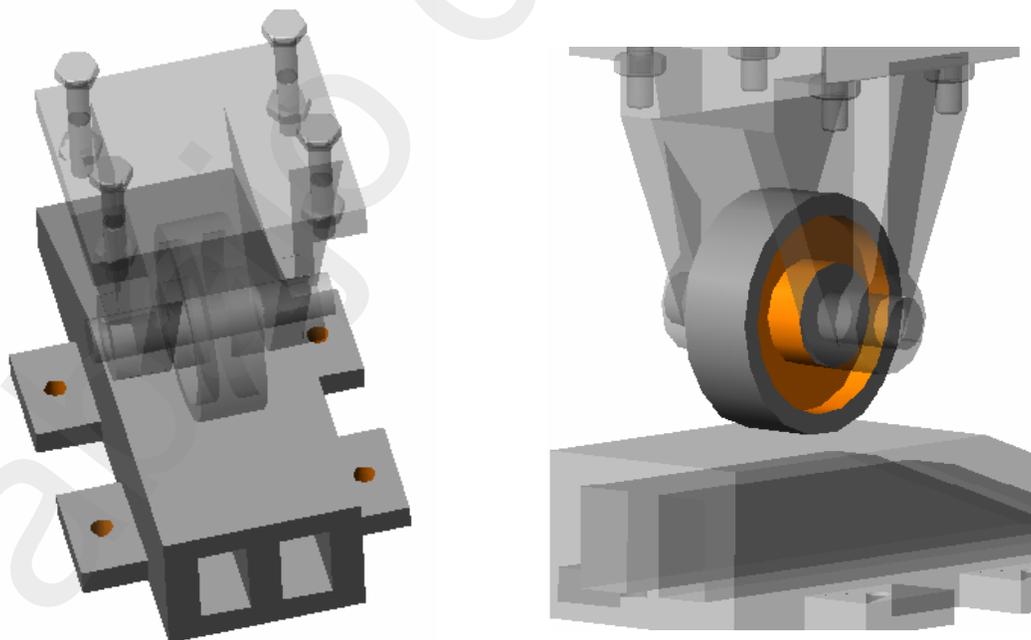
**Tabla 2.3** Parámetros del motor ruso MAP

	Potencia	Régimen de trabajo	$\alpha$	rpm	Conexión
<b>1ra velocidad</b>	6 KW	30 min.	27,5	580	Estrella
<b>2da velocidad</b>	9 KW	30 min.	9,5	1330	Delta

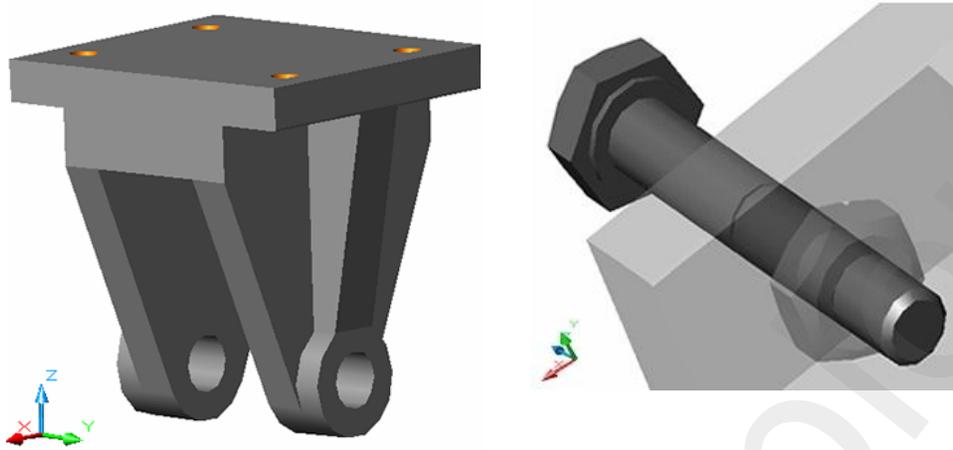
Una vez transmitido el movimiento del motor al reductor cilíndrico, éste último acciona la corona cónica superior que está unida por un árbol al piñón, los cuales se encuentran apoyados en unas chumaceras. El piñón que con su giro se desplaza por la cremallera inferior que se encuentra empotrada a la plataforma central, permite el giro del puente hasta un ángulo cercano a los 90 grados.

Además de este mecanismo que se encarga de la acción mecánica del giro, interviene otros dispositivos que son los que se encuentran más deteriorados y que se encargan de complementar dicha acción, son ellos: las cuatro ruedas laterales que se encuentran en los extremos del puente y tienen como función mantener la estabilidad en los extremos una vez que este llegue a su posición de anclaje en la plataforma y los cuatro carros de desplazamiento del pivote central que se desplazan sobre la pista circular de rodadura del puente y cuya función es mantener la estabilidad en el centro y permitir el desplazamiento sobre dichos carros de todo el peso del puente durante el giro del mismo.

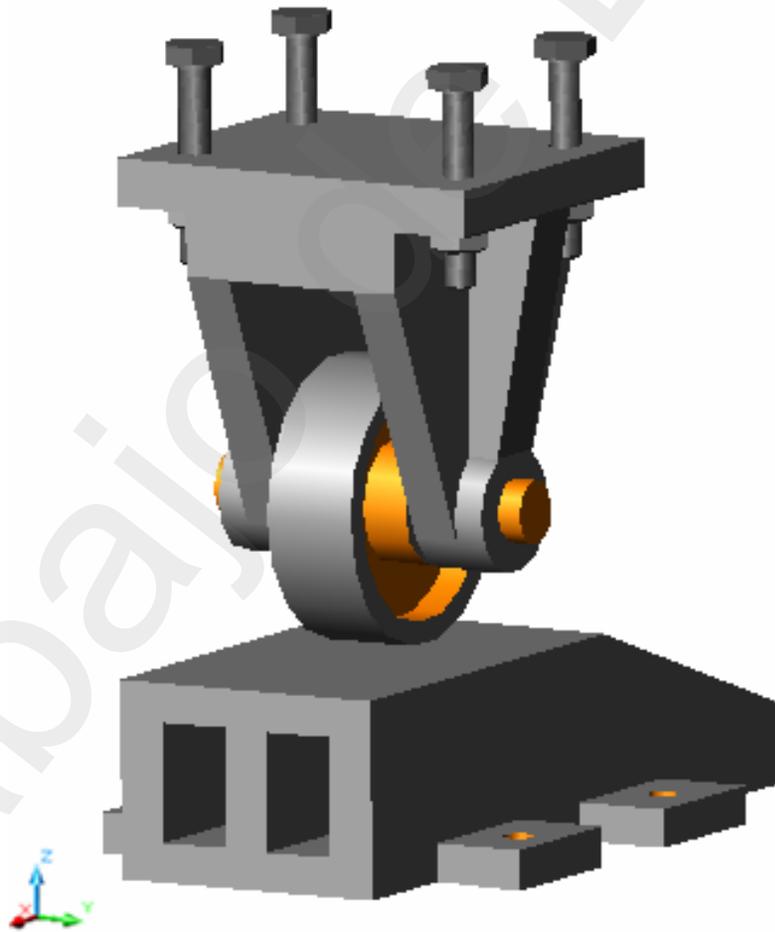
En las siguientes imágenes se puede apreciar el resultado de la modelación de las ruedas laterales del mecanismo, las cuales están deterioradas o ausentes en algunos lugares.



**Figura 2.9** Vistas parciales de la base inclinada y la rueda.



**Figura 2.10** Vistas parciales del apoyo superior y un detalle de uno de los tornillos que permite la unión del apoyo a la viga principal del puente.



**Figura 2.11** Vista completa de uno de los apoyos laterales.

**Tabla 2.4** Dimensiones, ubicación y cantidad de elementos que conforman el Mecanismo de Giro.

Nº	Descripción	Dimensiones (mm)	Ubicación	Cant.
1	Soporte	320 x 220 x 278	Atornillado a la viga principal	4
2	Rueda maciza	264 x 76	Acoplada por un pasador al soporte	4
3	Base inclinada	1350 x 111 x 380 x 21	Empotrada a la plataforma de Hormigón por tornillos	4
4	Tornillo M20	20 x 50	Empotrados a la base de Hormigón	16
5	Pasador con pasapunta	310 x 64	Entre la rueda y el soporte	4

En el Anexo No. 1 (Especificación Técnica), aparecen relacionadas las piezas del 1 al 3 correspondientes al Mecanismo de Giro. En el Anexo No. 5 aparecen los planos de cada una de las piezas que componen los apoyos laterales, con todos los detalles y normativas de soldadura para acometer su construcción. Se anexan además los planos de ensamble del Pivote Central en el Anexo No. 6 donde se detallan cortes transversales y longitudinales, así como la plataforma de giro.

### 2.3 Resultados del análisis del material del Mecanismo

El mecanismo analizado fue construido hace más de 100 años (a lo largo de 1906) por lo que fue necesario determinar experimentalmente cada una de las características y propiedades mecánicas de los materiales con los que fueron construidas las piezas y con los que se construyó la estructura metálica del puente, o sea, las vigas. Además se determinó su composición química y se realizó un análisis metalográfico para determinar su estructura y tamaño de grano. Como los mecanismos de los puentes son elementos de alta responsabilidad, se hacen de materiales resistentes, seguros y duraderos.

En el caso de los puentes metálicos se emplea el acero fundamentalmente pues el mismo posee un conjunto de altas propiedades y no solamente un valor elevado de una propiedad.

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 soportar los efectos dinámicos y de impacto; debido a su resistencia a la fatiga, puede soportar cargas alternativas; brinda oposición a la acción del contacto 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 fundamentalmente por el carbono u otras sustancias que se encuentran en su estructura.

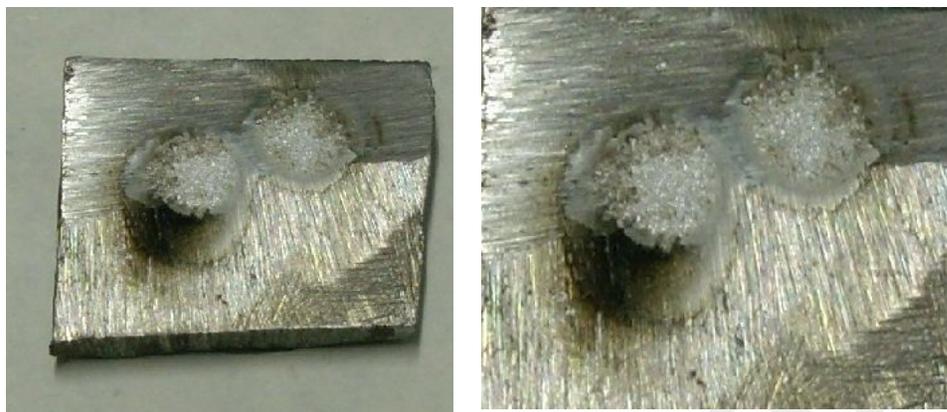
### 2.3.1 Determinación de la composición química

Para la determinación de la composición química de los materiales se tomaron dos muestras, una de los Apoyos y otra del Ala de la Viga, con la que se elaboraron dos probetas de aproximadamente 30 x 30 mm de largo y ancho y 5 mm de espesor, las cuales fueron inicialmente esmeriladas con una muela abrasiva y lijadas por ambas superficies hasta llevar la superficie pulida a espejo, dichas probetas se sometieron a un análisis químico realizado en el Taller “Román Roca” de Santa Clara, obteniendo los siguientes resultados:

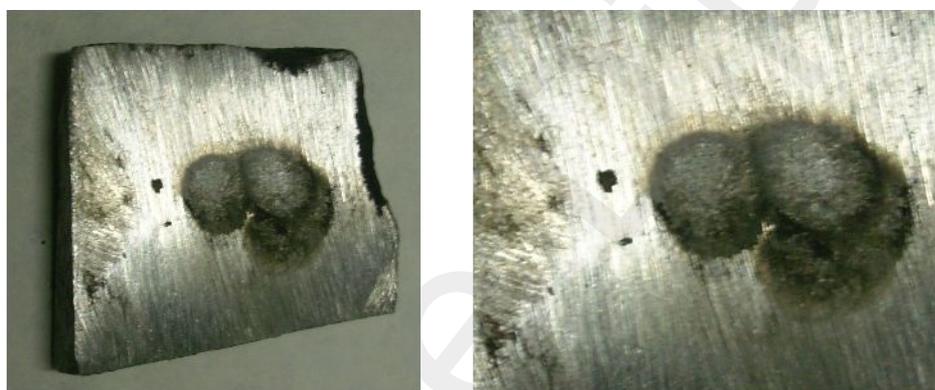
**Tabla 2.5** Resultados del análisis químico.

Material	Composición Química, %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
<b>Ala de la Viga</b>	0.25	0.32	0.53	0.1	0.05	0.15
<b>Apoyo</b>	0.26	0.059	0.38	0.08	0.04	-

A continuación se muestran las imágenes de las pruebas realizadas a las probetas de los materiales del puente:



Material del Ala de la Viga



Material del Apoyo

**Figura 2.12** Probetas del puente con las huellas del análisis químico.

Aceros Soviéticos Similares:

Según el manual Metallurgist's Handbook [5], se puede encontrar un acero que posea una composición química similar a la de los materiales del puente.

**Tabla 2.6** Aceros soviéticos con composición química similar

Material	Acero Soviético Similar	Composición Química, %					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
Ala de la Viga	. 4c	0.18-0.27	0.12-0.35	0.40-0.70	0.05	0.05	-
Apoyo	. 4c	0.18-0.27	Trazas	0.40-0.70	0.05	0.05	-

. 4c - . 4c - clasificados como "Aceros para la Construcción de Barcos", elaborados en un horno Siemen Martin (open hearth)

– En la literatura soviética [6] significa que es un acero calmado.

Con esta composición química del acero CT.4c se puede comparar en la siguiente tabla con la composición del acero ASTM-3694, el cual posee similares valores:

**Tabla 2.7** Comparación entre las composiciones químicas

Composición Química, %						
Acero	C	Cu	Mn	P	S	Fe
CT4.c	0.27	0.2	0.70	0.05	0.05	99
ASTM-3694	0.26	0.2	0.75	0.04	0.05	-

### 2.3.2 Determinación de las Propiedades Mecánicas

Dichos materiales clasifican como: "Aceros al Carbono con propósito especial"

Al consultar los manuales [5] y [6], se obtienen las siguientes propiedades:

**Tabla 2.8** Propiedades mecánicas

Material	Acero Soviético Similar	Propiedades Mecánicas						
		Límite de Resistencia a la Tracción, MÁX (kgf/mm <sup>2</sup> )	Límite de Fluencia, $\gamma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Dureza (kgf/mm <sup>2</sup> )	Resiliencia (kgf.m/cm <sup>2</sup> )	Elongación mínima, %, en planchas de espesores		
						b	10	5
Ala de la Viga	. 4c	42-52	24-26	HB=143 HV=143 HSh=23	6-8	2-2.5	3-3.5	3.75
Apoyo	. 4c	42-52	24-26	-	6-8	14	15	16

A partir de las propiedades obtenidas anteriormente, se pueden comparar con las del acero ASTM-3694, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

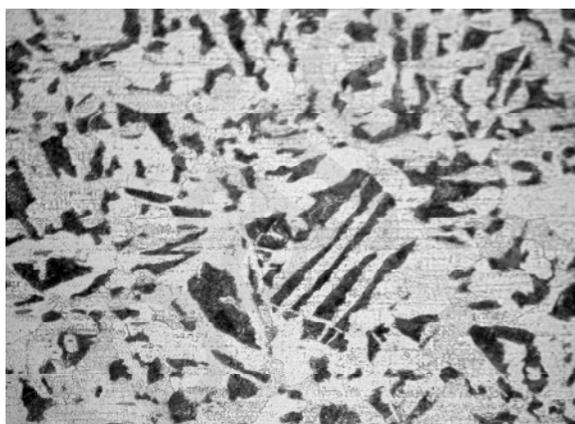
**Tabla 2.9** Comparación entre las propiedades mecánicas del acero CT4.c y el acero ASTM-3694

Acero	Resistencia a la Tracción (kgf/mm <sup>2</sup> )	Límite de Fluencia (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongación mín. (%)
CT4.c	42-52	24-26	14-16
ASTM-3694	40-50	25	20

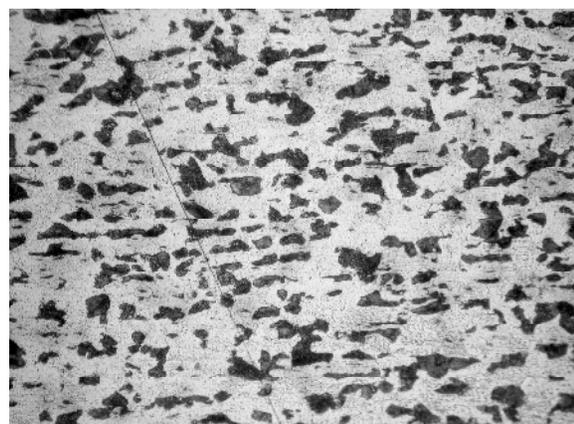
Como se puede apreciar, ambos aceros poseen similares propiedades en cuanto a sus parámetros fundamentales, solo varía un poco la elongación mínima.

### 2.3.3 Análisis Metalográfico

Este análisis fue realizado en el Laboratorio de Microscopía electrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Después de preparadas las muestras y llevadas al microscopio, se obtienen las imágenes que aparecen a continuación.



Apoyos



Alma de la Viga

**Figura 2.13** Imágenes de la estructura obtenida del microscopio electrónico de las probetas del Mecanismo de Apoyo y del Ala de la Viga.

En la siguiente tabla se exponen los resultados de este análisis. Se aprecia una coincidencia en el tipo de estructura Ferrítico-Perlítica y una leve diferencia en el tamaño de grano, lo que los hace muy similar.

**Tabla 2.10** Resumen del análisis metalográfico de ambas probetas.

<b>Probetas</b>	<b>Estructura</b>	<b>Tamaño de grano</b>	<b>Aumento</b>
Apoyo	Ferrítico-Perlítica	7	X200
Ala de la Viga	Ferrítico-Perlítica	8	X200

## 2.4 Tecnología de Soldadura

### 2.4.1 Introducción

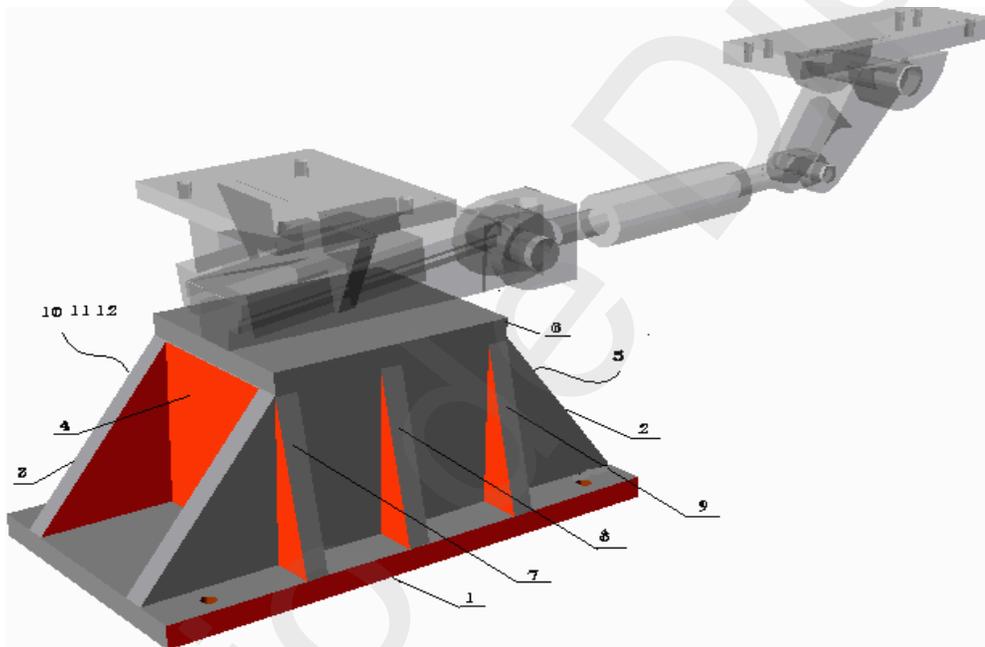
En la presente tecnología se brinda la información requerida para realizar la unión mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido de las piezas del Mecanismo de Apoyo, el cual se utilizará como referencia para los cálculos de las demás piezas que requieran este proceso. El material base es acero naval ASTM-3694 y se trata de una producción unitaria.

Durante el desarrollo de una tecnología de soldadura es necesario realizar un análisis preliminar del ensamble a soldar, conociendo la composición química y las propiedades mecánicas del material base. De esta forma se permite establecer un procedimiento de soldadura, para el cual se escogería el electrodo adecuado, que garantice los parámetros del régimen necesario para ejecutar la soldadura. Particular importancia tiene la determinación de los costos de las uniones soldadas, que permite determinar la efectividad técnico económica. Además, se tiene en cuenta el análisis del control de la calidad de los trabajos de soldadura anexándose las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura.

### 2.4.2 Tecnología de soldadura del Apoyo Base

El presente epígrafe se centra en el establecimiento del procedimiento de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido del apoyo base perteneciente al Mecanismo de Apoyo.

Debido al medio corrosivo en que se encuentra enclavado el puente, se emplea el acero naval ASTM - 3694, que es un acero más resistente a la corrosión, aumentando de esta manera considerablemente la durabilidad del mismo. Los espesores de las chapas seleccionadas son de 30 mm.



**Figura 2.14** Elementos de la base del mecanismo de apoyo.

Dimensiones: B = 810, L = 1090, L1 = 590,  $\delta$  = 30, C = 15

Material Base: ASTM-3694

Costos de Consumibles de soldadura:

Electrodo revestido E7018 x  $\varnothing$ 3.2 – 1,75 USD/kg

$\varnothing$ 4 – 1,66 USD/kg

$\varnothing$ 4,8 – 1,50 USD/kg

- Tarifa de Costo de Energía eléctrica – 0,04 USD/kWh
- Tarifa de Costo de Mano de Obra – Soldador A – 1,562 USD/h  
Soldador B – 1,471 USD/h  
Soldador C – 1,361 USD/h

### 2.4.3 Análisis Preliminar de las características del conjunto soldado.

La composición química del material con que se realizará el proceso se muestra en la tabla 2.11. Debido a sus propiedades mecánicas (tabla 2.12), tiene gran aplicación en las industrias naval y construcción de estructuras metálicas con cercanía al mar.

**Tabla 2.11** Composición química del Acero ASTM - 3694

Elementos	%
Carbono (C)	0,26
Cobre (Cu)	0,2
Manganeso (Mn)	0,75
Hierro (Fe)	99,0
Fósforo (P)	0,04
Azufre (S)	0,05

**Tabla 2.12** Propiedades mecánicas del Acero ASTM - 3694

Propiedades mecánicas	(Psi)	(MPa)
Resistencia a la tracción	58000 - 79800	400 – 550
Límite elástico de compresión	22000	152
Elongación (%)	20.0 %	

#### 2.4.4 Descripción del ensamble

Las chapas de la base (figura 2.14) donde se encuentra apoyado el puente, deben ser transportadas al taller y pueden sufrir deformaciones durante la manipulación, por lo que son sometidas a un proceso de enderezado en cilindros de enderezar chapas. Luego de verificada la rectitud y planicidad, se comprueba con una regla de acero de un metro de longitud, la irregularidad no puede sobrepasar los 1,5 mm de profundidad. La falta de perpendicularidad no puede sobrepasar 1mm por cada 100 mm de ancho.

Una vez culminado el proceso de enderezado se someten las planchas al corte por cizallamiento.

En la figura 2.14 se representan las costuras I y II a unir por soldadura en T y a solape respectivamente sin preparación de los bordes por ambos lados (t3) y la costura, según la norma cubana SMAW- NC 08-06, se emplea el procedimiento de soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Este proceso permite la soldadura de aceros navales, pudiéndose emplear en todas las posiciones, lo que lo hace adecuado para este tipo de soldadura.

#### 2.4.5 Preestablecimiento de la secuencia de ensamble

Elementos a unir: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Número de costuras: I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI, XXXII.

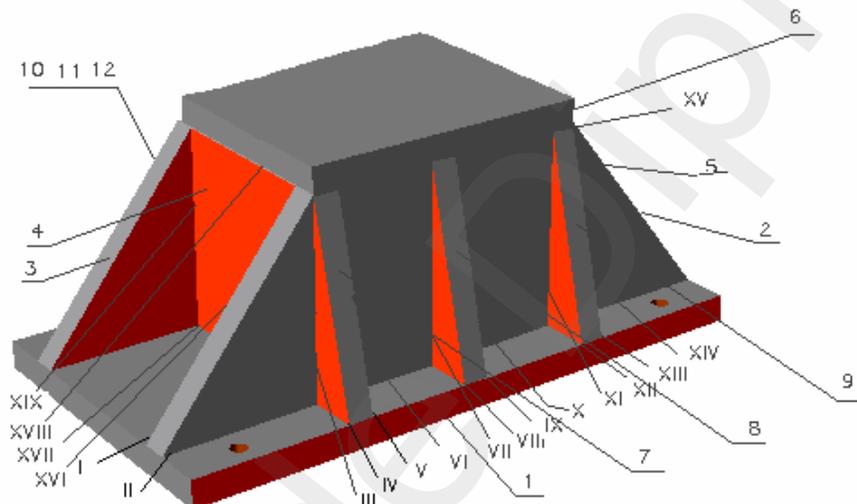
Formas de unir:

1-2{I-II}	1-8{VIII-IX}	2-4{XVI}	2-9{XIV}
1-3{XX-XXI}	1-9{XII-XIII}	2-5{XXXIV}	3-4{XIX}
1-4{XVII}	1-10{XXII-XXIII}	2-6{XV}	3-5{XXXV}

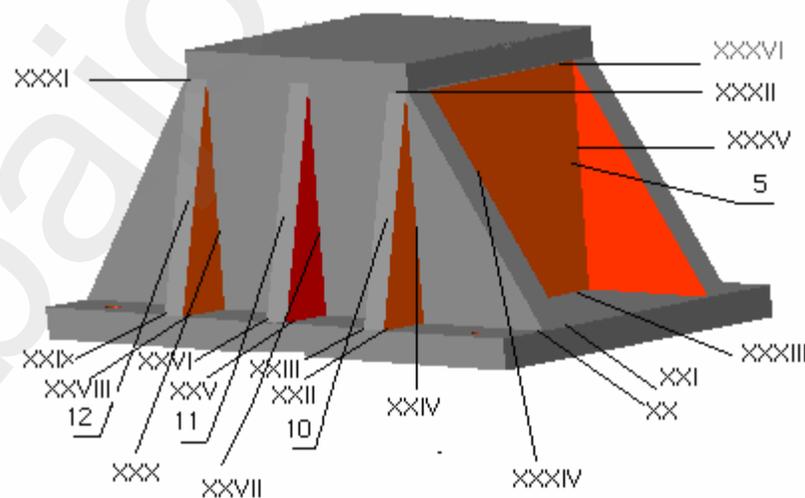
1-5{XXXIII}	1-11 {XXV - XXVI}	2-7{VI}	3-6{XXXII}
1-7{IV-V}	1-12{XXXVIII - XXXIX}	2-8{X}	3-10{XXIV}
3-11 {XXVII}	3-12 {XXX}	4-6{XVIII}	5-6 {XXXVI}

Posiciones:

Todos los elementos se unen a partir de una posición plana.



**Figura 2.15** Apoyo base:



**Figura 2.16** Apoyo base invertido:

Condiciones de taller: Se toma en cuenta que para elaborar esta pieza se trabajará en un taller con óptimas condiciones donde existan equipos para soldadura SMAW (producción unitaria), SAW (más productivo), GMAW (productivo) equipos de oxicorte mecanizado y algunos dispositivos con el objetivo de poder ensamblar la pieza.

Preselección de los procesos de soldadura: Según la capacidad de unión del material base nos indica que los tres procesos antes expuestos son recomendados para dicha soldadura, pero por su sencillez de instalación, fácil operabilidad y bajo costo económico se selecciona el proceso SMAW.

#### 2.4.6 Establecimiento de los procesos de soldadura

Las expresiones que a continuación se exponen fueron tomadas del artículo [8].

Determinación de la sensibilidad de agrietamiento en frío mediante la composición química:

$$CEq = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CEq = 0.26 + \frac{0.75}{6} + 0 + \frac{0.20}{15}$$

$$CEq = 0.40 \%$$

Como 0.40% es menor que 0.45% que es el límite aproximado para que empiece a existir la posibilidad de sensibilidad al agrietamiento, indica que existe una baja sensibilidad al agrietamiento por lo que no es necesario aplicar un precalentamiento.

Determinación de la sensibilidad de agrietamiento en frío mediante su dureza:

$$HV = 90 + 1050 * C + 47 * Si + 75 * Mn + 30 * Ni + 31 * Cu$$

$$HV = 90 + 1050 * 0.26 + 0 + 75 * 0.75 + 0 + 31 * 0.20$$

$$HV = 389.45$$

Como 389.45 es mayor que 350 que es aproximadamente el límite para que empiecen a surgir las grietas en frío, esto nos indica que hay sensibilidad al agrietamiento en frío y una de las medidas tecnológicas es aplicar precalentamiento.

$$C_t = CEq (1 + 0.005 * \delta)$$

$$C_t = CEq (1 + 0.005 * 30)$$

$$C_t = 0.46$$

$$T_{pre} = 350\sqrt{C_t + 0.25}$$

$$T_{pre} = 350\sqrt{0.64 - 0.25}$$

$$T_{pre} = 136.5^{\circ}C$$

Al calcular la sensibilidad de agrietamiento por dos métodos diferentes y uno dar la posibilidad de que surjan grietas se hace necesario el cálculo de precalentamiento.

#### Determinación de la sensibilidad de agrietamiento en Caliente:

$$H_{sc} = \frac{C(S + P + \frac{Ni}{100})}{3Mn + Cr + Mo + V} * 1000$$

$$H_{sc} = \frac{0.26(0.050 + 0.040 + 0)}{3 * 0.75} * 1000$$

$$H_{sc} = 1.04$$

Este valor significa que no hay sensibilidad para la propagación de grietas en caliente. Debido a que para espesores de chapa mayores o iguales a 20 mm los valores de  $H_{sc} < 1.6$  indican que no hay sensibilidad al agrietamiento en caliente.

#### Elección de los metales de aporte:

Para las uniones soldadas con costura de ranura de penetración completa se deben seleccionar metales de aporte con un nivel de resistencia igual o superior al material base (M.B); estos metales de aporte deben poseer una mínima resistencia a la tracción igual o superior al (M.B). Generalmente es innecesario igualar la composición química, ya que la costura experimentará una mayor velocidad de enfriamiento, la cual incrementará su resistencia.

También se debe tener en cuenta el tipo de unión en cuanto a la forma de transmitir la carga, ya sea unión primaria y unión secundaria.

Las costuras primarias son aquellas que transfieren la carga completa en el punto donde ellas son localizadas. La costura en ese punto posee las mismas propiedades que el miembro, y si la costura falla, el miembro también, las cuales no son nuestro caso.

Las costuras secundarias son aquellas que simplemente retienen las partes unidas formando el miembro. En la mayoría de los casos, las fuerzas en estas costuras son pequeñas.

En las costuras secundarias se deben emplear metales de aporte con una resistencia inferior al (M.B). Esto es particularmente importante durante la soldadura de aceros de baja aleación y alta resistencia, en los que no se deben emplear costuras de resistencia total, a no ser que estas sean requeridas. El acero de alta resistencia requiere precalentamiento adicional y gran cuidado durante su soldadura debido a que presenta tendencia al agrietamiento, especialmente si las uniones están embridadas.

Las costuras secundarias pueden ser realizadas con metales de aporte de menor resistencia - E70, E80 ó E90. Debido a que los electrodos E70 presentan mayores facilidades para su obtención en Cuba, ésta debe ser la selección preferida. En este caso el diseñador solo debe garantizar que la costura sea dimensionada con el fin de brindar la suficiente resistencia a la unión.

#### **2.4.7 Determinación de la geometría de la unión soldada**

Las costuras de filete pueden emplearse en uniones a solapa, en T, o de esquina sin preparación de bordes. Es económico su empleo para dimensiones de catetos inferiores a 16 mm, y el problema que nos ocupa es un cateto de 15 mm. Es la más difundida de todas las soldaduras ya que normalmente no requiere preparación de bordes. En algunos casos, la costura de filete puede resultar menos costosa, aún cuando necesite más metal de aporte que una costura de ranura, ya que el costo de preparación es menor.

Debido a estos aspectos antes expuestos se decidió emplear este tipo de costura para la realización de esta tecnología de soldadura.

#### Determinación del régimen de soldeo:

Para una soldadura de múltiples pasadas con espesores de 30 mm, costuras a tope y de solape en posición plana, con un proceso de soldadura SMAW. La máquina diseñada para trabajos industriales, nombrada R3R-400 proporciona soldaduras con electrodos revestidos de primera calidad. Su arco suave, bajo en salpicaduras nos brinda resultados consistentes día tras día para soldar una gran variedad de materiales.

#### Selección del diámetro de electrodo ( $d_e$ ):

Se recomienda para la realización de costuras de filete en posición plana que el diámetro del electrodo no exceda el valor del cateto de dicha costura, mientras que el máximo diámetro admisible en estas costuras es de 7.9 mm y para espesores mayores de 13 mm en el metal base el diámetro del electrodo debe oscilar entre 4.8 y 7.9 mm.

$d_{e_{RAIZ}} = 4.8mm$  Diámetro del electrodo para pasadas de raíz.

$d_{e_{PP}} = 6.3mm$  Diámetro del electrodo para pasadas posteriores.

Por cuestiones prácticas de Cuba y que además cumplen perfectamente los requisitos técnicos necesarios, se seleccionan los diámetros de electrodos siguientes:

$d_{e_{RAIZ}} = 3.2mm$

$d_{e_{PP}} = 5mm$

-Corriente de soldadura: (Corriente continua)

-Polaridad: invertida

#### Selección de la intensidad de Corriente ( $I_s$ ):

	$I_s = 40 * de$	$I_s = (20 + 6de)de$
Intensidad de corriente para un (de=3.2)	$I_s = 40 * 3.2$	$I_s = (20 + 6 * 3.2)3.2$
	$I_s = 128A$	$I_s = 125.44A$

Recomendaciones: 115-165

	$I_s = 40 * de$	$I_s = (20 + 6de)de$
Intensidad de corriente para un (de= 4)	$I_s = 40 * 4$	$I_s = (20 + 6 * 4)4$
	$I_s = 160A$	$I_s = 176A$

Recomendaciones: 150-220

Como la intensidad es de 140A para un diámetro de 3.2mm, entonces ofrece una razón de depósito de 2.74kg/h y una eficiencia de deposito de 70.9%; para diámetro de 4mm tiene como intensidad 200A con una razón de depósito de 4.31kg/h y una eficiencia de deposito de 73.0%. Estos valores fueron tomados de la tabla 4.3 del artículo [8].

#### Determinación del Voltaje de Arco ( $V_a$ ):

Para este proceso el voltaje de arco generalmente no se reglamenta ya que el soldador no puede previamente preestablecerlo en la máquina. El voltaje de arco depende de varios factores como: tipo y diámetro de electrodo, corriente de soldadura y longitud de arco.

Va: Voltaje de arco.

L: Longitud del arco se puede asumir como el diámetro del electrodo en mm.

K: Es igual a 12 para todo los aceros al carbono.

Is: Intensidad de la corriente.

-Voltaje de arco (Pasadas de Raíz):

$$Va = K + \frac{l * de}{10} * D$$

$$Va = K + \frac{l * de}{10} * \frac{Is}{Fc}$$

$$Fc = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$Fc = \frac{\pi * (3.2)^2}{4} = 8.04$$

$$Va = 12 + \frac{3.2 * 3.2}{10} * \frac{140}{8.04}$$

$$Va = 29.82 \text{ mm / s}$$

$$K = 12$$

$$l = 3.2 \text{ mm}$$

$$de = 3.2 \text{ mm}$$

$$Is = 140 \text{ A}$$

Voltaje de arco (Pasadas Posteriores):

$$Va = K + \frac{l * de}{10} * D$$

$$Va = K + \frac{l * de}{10} * \frac{Is}{Fc}$$

$$Fc = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$Fc = \frac{\pi * (4)^2}{4} = 12.56$$

$$Va = 12 + \frac{4 * 4}{10} * \frac{200}{12.56}$$

$$Va = 36.83 \text{ mm / s}$$

$$K = 12$$

$$l = 4 \text{ mm}$$

$$de = 4 \text{ mm}$$

$$Is = 200 \text{ A}$$

#### 2.4.8 Calculo del número de pasadas.

$$N_{TP} = \frac{AMD - N_R * A_R - N_{RE} * A_{RE}}{A_P} + N_R + N_{RE}$$

Donde NTP – representa el número total de pasadas

AMD- área de metal a depositar en la unión (se determina geoméricamente)

NR- número de pasadas de raíz, que depende del tipo de unión.

AR- área de la sección transversal de la pasada de raíz, que se puede estimar aproximadamente por la expresión:

$$APR = (6 \div 8) * deR \quad (\text{mm}^2)$$

NRE- número de pasadas de revés o respaldo, que depende del tipo de unión.

ARE- área de la sección transversal de la pasada de revés o respaldo; que se determina geoméricamente en dependencia del tipo de unión.

APP- área de la sección transversal de las pasadas posteriores.

$$APR = (8 \div 12) * deP \quad (\text{mm}^2)$$

deR y deP- diámetros de electrodo para pasada de raíz y posteriores respectivamente (mm).

$$N_{TP} = \frac{A_{MD} \cdot N_R * A_R - N_{RE} * A_{RE}}{A_P} + N_R + N_{RE}$$

$$N_{TP} = \frac{15 - 0 * 25.6 - 0 * 0}{48} + 2$$

$$N_{TP} = \frac{15 * 25.6}{48} + 2$$

$$N_{TP} = 10$$

-Velocidad de soldadura:

$$V_s = \frac{RD}{\gamma_{MD} * A_{MD}}$$

$$(de=3.2): \quad V_s = \frac{2.74}{7860 * 2.6824 * 10^{-3}}$$

$$V_s = 0.4m/h$$

$$V_s = \frac{RD}{\gamma_{MD} * A_{MD}}$$

$$(de=4): \quad V_s = \frac{4.31}{7860 * 2.6824 * 10^{-3}}$$

$$V_s = 0.68m/h$$

Donde:

$V_s$  – representa la velocidad de soldadura (m/h)

$RD$  – razón de depósito del electrodo (kg/h); se determina según tablas 4.2 a 4.6 del artículo [8] , o según datos del fabricante.

$\gamma_{MD}$  – densidad del metal depositado (kg/m<sup>3</sup>). Para aceros al carbono y de baja aleación se puede asumir  $\gamma_{Ac}$  al carb=7860 kg/m<sup>3</sup>.

$A_{MD}$  – área de la sección transversal de metal depositado en la pasada (m)<sup>2</sup>

• Para la soldadura de filete de cateto 15 los parámetros son los siguientes:

-Área de metal a depositar:

$$F_T = 1.1 * \frac{1}{2} C^2$$

$$F_T = 1.1 * \frac{1}{2} * 15^2$$

$$F_T = 123.75 \text{ mm}^2$$

-Diámetro del electrodo:  $de = 4.8 \text{ mm}$

-Número de pasadas totales:

$$N_{pt} = \frac{F_T - N_R * A_R - N_{RE} * A_{RE} + N_{RE} + N_R}{A_{PR}}$$

$$N_{pt} = \frac{F_T}{A_{PR}}$$

$$N_{pt} = \frac{123.75}{(8 \div 12) * de}$$

$$N_{pt} = \frac{123.75}{8 * 4}$$

$$N_{pt} = 3.8 \approx 4 \text{ pasadas}$$

- Corriente de soldadura: Corriente directa (CD+)

- Polaridad: invertida

- Intensidad de corriente:

$$I_s = 40 * de \quad I_s = (20 + 6de)de$$

$$I_s = 40 * 4 \quad I_s = (20 + 6 * 4)4$$

$$I_s = 160 \text{ A} \quad I_s = 176 \text{ A}$$

Como la intensidad es de 200A para diámetro de 4 mm entonces da una razón de depósito de 4.31kg/h y una eficiencia de depósito de 73.0%. Tabla 4.3 [8].

	$Va = K + \frac{l * de}{10} * D$	$K = 12$	$D = \frac{I_s}{F_t}$
Voltaje de arco:	$Va = 12 + \frac{4.8 * 4.8}{10} * 1.61$	$l = 4.8 \text{ mm}$	$D = \frac{200}{123.75}$
	$Va = 15.71 \text{ mm/s}$	$de = 4.8 \text{ mm}$	$D = 1.61$

$$V_s = \frac{RD}{\gamma_{MD} * A_{MD}}$$

Velocidad de soldadura:  $V_s = \frac{4.65}{7860 * 1.237 * 10^{-3}}$   
 $V_s = 0.48m/h$

Establecimiento de la secuencia de realización e los cordones en cada unión soldada:

El establecimiento de la secuencia de realización de los cordones en cada unión soldada se relaciona con facilitar la operación de soldeo al soldador, facilitar la no-aparición de defectos, minimizar distorsiones, etc.

Para el cordón de filete:

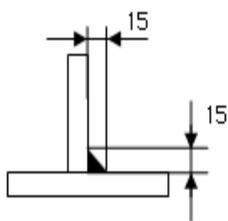


**Figura 2.17** Secuencia de realización de los cordones

**2.4.9 Llenado de los Modelos de Procedimientos de Soldadura**

Los modelos de procedimiento de soldadura se encuentran en el anexo 2, donde se resumen todos los parámetros para realizar la tecnología.

**Tabla 2.13** Procedimiento de Soldadura

No. de Pasadas	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Velocidad de Soldadura (m/h)	
		Clasificación	Diámetro (mm)	Tipo y Polaridad	Intensidad (A)			
4	SMAW	E7018	4.8	CDEP	192 - 234	15.7	0.48	

### 2.4.10 Determinación de los costos de realización de la soldadura

Para soldadura de filete:

-Masa de metal a depositar:

$$M_{MD} = F_{MD} * \gamma_{MD}$$

$$M_{MD} = 123.75 * 7860$$

$$M_{MD} = 0.97 \text{ kg/m}$$

Costos de los consumibles:

$$CTS = CMO + ADM + CCS + CEE;$$

Donde: CTS – representa el costo total de soldadura (USD)

CMO+ADM – costo de mano de obra y administrativos (USD)

CCS – costo de consumibles de soldadura (USD)

CEE – costo de energía eléctrica (USD)

$$C_{TS} = (C_{CS} + C_{CM} + C_{AM} + C_{EE})$$

$$C_{TS} = (20.86 + 2 + 18.58)$$

$$C_{TS} = (41.44) \text{ USD}$$

Costo total de soldadura:

$$C_{cs} = 14.34 \text{ m} * 0.97 \text{ kg/m} * 1.50 \text{ USD/kg}$$

$$C_{cs} = 20.86 \text{ USD}$$

Costo del electrodo en USD/m:

$$C_E = \frac{M_{MD} * P_E}{E_T}$$

$$C_E = \frac{0.97 * 1.50}{0.61}$$

$$C_E = (2.4) \text{ USD/m}$$

Eficiencia total:

$$E_T = \frac{(L_E - L_C)E_D}{L_C}$$

$$E_T = \frac{400 - 75}{400} * 0.76$$

$$E_T = 0.61\%$$

Costos de la mano de obra y administrativo:

$$C_{MO+AM} = \frac{T_{MO+AM}}{V_s * FO}$$

$$C_{MO+AM} = \frac{1.562}{0.68 + 0.3}$$

$$C_{MO+AM} = (1.6)(USD / h) * 1m / h$$

$$C_{MO+AM} = 1.6USD$$

Factor operativo para SMAW:

$$FO = \frac{T_{ARCO}}{T_{Total}}$$

$$FO = 30\%$$

$$FO = 0.3$$

Costo de energía eléctrica:

$$CEE = \frac{P_{kw/h} * V_{ARCO} * I_s * M_{Md}}{1000 * RD * FO * EFE}$$

$$CEE = \frac{0.04 * 14.57 * 200 * 12375}{1000 * 4.31 * 0.3 * 0.60}$$

$$CEE = (1859)USD$$

**Tabla 2.14** Resumen de la determinación de los costos de la soldadura para el apoyo base.

<b>Masa del Metal a Depositar</b>	0.97 kg/m
<b>Costo total de soldadura</b>	41.05 USD
<b>Costo del Electrodo</b>	2.4 USD/m
<b>Eficiencia Total</b>	0.61 %
<b>Costos de la mano de obra y administrativo</b>	1.6 USD
<b>Costo de energía eléctrica</b>	18.59 USD
<b>Costo total</b>	41.05 USD

En el Anexo No. 2 se presenta la Documentación Técnica de la tecnología de soldadura.

**Tabla 2.15** Resumen de la determinación de los costos de la soldadura para cada uno de los 8 elementos que requieren el proceso.

<b>Elemento</b>	<b>Masa del metal a depositar (kg/m)</b>	<b>Costo Consumible de Soldadura (USD)</b>	<b>Costo del Electrodo (USD/m)</b>	<b>Eficiencia Total (%)</b>	<b>Costos de la mano de obra y Administrativo (USD)</b>	<b>Costos de E. Eléctrica (USD)</b>	<b>Costo Total (USD)</b>
<b>Mecanismo de Apoyo</b>							
Viga del apoyo superior	0.97	2.61	2.4	0.61	1.6	18.59	22.8
Soporte base	0.97	20.86	2.4	0.61	1,6	18.59	41.05
Tensor acoplado a la cuña	0.97	0.61	2.4	0.61	1,6	18.59	20.8
<b>Mecanismo de Cierre</b>							
Base empotrada	0.97	2.58	2.4	0.61	1,6	18.59	22.77
Soporte del resorte	0.97	4.19	2.4	0.61	1,6	18.59	24.38
Resorte	0.97	7.28	2.4	0.61	1,6	18.59	27.47
Acople al resorte	0.97	1.09	2.4	0.61	1,6	18.59	21.28
<b>Mecanismo de Giro</b>							
Base inclinada	0.97	30.99	2.4	0.61	1,6	18.59	51.18
<b>TOTAL: 8</b>	<b>7.76</b>	<b>70.21</b>	<b>19.2</b>	<b>4.88</b>	<b>12.8</b>	<b>148.72</b>	<b>231.73</b>

**Tabla 2.16** Resumen Total de la determinación de los costos de la soldadura para cada mecanismo en general según la cantidad de elementos.

Mecanismo	Masa del metal a depositar (kg/m)	Costo Consumible de Soldadura (USD)	Costo del Electrodo (USD/m)	Eficiencia Total (%)	Costos de la mano de obra y Administrativo (USD)	Costos de E. Eléctrica (USD)	Costo Total (USD)
<b>Mecanismo de Apoyo</b>	17.46	144.48	43.2	10.98	28.2	334.62	503.58
<b>Mecanismo de Cierre</b>	7.76	30.28	19.2	4.88	12.8	148.72	191.8
<b>Mecanismo de Giro</b>	3.88	123.96	9.6	2.44	6.4	74.36	204.72
<b>Totales: 3</b>	29.1	298.72	72	18.3	47.4	557.7	<b>900.1</b>

Se necesitan comprar 180 Kg de material consumible de soldadura (Electrodos E 7018).

## 2.5 Conclusiones Parciales

1. A partir de la obtención in situ de las características geométricas del mecanismo, se confeccionaron los planos de piezas y de ensamble, así como el modelo en 3D del mismo, que permitirá su simulación mediante Elementos Finitos, lo cual reviste una alta importancia para las piezas ausentes o deterioradas de los mecanismos analizados.
2. Después de determinar la composición química y las propiedades mecánicas de las muestras de los materiales del puente, se concluye que son aceros que poseen similares propiedades y estructura, sólo se diferencian en que el acero de los Apoyos es un acero calmado, mientras el del Ala de la Viga, posee un tamaño de grano mayor.
3. Según los parámetros calculados en la tecnología de soldadura, se determinó el tipo de electrodo para realizar el proceso como E7018 de diámetro 4 mm, con una costura de filete de 4 pasadas y una intensidad de corriente de 220 Ampere.
4. El costo de la soldadura para todas las piezas a construir es de 900 dólares.

## Capítulo III “Simulación de los Mecanismos. Análisis de los resultados”

### 3.1 Introducción

El Método de los Elementos Finitos en estos momentos es considerado como un procedimiento general donde se discretizan problemas continuos que son expresados por modelos matemáticos bien definidos, es un potente método de cálculo numérico y de solución de sistemas de ecuaciones diferenciales que describan procesos en medios continuos. A pesar de su carácter aproximado, ha llegado a convertirse en una herramienta muy útil que permite realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente realizables por los métodos analíticos clásicos.

En este capítulo se realiza la simulación mediante el MEF a través del software CosmosDesignStar de las piezas del Mecanismo de Apoyo que están sometidas a cargas y que requieren de este análisis para su comprobación bajo las propiedades del acero ASTM 3694, debido a que es el mecanismo que se está sometido a una mayor carga, pues la mayor parte del tiempo, el puente está dando servicio a cargas rodantes sobre él, y por tanto, dicho mecanismo soporta además el peso del puente y de los vehículos que circulan diariamente. El análisis de sensibilidad se le realiza solamente a este mecanismo.

Como análisis adicionales, para completar el proceso de simulación de los tres mecanismos del puente, se realizarán las corridas a los modelos de los mecanismos de giro y cierre, que aunque no soportan cargas la mayor parte del tiempo como los apoyos, también es importante realizarles los análisis para comprobar como se comportarán bajo la acción de estas cuando ocurra el giro del puente.

Es necesario aclarar que se aplicó como material el acero ASTM 3694 y no los originales del puente debido a que este será el empleado en su reparación, y por tanto en la fabricación de las piezas que a continuación se simulan, por lo que surge la necesidad de comprobar como se comportarían las estructuras representadas en los modelos con las propiedades de este material.

### 3.2 Acerca del MEF y la modelación

El método de los Elementos Finitos se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema— en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados “elementos finitos”. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodos”. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama “malla”.

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor,

de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril, los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

El MEF es usado en el diseño de nuevos productos, y en la mejora de los actuales. Una empresa capaz de verificar un diseño propuesto será capaz de ajustarse a las especificaciones del cliente antes de la fabricación ó construcción. Modificando un producto o estructura existente es utilizado para calificarlo para unas nuevas condiciones de servicio. En caso de fallo estructural, el MEF puede ser usado para ayudar a determinar el diseño de las modificaciones para ajustarse a las nuevas condiciones.

Al utilizar la tecnología de análisis del diseño para predecir el comportamiento del diseño, los ingenieros pueden optimizar los diseños del producto en la computadora sin construir un solo prototipo, se realizan toda las iteraciones necesaria hasta llegar a un producto que satisfaga las necesidades y sea factible para la empresa. Al optimizar al máximo el producto se puede experimental con nuevos diseños, materiales con el menor tiempo y costo.

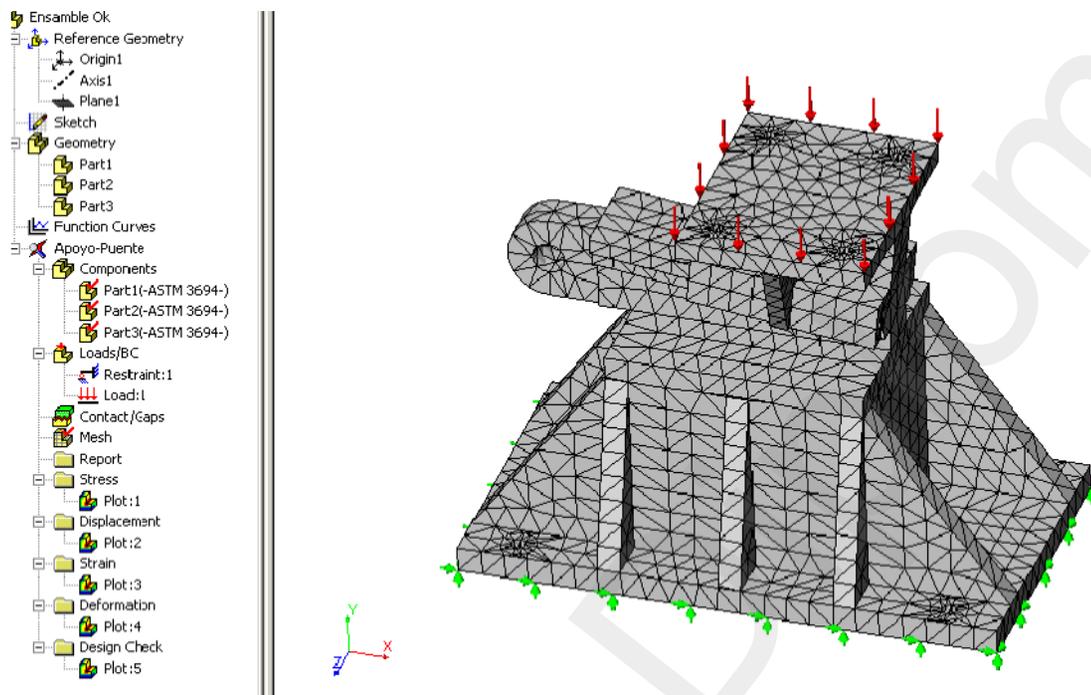
El MEF se ha vuelto una solución para la tarea de predecir los fallos debidos a tensiones desconocidas enseñando los problemas de la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las teóricas tensiones involucradas. Este método de diseño y testado del producto es muy superior a los costes de manufactura que podrían acarrear si actualmente cada ejemplo fuera construido y testado. [7]

### 3.3 Descripción del modelo de los apoyos a partir de la utilización del acero ASTM 3694

Los dibujos fueron exportados con la extensión “.stp” para el software CosmosDesingStar en el cual se realizó la simulación. El modelo de Elementos Finitos consta de Restricciones y Cargas que serán descritas a continuación, para ellos fue necesario realizar el cálculo manual de las cargas para determinar la presión uniforme que será aplicada a la geometría que soporta la misma, para de esta forma poder determinar las tensiones, desplazamientos y el factor de seguridad del ensamble. A continuación se describe el procedimiento para simular el modelo.

Para el caso del Mecanismo de Apoyo, se tomaron como base los modelos exportados del Mechanical Desktop, los cuales se ensamblaron y finalmente se escogió la parte del ensamble que estaba sometida a carga estática, o sea, la parte de los apoyos que soporta todo el peso del puente cuando este presta servicio a cargas rodantes sobre él.

Una vez realizado el mallado con un tamaño de elemento de 3,8 mm y un total de 7223 nodos, se aplica el material al modelo, el cual fue introducido al software CosmosDesignStar, como se puede observar en la figura 3.1, a partir de las propiedades del acero ASTM 3694, debido a que la biblioteca del software no contaba con este acero fue necesario hacerlo manualmente. Posteriormente se aplicaron restricciones del tipo empotramiento por la parte inferior del apoyo, el cual va fijo a los pilotes de hormigón ubicado en el centro y en los extremos del puente. Finalmente se aplicó la presión uniforme antes mencionada por la parte superior de la viga, que es donde recibe la carga todo el mecanismo de apoyo.



**Figura 3.1** Mallado de los Apoyos.

Para conocer la carga a aplicar sobre el apoyo, se parte de los resultados obtenidos por la Estación Comprobadora de Puentes, la cuál realizó un estudio para determinar las cargas que reciben cada uno de los apoyos mediante el empleo de 5 camiones alineados uno detrás de otro, los cuales estaban cargados con una determinada cantidad de sacos de arena, y que servían para calcular las cargas máximas a que estaba sometida la parte metálica del puente, las cuales poseían valores de 300 KN por los extremos y 600 KN en el centro, tomándose como base el valor de carga más crítica para realizar la simulación, o sea 600 KN.

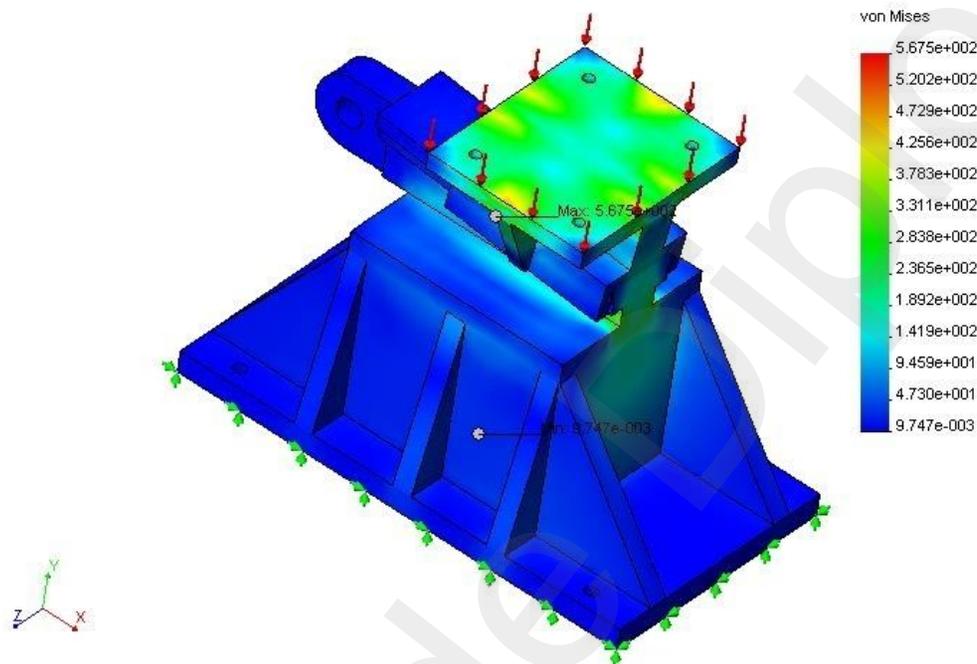
Tomando como base ese valor se calculó la Presión Normal aplicada a la geometría de la Viga Superior por donde recibe la carga el ensamble.

$$Pr esiónNormal = \frac{Fuerza(kg)}{Area(cm^2)} = \frac{61182,97278kgf}{3127cm^2} \quad \begin{array}{l} Area = 59x53cm^2 \\ Area = 3127cm^2 \end{array}$$

$$Pr esiónNormal = 19,5660kgf / cm^2$$

Se le aplicó la presión uniforme anteriormente calculada, obteniendo los siguientes resultados que se muestran a continuación:

Ensamble Ok-Apoyo-Puente :: Static Nodal Stress  
Units: kgf/cm<sup>2</sup> Deformation Scale 1 : 0



**Figura 3.2** Análisis tensional del apoyo bajo una presión uniforme crítica.

Como se pudo apreciar en la figura 3.2, las tensiones máximas para los apoyos se encuentran en la viga superior que va atornillada al puente, específicamente en las uniones de los extremos de la plancha superior, que es donde mas soporta la carga estática y en la cuña. Para el caso de la tensión máxima de todo el mecanismo, cabe señalar que esta se encuentra localizada en el nodo # 4877 del borde extremo superior del soporte de la plancha, la cual posee un valor de 567,5 kgf/cm<sup>2</sup> con lo cual cumple con la condición de resistencia que plantea que la tensión permisible que posee un valor de 2125 kgf/cm<sup>2</sup> no debe ser menor que la tensión máxima, o sea:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]$$

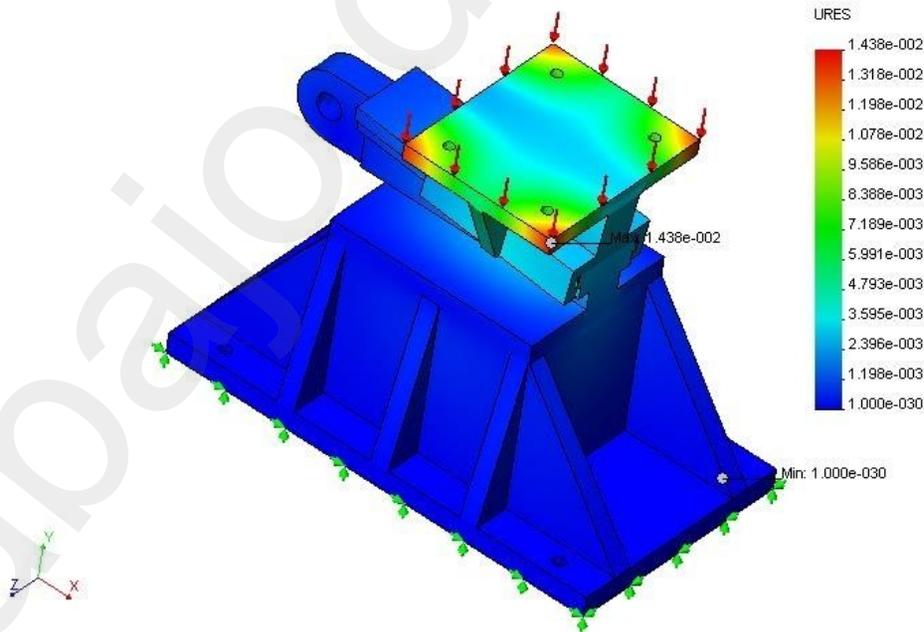
$$567,5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 2125 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Este resultado de tensión permisible se obtuvo para un factor de seguridad de 1,2. Mientras que el valor de tensión mínima se encuentra localizado en la parte centro inferior del apoyo base, y posee un valor de  $9747 \text{ kgf/cm}^2$ , el cual es elevado, lo que nos indica que ese punto es el menos expuesto a cargas estáticas dentro del mecanismo.

A continuación se presentan los resultados del análisis de desplazamiento de acuerdo a la tensión de fluencia del material (URES):

Para el caso de los desplazamientos, como se puede apreciar en la figura 3.3, se muestran los desplazamientos resultantes de cada uno de los nodos, los cuales tienen su valor máximo en los extremos que están en voladizo de la viga superior (rojo fuerte), con un valor de  $0,014 \text{ mm}$ , lo cual significa un desplazamiento muy pequeño. En cuanto al desplazamiento mínimo, este es casi despreciable, y se encuentra localizado en los agujeros del apoyo base donde se atornillan los tornillos que están empotrados en el hormigón.

Ensamble Ok-Apoyo-Puente :: Static Displacement  
Units : mm Deformation Scale 1 : 0

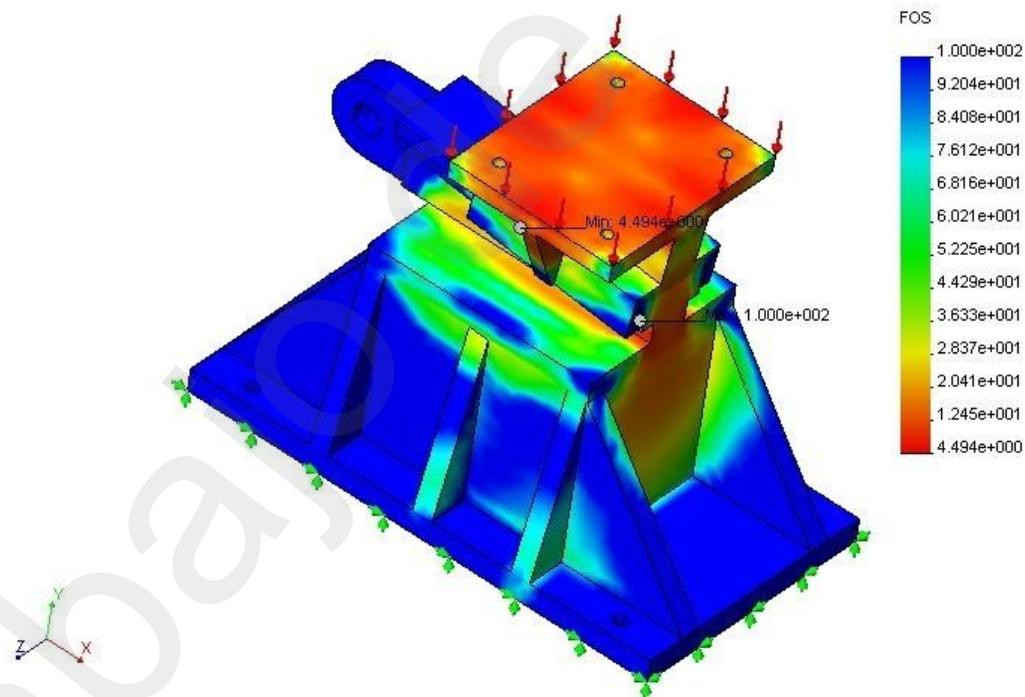


**Figura 3.3** Análisis de Desplazamiento resultante de cada uno de los nodos.

Para el caso del Factor de Seguridad del mecanismo, se realizó el análisis de acuerdo a la tensión de fluencia del material (FOS), el cual arrojó valores elevados, como se muestra en la figura 3.4, donde se comprueba que las zonas de un mayor factor se encuentran señaladas en rojo fuerte, y están ubicadas principalmente en la viga superior y en el centro de la cuña que está sometida a carga cuando se encuentra acoplada entre la viga y el apoyo base, y su valor mínimo es de 4.49.

Las zonas que están en azul representan los valores del factor de seguridad más elevados, o sea, las zonas que menos posibilidades tienen de fallar ante esta carga.

Ensamble Ok-Apoyo-Puente :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress  
Factor of safety distribution: Min FOS = 4.5      Deformation Scale 1 : 0



**Figura 3.4** Factor de Seguridad de acuerdo a la tensión de fluencia del material.

### 3.4 Validación o Calibración del modelo de los apoyos.

#### 3.4.1 Análisis de sensibilidad o convergencia

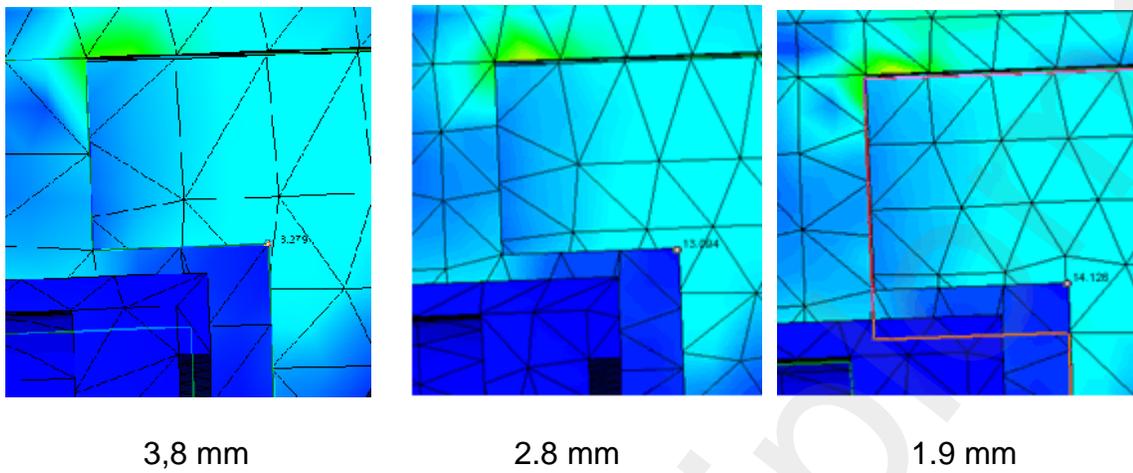
El Análisis de Sensibilidad o Convergencia se realiza para asegurar la precisión del modelo frente a alguna variable tal como la tensión, la deformación o el desplazamiento, podía haberse realizado para una sola de ellas, pero en este trabajo se hizo para las dos primeras variables mencionadas, para ello se utilizaron las cargas anteriormente calculadas.

Para un análisis más exhaustivo del modelo, se realizaron tres muestreos de las tensiones y desplazamientos para una misma carga pero con diferentes densidades de malla en las coordenadas (173.91, 205.05, 8.36) de la viga superior, hasta que el valor de las variables analizadas convergiera sin un error específico considerable entre tres análisis consecutivos.

**Tabla 3.1** Valores de tensión, desplazamiento y deformación con diferentes mallados.

Tipo de Mallado	Tamaño de Elemento (No. de Elemento)	Desplazamiento (mm)	Tensión (kgf/cm <sup>2</sup> )	Diferencia Tensión(%)
Malla Fina	1.9 (56942)	0.0023	14.126	7.31
Malla Media	2.8 (31283)	0.0023	13.094	1.41
Malla Gruesa	3.8 (9912)	0.0023	13.279	-

En la tabla anterior se observa que todas las mallas realizadas ofrecen buenos resultados pues la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre tres análisis consecutivos fue menor de 7.31 %, indicando esto que la precisión es adecuada, ya que es menor de un 10 %. A continuación se muestran imágenes de las tres densidades de mallas utilizadas para el análisis de sensibilidad de los apoyos, tomadas de un extremo de la parte inclinada de la viga superior.



**Figura 3.5** Tamaños de malla realizados para el análisis de sensibilidad.

### 3.5 Simulación de los Mecanismos de Giro y Cierre

Para estos mecanismos se muestran los resultados obtenidos en los análisis de tensiones, desplazamientos y factor de seguridad. Es necesario aclarar que estos análisis se realizaron de forma adicional, debido a que no están sometidos a cargas constantes como son los apoyos, debido a que solo están expuestos a las mismas cuando el puente gira para dar paso al transporte fluvial, no por esto dejan de ser importantes por lo que se decide realizar las corridas de los modelos de estos dos mecanismos para completar un proceso de simulación que abarca los tres mecanismos principales del puente.

#### Simulación del Mecanismo de Giro

Los análisis se realizaron a las ruedas laterales que son dentro del mecanismo de giro los elementos que soportan la mayor carga. El mado se realizó con un tamaño de elemento medio de 3.8 mm. Se aplicaron restricciones por la parte inferior de la rueda maciza y por la parte inferior de los agujeros de la viga superior donde van fijados los tornillos y se le aplicó la misma presión uniforme que a los apoyos, ya que las ruedas laterales del centro llegan a soportar la misma carga extrema de los apoyos, que son 600 KN. Las tensiones Von Mises ofrecen un valor de  $1163 \text{ kgf/cm}^2$ , lo cual cumple con la condición de resistencia y posee sus valores máximos en los agujeros de la viga, los cuales están sometidos a las mayores tensiones, debido a que en ellos van fijados los tornillos que se atornillan en la viga del puente como lo muestra la figura 3.6.

En cuanto al desplazamiento, este posee un valor máximo de 0,018 mm, y se encuentra localizado en el centro de la viga superior. Los lugares de menor desplazamiento se encuentran localizados en la rueda y en los extremos en voladizo de la viga como se muestra en la figura 3.7, donde también se aprecia el factor de seguridad, que posee un valor mínimo de 2.1 y se puede apreciar principalmente alrededor de los agujeros de la viga y en la parte central del pasador, siendo estas sus partes más críticas, pues son las más expuestas a las tensiones en el mecanismo.

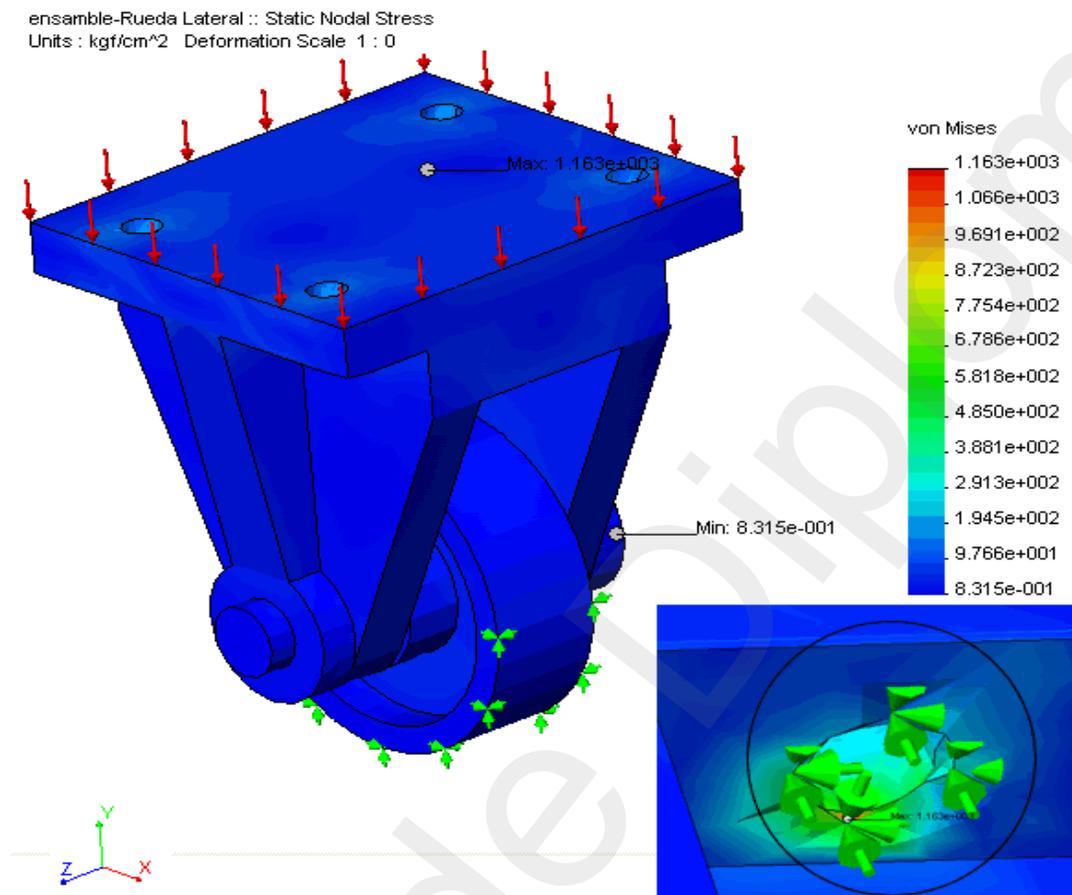


Figura 3.6 Tensiones en las ruedas laterales.

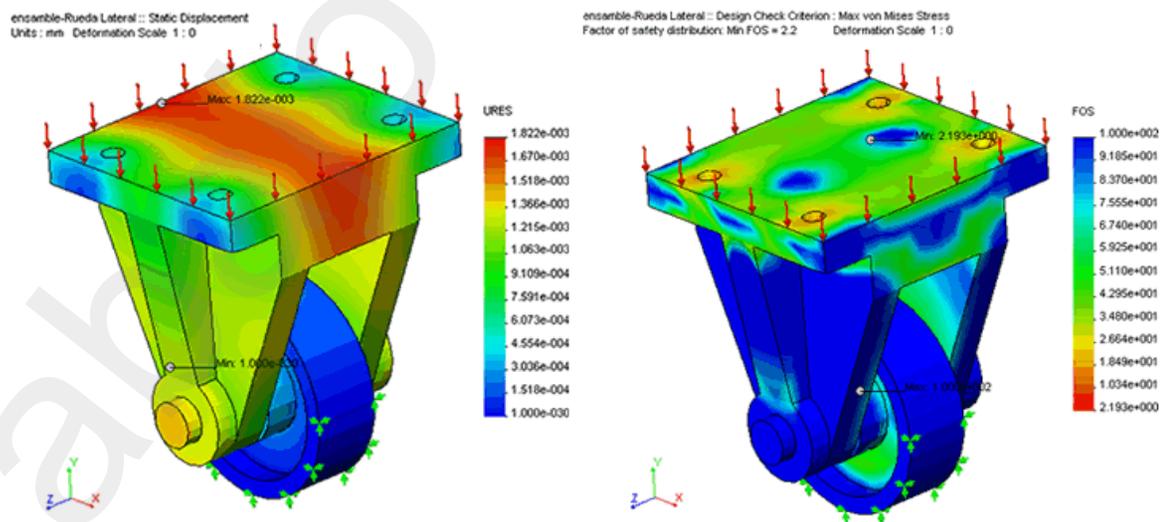


Figura 3.7 Desplazamiento y Factor de seguridad.

### Simulación del Mecanismo de Cierre

En este mecanismo se realizó el análisis a la estructura que mayor carga soporta, que es el soporte con todos sus acoples, al cual están fijadas todas las piezas del sistema de cierre. No se incluyó el resorte con su acople y la rueda, debido a que estos no se someten a cargas importantes ya que su función no es soportar las mismas, sino realizar movimiento cuando se acciona el mecanismo. Por tanto la estructura en cuestión constituye el elemento principal a la hora de realizar la simulación, pues sobre él descansa toda la responsabilidad del mecanismo.

Se le aplicaron restricciones por la parte de atrás al soporte, ya que por ahí va soldado a la viga del puente y se le aplicó una presión normal de  $3 \text{ kgf/cm}^2$  por la parte superior, según los cálculos realizados a partir de la carga más crítica que soportan los extremos del puente que son  $300 \text{ KN}$  y del área de la superficie que se le aplica dicha carga que son  $12600 \text{ cm}^2$ . Además se le aplicó una presión uniforme del tipo direccional en el eje  $y$ , al pasador de la unión que acopla al eje principal, simulando la presión que ejercen los tensores cuando accionan el sistema, este valor fue de  $1 \text{ kgf/cm}^2$ , que sería una carga extrema. La maya se creó para un tamaño medio de elemento de  $7,8 \text{ mm}$ .

Como se puede apreciar en la figura 3.8, las tensiones ofrecen un valor de  $40,52 \text{ kgf/cm}^2$ , por lo que cumple con la condición de resistencia. Este valor es muy bajo por lo que demuestra que esta estructura no está expuesta a grandes cargas, las cuales en su valor máximo se encuentran localizadas en la parte posterior de las ranuras del soporte por donde se atornillan los acoples.

En cuanto al desplazamiento y al factor de seguridad, estos se representan en la figura 3.9. En el caso de los desplazamientos, estos ofrecen un valor máximo de  $0.014 \text{ mm}$ , el cual es muy pequeño y se encuentran localizados en las partes derechas del eje principal y del pasador de la unión a los tensores por donde se le aplica la tensión.

El factor de seguridad posee un valor de  $6.2$ , el cual es elevado y se encuentra localizado en la parte superior de las ranuras del soporte.

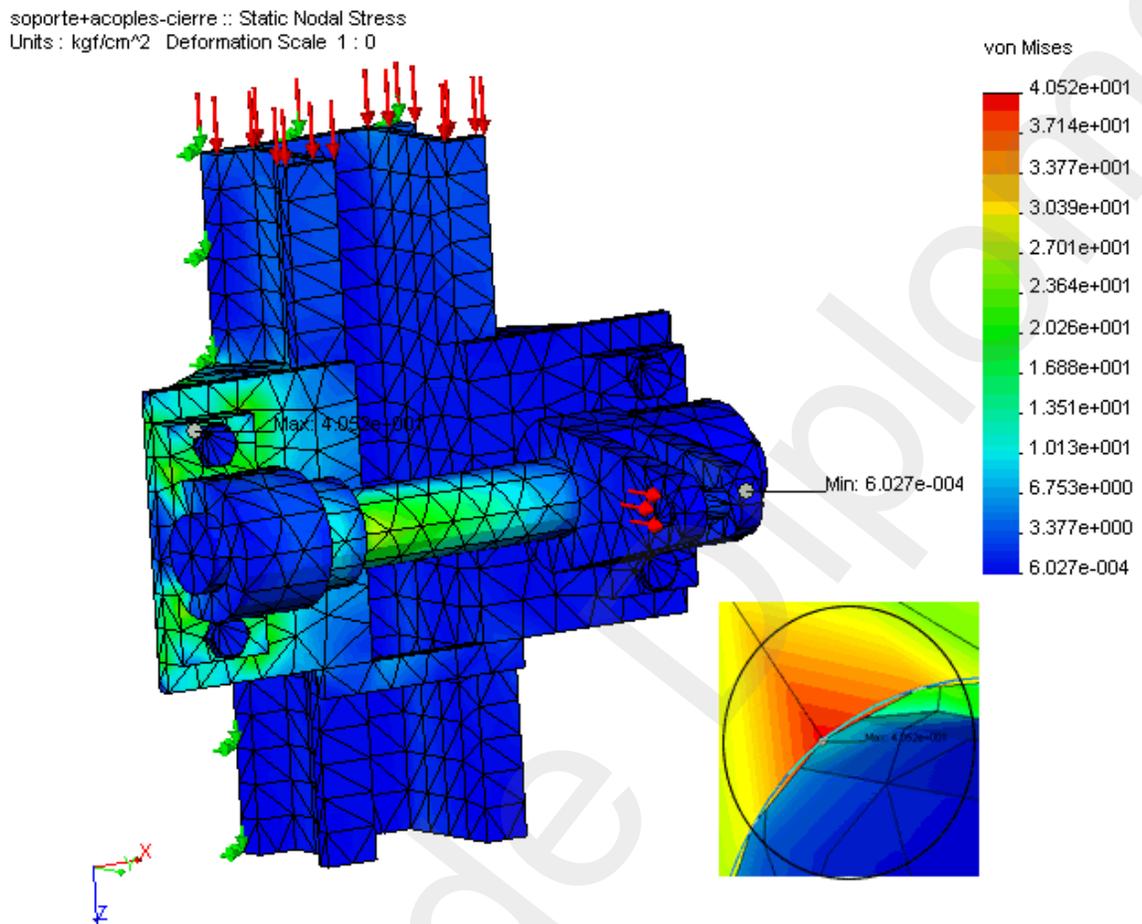


Figura 3.8 Tensiones del Mecanismo de Cierre

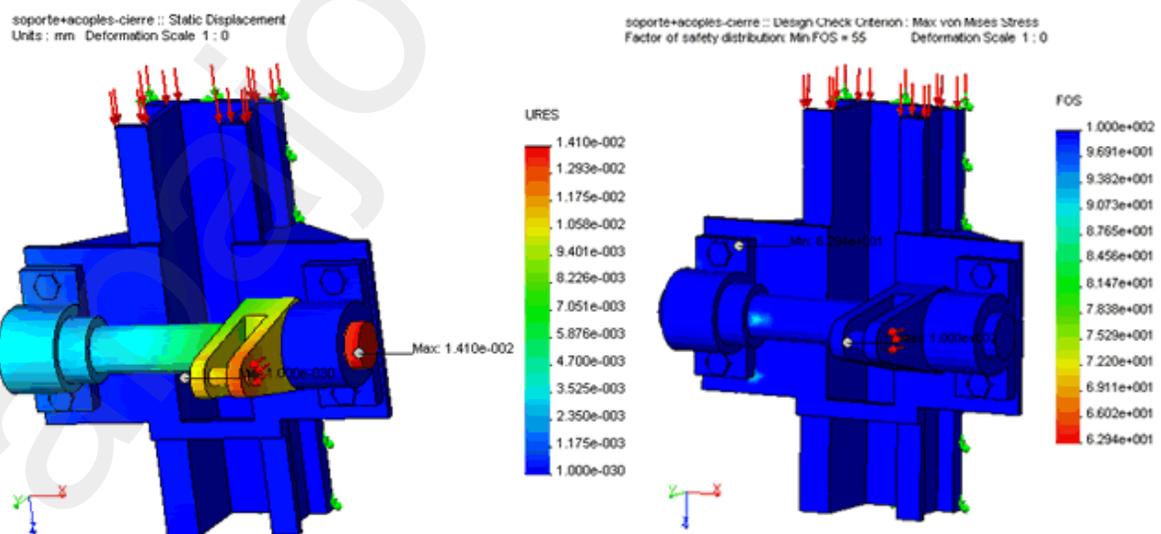


Figura 3.9 Desplazamientos y Factor de Seguridad

### 3.6 Conclusiones Parciales

1. Mediante la utilización de una presión uniforme es posible simular los valores de las tensiones, desplazamientos y el factor de seguridad de los mecanismos de apoyo, cierre y giro de un puente metálico.
2. El análisis de sensibilidad o convergencia de los apoyos ofreció una precisión adecuada ya que la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre tres análisis consecutivos fue menor de 7.88 %.
3. La calibración del modelo de los apoyos posibilita establecer las condiciones de utilización del puente con niveles de seguridad apropiados.
4. La simulación de los mecanismos de cierre y giro nos comprueba la calidad de los modelos y nos demuestra que sobre estos no recae la responsabilidad mayor de las cargas del puente, no obstante su análisis permitió verificar los principales parámetros para una mayor seguridad en el funcionamiento del mismo.

## Conclusiones Generales:

1. Según el estado técnico actual de las piezas que componen los mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del puente, es obligatorio construir los elementos deteriorados o ausentes según los planos de piezas señalados en la Especificación Técnica que se adjunta.
2. Es necesario la revisión, limpieza, mantenimiento a los componentes y comprobación del estado técnico por especialistas de los dos motores y los tres reductores que intervienen en el giro, debido a que estos no necesitan ser reconstruidos, disminuyendo el costo total de la obra.
3. A partir de la obtención in situ de las características geométricas del mecanismo, se pudo confeccionar los planos de piezas y de ensamble, así como el modelo 3D del mismo para su futura simulación mediante Elementos Finitos, dando cumplimiento a los objetivos específicos dos, tres y parte del objetivo general de este trabajo.
4. Reviste una extrema importancia la modelación de las piezas ausentes o deterioradas de los mecanismos analizados debido a que con ellas es posible un mejor análisis para la fabricación de las mismas.
5. Después de determinar la composición química y las propiedades mecánicas de las dos muestras de los materiales del puente, se concluye en que son aceros que poseen similares propiedades y estructura, solo se diferencian en que el acero de los Apoyos es un acero mas calmado que el del Ala de la Viga, el cual posee un tamaño de grano mas grande.
6. Según los parámetros calculados en la tecnología de soldadura, se determinó el tipo de electrodo para realizar el proceso como E7018 de diámetro 4 mm, con una costura de filete de 4 pasadas y una intensidad de corriente de 220 Ampere.
7. Mediante la utilización de una presión uniforme es posible simular los valores de las tensiones, deformaciones, desplazamientos y el factor de seguridad del mecanismo de apoyo de un puente metálico.

8. El análisis de sensibilidad o convergencia ofreció una precisión adecuada ya que la diferencia entre los valores de las variables analizadas de los tres análisis consecutivos no fue significativa.
9. La calibración del modelo posibilita establecer las condiciones de utilización del puente con niveles de seguridad apropiados.

Trabajo de Diploma



## Recomendaciones

- Realizar investigaciones similares en otros puentes metálicos con el objetivo de valorar la posibilidad de emplear esta aplicación del giro con lo que se lograría expandir esta experiencia.
- Se debe comprobar el estado de las superficies de las partes rodantes o que presentan deslizamiento como es el caso de los pasadores y las cuñas, los cuales deben ser correctamente lubricados.
- Las varillas que unen cada unos de los seis puntos donde se sitúan los mecanismos de Apoyo se encuentran empatadas por soldadura, en bastante mal estado y fuera de su eje, se deben sustituir completamente.
- El sistema de Apoyo se encuentra sumamente deteriorado, sólo se conserva 1 de las seis cuñas y los apoyos están oxidados y deteriorados. Es obligatoria la construcción total de sus componentes de acuerdo a los planos de pieza que se adjuntan.
- Realizar un estudio con el objetivo de colocar Ánodos de sacrificio para con esto evitar la corrosión del acero en los mecanismos.
- Aplicar una capa de pintura anti-corrosiva para evitar el aceleramiento progresivo en la corrosión debido a su cercanía al mar.
- Elaborar en futuras investigaciones, las tecnologías de fundición y de maquinado para las piezas que restan, las cuales requieren de estos procesos, y los mismos se encuentran especificados en los planos de pieza adjuntos.

**Referencias (EndNote):**

[1-7]

1. Rodríguez, A.V.C., *Hitos de una Comunidad*. III Simposio Municipal y el Carmelo, 2008.
2. Centralia, W., *Load Test and Rating Report Puget Sound & Pacific Railroad Bridge Steel Through-Truss Bridge*. MP 1.7, 2001.
3. <http://www.2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials2.html>.
4. <http://www.nycroads.com/crossings/hell-gate/>.
5. Metallurgist's Handbook, S.E., MIR Publishers, Moscow, 1968, pp 132.
6. Manual de Resistencia de Materiales, G.S.P.e.a., Editorial MIR, Moscú, 1985.
7.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%83%C2%A9todo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos#Qu.C3.A9\\_es\\_el\\_M.C3.A9todo\\_de\\_los\\_Elementos\\_Finitos](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%83%C2%A9todo_de_los_elementos_finitos#Qu.C3.A9_es_el_M.C3.A9todo_de_los_Elementos_Finitos)
8. Pozo, G.S, Artílez, A.H, Centro de Investigaciones de Soldadura, *Apuntes para la realización de una tecnología de soldadura por arco eléctrico*, 2000.

**Bibliografía (EndNote):**Artículos y Publicaciones:

(Jáuregui; industrial) 1909; Normalización 1984; Valbuena 1996; Ing. Cecilia S. Alvarez 2002; Morán 2003; Normalización 2004; Asociación Latinoamericana para el Control 2005; Fomento 2005; Ing. Civil 2006; Acero 2007; Autores 2007; Jose Romo Martín 2007; Monografías 2007; Néstor F. Ortega 2007; Rodríguez 2008)

Acero, A. p. I. P. T. d. (2007). "Puentes Atirantados. La importancia del acero en la construcción del viaducto de Millau." Técnica Constructiva **5**.

Asociación Latinoamericana para el Control, P. y. R. d. I. C. (2005). "Inspección, Diagnóstico y Terapias de un Muelle - Experiencias Valiosas." VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción CONPAT 2005. Vol. II : Patología de la Construcción: Capítulo VI: Estructuras, Trabajo BR31, pp. VI.57 - VI.64.

Autores, C. d. (2007). "Reglamento Argentino para el Proyecto y Construcción de Puentes Ferroviarios de Acero Remachado." 2-41.

Azizinamini, N. L. a. A. (2006) Steel Bridge Sistem, Simple for Dead Load and Continous for Live Load. Civil Engineering Departament, University of Nebraska-Lincoln **Volume**, DOI:

Chong, S.-L. (2004). "Preventing Corrosion in Steel Bridges." United States Department of Transportation - Federal Highway Administration **Vol. 68 No. 2**.

Farhey, D. N. (2005) Bridge Instrumentation and Monitoring for Structural Diagnostics Structural Health Monitoring **Volume**, DOI:

Fomento, M. d. (2005). "Orden FOM. Inspecciones técnicas en los puentes de ferrocarril " Boletín Oficial del Estado Español **BOE No. 154**((ITPF-05)).

industrial), T. y. C. I. (1909). "Estructura de los Puentes Metálicos." **Capítulo 5**.

Ing. Cecilia S. Alvarez, D. J. C., Federico R. di Genova (2002). "Comparación entre las especificaciones para el proyecto de puentes." Reglamento Argentino de Puentes (C6-T003).

Ing. Civil, N. P. S., Dr. Ing. Ernesto L. Chagoyén Méndez (2006). "Análisis Dinámico Lineal Comparativo de Estructuras Frente a Cargas de Sismos, según la Norma Cubana."

Jáuregui, D. "Ensayos de Carga no destructivos usados para la Evaluación de Puentes." Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil: 157-164.

Jose Romo Martín, H. T. P. F. I. C. (2007). "Una reflexión sobre las tendencias actuales en el proyecto de puentes." Revista Zuncho **5**.

Macinterney, E. (1999) Finite Element Analysis in Structural Mechanics of Cound Arbour Bridge. University of Adelaide **Volume**, DOI:

Monografías, M. (2007) Deficiencias Estructurales en Puentes de Acero Miliarum **Volume**, DOI:

Morán, J. F. F. B. y. F. J. V. (2003). "Metodología sistemática para la cuantificación de la vulnerabilidad de puentes sobre cauces al paso de avenidas." 1-12.

Néstor F. Ortega, M. R. (2007). "Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas." IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires: 1-11.

Normalización, C. E. d. (1984). "Elaboración de Proyectos de Costrucción. Obras de Fábrica. Método de Cálculo." Norma Cubana NC53-115 I: 1-33.

Normalización, I. O. N. d. (2004). "Norma Cubana NC 335: 2004." Inspección y Conservación de Puentes. Código de Buenas Prácticas **1 Edición**(ICS: 93.040).

Rodríguez, A. V. C. (2008). "Hitos de una Comunidad." III Simposio Municipal y el Carmelo.

Valbuena, E. M. y. E. (1996). "Evaluación del estado de los Puentes de Acero de la Red Vial de Colombia." Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. **4(2)**: 125-140.

#### Artículos en Inglés:

(Macinterney 1999; Chong 2004; Farhey 2005; Azizinamini 2006)

## Anexo 1. Especificación Técnica de los planos de pieza y de ensamble de los Mecanismos de Apoyo, Cierre y Giro del Puente de Hierro de 11 y 26

Formato	Zona	Posición	Código	Denominación	Cantidad	Observaciones
1	2	3	4	5	6	7
				<u>Piezas del Mecanismo de Apoyo</u>		
A3		1	ASP-00-01-01	Viga del apoyo superior	6	
A3		2	CUN-00-01-02	Cuña	6	
A3		3	BAS-00-01-03	Soporte base	6	
A3		4	TEN-00-01-04	Tensor acoplado a la cuña	6	
A3		5	UNI-00-01-05	Unión entre el mec. tensor y el soporte	6	
A3		6	SAT-00-01-06	Soporte atornillado a la viga	6	
				<u>Piezas del Mecanismo de Cierre</u>		
A3		1	BEM-00-02-01	Base empotrada	2	
A3		2	SRE-00-02-02	Soporte del resorte	2	
A3		3	RES-00-02-03	Resorte	2	
A3		4	RDA-00-02-04	Rueda mascisa	2	
A3		5	ACR-00-02-05	Acople al resorte	2	
A3		6	AS2-00-02-06	Acolple al soporte	4	
A3		7	BUA-00-02-07	Brazo unión entre el arbol y el resorte	2	
A3		8	UN2-00-02-08	Unión entre el arbol y los tensores	2	
				<u>Piezas del Mecanismo de Giro</u>		
A3		1	SPS-00-03-01	Soporte	4	
A3		2	RDA-00-03-02	Rueda mascisa	4	
A3		3	BIN-00-03-03	Base inclinada	4	
				<u>Unidades Ensambladas del Pivote Central</u>		
A0		1	PIV-00-04-01	Corte transversal del pivote	1	
A0		2	PIV-00-04-02	Corte longitudinal del pivote	1	
A0		3	PFG-00-04-03	Plataforma de giro	1	
				<u>Esquema cinemático de los Tensores</u>		
				Sist. extracción de cuñas	1	Esquema

Mod	Cant.	No. Notif.	Firma	Fecha	<b>MECANISMO DE GIRO</b>  Especificación Técnica	<b>UCLV</b>	
Elab.		YAG		22/4/9		Etapas de elab.	Hoja No. 1
Rev.		ERG		27/4/9			C. Hojas 1
Cont. Tec.		ERG		27/4/9			
Cont. Nor.		AEA		27/4/9			
Aprob.		CCHM		27/4/9		<b>ETC-00-06-01</b>	

## Anexo 2. Especificaciones del Procedimiento de Soldadura

Empresa Empresa de Vias y obras de la  
Construcción Ferroviarias (EVOCF)  
Proceso(s) de soldadura: SMAW

Procedimiento No. EVOCF - 1  
Revisión      Fecha       
     Por       
Tipo: Manual [X] Semiaut. [ ] Mecaniz. [ ]  
Autom. [ ]

### DISEÑO DE UNION EMPLEADA

Tipo: Costura unilateral [ ] bilateral [X]  
Respaldo: Si [ ] No [X]  
Material del respaldo     

Holgura en raíz 0 Altura del talón 0

Angulo del bisel N/A Radio (J - U) N/A  
Resanado: Si [ ] No [X] Método N/A

### METALES BASE

Especificación del material ASTM - 3694  
Tipo o grado N/A  
Espesor: Cost. de Ranura      Filete 15m  
Diámetro (tubo) N/A

### METALES DE APORTE

Especificación AWS E7018  
Clasificación AWS A5.9

### PROTECCION

Fundente X Gas       
Composición      Electrodo-Fundente(Clas.)  
Flujo       
     Diámetro de tobera de gas     

### PRECALENTAMIENTO

Temp. de Precalentamiento, Min. 136.5° C  
Temp. entre pasadas: Mín. N/A  
Máx. N/A

### POSICION

Posición para cost. de Ranura      Filete X  
Progresión: Ascendente [N/A] Descendente [N/A]

### CARACTERISTICAS ELECTRICAS

Modo de transferencia (SMAW):  
Cortocircuito [X] Globular [ ] Gota Fina [ ]  
Corriente: CA [ ] CDEP [X] CDEN [ ] Pulsada [ ]  
     Otra     

Electrodo de tungsteno (GTAW):

Tipo: N/A Diámetro N/A

### TECNICA

Pasada(s) simple o múltiple (por lado)      simple     

Cordón estrecho u oscilado      estrecho

Número de electrodos 1

Espacio entre electrodos: Longitudinal N/A  
Lateral N/A  
Angulo N/A

Distancia pieza - boquilla de contacto N/A

Martillado N/A

Limpieza entre pasadas N/A

### TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR

Temperatura N/A

Tiempo N/A