

## **Título: Estudio de ingeniería inversa de materiales de puentes de ferrocarriles para la Industria Azucarera.**

**Autor:** Dr. Ing. César A. Chagoyén Méndez. \* ([cachagoyen@uclv.edu.cu](mailto:cachagoyen@uclv.edu.cu))  
Ing. Yasser Mujica Alonso. \*  
MSc. Ing. Ramón García Caballero. \*  
Dr. Ing. Emilio Álvarez García. \*

\* Departamento de Mecánica Aplicada y Dibujo. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

### **Resumen:**

En este trabajo se realiza la caracterización de los materiales del puente ferroviario metálico km 9.568 mediante la realización de diversos ensayos mecánicos, químicos y metalográficos. Este puente cuenta con más de cien años y aún se transporta caña, mieles, azúcar y otras mercancías necesarias para el desarrollo de la zafra azucarera.

Además se modela el ensayo de tracción mediante el Método de los Elementos Finitos y finalmente, a través de un proceso de ingeniería inversa se define, cuales de los materiales actuales son similares a los materiales del puente para valorar su reparación.

### **Study of inverse engineering of railroad bridges materials for the Sugar Industry.**

#### **Abstract:**

In this work the characterization of the materials that km 9.568 metallic railroad bridge by means of diverse mechanical, chemists and metallographic test is carried out. This bridge counts with more than a hundred years and still it is transported cane, molasses, sugar and other necessary merchandize for the sugar harvest development.

The tensile test is also modeled by means of the Finite Elements Method and finally, through a inverse engineering process is defined, which are similar of the current materials to the bridge materials to value their repair.

**Palabras claves:** material test, metallic railroad bridge, Sugar Industry, Finite Element Analysis.

## **INTRODUCCIÓN**

El sistema ferrocarrilero cubano tiene ya más de 100 años, se asegura que Cuba fue el séptimo u octavo país del mundo donde primero se construyó el ferrocarril; incluso, el primer lugar en América Latina.

Dadas las características de nuestra isla, larga y estrecha, con una longitud superior a los 1000 kilómetros, económicamente no hay, en grandes distancias por tierra, ningún sistema de transporte superior al ferrocarril, tanto para carga como para pasaje. Al igual que otras industrias, la azucarera utiliza el sistema de ferrocarril para el transporte de caña, mieles, azúcar y otras mercancías necesarias para el desarrollo de la zafra azucarera. En realidad, nuestro país se había ido quedando rezagado en materia de ferrocarriles, y el ferrocarril en las condiciones de Cuba resulta un transporte insustituible.

Debido a estas circunstancias, de longevidad y deterioro, es necesario, mediante la vía más económica, la realización de distintos mantenimientos tanto en los trenes como en las vías férreas. Para la realización de los mismos en las vías férreas, se deben conocer entre otras, las características de los aceros empleados en esta rama de la industria y particularmente en los puentes que forman parte de las vías férreas.

Este trabajo versa sobre la caracterización de los materiales utilizados en la construcción del puente Km. 9.568 basándose en el principio de la experimentación y específicamente en los ensayos químico, metalográfico, de tracción, dureza e impacto, de una forma integral, brindando resultados que son escasos o nulos actualmente en la literatura. Como un resultado más se modela el Ensayo de Tracción mediante el Método de los Elementos Finitos.

La ingeniería inversa tiene como objetivo obtener información técnica a partir de un producto accesible a las personas, con el fin de determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y cómo fue fabricado. Finalmente en este trabajo se determina, mediante un procedimiento de ingeniería inversa, cuál de los materiales actuales se corresponde con los materiales del puente para poder valorar su futura reparación.

## DESARROLLO

### Características del puente analizado

El puente del km 9.568 es un puente tipo Girder en acero y de viga maestra múltiple [1]. Está compuesto por dos vigas las cuales están construidas básicamente por una plancha y cuatro angulares, además de otros elementos, tal y como se muestra en la Figura 1.

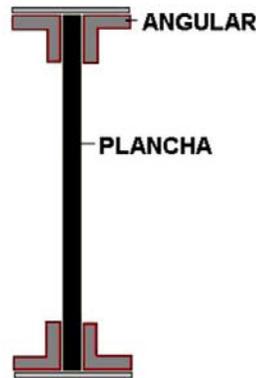


Figura 1 Componentes básicos de la viga

Tanto la plancha como los angulares son los objetos de investigación de este trabajo, es decir, son los materiales a los cuales se les pretende determinar sus características.

Los puentes se construyen de aceros al carbono, conocidos como estructurales, que deben poseer características de resistencia, dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión atmosférica, etc. [2] [3]

### Grado de precisión de los ensayos

Durante la realización de trabajos científicos de investigación el error relativo no debe sobrepasar de un 3 a 5%, para una probabilidad del 95% [4]. A partir del valor de error relativo determinado (definido), se determina el tamaño de la muestra (número de réplicas) (n), necesario para garantizar la requerida precisión en los ensayos.

Para la realización de los experimentos de este trabajo de investigación se decidió partir de un número de muestras  $n=5$  y un error relativo permisible de la muestra entre 1 y 3 % recomendado para investigaciones.

### Elaboración de probetas para la realización de los Ensayos y resultados de los mismos

Para el **Ensayo Químico** las probetas utilizadas fueron cortadas, según lo recomendado por los especialistas que realizan este ensayo, mediante una sierra manual con dimensiones de 30x30 mm aproximadamente. Este ensayo fue realizado utilizando un espectrómetro de emisión atómica marca Spectrum modelo Spectrocast de procedencia alemana [5]. A continuación se muestran los resultados de este ensayo:

#### Angular

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,118	<0,0100	0,527	0,0139	0,0452	0,0232	<0,0100	0,0665	<0,0100

Cu	Nb	Ti	V	Pb	Sn	Mg	Fe
0,105	<0,0100	<0,0100	0,0184	<0,00500	<0,0100	<0,00500	99,01

#### Plancha

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,0974	<0,0100	0,378	<0,00200	<0,00100	0,0277	<0,0100	0,0624	<0,0100

Cu	Nb	Ti	V	Pb	Sn	Mg	Fe
0,154	<0,0100	<0,0100	0,0171	<0,00500	<0,0100	<0,00500	99,19

Por lo general, el contenido de estos elementos tiene los siguientes límites superiores, en %; 0,8Mn; 0,5Si; 0,05P y 0,05S. Si su contenido es mayor, el acero debe considerarse aleado, pero como se pudo observar anteriormente ninguno de los elementos que conforman estos aceros sobrepasa los límites fijados, por lo que se puede afirmar que estamos en presencia de un acero al carbono, con un contenido relativamente bajo de carbono. La plancha posee un contenido de carbono inferior al angular.

Para el **Ensayo Metalográfico**, una vez seleccionada la región de donde se tomará la muestra, se deben tener en cuenta una serie de elementos para realizar el corte como son: la geometría, dimensiones, localización de la región, tipo de material, etc. [6] Se obtuvieron probetas de aproximadamente 10x10x10 a 20x20x20 mm. El ensayo metalográfico se realizó en un microscopio NEOPHOT 32. En las Figuras 2 y 3 se muestran imágenes de la estructura de estos materiales.

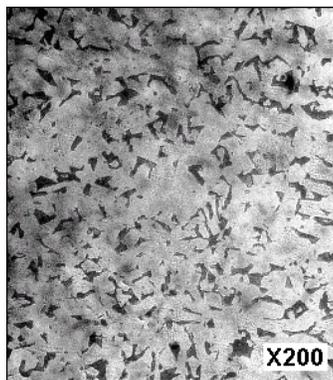


Figura 2 Estructura de la Plancha

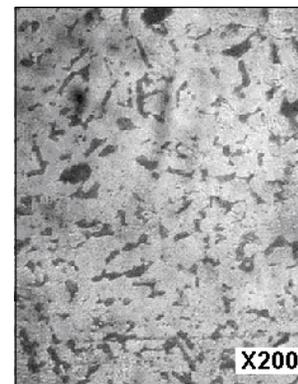


Figura 3 Estructura del Angular

El análisis de estas figuras permite establecer que la estructura de estos aceros está compuesta de ferrita y perlita, o sea, son aceros hipoeutectoides con un por ciento de carbono cercano al 0,20%.

Al comparar estas microestructuras con las microestructuras que se reproducen en la figura 144 del libro Metalografía de P. A. Guliaev [6], se observa tienen correspondencia con la que posee 0,20% de carbono, lo cual se había corroborado anteriormente con el ensayo químico.

Para la realización del **Ensayo de Dureza Vickers** las probetas fueron cortadas manualmente con una dimensión aproximada de 30X30 mm. El ensayo se realizó en un Durómetro Vicker marca Heckert, modelo HMO 10 de fabricación alemana, con una carga de 98,1 N [7]. A continuación se muestran los valores de dureza HV obtenidos en este ensayo:

No. Ensayo	Dureza Vickers, HV	
	Angular	Plancha
1	167	148
2	166	148
3	165	147
4	165	146

Después de hallados los valores, para 4 muestras, se determinó la mediana, obteniendo, para el Angular una dureza Vickers de **165,75 HV**, superior a la Plancha que alcanza **147,25 HV**.

Las probetas para la realización del **Ensayo de Tracción** se realizaron a partir de la norma NC 04-07 “Probetas planas de espesores de 3 mm hasta 50 mm”. Para el caso de la plancha, al realizar las mediciones se obtuvo un valor medio de espesor igual a 10,20 mm y para el angular 13,35 mm. Este

ensayo se realizó en una máquina universal de ensayos marca IBERTEST [8]. A continuación se muestran los resultados de este ensayo:

<b>Plancha</b>			
<b>No. Ensayo</b>	<b>Fuerza Máxima (N)</b>	<b>Fuerza Rotura (N)</b>	<b>Elongación (%)</b>
1	107873.15	88259.85	34,4
2	109834.48	88259.85	36,0
3	109834.48	88259.85	35,4
4	106892.48	88259.85	26,0
5	104931.15	89240.51	26,0
<b>Angular</b>			
1	149061.08	132389.77	21,2
2	144157.75	132389.77	14,8
3	146119.08	135331.77	12,9
4	149061.08	132389.77	29,2
5	156906.4	137293.10	21,2

La fuerza máxima promedio para la Plancha fue de **10 7873,1 N** y para el Angular de **14 9061,1 N**, que son las fuerzas de mayor interés en este trabajo.

Al dividir esta fuerza por el área de la sección transversal de la probeta se obtiene la tensión máxima de tracción, en MPa, es decir:

Para la Plancha:

$$A = a \cdot b = 10.2 \cdot 30 = 306 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{X2} = \frac{P_{\text{promedio}}}{A} = \frac{107813,1}{306} = \underline{\underline{352,5 \text{ MPa.}}}$$

Para el Angular:

$$A = a \cdot b = 13.35 \cdot 30 = 400,5 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{X2} = \frac{P_{\text{promedio}}}{A} = \frac{149061,1}{400,5} = \underline{\underline{372,2 \text{ MPa.}}}$$

El por ciento de elongación promedio de la plancha fue de 31 % y del angular 26 %.

Para la realización del **Ensayo de Impacto** se realizaron probetas según la norma NC- 04-12 “Ensayo de impacto en metales”. Este ensayo fue realizado en un péndulo Charpy. A continuación se muestran los resultados de este ensayo:

<b>No. Ensayo</b>	<b>Valores de Resiliencia (N-m/cm<sup>2</sup>)</b>	
	<b>Plancha</b>	<b>Angular</b>
1	90.22	57.85
2	48.05	35.30
3	71.58	26.47
4	50.01	29.41
5	94.14	32.36

En ambos casos se determinó la mediana y se puede decir entonces que la Plancha posee un valor de Resiliencia de **70,81 N-m/cm<sup>2</sup>** superior al Angular que alcanzó **36,28 N-m/cm<sup>2</sup>**, valores que se corresponden con los % de carbono, es decir, la plancha es más suave, se elonga más, menos resistente y más dúctil, mientras que el angular es más duro, se elonga menos, es más resistente y más frágil.

Todos los equipos y máquinas utilizadas en la realización de ensayos pertenecen a los distintos laboratorios con que cuenta la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, los cuales se encuentran debidamente certificados para el uso por la Oficina Nacional de Normalización.

### Modelación mediante MEF d el Ensayo de Tracción

A los efectos de corroborar aún más los resultados obtenidos en los ensayos se decide realizar la modelación mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) del Ensayo de Tracción.

La modelación se realizó a partir de dibujar las probetas en el software Mechanical Desktop 2004 [9] y exportar dichos dibujos al software COSMOSDesignStar 4.0 [10], creando para este análisis un material específico con las características determinadas durante el Ensayo de Tracción. En la Figura 4 se muestra el modelo con las condiciones de apoyo y de carga empleadas, siendo las mismas ubicadas en las cabezas de las probetas, tanto para la Plancha como para el Angular.

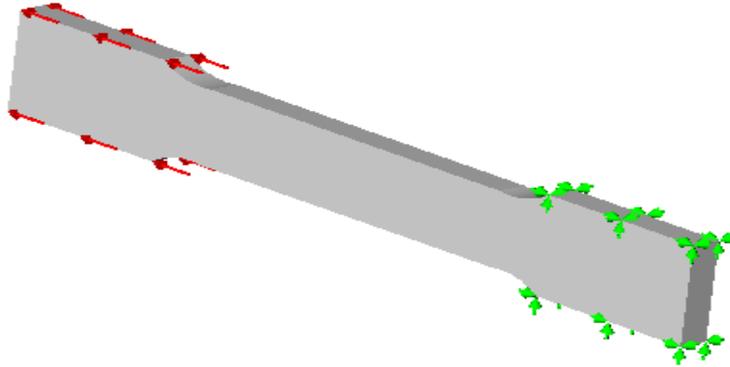


Figura 4 Modelo creado con las condiciones de apoyo y de carga de las probetas para el Ensayo de Tracción.

A continuación, como ejemplo, se muestra una imagen de la distribución de tensiones ( $\sigma_x$ ) obtenidas mediante MEF de la Plancha (Figura 5).

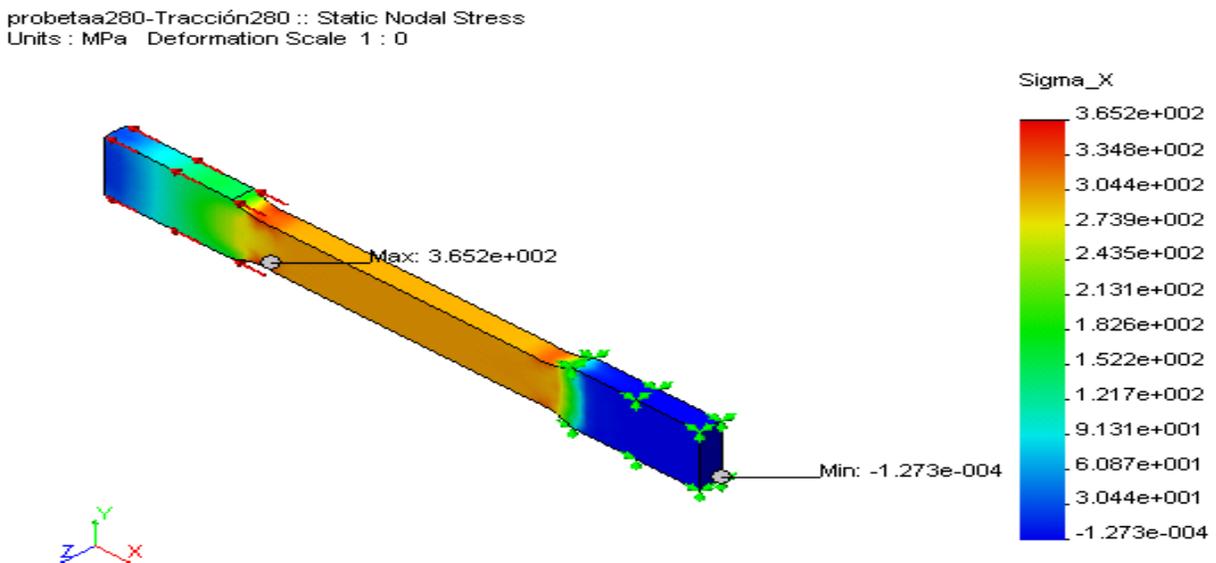


Figura 5 Tensiones equivalentes Von Mises para la Plancha durante el Ensayo de Tracción.

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

Componente de la viga	Tensiones máximas (MPa)		Diferencia, %
	Experimentales	MEF	
Plancha	353	365,2	3,34
Angular	372	384,3	3,20

En la tabla anterior quedó demostrada la precisión de los resultados de los ensayos. La diferencia entre ambos procedimientos puede estar dada al no considerar en el modelo defectos (poros, corrosión, etc.) que tienen las probetas. Hay que recordar que este material está formando parte de una estructura hace más de 100 años. No obstante, es meritorio destacar que el modelo es muy similar a la probeta real. La diferencia entre ambos procedimientos no sobrepasa el 3,4 %, por lo que se pueden catalogar de buenos.

### Clasificación de los materiales

A partir de las propiedades químicas y mecánicas de los materiales del puente ferroviario, determinadas con la realización de los diferentes ensayos y de las propiedades ya conocidas de diferentes aceros actuales recomendados por AISI [11], se lleva a cabo la búsqueda de los aceros actuales que son similares a los ensayados. La misma se realiza con el objetivo de, ante alguna posible reparación del puente, conocer cuales son los aceros actuales similares con los cuales acometer la reparación.

Para lograr una adecuada clasificación, la comparación entre las propiedades fue realizada con la ayuda del software Microsoft Excel 2003. Para ello se decidió comparar los materiales desde dos puntos de vista, es decir, desde el punto de vista de la composición y desde el punto de vista de las características mecánicas como se puede apreciar en las Figuras 6, 7, 8 y 9. Los materiales AISI más parecidos al material de la plancha son el AISI 1008 y el AISI 1010, mientras que los más parecidos al material del angular son el AISI 1012 y el AISI 1015.

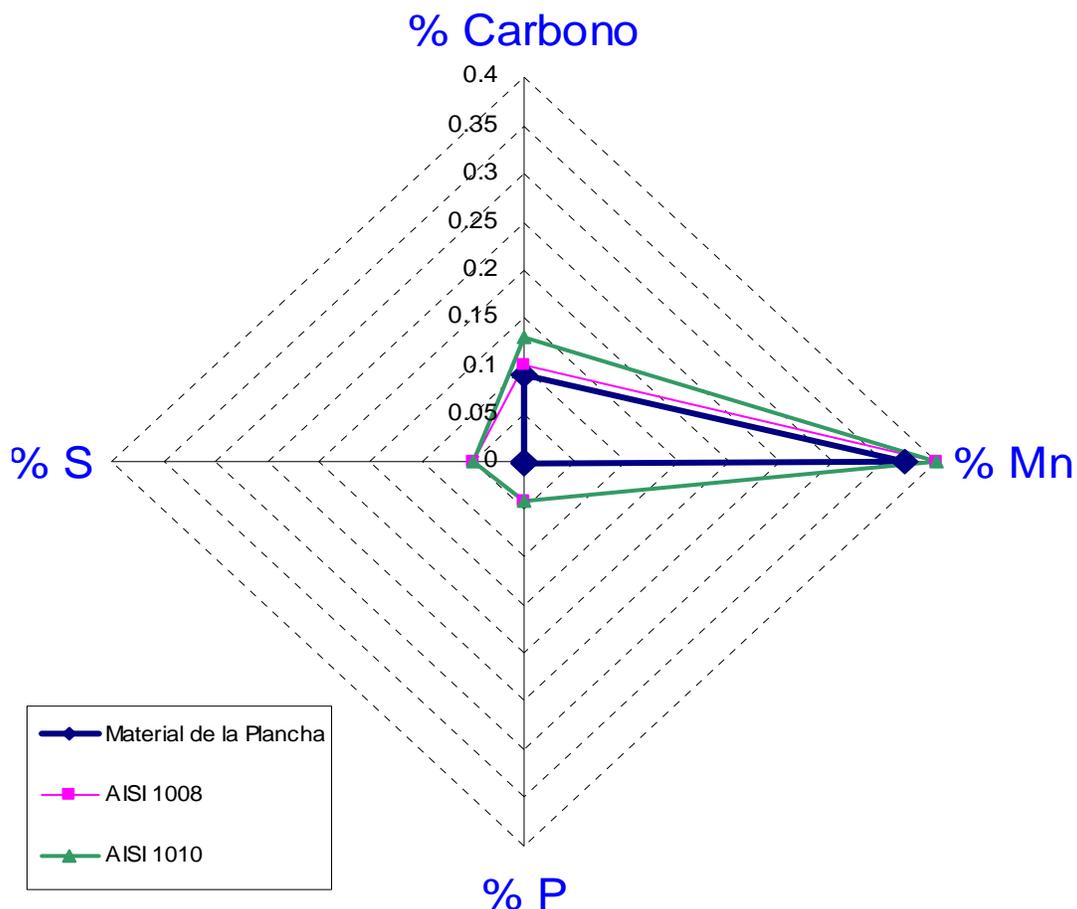


Figura 6 Gráficos de comparación de la composición y las propiedades mecánicas de la Plancha y los aceros AISI 1008 y AISI 1010

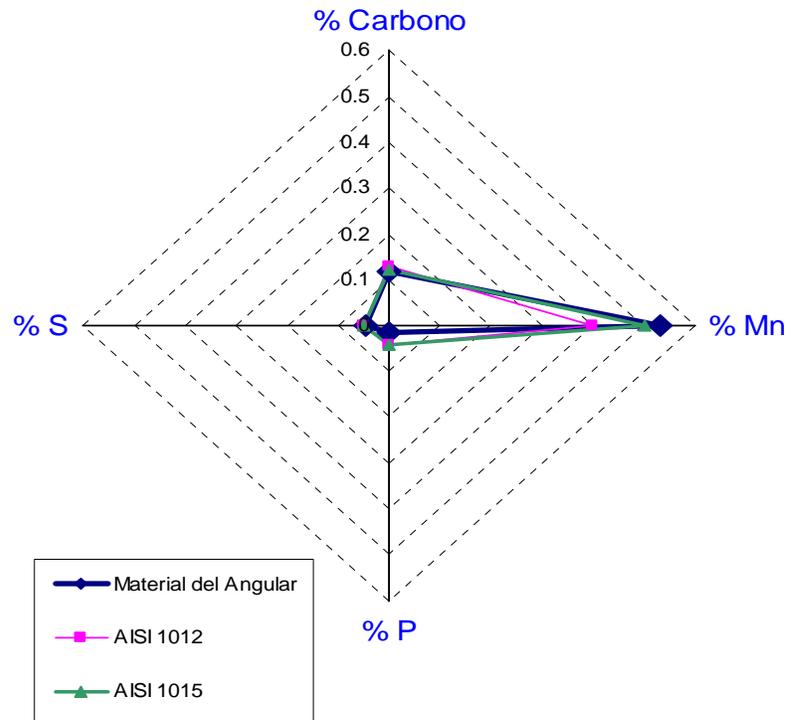


Figura 7 Gráficos de comparación de la composición y las propiedades mecánicas de la Plancha y los aceros AISI 1008 y AISI 1010

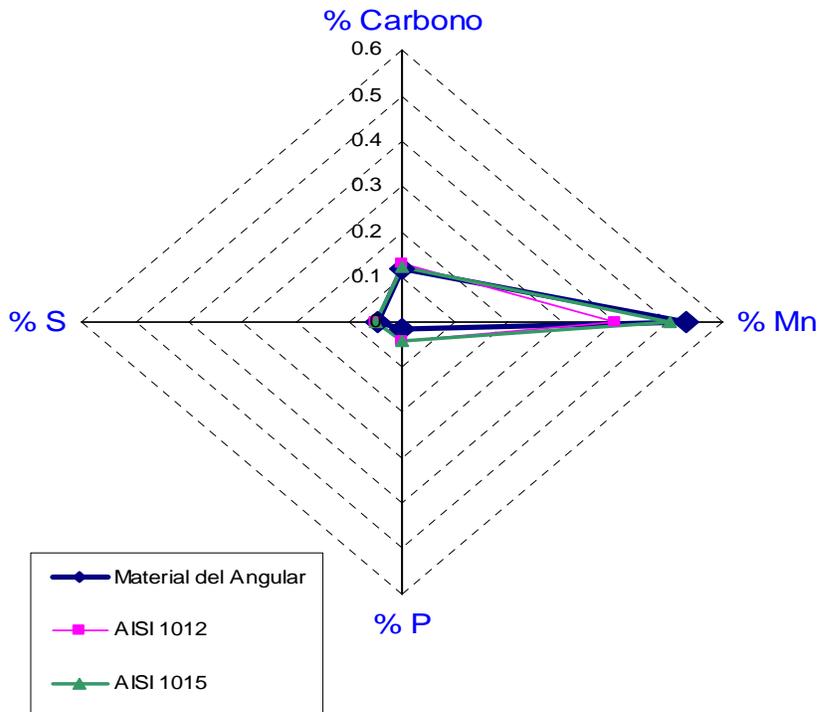


Figura 8 Gráficos de comparación de la composición y las propiedades mecánicas del Angular y los aceros AISI 1012 y AISI 1015

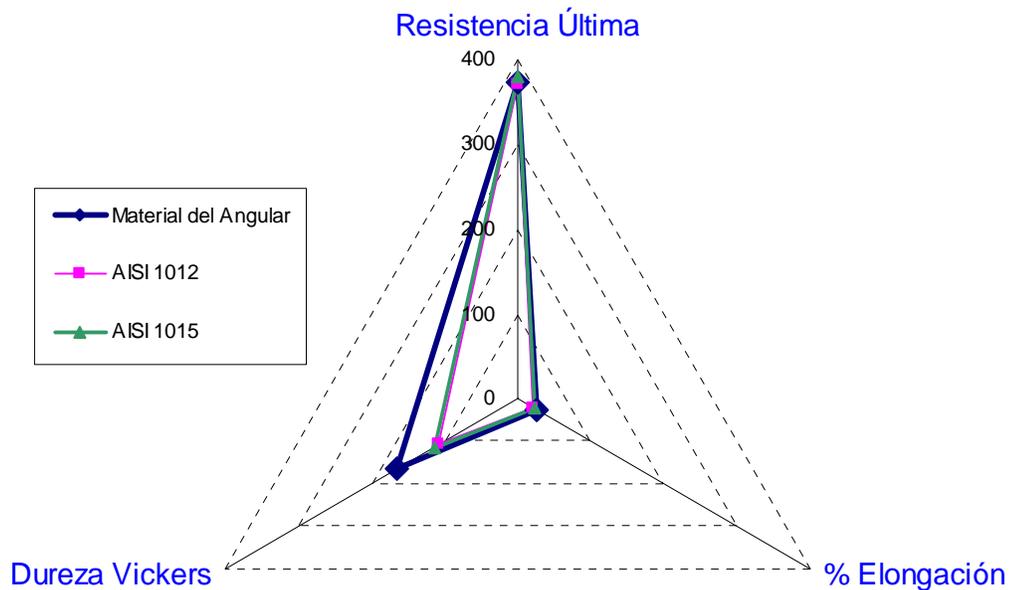


Figura 9 Gráficos de comparación de la composición y las propiedades mecánicas del Angular y los aceros AISI 1012 y AISI 1015

A partir de las comparaciones realizadas, después de analizar detalladamente los gráficos se puede establecer que el material de la Plancha es similar al acero **AISI 1008** y el material del Angular similar al **AISI 1015**.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se emplea un procedimiento de Ingeniería Inversa y además se establece una Metodología para la determinación del material actual, similar al del puente. Otros resultados son:

A partir del Ensayo Químico se logró determinar que el material de la estructura del puente es Acero al Carbono. El Ensayo de Dureza Vickers permitió conocer que la Plancha tiene una dureza de 147 HV y el Angular 165 HV.

A partir del Ensayo de Tracción se determinó que la tensión máxima del material de la Plancha es 353 MPa y la del Angular de 372 MPa. También se determinó que el por ciento de Elongación en la Plancha es 31 % y en el angular 26 %.

El Ensayo de Impacto arrojó que la Plancha tiene de resiliencia  $70,61 \text{ N-m/cm}^2$  y el Angular  $36,28 \text{ N-m/cm}^2$ .

Al comparar los resultados experimentales de los ensayos con los resultados de la modelación, el error, en ninguno de los dos materiales, supera el 3,4%.

Los resultados de los ensayos permiten establecer que el material de la Plancha es similar al acero **AISI 1008** y el del Angular a un acero **AISI 1015**.

## FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS

- [1] <http://www.dtop.gov.pr/act/puentes/Apendice.htm> (Last accessed, 2007)
- [2] <http://www.catskillarchive.com/rrextra/Page0002.html> (Last accessed, 2007)
- [3] <http://www.2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials2.html> (Last accessed, 2007)

- [4] Shirakov V. P.; Manual de Hilandería, Moscú, 1985.
- [5] Calvo, R., Metales y Aleaciones, Ed. I.N.T.A., 1965.
- [6] Guliaev, A. P., Metalografía. Tomo I y II, Ed. MIR, Moscú, 1990.
- [7] <http://www.monografias.com/trabajos14/choque/choque.shtml> (Last accessed, 2007)
- [8] <http://www.ibertest.com/> (Last accessed, 2007)
- [9] <http://www.autodesk.com/> (Last accessed, 2007)
- [10] <http://www.cosmosm.com/> (Last accessed, 2007)
- [11] <http://www.matweb.com/> (Last accessed, 2007)