

Modelación por Elementos Finitos como Método para la Sustitución de Piezas de Acero por Hierro Nodular.

Autores: Dr. Mario Jacas, Dr. Melchor Rodríguez, Dr. Urbano Ordoñez.

Instituto Superior Politécnico Jesé Antonio Echeverría. CUJAE. Marianao, Ciudad de La Habana.
urbano@mecanica.cujae.edu.cu

Resumen:

Dado el nivel de aplicación que ha tenido en los últimos años la sustitución de piezas de acero por hierro fundido nodular, en este trabajo se establece una vía de análisis con el empleo de un software de Elementos Finitos que justifique desde el punto de vista de las propiedades mecánicas de los elementos las posibilidades de sustitución.

El objetivo del presente trabajo es la sustitución de un tope de maquina hormigonera originalmente fabricado de componentes soldados de material AISI 1020 por uno rediseñado con hierro nodular austempleado (ADI), utilizando la modelación por elementos finitos, sobre la base de un análisis lineal estático.

Finalmente, al comparar las tensiones de Von Mises y los desplazamientos originados por la acción de la carga, se pudo observar un mejor comportamiento mecánico en el modelo rediseñado del tope de hierro nodular austempleado (ADI).

Introducción.

El problema de la conversión de piezas originalmente fabricadas de acero en piezas de hierro nodular ha adquirido desde hace años una gran importancia considerando la economía y la funcionabilidad. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, el hierro nodular o dúctil se ha ido acercando paulatinamente al acero hasta tal punto que actualmente los valores de resistencia alcanzado por ciertos tipos de hierros nodulares (ADI) sobrepasan ampliamente a muchos tipos de aceros de bajo y medio carbono y son incluso comparables a los aceros aleados considerados como de alta resistencia. Los costos de producción del hierro nodular son casi un 40% inferior al del acero fundido en la condición "as cast", todo lo cual explica la tendencia creciente al empleo del hierro nodular en lugar del acero en muchas ramas de la construcción de máquinas.

Por otra parte en ciertas aplicaciones como son por ejemplo los vehículos automotrices de casi cualquier tipo abundan las estructuras resueltas muchas veces a través de la soldadura y generalmente a base de unir una serie de elementos hasta formar la pieza soldada. La desventaja en este caso reside en el hecho de que la unión por soldadura de un número dado de elementos implica generalmente complicaciones en el flujo tecnológico de fabricación, problemas relacionados con el surgimiento de tensiones internas etc., sin mencionar la necesidad de tener siempre en cuenta que el acero empleado debe poseer buena soldabilidad.

Se acepta generalmente que la conversión de una pieza soldada en su equivalente fundido brinda ahorros globales en los costos del orden del 40% de aquí que, desde este punto de vista la sustitución es siempre una vía a considerar.

El cambio de una pieza obtenida mediante soldaduras por una fundida se justifica en general cuando se cumplen adicionalmente las siguientes condiciones:

- La variante soldada es tecnológicamente muy compleja
- Su geometría puede obtenerse por fundición
- Las propiedades de ingeniería se pueden garantizar o mejorar con el material sustituto y la solución se justifica por razones económicas.

Normalmente los componentes se diseñan considerando los esfuerzos de fluencia teniendo en cuenta además un factor de seguridad. Generalmente la resistencia a la tracción de la pieza soldada es solo una fracción de la del material sustituto.

Esto es una consecuencia de las alteraciones geométricas introducidas por el proceso de soldadura, y que producen efectos adicionales como lo son la presencia excesiva de concentradores de tensiones con la consiguiente disminución de la resistencia a la fatiga, la aparición de tensiones internas etc.

Por estas razones puede esperarse el fallo del elemento soldado a cargas incluso inferiores al límite de fluencia. Adicionalmente los esfuerzos residuales son comunes en las piezas soldadas, pudiendo inclusive sobrepasar la tensión de fluencia del material.

Esto puede originar pandeos en las piezas al disminuir los espesores durante el maquinado.

En la variante obtenida por fundición los problemas mencionados están bastante minimizados. Las tensiones internas en las piezas fundidas son despreciables siempre que se enfríen adecuadamente.

Bases para la selección de los materiales.

La selección de los materiales consiste en última instancia en la combinación más adecuada de factores como el comportamiento durante el servicio, la facilidad de fabricación, el costo y la disponibilidad. No obstante estos factores cambian constantemente e incluso varían en dependencia del área de uso del material.

Por ejemplo en algunas aplicaciones claves como la industria aeronáutica y la aeroespacial, la variable peso es decisiva cuando se comparan materiales de similar comportamiento mecánico.

En cualquier caso la sustitución de un material por otro lleva siempre implícito un proceso de revisión sistemática del acoplamiento más ventajoso entre los materiales y su aplicación específica. En ciertos casos la sustitución implica encontrar el mejor material para una aplicación dada; en otros el problema consiste en rediseñar o desarrollar la aplicación para hacer un mejor uso de los materiales disponibles.

Una vez resueltos los problemas de funcionalidad tecnológica inherentes al cambio de un material por otro, queda entonces el problema básico de garantizar la igualdad en el comportamiento mecánico.

La ventaja del uso de las técnicas de elementos finitos en este caso consiste en que es posible, a partir del rediseño de la pieza fundida simular el comportamiento mecánico de esta para cualquier condición de carga si se cuenta con un Software adecuado.

El requerimiento básico es conocer de la forma mas completa posible las propiedades mecánicas del material para cualquier condición requerida de tratamiento térmico.

El ejemplo que se presenta para mostrar el método de solución es el de un tope de un camión-hormigonera, originalmente fabricado a partir de elementos soldados [1] de acero AISI 1020 el cual se intenta sustituir por uno fabricado de hierro nodular austemplado (ADI).

Es por lo anteriormente planteado que el Grupo de Modelación e Ingeniería de Materiales del Departamento de TCM de la CUJAE se dio a la tarea de diseñar modelos de tope con materiales diferentes y comprobar su comportamiento bajo las mismas condiciones de carga usando el programa de Elementos Finitos ALGOR [2] en un análisis lineal estático valorando el comportamiento y valores de esfuerzos equivalentes de Von Mises y desplazamientos. En nuestro caso tomaremos como ejemplos de estudio la pieza soldada de AISI 1020, así como la pieza rediseñada de hierro fundido nodular austemplado figura 1.

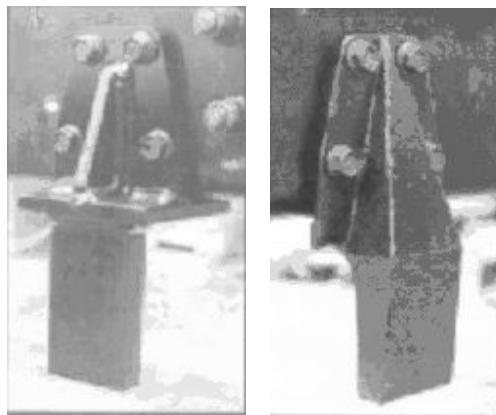


Fig. 1 Tope soldado y fundido respectivamente

Objetivos:

El objetivo del presente trabajo es la sustitución de un tope de maquina hormigonera originalmente fabricado de componentes soldados de material AISI 1020 por otro rediseñado con hierro nodular austemplado, utilizando la modelación por elementos finitos.

Para el análisis por elementos finitos serán empleados; el concepto de mecánica del continuo para definir los estados tensionales, deformacionales y su relación, y el principio de los trabajos virtuales para derivar las ecuaciones de elementos finitos.

Modelo de Elementos Finitos.

En el modelo de elementos finitos la pieza será discretizada empleando elementos tipo “brick”, los cuales son elementos 3D de 8 nodos. El análisis para evaluar el comportamiento de la pieza sometida a cargas estáticas será lineal y se asume que el material es elástico. Para el sistema de carga y los materiales analizados se considerará la tensión de fluencia como punto crítico de carga.

Para el análisis por elemento finito se definió para cada elemento:

- Las relaciones de los desplazamientos en el interior del elemento con los desplazamientos en los nodos, definiendo las funciones de forma del elemento N.



- Las relaciones entre las deformaciones y los desplazamientos, estableciendo la matriz de relación deformación-desplazamiento B.
- La relación tensión-deformación de acuerdo con la ley constitutiva del modelo material, en este caso lineal elástico.
- Por último se aplica el principio de los trabajos virtuales para dar solución a la condición de equilibrio en cada elemento y en el conjunto de elementos de la pieza discretizada.

Las tensiones y las deformaciones del elemento son relacionadas mediante la relación de estado, para análisis lineal y material isotrópico como

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (1)$$

En la anterior expresión $\{\sigma\}$ es el tensor de tensiones y $\{\varepsilon\}$ el tensor de deformaciones, la matriz [D] es la matriz constitutiva o de relación tensión-deformación, la cual para un material isotrópico depende del módulo de elasticidad del material E y del coeficiente de Poisson ν . [D] es una matriz simétrica de 6x6 para un elemento.

La matriz de rigidez K para el elemento 3D de 8 nodos se deriva por el método de mínima energía potencial y el principio de los trabajos virtuales,

Aquí la energía potencial es dada por

$$\pi_p = U + \Omega_p \quad (2)$$

Donde:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (3)$$

La energía potencial de las fuerzas nodales es

$$\Omega_p = -\{d\}^T \{P\} \quad (4)$$

El principio de los trabajos virtuales establece que:

$$W_{int} = W_{ext} \quad (5)$$

donde

W_{int} es el trabajo de las fuerzas internas

W_{ext} es el trabajo de las fuerzas externas

Sustituyendo obtenemos

$$\int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = f \quad (6)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior por las relaciones deformación desplazamiento y por la relación tensión deformación obtenemos

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} = \{f\} \quad (7)$$

De la anterior ecuación se obtiene la matriz de rigidez



$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (8)$$

La ecuación (8) es la matriz de rigidez, la cual contiene toda la información geométrica del elemento y de las propiedades del material. Sustituyendo (8) en (7) se obtiene la ecuación de elementos finitos para el análisis lineal elástico en forma abreviada

$$[K]\{d\} = \{f\} \quad (9)$$

Donde:

$[K]$ es la matriz de rigidez

$\{d\}$ es el vector de los desplazamientos

$\{f\}$ es el vector de fuerzas

Propiedades Mecánicas de los Materiales:

En la tabla I se presentan los valores de las propiedades mecánicas de los materiales analizados. [4]

Tabla I Propiedades Mecánicas de los Materiales

Propiedades	Acero AISI 1020	H F Nodular Austemplado (ADI)
Módulo de Elasticidad $[N/mm^2]$	200000	169000
Densidad de Masa $[N s^2/mm^4]$	0.0000381	0.0000074
Coefficiente de Poisson	0.3	0.275
Límite de Fluencia $[N/mm^2]$	380	480

Creación del Modelo de Elementos Finitos:

Como primer paso, y debido a la geometría del tope, se realizaron los modelos digitales en el programa CAD: *Mechanical Desktop*5. los que fueron exportados con extensión .IGES para el software ALGOR

Análisis de Convergencia:

En cualquier tipo de análisis realizado mediante elementos finitos, la precisión de los valores a obtener está en una relación directa con la discretización (cantidad de elementos) en que ha sido dividido el modelo. Este análisis de incremento de precisión de los valores a obtener se lleva a cabo a través de las pruebas de convergencia. [2; 3]

Para el análisis de convergencia se tomó el modelo correspondiente al de la pieza fundida de hierro nodular austemplado (ADI), al que se le aplicó la carga distribuida de 4000 N y se consideró restringido de rotación y traslación de los tres ejes coordenados, en los bordes, de las superficies superior e inferior de los agujeros de fijación.

Se realizaron siete mallados con diferentes concentraciones de elementos cuyos números varían desde los rangos de 3000 hasta 9000 y cuyos datos se muestran en la tabla II y Fig.2. El material fue considerado con comportamiento isotrópico y elementos

Tipo "brick".

Tabla II: Resultados experimentales hierro fundido nodular austemplado (ADI) con esfuerzos de Von Mises.

Prueba	No. Elem.	Esfuerzo de Von Mises (Mpa)	Nodo	Tiempo (min)
1	3324	148.64	29	0.615
2	3932	140.82	249	1.214
3	7064	152.62	326	1.403
4	7985	171.78	432	1.417
5	8263	138.94	427	2.283
6	8874	163.96	450	2.642
7	9246	169.72	58	2.457

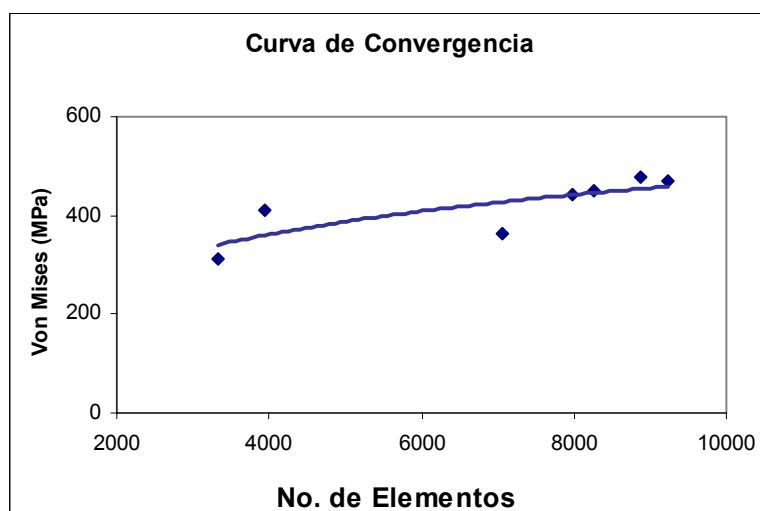


Fig. 2 Gráfico del comportamiento de los esfuerzos de Von Mises contra el Número de Elementos

De la prueba de convergencia se determina que la discretización óptima del modelo para garantizar una mayor precisión de los resultados es de 9000 o mas elementos, o sea la zona del grafico donde un incremento del número de elementos no implica una variación significativa de los valores de tensiones.

En la tabla III y figura 3; 4, se presentan los resultados de los análisis de tensiones de Von Mises y desplazamientos máximos obtenidos de la corrida de los modelos soldados de acero AISI 1020 y hierro fundido nodular austemplado respectivamente (ADI) bajo las mismas condiciones de carga.

Tabla III: Resultados experimentales del modelo de acero AISI 1020 y Hierro Fundido (ADI).

Análisis	No. Elem.	Tensiones de Von Mises (MPa)	Desplazamientos Máximos (mm)
AISI 1020	10391	298.11	0.3762
H. F. ADI	9246	169.72	0.1077

Análisis de Resultados:

- Del análisis de la tabla II y las figuras 3 se observa que el valor de las tensiones equivalentes de Von Mises resultan menores en el modelo de **H. F. ADI** que en el modelo soldado de acero **AISI 1020** y que el nivel de zonas concentradoras de tensiones es muy superior en el segundo caso.
- En otro orden de cosas los valores de desplazamientos obtenidos como consecuencia de la aplicación de las fuerzas figura 4, resulta mayor en el modelo de acero **AISI 1020**. No obstante en este último aspecto influyen las diferentes configuraciones geométricas de las piezas.
- De los resultados obtenidos se puede establecer las posibilidades de sustitución en casos como el analizado de algunos tipos de aceros por materiales como el hierro fundido nodular austemplado (ADI) dadas sus ventajas de buenas propiedades mecánicas y bajo costo, siempre y cuando los costos del proceso de producción lo justifiquen.

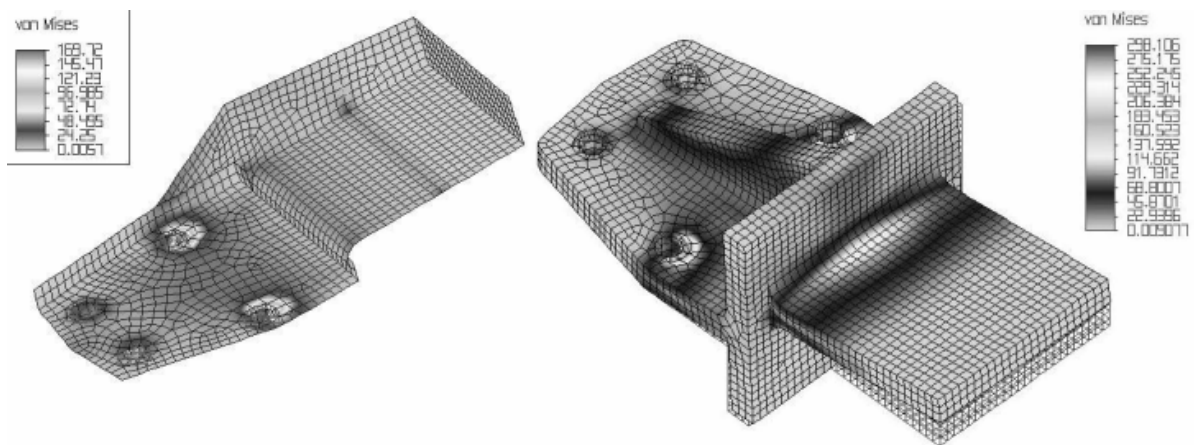


Fig. 3 Análisis de tensiones equivalentes Von Mises de las piezas de H.F. ADI y de acero AISI 1020

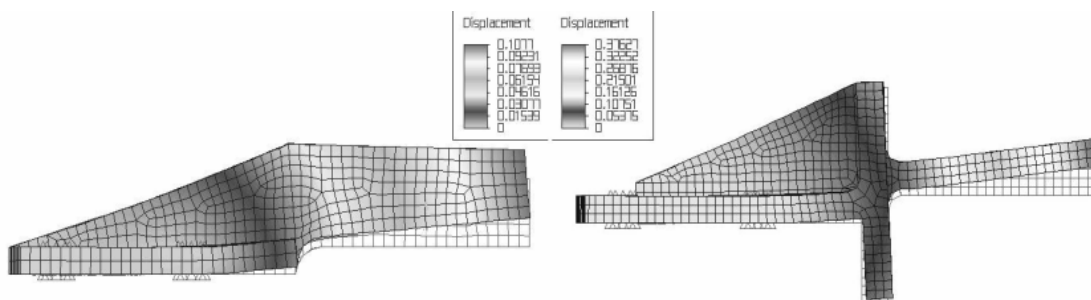


Fig. 4 Análisis de desplazamientos las piezas de H.F. ADI y de acero AISI 1020

Conclusiones:

- 1- Basándose en la modelación por elementos finitos se puede asegurar que la sustitución de un tope de acero AISI 1020 por otro de Hierro Fundido Nodular Austemplado (ADI) es posible, siempre que se justifique económicamente según el tipo de producción.



- 2- Del presente trabajo se deriva la posibilidad de establecer una metodología para la sustitución de un material por otro de mejor comportamiento mediante la modelación por elementos finitos.

Bibliografía

- [1] Hathaway Robert M. Converting Steel Weldments to Ductile Iron Castings. Modern Casting Magazine. 26, 27. Marzo 1995. (en ingles)
- [2] Programa de Elementos Finitos ALGOR. 12. 1999.
- [3] Programa de Elementos Finitos ANSYS 6.1. 2002
- [4] Yoslaydis Rodríguez. " Metodología para Predecir la Formación de Grietas en el ADI Sometido a Fatiga de Contacto". Trabajo no publicado Dpto. TCM. CUJAE. Ciudad de La Habana. 2003.