

# **REPARACIONES ESPECIALES EN EJES PARA MOLINOS DE CAÑA**

José Jair Sánchez Aguirre, [jsanchez@fundicionesuniverso.com](mailto:jsanchez@fundicionesuniverso.com)  
Edgar Luis Díaz Luna, [ediaz@fundicionesuniverso.com](mailto:ediaz@fundicionesuniverso.com)  
Departamento de Ingeniería, Fundiciones Universo S.A.  
Cali, Colombia.

## **INTRODUCCION**

El presente trabajo pretende ilustrar algunos métodos empleados para la recuperación de ejes de molinos de caña que por diversas razones se han partido, están fisurados ó han llegado a una condición de extremo desgaste que les impide ser utilizados en las mazas del molino. Se trata de ofrecer una alternativa al Ingenio que le permita rehabilitar un repuesto de un alto valor económico, la otra opción es comprar un eje nuevo importado que se puede tardar varios meses para llegar a la fabrica.

Desde hace algunos años, las tecnologías modernas permiten cumplir procedimientos confiables para soldar ejes en acero 1045, lo novedoso es aplicar conceptos de ingeniería mecánica y un software especializado para realizar uniones de ejes partidos. En cualquier caso siempre se debe hacer un análisis del costo de la reparación contra el valor del eje nuevo para justificar la decisión.

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

Los ejes para los molinos de caña representan activos fijos para los Ingenios Azucareros por su extensa vida útil. Su tamaño y método de producción implica que solo se construyen en grandes forjas de algunos países industrializados, esta condición se traduce en altos costos con amplios tiempos de fabricación y entrega. La mayoría de ejes se fabrican en acero 1045 forjado y normalizado, regularmente sus diámetros exceden los 530 milímetros con longitudes hasta de 5 metros, pesan alrededor de 10 toneladas y pueden costar entre \$ 30.000 y 50.000 dólares.

Algunas zonas expuestas al jugo de la caña pueden propiciar grietas profundas por corrosión. Deficiencias en los sistemas de lubricación y enfriamiento producen desgastes severos ó catastróficos sobre los guijos ó muñones (figura 1). Las permanentes cargas combinadas de tensión y compresión generan fatiga del material. Es frecuente encontrar ejes con fisuras profundas en las zonas críticas: radios internos de los muñones y vértices del cuadrado para acoplar la transmisión, en muchas ocasiones estas fisuras terminan partiendo el eje en dos pedazos. También es frecuente ver ejes partidos en su parte central ó en los bordes del casco.

En Fundiciones Universo hemos desarrollado diferentes métodos de reparación de ejes desde la reconstrucción de zonas con excesivo desgaste ó fisuras muy profundas hasta el armado de un nuevo eje a partir de dos pedazos de eje fracturados. La reparación es

compleja por el gran tamaño del eje que dificulta seguir el procedimiento establecido para reconstruir piezas en acero 1045, se requieren equipos y dispositivos especiales para cumplir minuciosamente las normas exigidas en esta clase de aplicaciones con soldadura. La unión de dos partes separadas (embone) demanda cálculos de ingeniería para garantizar que se obtendrá la mayor resistencia mecánica de cada una de las dos partes que se están uniendo.

El principal requisito para soldar acero 1045 es garantizar la temperatura exigida de acuerdo a la clase de soldadura utilizada. En Universo aplicamos soldaduras en alambres Lincoln con tecnología de arco sumergido, precalentamos y mantenemos la temperatura entre 250 y 300 °C utilizando varios quemadores con una red de gas natural que permite mantener la temperatura durante toda la reparación (figura 2). Al final aliviarnos tensiones en un horno a gas natural calentando gradualmente hasta 650 °C y enfriando controladamente hasta la temperatura ambiente.

Para unir dos tramos de eje diseñamos un embone hembra-macho de tal manera que las secciones transversales de ambos tengan la misma resistencia mecánica (figura 3).

Los embones que estarán cubiertos por otra pieza, que les evita la carga de flexión, solo se calculan bajo cargas de torsión, es el caso de las uniones de cuadrantes y de los ejes partidos en la parte central. En el primer caso están protegidos por el piñón de transmisión y en el segundo por el casco de la maza. Resulta más crítico el embone de cuadrante que se hace intencionalmente desde el sitio del piñón para evitar la carga de flexión y lograr la ayuda que le proporciona la cuña ó chaveta de arrastre del piñón (figura 4). Utilizamos la teoría del esfuerzo cortante máximo para igualar las secciones resistentes al torque y así calculamos la circunferencia óptima que corresponde al diámetro exterior del inserto macho y al diámetro interior del inserto hembra (figura 5).

$$\tau_s = \frac{T \cdot R_s}{J_s}$$

$\tau$  = Esfuerzo cortante

$r_1 = r_2$

$T$  = Torque

$R$  = radio

$J = \frac{1}{2} \pi (R_1^4)$  Momento polar de inercia embone macho

$J = \frac{1}{2} \pi (R_1^4 - R_2^4)$  Momento polar de inercia embone hembra

Los embones que no están cubiertos por otra pieza deben ser calculados bajo cargas combinadas de flexión y torsión e involucran resistencia a la fatiga (figura 6).

En ambos casos realizamos una simulación computarizada de las cargas y empleamos un software que calcula esfuerzos mecánicos por elementos finitos (figura 7), el resultado final arroja un factor de seguridad que mide el grado de confiabilidad del embone.

El ensamble se hace en caliente con ajuste de interferencia para conseguir el máximo apriete que resista el material de acero, esto garantiza que las dos partes se comportan como una sola para soportar las cargas de flexión y torsión. Además de prever amplios radios para minimizar los concentradores de esfuerzos entre las dos partes, se tornean biseles en doble “j” para unir con soldadura las superficies exteriores, el procedimiento es el mismo que describimos anteriormente con arco sumergido (figura 8).

El embone más frecuente es el de cuadrante porque las superficies se aplastan hasta perder considerablemente la planitud de las cuatro caras, porque se presentan múltiples fisuras en los vértices ó simplemente porque se rompe todo el cuadrante. Esta alternativa es especialmente útil cuando se logra recuperar no solo el eje sino también el casco superior. De la misma manera es viable insertar un cuadrante nuevo en un eje que no lo tiene para habilitarlo como eje superior. A la fecha se han realizado con éxito cerca de 50 embones de cuadrante para más de una decena de Ingenios Azucareros, el costo oscila entre un 20 y 30% del valor del eje nuevo.

Otra importante cantidad de embones se están realizando en los ejes que requieren modificarse para instalar motores hidráulicos y transmisiones independientes como los modernos sistemas planetarios (figura 9).

Uno de los embones más sencillos y económicos se realiza al unir el eje en la parte central debajo del casco. La amplia superficie y el ajuste de interferencia reducen al máximo los esfuerzos de flexión y torsión en la unión, de hecho podría omitirse la unión soldada entre las dos partes. La única exigencia es garantizar la distancia entre centros de los guijos ó muñones y el alineamiento entre las dos partes ensambladas. Esta solución es muy útil para armar un eje de dos pedazos de ejes partidos, muy frecuente en todos los Ingenios azucareros, su costo puede ser inferior al 15% del valor del eje nuevo.

## **CONCLUSIONES**

Es posible recuperar los ejes de las mazas de los molinos de caña ante la presencia de fisuras, desgastes severos e incluso cuando se han partido. Es indispensable cumplir estrictamente los procedimientos de reparación con soldaduras correctamente seleccionadas.

Las uniones soldadas en los ejes serán eficaces en la medida en que se identifiquen mecánicamente las cargas que inciden en la zona comprometida. Un análisis de ingeniería es fundamental para establecer los diferentes esfuerzos que afectan los ejes durante la molienda y calcular el factor de seguridad resultante de un embone ó transformación.

Es preferible hacer las uniones donde se minimicen los esfuerzos por flexión. Los embones son más seguros cuando se realizan en zonas que luego estarán cubiertas ó

protegidas por una pieza de ensamble, esto sucede en la parte central debajo del casco y en los apoyos de los elementos de transmisión.

La decisión de reparar ó comprar un eje nuevo depende no solo del valor de una opción frente a la otra sino también de la disponibilidad del material para fabricar un eje nuevo. Sin duda el análisis económico es muy favorable para la reparación cuando se embona un cuadrante y de paso se logra salvar un casco superior. También se obtienen ganancias al armar un eje nuevo a partir de dos pedazos de eje partidos.

## **BIBLIOGRAFIA**

Shigley, J.E, Diseño en Ingeniería Mecánica, octava edición.

## **REFERENCIAS**

Algor ® Versión 19.

Solidworks ® Premium Versión 11.



Figura 1. Desgaste severo en un muñón por falta de lubricación.



Figura 2. Equipo para calentamiento de ejes con gas natural.



Figura 3. Preparación de eje para embonar cuadrante. A la izquierda agujero hembra, a la derecha inserto macho.

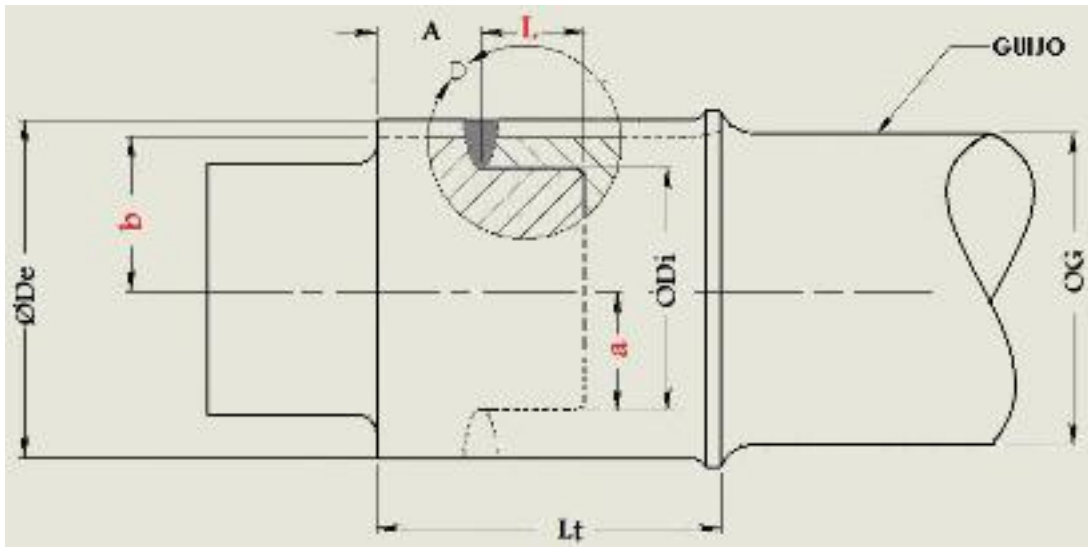


Figura 4. Embone protegido por el piñón de transmisión y la cuña.

Interferencia diamétrica		$I$	0,01001	0,00001 a 0,0001 de Jostes
<b>EMBONE HEMBRA</b>				
[r1]	Radio exterior	$b$	0,75	Radio o radio de b. canal
[r1]	Radio interior	$a$		Superficie $J_1=0,0001008$
[r1]	Profundidad hueco	$L$	7	
[r1d]	Fresado interno	$P$	0,00474599	
[r1d]	Módulo de flexión	$B$	$2,90F+70$	
	Coeff. poisson	$\nu$	0,29	
	Coeff. de expansión	$\alpha$	0,5	
[r1]	Exposición	$h$	0,75	
	Coeficiente de radio interno	$D_1$	$1,33250$	
<b>EMBONE MACHO</b>				
[r2]	Radio exterior	$a$	7,0000	
[r1d]	Módulo de flexión	$B$	$2,90F+70$	
	Coeff. poisson	$\nu$	0,29	Para el eje
[r2d]	Fresado de ajuste	$P$	0,00474008	7,000000
[r2]	Coeficiente de radio externo	$D_2$	$1,33250$	7,000000
Torque transmitido a través del eje		$T_e$	6,266,068	Nm

Torque de diseño		$T$	10,914,548
<b>EMBONE HEMBRA</b>			
[r1]	Radio exterior	$b$	0,75
[r1]	Radio interior	$a$	
[r1]	Módulo de flexión	$B$	$10,914,548+21$
[r1d]	<b>TORQUE MÁXIMO</b>	$T$	$4,227,311,995$
<b>EMBONE MACHO</b>			
[r2]	Radio exterior	$a$	7,00000
[r1]	Módulo de flexión	$B$	$217,145,1981$
[r1d]	<b>TORQUE MÁXIMO</b>	$T$	$15700,42674$
Torque de entrada		$T_{in}$	10,914,548
Torque en el eje		$T_e$	298,577
Torque Máximo interno		$T_{e1}$	4,744,569
Torque Máximo externo		$T_{e2}$	26,762
Torque transmitido al eje		$T_e$	5,969,679

Figura 5. Calculo de embone de un cuadrante bajo cargas de torsión.

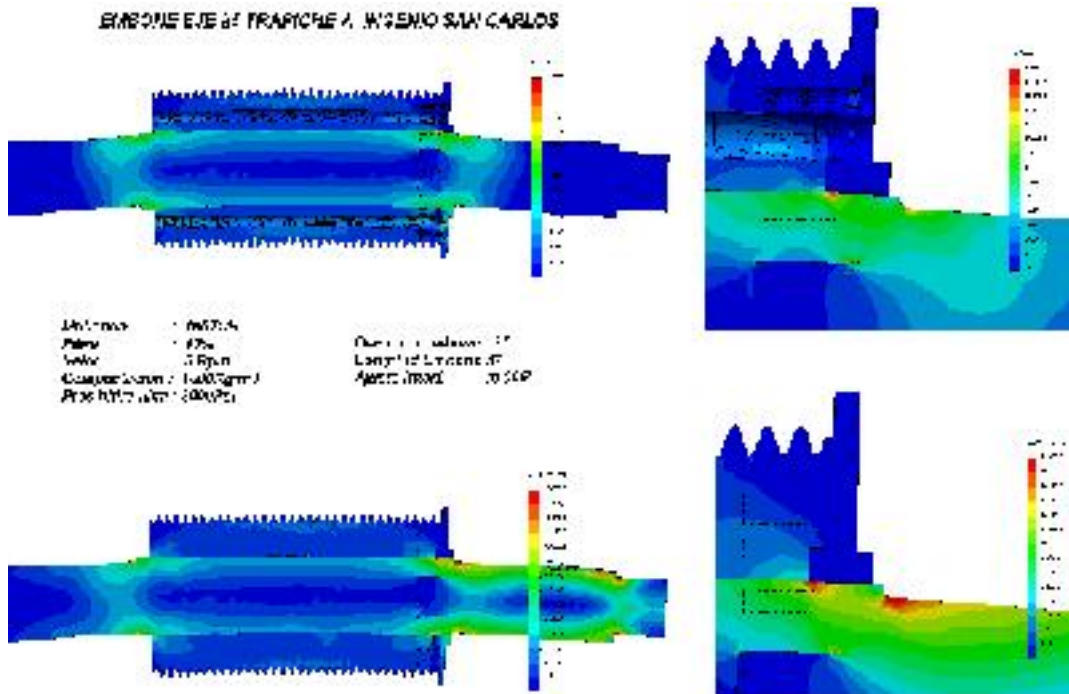


Figura 6. Embone de un eje en el borde del casco, cargas de flexión y torsión.

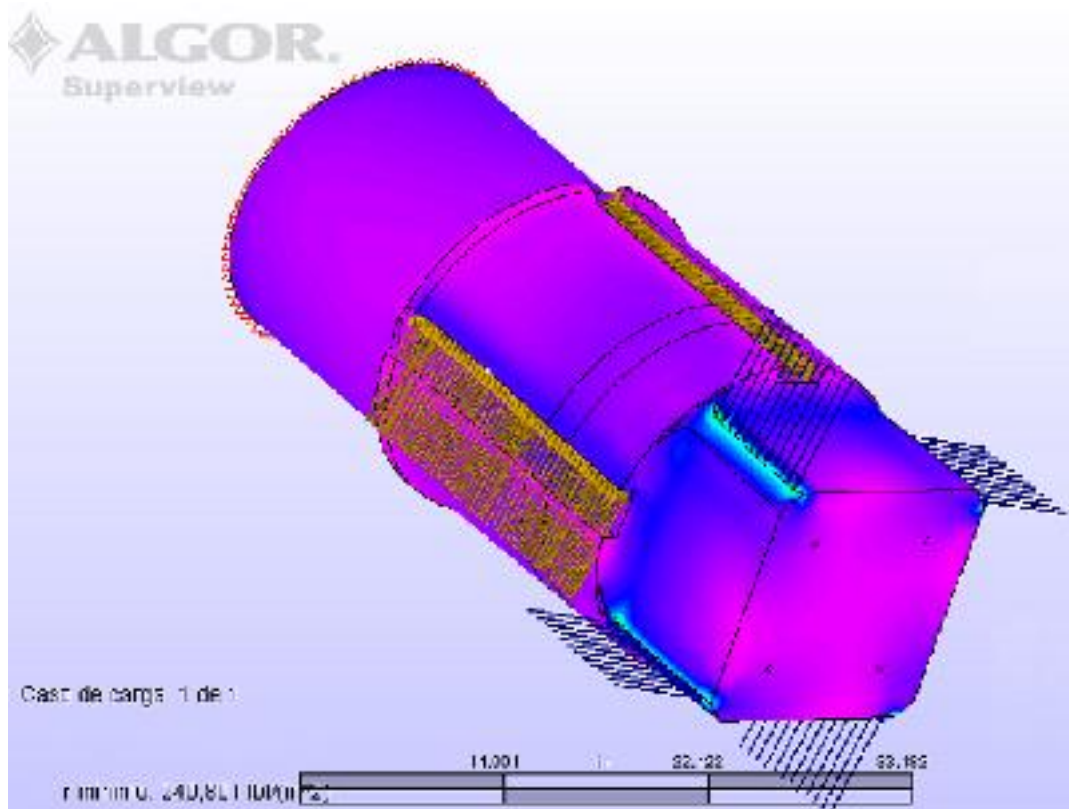


Figura 7. Análisis de elementos finitos para calcular esfuerzos en zonas críticas.

