

FABRICACIÓN DE GRANDES EJES DE ROTOR PARA GENERACIÓN HIDRÁULICA

MANUFACTURING OF HUGE HYDRAULIC ROTOR SHAFTS

Recibido: 26/10/07

Aceptado: 14/01/08

Javier Tezanos Díaz
Ingeniero industrial
Sidenor I+D

Manu Llanos Ruiz
Ldo. Ciencias Químicas
Sidenor I+D

RESUMEN

Sidenor Industrial ha fabricado seis ejes de gran tamaño para la planta de generación eléctrica de la presa de Las **Tres Gargantas**, en **China**. Como se sabe, ésta es la planta hidroeléctrica más grande del mundo, con una capacidad de generación de energía de cada generador de 840 MW.

Como suele ser habitual, los proyectos que se escapan de lo normal van acompañados de importantes desarrollos tecnológicos hasta en los detalles que en principio no se habían previsto y que son los que hacen que la humanidad avance. En concreto, los principales retos que se presentaron a **Sidenor** han sido la forja, la soldadura y el mecanizado de esos grandes diámetros (4.120 mm),

Todas las operaciones de esta fabricación, cuyos procesos se detallan en este artículo, se llevaron a cabo en la fábrica que **Sidenor** posee en **Reinosa**.

Palabras clave: Generación hidroeléctrica, forja de grandes piezas, soldadura de grandes espesores.

ABSTRACT

Sidenor Industrial has manufactured six very big Lower Shafts for the Three Gorges Hydraulic Power Plant in the Yangtze River at the Yichang dam in China. As it is known, this will be the biggest hydropower station all over the world as the performance of each generator set will be 840 MW.

The main challenges for SIDENOR have been Forging and welding such big components as well as machining very large diameters (4120 mm).

All manufacturing operations, whose detailed fabrication processes are shown along the paper, were carried out at SIDENOR REINOSA Works.

Key words: Hydroelectric generation, big pieces forging, welding of very thick parts.

1. INTRODUCCIÓN

China es un país en plena evolución, cuya demanda de energía se está incrementando exponencialmente. Esto, unido a las fuertes inundaciones que se producían en el río **Yangtze**, que se llevaban la vida de más de

mil personas al año, movieron al gobierno Chino a construir una gigantesca presa, de 185 m de altura y 2,3 km de largo, con la que se formará un pantano, de 630 km de longitud y 1,3 km de ancho medio, que cubrirá una serie de cañones y valles, desplazando más de un millón de personas.

En la presa se van a instalar 36 turbinas Francis (24 en una primera fase y 12 en la segunda), que generarán una potencia de 700 MW (770 MW nominales, con un máximo de 840 MW) cada una (más que la C.N. de Santa M^a de Garoña). Esto significa una producción de energía de 84,7 TW.h/año, que representa la décima parte de la demanda de **China**.

Las piezas necesarias para estos generadores son también de un tamaño nada común comparado con las dimensiones habituales hasta el momento. **Sidenor** recibió el encargo de fabricar 6 ejes inferiores en su fábrica de **Reinosa**. Se trata de ejes

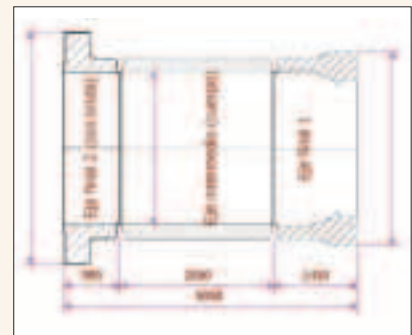


Fig. 1: Partes del eje inferior.

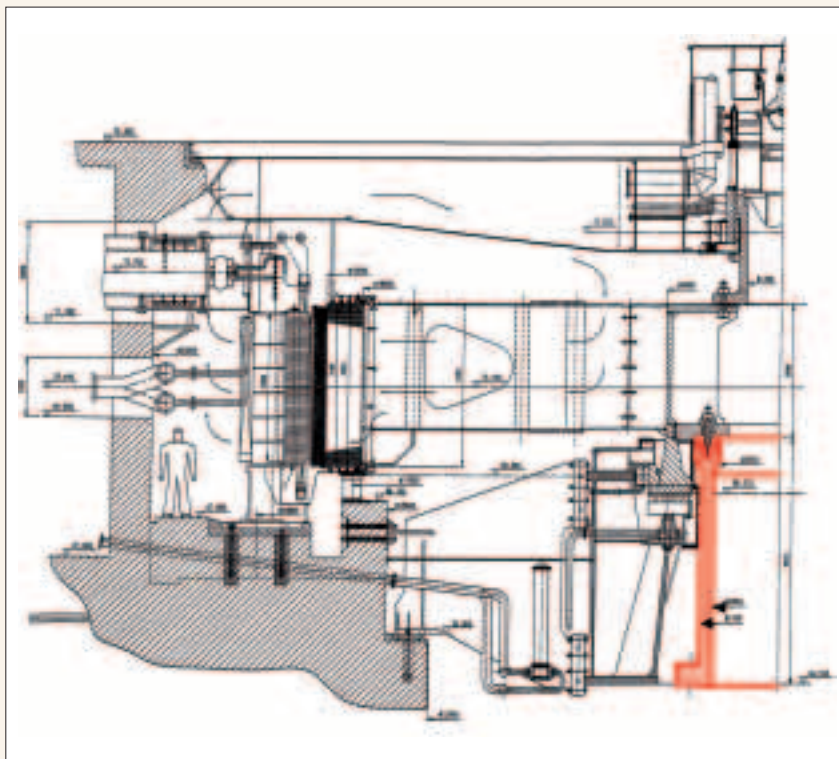


Fig. 2: Situación del Eje Inferior, en el conjunto del generador.

huecos compuestos por tres partes que finalmente van soldadas (Fig. 1). La posición de esta pieza en el generador es la representada en la Fig. 2. En la parte inferior de esta pieza va acoplado el sistema de la turbina Francis.

Esta fabricación ha supuesto un gran reto y un enorme esfuerzo para **Sidenor**, en otras cosas, porque estas piezas estaban justo en el límite de nuestra capacidad operativa. Sin embargo, con la unión de conocimiento, experiencia y metodología, ha sido posible desarrollar y optimizar procedimientos y fabricar una pieza excepcional con la máxima calidad.

2. PROCESO DE PRODUCCIÓN

2.1 FABRICACION DEL ACERO

Las instalaciones de la Planta de **Sidenor-Reinosa** consisten en un horno de fusión de 70 t con EBT (*Eccentric Bottom Tapping*), dos hornos cuchara de 70 t cada uno, uno del proceso VAD (*Vacuum Arc Degassing*) y otro del LF (*Ladle Furnace*). En ambos casos se puede hacer alto vacío en la correspondiente

instalación VD (*vacuum Degassing*). Además se dispone de un tanque de vacío, proceso VIC (*Vacuum Ingot Casting*), para colar los lingotes mayores de 70 t.

Los lingotes para hacer las tres piezas se colaron en el tanque bajo vacío, para lo que se utilizaron lingotes de, 125 t para el eje extremo 1,

140 t para el eje central y 140 t para el eje extremo 2 (con brida).

La composición del acero se realizó de acuerdo a la especificación del grado 20Mn5. El procedimiento de fabricación se diseñó cuidadosamente para obtener la más alta calidad y, sobre todo, limpieza (Fig. 3). Los principales parámetros del proceso fueron:

- Contenido de oxígeno al final del período oxidante: ≤ 300 ppm.
- Desoxidación con aluminio.
- Antes de la colada del lingote se da un tratamiento de vacío, en la instalación VD, durante 20 min, a menos de 0.5 mbar.
- Durante la colada del lingote en tanque se protege con argón el chorro de colada en el llenado de la cuchara intermedia.
- El vacío en el tanque es de ≤ 0.5 mbar y la velocidad de llenado ≈ 150 mm/min.

2.2 PROCESO DE FORJA

El proceso de forja ha sido similar para las tres piezas (Fig. 4). El punto de control de la temperatura del horno, para todos los calores fue de 1250 °C.

La secuencia de forja fue:

- Primer calor:

Forja de la mazarota, primer recalado, desbaste y despunte de los extremos de mazarota y pie.

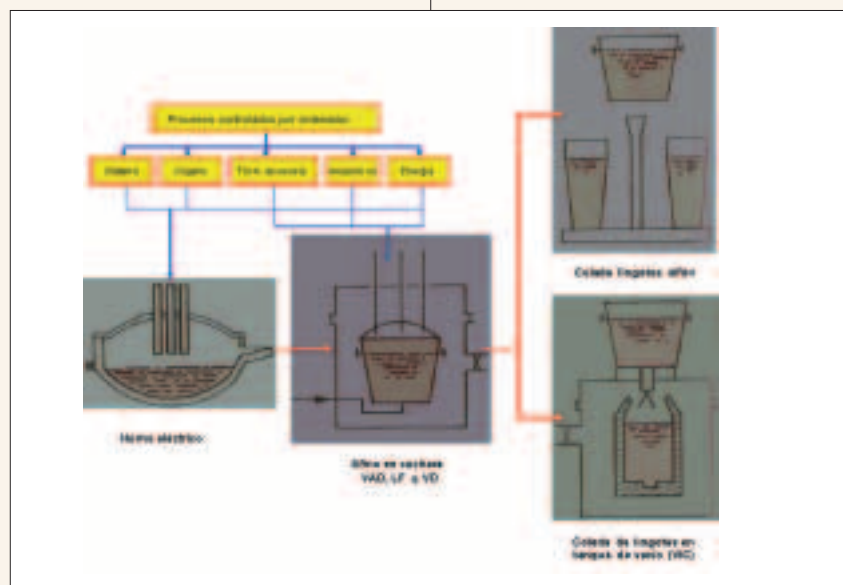


Fig. 3: Procesos de Acería

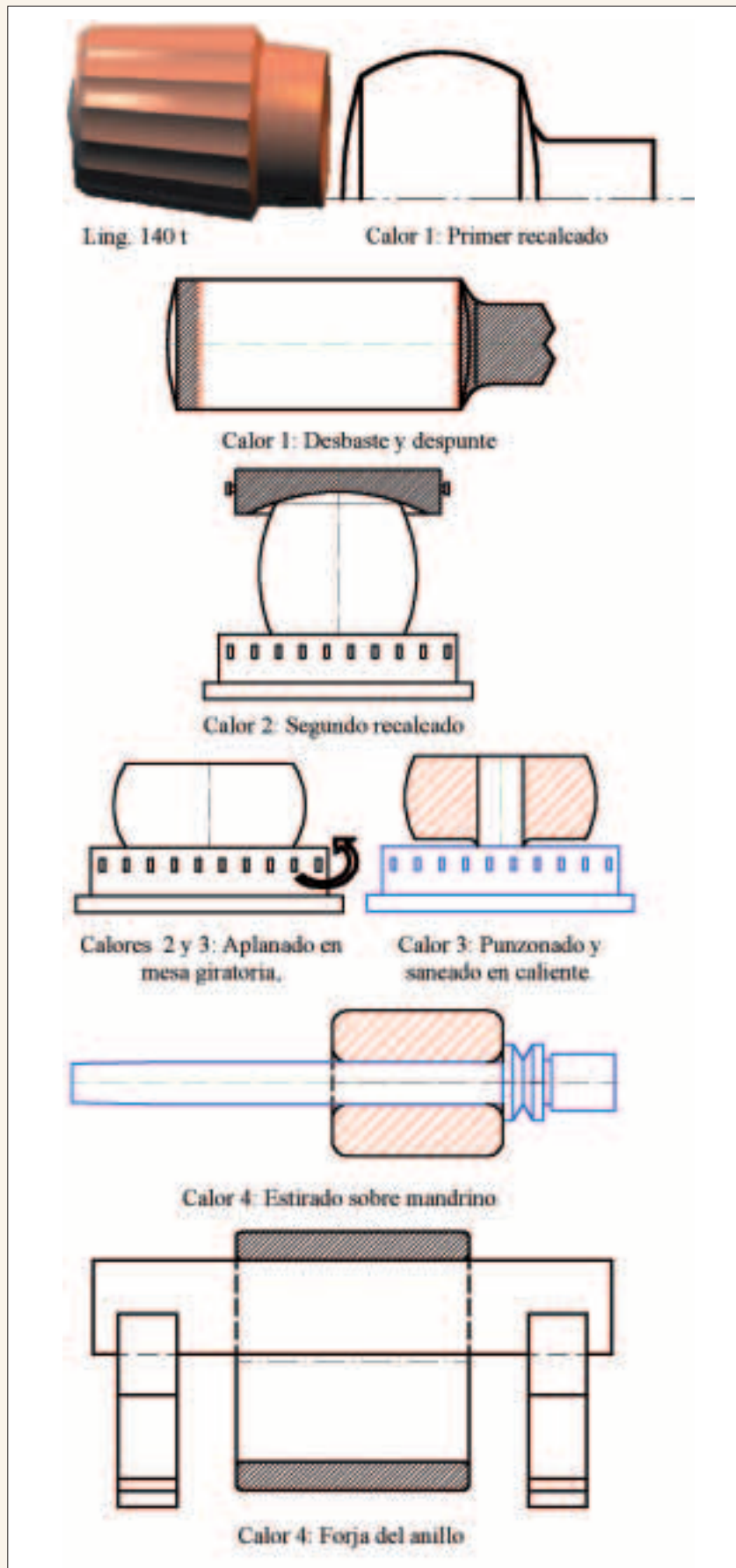


Fig. 4: Secuencia de forja

- Segundo calor:
Segundo recalcado y aplanado en mesa giratoria.
- Tercer calor:
Terminación del aplanado, punzonado y saneado de la rebaba.
- Cuarto calor:
Estirado en mandrino, para obtener la anchura deseada y forja final de anillo sobre barrón.

2.3 PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos se han llevado a cabo en bruto de forja, siendo los procedimientos como sigue:

- Tratamiento térmico preliminar:
Normalizado (930 °C, enfriamiento en aire) y distensionado (620 °C, enfriamiento en horno a 20 °C/hora hasta 150 °C).
- Tratamiento térmico de calidad:
Temple (910 °C enfriamiento en agua agitada) y revenido (640 °C, enfriamiento en horno a 30 °C/hora).

2.4 MECANIZADO EN DESBASTE

La siguiente operación fue el mecanizado en desbaste de todas las partes en un torno vertical con CNC, cuyas principales características son:

- Máximo diámetro de torneado 10800 mm.
- Altura máxima 3700 mm.
- Alcance de la corredera principal 1800 mm.
- Peso máximo de la pieza 100 t.

El mecanizado en desbaste se hizo de acuerdo a la siguiente secuencia:

- Mecanizado de las superficies forjadas para realizar la detección ultrasónica de las partes.
- Corte de los anillos para ensayos, extracción de las probetas y posterior realización de ensayos mecánicos para la aprobación de cada una de las partes.
- Después de esta aprobación se realizó un mecanizado de semi-terminación con el fin de preparar los bordes de las soldaduras, otro desbaste para perfilar las superficies externas y se terminaron las superficies del agu-

Ha sido posible desarrollar y optimizar procedimientos y fabricar una pieza excepcional con la máxima calidad

jero central, como se aprecia en las zonas sombreadas de la Fig. 5.

2.5 DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Se eligió el proceso SAW (arco sumergido) por ser el más adecuado para este tipo de soldaduras de gran espesor. Debido a la alta responsabilidad de esta pieza, se puso el máximo cuidado en escoger el mejor pro-

cedimiento para esta aplicación. Los pasos para elegir los parámetros de soldeo más adecuados fueron los siguientes:

- Mediante la técnica del diseño de experimentos se hizo un análisis factorial. Para esto se eligieron tres niveles de cada variable principal, dentro del rango de trabajo de las máquinas de soldadura de **Sidenor**:

- Voltaje: 28, 32 & 36 V.
- Intensidad: 600, 700 & 800 A.

- Velocidad: 55, 65 & 75 cm/min.

- Se hizo un estudio metalúrgico de los experimentos, analizando la morfología y calidad del cordón de soldadura de cada uno de ellos, con el fin de conocer los efectos que los parámetros tenían en las características del cordón.

- Se realizó un estudio estadístico para correlacionar las variables de soldeo con sus efectos en las propiedades del cordón.

- Finalmente **Sidenor** dio mayor preponderancia a las propiedades de tenacidad de la pieza que a la productividad. Así, los parámetros escogidos fueron aquellos cuya zona térmicamente afectada fue la menor

- Voltaje: 32 V.
- Intensidad: 600 A.
- Velocidad: 55 cm/min.

Una de las decisiones más importantes a tomar fue el diseño del bisel de los bordes de soldadura. Dado que era imposible soldar por el interior de la pieza, con las máquinas SAW de **Sidenor**, se eligió una preparación a tope en V. Además, con el fin de prevenir cualquier defecto en la raíz de la soldadura, se hizo un diseño especial para esta zona (Fig. 6) con el fin de obtener las dos ventajas siguientes:

- Facilitar la alineación de las piezas y dar un cordón por el interior, con el fin de mantener juntas las partes mientras se colocan en posición de soldadura y se realiza el primer cordón.

- Eliminar la raíz después de la soldadura, con el fin de evitar cualquier defecto en esta zona.

La temperatura de calentamiento fue $\geq 200^{\circ}\text{C}$ (de acuerdo con la fórmula de **Darden & O'Neil**), con el fin de disminuir las tensiones residuales generadas durante el soldeo y eliminar la posibilidad de agrietamiento.

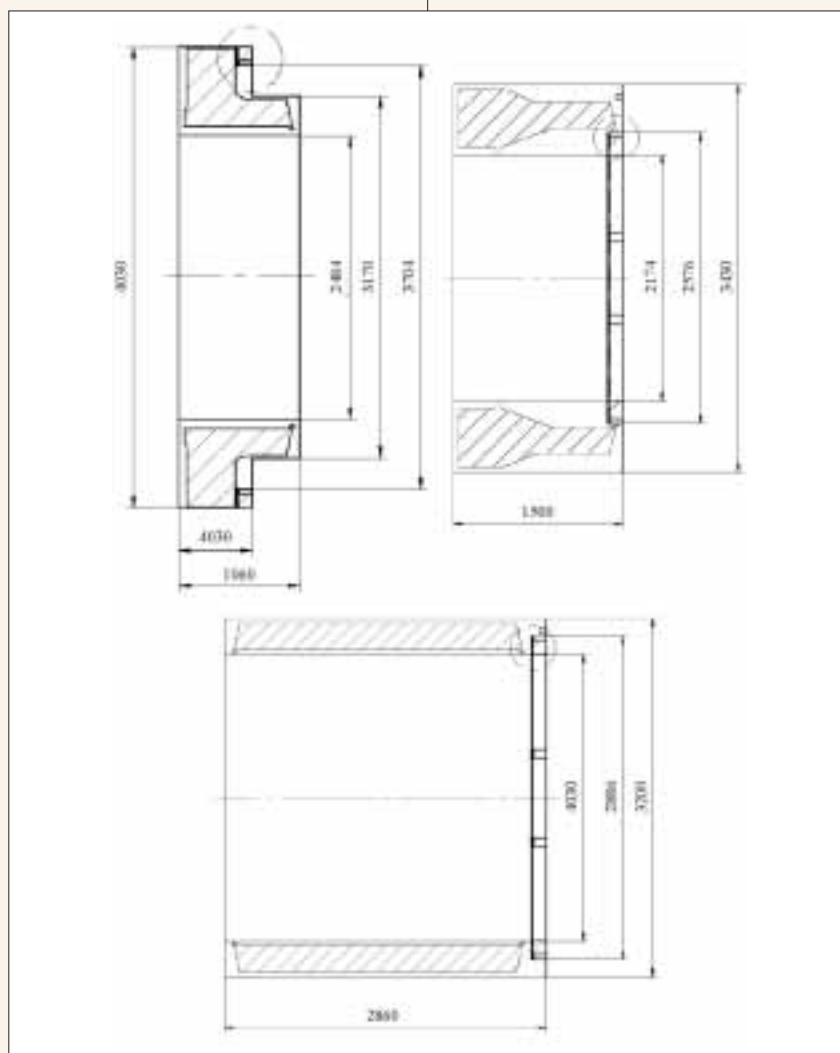


Fig. 5: Configuración del mecanizado en desbaste: Líneas externas: perfil para detección ultrasónica. Zonas sombreadas: perfil para soldadura

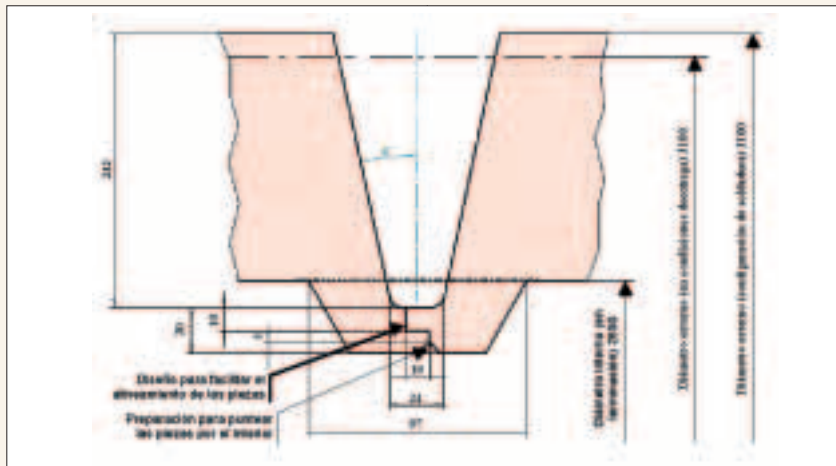


Fig. 6: Preparación de la junta de soldadura

La temperatura entre pasadas se fijó en $\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.6 HOMOLOGACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

Después de diseñar el mejor procedimiento se llevaron a cabo las homologaciones, tanto del procedimiento como de los soldadores. Para este propósito se mecanizó una preparación en V de 200 mm de profundidad en una chapa de 220 mm de espesor, llenándose posteriormente con cordones realizados con los parámetros elegidos. Los resultados mostraron una soldadura muy tenaz, como se puede ver en la Tabla 1.

La probeta de plegado dobló 180° sin que se produjeran defectos. Los

2.7 EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA

Las dos soldaduras, para unir las tres partes, se hicieron simultáneamente (Fig. 6). Los materiales de soldeo se eligieron para obtener una zo-

dadura un contenido de inclusiones muy bajo (ESAB OK 10.62).

• Alambre:

Se eligió el alambre de acero al Mn utilizado en las soldaduras de vasijas de alta presión, con una composición química cuyo depósito igualara la dureza del material base (ESAB OK AUTROD 12.32).

El calentamiento se realizó con varios quemadores situados estratégicamente dentro de la zona interior de la pieza, que estuvieron calentando mientras duró la soldadura.

El avance fue regulado con dos cunas de rodillos motorizadas, que rotaban el conjunto.

Después de terminada la soldadura, las zonas fundidas y las adyacentes se detectaron de acuerdo a siguiente procedimiento:

Palpadores utilizados en la detección ultrasónica:

- 0° Longitudinal 2 MHz.
- 45° Transversal 2 MHz.
- 60° Transversal 2 MHz.

El calentamiento se realizó con varios quemadores situados estratégicamente dentro de la zona interior de la pieza

Tabla 1: Propiedades mecánicas de la zona soldada

Probeta	Y.S. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)	KV (J)
Especificado	≥ 300	490/640	≥ 18		≥ 50
Longitudinal	362	565	25.2	60.3	126
Tangencial	412	577	25.2	66.4	151
Radial	376	570	21.2	62.8	120

ensayos de dureza mostraron una buena homogeneidad:

- Material base: 175 a 185 HV₁₀.
- Zona térmicamente afectada: 185 a 195 HV₁₀.
- Zona de soldadura: 170 a 175 HV₁₀.

na fundida con buena ductilidad y alta tenacidad:

• Flux:

Se eligió del tipo básico aglomerado (índice de basicidad de 3.4) y con un potencial muy bajo de oxígeno, con el fin de obtener en el la sol-

- 70° Transversal 2 MHz.

• El defecto equivalente permitido en la zona soldada era: 2 mm.

• En los ensayos realizados se detectaron defectos muy aislados con un tamaño de defecto menor de 1 mm.

• No se encontraron defectos superficiales en los ensayos de partículas magnéticas.

Una vez se terminaron los ensayos no destructivos se envió la pieza al taller de tratamientos térmicos para realizar un distensionado en toda la masa ($620\text{ }^{\circ}\text{C}$, enfriamiento en horno a $20\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$ hasta $150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Mediante la técnica del diseño de experimentos se hizo un análisis factorial

2.8 MECANIZADO FINAL

Antes de llevar a cabo el mecanizado final se realizó una simulación CAE del proceso, con las cargas involucradas en esta etapa. El objetivo de este estudio fue determinar las deformaciones de la pieza y la resistencia de los adaptadores de centrado, con el fin de diseñarlos apropiadamente.



Fig. 7: Montaje para la soldadura

Después de estas tareas, el mecanizado final se realizó en dos etapas:

- Todos los agujeros de amarre se taladraron y escariaron en una mandrinadora, en la que también se ajus-



Fig. 8: Mecanizado final del eje.

taron los adaptadores de centrado. Esta mandrinadora, con CNC, tiene las siguientes características:

- Longitud de bancada 14500 mm.
- Desplazamiento del cabezal 3000 mm.
- Desplazamiento de la columna 12000 mm.
- Diámetro del barrón 181 mm.

- La superficie externa y los frontales se tornearon en un torno horizontal (Fig. 8), con CNC. Esta operación se realizó sin cambiar la posición inicial de la pieza, debido al diseño especial de los adaptadores de centrado. Este torno tiene las siguientes características:

- Distancia entre centros 24000 mm.
- Máx. diám. de pieza sobre bancada 4150 mm.
- Máx. diám. de giro sobre luneta 3940 mm.
- Diámetro del plato 3500 mm.
- Peso máximo de la pieza 270 t.

3. CONCLUSIONES

Después de culminar satisfactoriamente la fabricación de estas piezas, se pueden extraer las siguientes consideraciones:

- La unión entre tecnología (conocimiento empírico), experiencia (conocimiento tácito) y método es la combinación que mejores resultados proporciona en cualquier tipo de fabricación, especialmente si es muy exigente y novedosa.

- La soldadura ha demostrado ser una tecnología muy apropiada para fabricar grandes piezas a partir de componentes de menor tamaño. Esto debería de animar más a los diseñadores al uso de esa tecnología cuando se trata de producir grandes componentes forjados.

- **Sidenor** ha demostrado su capacidad en términos de dominio de las tecnologías involucradas y posesión del “*expertise*” necesario para cumplimentar exitosamente retos como el aquí considerado.

Una vez más, queda demostrado que los grandes y ambiciosos proyectos son los que generan a su vez una cadena de retos en todos los frentes involucrados en el proyecto que, de esta manera, actúa como verdadera fuerza motriz para el avance de la ingeniería y de la tecnología en general.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Latest Developments for Very Big Hydraulic Rotor Shafts at Sidenor Reinoso Works; Javier Tezanos and Manu Llanos; 15th International Forgemaster Meeting; Kobe, oct, 2003.

- MARAÑÓN ANTOLÍN, Jose Miguel. “Las 3 gargantas: otro gran proyecto chino”. DYNA Mayo 2007, Vol. 82. p.31-36.

- FERNÁNDEZ DE AGUIRRE, Ignacio. “Introducción a la Ingeniería Robusta” DYNA Junio 2006. Vol. 81. p. 29-32.

- Procedimientos internos de fabricación de ejes de rotor. Ed. Sidenor 2007. ■