



Reparación del rotor de una turbina de vapor por soldadura.

Universidad estatal de ciencias aplicadas (PWSZ)

Fátima Díaz Llera

Proyecto final dirigido por Dr. ing. Anna Rehmus-Forc.

ÍNDICE

1. Turbinas de vapor	3
1.1. Turbina de vapor.....	3
1.2. Funcionamiento de la turbina de vapor	3
1.3. Partes de la turbina de vapor	3
1.4. Operación y mantenimiento	4
2. Rotor de una turbina de vapor.	5
2.1. Introducción	5
2.2. Daños comunes en un rotor de una turbina	5
2.3. Soldabilidad	6
2.4. Evaluación	7
3. Procesos de soldadura.	8
3.1. SMAW.....	8
3.2. SAW.....	8
3.3. GTAW	9
4. Estudio de la reparación de un rotor por soldadura.	10
4.1. Características del rotor	10
4.2. Tecnología de la soldadura.....	10
4.3. Ensayos después de la soldadura	11
4.4. Resultados	14

1. Turbinas de vapor.

1.1. TURBINA DE VAPOR

La turbina de vapor es una máquina térmica de combustión externa rotativa que transforma la energía cinética del vapor en energía rotacional.

Para aclarar un poco esta definición, a continuación, explico algunos conceptos:

- Máquina térmica: convierte calor en trabajo. En este caso convierte el calor del vapor generado en trabajo de rotación.
- Máquina térmica externa: la combustión se realiza fuera de la propia máquina, es decir, la producción de vapor se realiza fuera de la turbina.
- Energía cinética: energía del movimiento. En nuestro caso, la energía cinética del vapor debido a la presión y temperatura golpea los álabes de la turbina y se transforma en movimiento de rotación.

1.2. FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA DE VAPOR

En una caldera se obtiene vapor hirviendo agua. El combustible para calentar el agua puede ser gas, petróleo, carbón o incluso uranio en las centrales nucleares.

A través de tubos, llamados boquillas, el vapor generado en la caldera es transportado a la turbina. Cuando llega a la turbina, golpea los álabes y hace girar la turbina y su eje. La energía química del combustible utilizado para calentar el agua se transforma en energía cinética (rotación del eje). Si el rotor está enganchado, por ejemplo, a una dinamo o a un generador de electricidad, moverlo producirá corriente eléctrica, esta es la aplicación más común.

Una vez que el vapor sale de la turbina, ha perdido parte de fuerza y de calor, pero es utilizado de nuevo para condensarlo (vapor a líquido) y llevado de vuelta a la caldera para luego volver a calentarlo y volver a utilizarlo en el circuito. Se trata de un circuito cerrado. De esta manera se aprovecha el calor y la presión residual del vapor a la salida de la turbina, siendo mucho menores las pérdidas que si lo enviásemos a la atmósfera. Para condensar el vapor se utiliza un condensador, compuesto por tubos por los que circula agua fría, estos enfrían el vapor, y así, se condensa. Este vapor no ha perdido todo su calor, por lo que, al llegar de nuevo a la caldera, no requerirá tanta energía para vaporizarlo de nuevo.

1.3. PARTES DE LA TURBINA DE VAPOR

La turbina consta de tres partes principales:

- El cuerpo del rotor, que contiene las coronas rotativas de los álabes.
- La carcasa, que contiene las coronas fijas.
- Álabes.

Además, tiene una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares. A continuación, un listado de las principales piezas y sistemas que componen una turbina.

- El rotor
- La carcasa
- Los álabes
- La bancada
- Válvula de regulación
- Rodamientos de apoyo o radiales
- Rodamientos axiales o de empuje
- Sistema de lubricación: compuesto a su vez por:
 - Bomba mecánica principal
 - Bomba auxiliar
 - Bomba de emergencia
- Sistema de extracción de vahos
- Sistema de refrigeración de aceite
- Sistema de control de aceite
- Sistema de sellado con vapor
- Compensador

1.4. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Las turbinas de vapor y sus cubiertas tienen una gran inercia térmica, debido al material utilizado para su construcción y a que trabajan a altas presiones. Cuando comienza el proceso de calentamiento, las válvulas de cierre de vapor son desviadas para que el vapor generado pase a las líneas del sistema y llegue a la turbina. Para lograr un calentamiento uniforme cuando no hay vapor, la turbina gira lentamente. Gracias a esta rotación se evitan las dilataciones irregulares. Una vez que la turbina ha girado, el engranaje de giro se desconecta y el vapor entra en la turbina.

Con el paso del tiempo, la turbina adquiere una mayor velocidad de rotación, esto puede causar un desequilibrio del rotor. Este desequilibrio puede desencadenar en la separación de un álabe. Por eso se trabaja continuamente para equilibrar la turbina y evitar así ese riesgo.

El vapor utilizado es vapor sobrecalentado (seco) o saturado, que contiene muy poca humedad. De esta manera también se reduce el riesgo de erosión en los álabes. El agua que puede entrar en la zona de las palas también puede dañar los rodamientos, por lo que las instalaciones de la turbina están equipadas con desagües.

Son muy importantes las labores de mantenimiento en las turbinas debido a todos los riesgos de daño que existen en ellas.

2. Rotor de una turbina de vapor.

2.1. INTRODUCCIÓN

Los rotores de las turbinas son uno de los elementos más críticos y cargados del sistema. Normalmente las turbinas de alta presión y alta temperatura trabajan en rangos de temperatura entre 315 ° C y 565 ° C. Trabajando a estas temperaturas la fragilidad que provoca el revenido puede afectar la vida del rotor.

Después de muchos años de servicio, es común que los rotores presenten problemas o potenciales problemas como la fragilidad del temple, fatiga, fatiga térmica, fluencia, fractura frágil, erosión, corrosión y corrosión por tensión. Otros problemas que pueden surgir en un rotor provienen de errores en el diseño, fabricación, operación o debido a otros factores.

Cuando ocurre un fallo catastrófico en un rotor de turbina, lo más común es que se detenga. Debido a esta ruptura, habrá pérdidas económicas significativas. Se ha investigado mucho para desarrollar métodos y procesos de reparación en rotores de turbina para que estos no lleguen al fallo catastrófico.

Estos avances, especialmente en las técnicas de soldadura, permiten reparar ejes de turbinas gravemente dañados. La reparación de un rotor por soldadura es muy rentable, ya que el coste de uno nuevo es muy elevado. Además, si se hace una buena reparación, el tiempo de inactividad de la turbina será mucho menor que si la turbina termina teniendo un fallo catastrófico. Para que la reparación sea efectiva, la soldadura debe estar bien diseñada y tener un buen rendimiento. Por el contrario, si la soldadura está mal diseñada o no se ha ejecutado correctamente, el rotor puede llegar a romperse. Para garantizar la correcta reparación, cada una de ellas debe ser evaluado teniendo en cuenta todos los aspectos del rotor y las condiciones de trabajo.

2.2. DAÑOS COMUNES EN UN ROTOR DE UNA TURBINA

Analizando las causas de los fallos en los rotores de las turbinas de vapor, se pueden distinguir tres grupos principales:

- Causas relacionadas con el componente: como diseño, instalación, fabricación o defectos del material.
- Causas relacionadas con la operación: fallos en el sistema de control de la turbina, fragilidad del temple, rotura frágil, fatiga, fatiga térmica, corrosión, corrosión por esfuerzos, erosión o fluencia.
- Causas debidas a otros elementos.

Normalmente las principales averías que se producen en los rotores de las turbinas de vapor se deben a causas relacionadas con el producto. Las principales causas de fallo son:

- Daños por cuerpos extraños.
- Desalineación del rotor.
- Fallo en el sistema de control

- Fractura frágil
- Fracturas de falla por fluencia
- Fallas del equipo
- Fallos causados por la operación
- Fatiga y fatiga asistida por la corrosión
- Grietas por corrosión bajo tensión

2.3. SOLDABILIDAD

Normalmente los rotores de las turbinas de vapor están hechos de aceros de baja aleación. Sus principales agentes de aleación suelen ser cromo, molibdeno, níquel y vanadio. En estos tipos de acero, el porcentaje de carbono no supera el 0,35%. Generalmente, los aceros utilizados pertenecen a las siguientes especificaciones:

- ASTM A 470, clase 8 (1,25 Cr-1,25 Mo-0,25 V)
- ASTM A 471

Para elegir el material de aporte a utilizar tenemos dos opciones. La primera es utilizar un material con una composición química como la del rotor. La segunda es utilizar un material de relleno con un alto contenido de cromo para mejorar las propiedades a altas temperaturas.

Pre calentamiento

La temperatura de pre calentamiento es el valor de temperatura mínimo que deben tener las piezas antes de soldar para garantizar velocidades de enfriamiento adecuadas. Esta temperatura depende de la composición del material, del espesor y tipo de junta y de la potencia térmica. A medida que la temperatura de pre calentamiento aumenta, los gradientes de temperatura disminuyen, las temperaturas en los diferentes puntos y los tiempos de residencia aumentan; y disminuye la velocidad de enfriamiento. Por lo tanto, reduce el riesgo de fragilidad de la estructura, reduce el estado de tensión y facilita la difusión del hidrógeno.

La ausencia de pre calentamiento puede inducir tensiones internas muy altas en presencia de cantidades significativas de hidrógeno.

El pre calentamiento también implica una serie de riesgos como:

- Puede alterar tratamientos anteriores.
- Aumenta el riesgo de crecimiento del grano.
- Puede acelerar los fenómenos de precipitación de algunos aceros.
- Aumenta el ancho de la zona afectada térmicamente.
- Incrementa el coste.
- Es incómodo para el soldador.

Tratamiento post-soldadura

Se trata del tratamiento necesario para restaurar la zona afectada por la soldadura, obtener una ductilidad y propiedades óptimas y relajar las tensiones creadas durante el proceso. Suele alcanzar temperaturas entre 600°C y 700°C y dura entre 6 y 12 horas. El tratamiento puede ser en horno o in situ, siendo este último el más utilizado. Para aplicar este

tratamiento se coloca el rotor en posición vertical y se calienta toda la circunferencia del área reparada. Este calentamiento local reduce el riesgo de deformaciones en el rotor.

2.4. EVALUACIÓN

Para evaluar la reparación de los rotores más fácilmente, se creó una clasificación con diferentes tipos. En esta clasificación aparecen la mayoría de las reparaciones que se realizan actualmente.

Clase 1. Reparación por depósito de soldadura en las áreas de bajos esfuerzos, como son los muñones.

Clase 2. Reparación por depósito de soldadura sobre los elementos rotatorios, por ejemplo en las paletas y en los tetones de los alabes.

Clase 3. Reparación de la ranura para alabes en el disco integrado del rotor, por soldadura de un segmento de la circunferencia del disco.

Clase 4. Reparación por reposición del disco integrado por depósito de soldadura. El disco fisurado es mecanizado hasta que todo el daño sea removido y después la dimensión del diámetro del disco se restaura por depósito de soldadura.

Clase 5. Reparación por mecanizado de una ranura profunda en el cuerpo del rotor hasta eliminar una fisura circunferencial y después rellenar la ranura por la soldadura.

Clase 6. Reparación por corte de un segmento dañado del rotor y reposición de este segmento axial con una forja nueva soldada al cuerpo del rotor.

Clase 7. Reparación por soldadura de una sección parcial o circunferencial total para recuperar el disco integral.

3. Procesos de soldadura.

3.1. SMAW

Shielded metal arc welding

A este proceso se le denomina comúnmente soldadura por electrodos revestidos. Es uno de los más utilizados hoy en día, pues es capaz de soldar muchos materiales distintos. Se suele utilizar principalmente para soldar aceros al carbono. Este proceso nos permite soldar un rango de espesores muy amplio, aunque donde realmente se vuelve eficaz es a partir de los 5mm de espesor. Gracias a su portabilidad, lo convierte en una de las mejores opciones a la hora de tener que soldar fuera de taller, ya que no necesita gas de protección, con lo cual las posibles corrientes de aire no le afectarían. Se trata de un proceso de soldadura barato.

El proceso solamente utiliza un consumible, el propio electrodo revestido. Se trata de una varilla metálica, a la que se conoce como núcleo, recubierta por material cerámico. Este componente tiene varias funciones en la soldadura. Por una parte, funciona como electrodo para que salte el arco entre la fuente y la pieza y consiga estabilizarlo. Otra de sus funciones es la de material de aporte; el núcleo del electrodo suele ser de un material parecido al de la pieza a soldar, de tal manera que al fundirse hace las veces de material de aporte. Por último, tiene la función de proteger el baño de fusión. El electrodo consta de un recubrimiento de un material cerámico realizado por compactación de varios metales. Gracias a la mezcla de estos metales, el electrodo es capaz de cumplir sus funciones de estabilizar el arco y proteger el baño de fusión. Cuando salta el arco entre la pieza y la varilla, tanto la varilla como el recubrimiento comienzan a fundirse. El recubrimiento debe tener menos densidad que el material de aporte con la finalidad de quedarse en la parte superior y por consiguiente proteger la soldadura. Se forma así una barrera de protección que es denominada escoria y protege el baño de fusión de la contaminación ambiental y de la oxidación. Una vez realizada la soldadura la escoria debe ser retirada.

Se trata de un proceso manual en el que el soldador es el encargado de controlar todas las variables. Asimismo, el soldador es el responsable de cambiar los electrodos y limpiar la escoria.

3.2. SAW

Submerged arc welding

Se trata de un proceso de soldadura automático y muy barato. El principal inconveniente que tiene utilizar este proceso es que trabaja con intensidades muy elevadas. Por consiguiente, no se puede utilizar este proceso para soldar piezas de materiales sofisticados ni de espesores pequeños. Principalmente se utiliza para soldar aceros al carbono, aceros al carbono y aceros inoxidables.

Otra característica de este proceso es que permite soldar en dos posiciones determinadas solamente. Además solo se puede soldar mediante arco sumergido dentro del taller.

Como consumibles este proceso utiliza el material de aporte y el flux. El material de aporte consiste en una barra continua sólida. El flux es el encargado de proteger la soldadura.

3.3. GTAW

Gas tungsten arc welding.

Se trata de un proceso que se lleva a cabo manualmente, aunque, a día de hoy, cada vez surgen más propuestas para que se convierta en automático. Gracias a este proceso podemos alcanzar una muy buena calidad y penetración en la soldadura, aunque a un precio bastante elevado.

Para ejecutarlo se necesita una pistola de soldadura que en su interior alberga un electrodo de tungsteno. Al igual que en todos los procesos de arco eléctrico, el arco salta entre la pieza a soldar y el electrodo. Dicho electrodo, al contrario que en el primer proceso descrito, no es consumible. Dependiendo de la aplicación, puede ser necesario o no material de aporte. Si este fuera necesario se aplicaría por medio de unas varillas que manejaría el soldador. Para proteger el baño de fusión se utiliza un gas inerte.

Como consumibles se utilizan únicamente el gas que protege el baño de fusión y el metal de aporte si este fuese necesario.

Al tratarse de un proceso tan caro, solo se utiliza para materiales muy delicados y para piezas de muy poco espesor. El rango de espesores con el que mejor se trabaja es de 0.5 a 5 mm. Otra aplicación del TIG, es realizar la primera pasada, o pasada de raíz de una soldadura que se vaya a ejecutar con otro proceso. Esto se realiza porque con el resto de procesos, suele ser necesario tener que hacer un saneado de raíz.

4. Estudio de la reparación de un rotor por soldadura.

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL ROTOR

En este apartado explicaré las características del rotor al cual se le ha realizado la reparación. Se trata del rotor de una turbina de vapor. La reparación se llevó a cabo para restaurar la etapa de control de los rotores de alta velocidad. La potencia con la que cuenta el rotor es de 30MW y el material del que está compuesto es 26NiCrMoV14-7 Super Clean, es decir, libre de contaminantes como, por ejemplo, sulfuros.

La turbina de vapor en la que se encuentra alojado el rotor gira a unas 12000rpm, y el vapor alcanza una temperatura de 470°C y una presión de 100 bar al salir de la misma. El eje de esta turbina debe ser capaz de trabajar tanto a altas como a bajas presiones y temperaturas.

El proceso elegido para realizar la soldadura fue arco sumergido, SAW. Los consumibles utilizados fueron: como material de aporte, la varilla SZW572SC; y como fundente para proteger la soldadura, WP330.

4.2. TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA

Material de relleno

Como he dicho anteriormente, este tipo de rotores necesitan un material que soporte condiciones de trabajo exigentes. Por ello, el rotor a estudiar ha sido fabricado con acero forjado 26NiCrMoV14-7 SC siguiendo la norma NR417-07. En esta norma también se recogen los requisitos que deben cumplir otras piezas de la turbina.

Respecto a la soldadura, el material de aporte utilizado tiene unas propiedades de resistencia similares a las del rotor de la turbina. Se creó una probeta con las dimensiones que requiere la norma NR 417-07 para poder evaluar el estado de la soldadura. Tras analizar la probeta, se comprueba que, tanto la composición química como la estructura de la misma, cumple los requisitos descritos en la norma.

Características de la soldadura

Como ya he descrito anteriormente, la soldadura se realizó utilizando como material de aporte una varilla Bohler SZW572SC con una composición 3NiCrMo2.5-UP y como fundente WP330.

Tecnología de soldadura

La soldadura fue realizada en una sola pasada, en forma redonda y de manera automática. Para proteger el baño de fusión se utilizó el fundente anteriormente descrito. La varilla

utilizada como material de aporte tenía un diámetro de 3mm. El cordón de soldadura tenía un espesor de 36mm y una longitud de 200mm. La pieza fue precalentada a 300 °C y durante el proceso la temperatura de la misma se mantuvo entre 230 °C y 250 °C.

Como tratamiento después de la soldadura se ha realizado un recocido a la pieza con el objetivo de aliviar las tensiones generadas en el proceso de soldeo. Para llevar a cabo el recocido se siguieron los siguientes pasos:

- Calentamiento del horno al 580 °C.
- Introducción de la pieza en el horno durante 12 horas.
- Enfriamiento en el interior del horno hasta 300 °C, a razón de 30 °C/hora.

4.3. ENSAYOS DESPUÉS DE LA SOLDADURA

Ensayos no destructivos

Inspección visual

Uno de los métodos de ensayo no destructivos a realizar en primer lugar es la inspección visual. Esta primera revisión puede detectar muchas imperfecciones, de esta manera se ahorra tiempo y dinero al evitar otro tipo de pruebas de mayor coste. La inspección visual se realiza antes, durante y después de la soldadura.

Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes nos permite detectar defectos en la superficie de piezas no porosas. Normalmente gracias a este ensayo se detectan defectos como grietas, porosidades superficiales, cráteres, etc. Hay varios tipos de líquidos penetrantes pero los más utilizados son los rojos, pues junto con el revelador de color blanco se consigue un contraste muy bueno. Para llevar a cabo este ensayo se siguen los siguientes pasos:

- Limpieza de la superficie de la pieza para eliminar la oxidación, escoria, grasa, etc. Dicha limpieza se lleva a cabo con detergentes, disolventes o soluciones decapantes.
- Se aplica el penetrante con la ayuda de un pulverizador. Este líquido suele ser de color rojo brillante. Debe dejarse que actúe durante un tiempo para que pueda introducirse a través de todos los posibles defectos.
- Posteriormente, se limpia la superficie pulverizada con un paño para eliminar el líquido penetrante de la superficie.
- A continuación, se aplica el revelador, también por pulverización. Este producto suele ser de color blanco, de modo que cuando entra en contacto con el líquido penetrante se tiñe de rojo y se percibe fácilmente en la superficie. Si observamos algo en la superficie de color rojo, nos está indicando que hay un defecto.
- Finalmente se interpretan las indicaciones dadas por el revelador y se examina si son reales, es decir, si de verdad corresponden a un defecto en la soldadura.

Partículas magnéticas

Mediante este ensayo podemos detectar defectos superficiales y subsuperficiales, siempre que se encuentren lo suficientemente cerca de la superficie. Lo primero que hay que hacer para llevar a cabo este ensayo es limpiar la superficie de la pieza y luego magnetizarla. Para

magnetizar la pieza se utilizan imanes o electroimanes, aunque en ocasiones también es posible hacerlo por magnetización por corriente eléctrica o inducida. Posteriormente se espolvorea polvo de hierro en la superficie de la pieza, normalmente se suele hacer con un spray o con una pera de goma. A este proceso se le denomina por vía seca y es el más comúnmente utilizado.

Al magnetizar la pieza, si existe algún defecto, el campo magnético se desviará, con lo cual el polvo de hierro espolvoreado en la superficie se aglutinará en torno a dicho defecto. Para eliminar las partículas sobrantes se somete la pieza a una corriente de aire.

Es muy importante el tamaño de las partículas, ya que las de pequeño tamaño pueden incrustarse en los poros de la pieza, mientras que las de mayor tamaño tienen menor sensibilidad al método.

Para finalizar, se evalúan las indicaciones que nos ha dado el polvo de hierro y se desmagnetiza la pieza.

Inspección por ultrasonidos

Para llevar a cabo este método de inspección es necesario generar ondas ultrasónicas a través del efecto piezoeléctrico, pues hay materiales que una vez deformados por una fuerza externa, producen en su superficie cargas eléctricas.

Las ondas son generadas por una sonda compuesta por una lámina de cristal piezoeléctrico con una película de plata en la parte delantera y trasera. Cuando se aplica voltaje a los electrodos, dicho cristal vibra y genera pulsos ultrasónicos que se propagan a través de la pieza que se quiere inspeccionar. Las ondas emitidas se propagan por la pieza en línea recta y se reflejan cuando cambia la densidad del material a través del cual se propagan.

Existen varios métodos para realizar pruebas de ultrasonido:

- Método de resonancia.
- Método de transparencia o sombreado.
- Método de ecoimpulso.

Control radiográfico

Gracias a la capacidad de las radiaciones de pasar a través de los cuerpos e impresionar películas fotográficas estas pueden ser utilizadas como métodos de inspección en soldadura.

Generalmente para llevar a cabo estos ensayos se utilizan los rayos X y γ . Estos dos tipos de radiaciones se diferencian en su origen, pero ambos se propagan en línea recta, penetran los cuerpos con luz ordinaria, impresionan películas fotográficas y tienen efectos biológicos, entre otras muchas características que también comparten.

A la hora de elegir una u otra radiación hay que tener en cuenta que con los rayos X se obtienen mejores contrastes y a la hora de impresionar la imagen de los posibles defectos son mejores, pues tiene menos sombras. En favor de los rayos γ , hay que decir que tienen

una mayor portabilidad y son más baratos, por lo que es habitual que la inspección se realice con estos últimos.

Ensayos metalúrgicos

Composición química

Para conocer la composición química de la pieza se ha recurrido a un método espectral llamado SPECTROPORT. Este método usa chispas de argón sobre las secciones transversales de la soldadura.

Ensayos macroscópicos

Este ensayo se llevó a cabo con tres probetas diferentes que se extrajeron de secciones longitudinales de la forja con diferentes ángulos.

A la hora de evaluar los defectos se tomaron las directrices marcadas por la norma PN EN ISO 6520-1: 2009 y se concluyó con que estos eran insignificantes y ninguno llevaría al fallo catastrófico.

Ensayos de dureza

Para medir la dureza de la pieza se realizó un ensayo Vickers HV10 de acuerdo con la norma PN-EN ISO6507: 2007. Para ello se utilizó un durómetro ZWICK 3212. Este ensayo se hizo tanto en la soldadura, como en la zona afectada térmicamente, como en el metal base.

El resultado de la prueba fue que la soldadura cuenta con una resistencia entre 285 y 331 HV10 y que el metal base tiene una dureza media de 297 HV10. Tras comparar los datos del ensayo y los de la norma, se observa que la soldadura cumple con los requisitos establecidos.

Las pruebas microscópicas

Para conocer la microestructura se han realizado ensayos microscópicos en una sección transversal de la zona afectada térmicamente por la soldadura. El instrumento utilizado para el ensayo ha sido el microscopio AXIOSKOP y se han seguido las pautas marcadas por la norma PN-EN 1321: 2000.

Los resultados obtenidos fueron que el material de aporte presenta una estructura dendrítica; en la zona de fusión y la zona afectada térmicamente hay presencia de vainita; y en el metal base es vainita endurecida. No se encontraron ni microfracturas ni otras discontinuidades después de este ensayo.

Ensayos de resistencia

Se trata del último ensayo realizado, en él se midieron varios parámetros tales como: el límite elástico, el alargamiento, la contracción, la elasticidad y el factor FATT50. El instrumento escogido para el ensayo fue la máquina ZWICK 5111. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron comparados con los requisitos exigidos por la norma NR417-07, mientras que la prueba de resistencia se hizo según EN10045, A(KV). Al hacer la comparación de los resultados con la norma se observa que los valores obtenidos del ensayo cumplen los requisitos de la norma, excepto el factor FATT50.

También se llevó a cabo otra prueba adicional para determinar el factor de tenacidad a la fractura K1C, para ello se usó el método Begley-Longsdon según la norma HZKM620206. Una vez analizados los resultados de este ensayo se concluye que no cumple los requisitos exigidos por la norma.

4.4. RESULTADOS

Después de realizar todas las pruebas, se concluye que la soldadura se ha realizado correctamente.

En los ensayos no destructivos no se encontraron defectos que pudieran provocar el fallo catastrófico de la etapa.

Por el contrario, en las pruebas metalúrgicas se han detectado defectos, en su mayoría macrofracturas causadas por el funcionamiento del rotor. Han sido especialmente detectados en la etapa de control, ya que es donde se alcanzan las temperaturas y tensiones más altas, pues están en contacto con los álabes. En estas pruebas se analizó la composición del material y se pudo observar que el material de aporte presenta alfa ferrita y carburos, pero no aparece ferrita delta. La zona afectada térmicamente tiene una estructura bainítica y mide 4mm. La línea de fusión es prácticamente insignificante, alrededor de 0,5 mm y tiene una dureza de aproximadamente 330 HV10. En cuanto a la soldadura, se estima que tiene una dureza media de 305 HV10.

Como se ha expuesto anteriormente, tanto la dureza como los parámetros Re, Rm, A5 y Z cumplen los requisitos exigidos por la norma

En cuanto al factor FATT50, observamos que los resultados de la prueba indican que está en +11 °C cuando con el 50% de la fractura frágil y dúctil debería estar en -30 °C, según indica la norma NR417-07. Por lo tanto, no cumple los requisitos. El factor de resistencia a la fractura K1C tampoco cumple los requisitos de la norma.