



*Reparación de discos del rotor de turbina de vapor con gtaw y smaw bajo condiciones de soldabilidad y propiedades mecánicas mejoradas*

*Steam turbine rotor disc repair with gtaw and smaw under improved weldability conditions and mechanical properties*

*Reparo do disco do rotor da turbina a vapor com gtaw e smaw sob melhores condições de soldabilidade e propriedades mecânicas*

Alex Gionanny Tenicota-García <sup>I</sup>  
[alex.tenicota@esPOCH.edu.ec](mailto:alex.tenicota@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-0707-7698>

Cristian David Redroban-Dillon <sup>II</sup>  
[david.redroban@esPOCH.edu.ec](mailto:david.redroban@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-3543-9390>

Cesar Marcelo gallegos-Londoño <sup>III</sup>  
[cesar.gallegos@esPOCH.edu.ec](mailto:cesar.gallegos@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-8685-7501>

**Correspondencia:** [alex.tenicota@esPOCH.edu.ec](mailto:alex.tenicota@esPOCH.edu.ec)

Ciencias de la salud  
Artículos de investigación

\***Recibido:** 16 de julio de 2021 \***Aceptado:** 30 de agosto de 2021 \* **Publicado:** 06 de septiembre de 2021

- I. Magíster en Gestión del Mantenimiento, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Facultad de Mecánica, Grupo de Investigación del Mantenimiento GIMAN, Ecuador.
- II. Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Facultad de Mecánica, Grupo de Investigación del Mantenimiento GIMAN, Ecuador.
- III. Magíster en Gestión del Mantenimiento, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Facultad de Mecánica, Grupo Organización del Mantenimiento GIOMAT, Ecuador.

## Resumen

La soldadura de arco eléctrico como parte de un proceso de reparación de discos del rotor de turbinas de vapor, presenta resultados diferentes con el uso de consumibles, tratamientos térmicos y/o acabados superficiales en el mecanizado, por ello no se puede precisar las mejoras en los materiales. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar un caso en particular de reparación de discos del rotor de turbinas de vapor de material ASTM A565 Grado 616 y ASTM A 470-8 por soldadura de arco eléctrico SMAW vs GTAW, en donde se destaquen los resultados de soldabilidad y propiedades mecánicas. La soldabilidad fue definida analíticamente mediante la aplicación del carbono equivalente e interpretación del cordón resultante con diagrama de Shaeffler, para el caso de estudio bajo condiciones térmicas controladas entre 120 a 300 °C de precalentamiento según las dimensiones referenciales de espesores que oscilen entre  $\frac{3}{4}$ " a 1  $\frac{1}{4}$ ". Al aplicar las soldaduras con electrodos austeníticos o duplex, con recocido a través de un pase caliente por cada tres pases, se realiza la aplicación del normalizado y seguidamente el mecanizado y de ser posible el bruñido. En adición a ello es aplicado el revenido a máxima temperatura controlando el calentamiento y enfriamiento de la pieza intervenida. Finalmente se realiza el montaje con las pruebas de funcionamiento y control de calidad, de tal manera que, se prevé una mejora de las propiedades mecánicas de las superficies reparada, como el caso de la dureza y tenacidad mejorada entre el 2% al 16% con respecto a los valores referenciales en el metal base, cordón y zona afectada de calor.

**Palabras clave:** Reparación de rotores; turbinas de vapor; soldabilidad; dureza; tenacidad.

## Abstract

Electric arc welding as part of a steam turbine rotor disc repair process, presents different results with the use of consumables, heat treatments and/or surface finishes in the machining, therefore it is not possible to specify the improvements in the materials. The objective of this work is to study a particular case of steam turbine rotor disc repair of ASTM A565 Grade 616 and ASTM A 470-8 material by SMAW vs GTAW electric arc welding, highlighting the results of weldability and mechanical properties. The weldability was defined analytically through the application of the equivalent carbon and interpretation of the resulting bead with Shaeffler diagram, for the case of study under controlled thermal conditions between 120 to 300 °C of preheating according to the referential dimensions of thicknesses ranging from  $\frac{3}{4}$ " to 1  $\frac{1}{4}$ ". When applying the welds with

austenitic or duplex electrodes, with annealing through a hot pass for every three passes, the application of the normalized and then the machining and if possible, the burnishing is carried out. In addition to this, tempering is applied at maximum temperature, controlling the heating and cooling of the workpiece. Finally, the assembly is carried out with the operation and quality control tests, in such a way that an improvement of the mechanical properties of the repaired surfaces is foreseen, as in the case of hardness and tenacity improved between 2% to 16% with respect to the reference values in the base metal, bead and heat affected zone.

**Keywords:** Rotor repair; steam turbines; weldability; hardness; tenacity.

### Resumo

A soldagem a arco elétrico como parte de um processo de reparo de disco de rotor de turbina a vapor apresenta resultados diferentes com a utilização de consumíveis, tratamentos térmicos e / ou acabamentos superficiais na usinagem, portanto não é possível especificar nos materiais. O objetivo deste trabalho é estudar um caso particular de reparo de disco de rotor de turbina a vapor de material ASTM A565 Grau 616 e ASTM A 470-8 pela soldagem a arco elétrico SMAW vs GTAW, destacando os resultados de soldabilidade e propriedades mecânicas. A soldabilidade foi definida analiticamente através da aplicação do carbono equivalente e interpretação do cordão resultante com diagrama de Shaeffler, para o caso de estudo sob condições térmicas controladas entre 120 a 300 ° C de pré-aquecimento de acordo com as dimensões referenciais de espessuras variando de ¾ " a 1 ¼ ". Na aplicação das soldas com eletrodos austeníticos ou duplex, com recozimento por passe a quente a cada três passes, é realizada a aplicação do normalizado e posteriormente a usinagem e se possível, o polimento. Além disso, o revenimento é aplicado na temperatura máxima, controlando o aquecimento e resfriamento da peça. Por fim, a montagem é realizada com os testes de operação e controle de qualidade, de forma que se preveja uma melhora das propriedades mecânicas das superfícies reparadas, como no caso da dureza e tenacidade melhorada entre 2% a 16% com relação aos valores de referência no metal de base, cordão e zona afetada pelo calor.

**Palavras-chave:** Reparação de rotor; turbinas a vapor; soldabilidade; dureza; tenacidade.

## Introducción

La reparación según el criterio europeo definido en (EN UNE, 2016) refiere a la acción física que se realiza para restablecer la función requerida de cualquier elemento averiado teniendo en cuenta que también incluye la localización de averías y la verificación de la función. La ejecución de la reparación de elementos mecánicos reúne una serie de actividades y procesos industriales tales como la limpieza técnica, mecanizado, cambio de componentes, y recuperación de las propiedades mecánicas y dimensiones mediante procesos de soldadura, metalización, fundición, tratamientos térmicos, entre otros. En muchas ocasiones según (SÁNCHEZ, 2018), varias empresas que forman parte de los más importantes sectores industriales de un país en desarrollo poseen la necesidad de reparación de elementos metálicos generalmente costoso, lo que conlleva a definir procedimientos técnicos direccionados a rescatar las dimensiones geométricas, y mantener o mejorar propiedades mecánicas de los equipos críticos y sus componentes mecánicos mediante la alternativa más conveniente.

Un ejemplo importante de equipos críticos son los rotores y álabes de las turbinas de vapor, las cuales tuvieron sus inicios en 1880, y gracias a su construcción por el inglés Charles Parsons y el sueco Carl Gustav de Laval hicieron posible en un futuro la generación de la energía eléctrica. La turbina de vapor es un equipo térmico rotatorio de combustión generalmente externa, que transforma la energía térmica en energía eléctrica, por lo que uno de sus componentes más críticos por el contacto directo con el fluido son los discos de rotores, y estos son los elementos de una turbina donde tiene lugar la extensión de vapor causante del deterioro regular según (PINO GÓMEZ, 2017). Los discos y álabes son componentes muy delicados ya que su funcionalidad es de suma importancia para la turbina de vapor, pues como se mencionó anteriormente son los encargados de aprovechar los gases de combustión para mover la turbina a grandes velocidades, lo que puede provocar altos esfuerzos y cargas térmicas, que desencadenan pequeños defectos superficiales que pueden convertirse en críticas respecto al tiempo. Tanto los álabes como los discos de los rotores son de materiales forjados de baja aleación con cromo, molibdeno y vanadio, y para casos de servicio por encima de los 538 °C se usan aceros inoxidables martensíticos, según (Mazur, 1999). De acuerdo con lo analizado por (ESPINILLA PEÑA, 2019), las turbinas diseñadas por el inglés Charles responde a ser una turbina de reacción, la misma que permite que el vapor fluya en la dirección longitudinal del eje y reduce gradualmente la presión, distribuida sobre varias ruedas de cuchillas. En el caso de la turbina

diseñada por Carl, contempla un gran número de aspas en forma de cubo que recogen el vapor y lo convertían en un movimiento circular elaborada por una gran variedad de materiales, entre los principales el ASTM A565 Grado 616 y ASTM A 470, clase 8. Los discos de rotores muy populares son de material ASTM A 470-8, han registrado una mayor cantidad de daños irreparables originados por erosión, impacto de partículas sólidas, acumulación de elementos en la tubería y exfoliación. Para estos casos se han preferido soluciones de recambio, pero cuando los límites de desgaste han superado referencias permisibles, pero cuando los límites son tolerables entonces es recomendada la reparación por mecanizado, soldadura y tratamientos térmicos. Los daños más frecuentes y comunes que se producen en los discos de rotores de una turbina analizando ciertos aspectos que causan las averías en estos, se puede identificar de la siguiente manera: causas relacionadas con el elemento mecánico, debidas a otros elementos y con el funcionamiento u operación, según (RIVERA, 2009). A pesar de ello, la alternativa del mantenimiento correctivo para casos tolerables que no tienen un alto esfuerzo dentro de su contexto, y que los recursos de los métodos de reparación estén disponibles entonces podría proceder sin dificultad. Para dar solución a los daños en materiales especiales usados para discos de rotores se acude a la combinación de actividades técnicas de enfoque mecánico que muy a menudo varias de acuerdo con las dimensiones o composición del material. Se puede mencionar que los procedimientos podrían parecerse mucho para el desarrollo de una reparación por soldadura utilizando diferentes consumibles hacen notar soluciones con diversos resultados y hasta desconocidos.

Los motivos frecuentes de las averías en los elementos es la falta de mantenimiento, ambientes de trabajo agresivo, y deficiencia de las características mecánicas de los materiales constitutivos de componentes y subsistemas de equipos e instalaciones industriales. El caso de componentes mecánicos de extremada importancia para el proceso de generación de energía eléctrica como parte vital del desarrollo económico, requiere de la debida consideración para con el establecimiento de procedimientos específicos que respondan con soluciones puntuales sin la necesidad de desentender al personal técnico de esta labor apegada al cumplimiento de estándares internacionales y locales. Por lo tanto, los discos de rotores de una turbina de generación de energía eléctrica, sea dentro de un contexto de trabajo en caliente como turbinas de vapor, o dentro de un contexto abrasivo el caso de hidroeléctricas, estos sufren daños severos reflejados en

desgaste, según (PINO GÓMEZ, 2017). La construcción, el diseño y el tipo de material de fabricación, ha tratado de combatir las intensas manifestaciones de fallos, pero que en varias ocasiones los discos no han respondido con las condiciones de funcionamiento variantes del proceso productivo, lo que desencadena en la necesidad de recambios costosos o de preferencia la recuperación del elemento, y así evitar el cambio innecesario de todo un diafragma.

La soldadura de arco eléctrico como alternativa de reparación sea en la recuperación de elementos mecánicos por recargue o unión de piezas separadas, según los trabajos especializados de (PÉREZ, 2020), y (ARES, 2021), es la alternativa más confiable. La soldadura de arco eléctrico manual de electrodo revestido SMAW ha servido para resolver problemas de fracturas, desgaste y fatiga de la mayor cantidad de materiales metálicos con especial composición, principalmente por razones de versatilidad, variedad de consumibles y facilidad de implementación. Sin embargo, varios procesos de soldadura de arco eléctrico de mejor eficiencia han servido para destacar en la reparación de varios ejemplos industriales como el caso de la reparación de discos de rotores de turbinas, pero, existen desventajas en la recuperación de piezas averiadas que requieren conservar o mejorar las propiedades mecánicas de resistencia para aceros al carbono de alta aleación forjados y tratados al vacío, según algunos entendidos del tema como (FIGUEROA GARCÍA, 2019), (SÁNCHEZ ARCOS, 2019), (HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, 2018), entre otros.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la reparación de discos del rotor de turbinas de material ASTM A 470-8 por soldadura de arco eléctrico SMAW vs GTAW. Al contar con un proceso de reparación con definidas pautas en lo que refiere a la intervención de la soldadura, se podrá garantizar la soldabilidad, mantener las propiedades mecánicas y dimensionales de la pieza a reparar. Los discos reparados y disponibles para el proceso traen consigo la funcionalidad de los sistemas de generación de energía eléctrica, y mientras más se encuentren las posibilidades de hacerlo de manera ágil será mucho mejor.

## **Métodos y materiales**

A continuación, se procede con la explicación del proceso a seguir en la reparación de discos del rotor de turbinas de vapor en caliente, para casos de materiales conocidos y desconocidos desde un enfoque general. Fue resumida la formulación del proceso propuesto en el dimensionamiento del problema a solucionar y el seleccionamiento de los recursos necesarios para la reparación

efectiva. En la figura 1, se muestra un proceso lógico y secuencial que resume actividades estrictamente técnicas con un enfoque oportuno hacia la solución del problema de fallas ocurridas en los discos del rotor de turbinas, pero que bien podría ajustarse al tratamiento de los demás componentes rotatorios de la turbina.

Para empezar el proceso se identificó la presencia del requerimiento de reparación, el cual viene acompañado de los síntomas que pueden debilitar el correcto funcionamiento de la turbina, como es la pérdida de potencia, incremento de ruidos, niveles permisivos de vibración, entre otros. Lo mencionado se definió la forma de comunicación con los responsables del mantenimiento sea por pedido verbal o escrito, por parte de los responsables de producción u operación que llevan a cabo el monitoreo, y conforme a un plan establecido se llegue a decidir por la intervención correctiva.

**Tabla 1.** Elementos constituyentes de materiales base de discos del rotor de turbinas de vapor. (Bringas, 2016)

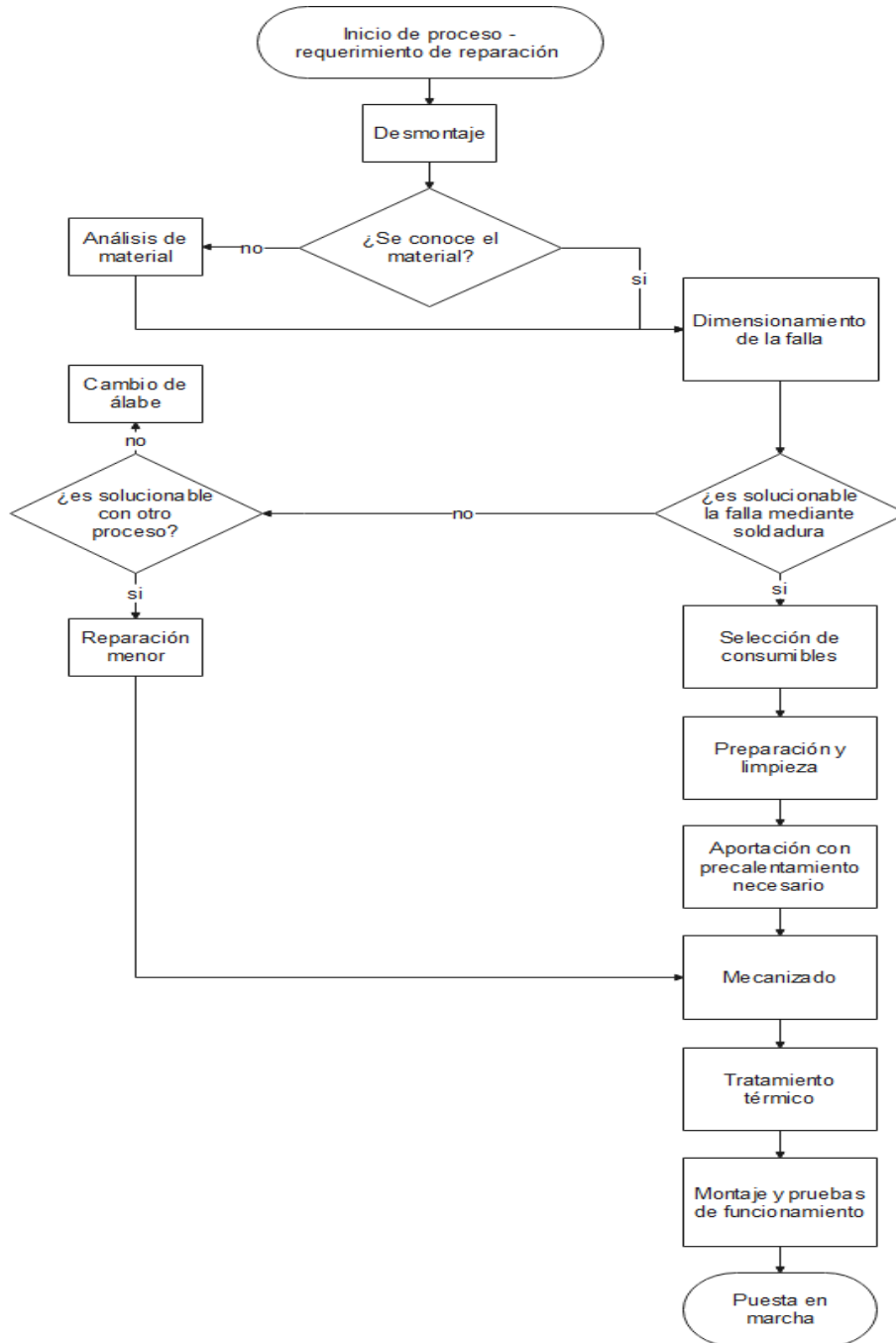
	<b>ASTM A565 GRADO 616</b>	<b>ASTM A 470, CLASE 8</b>
<b>ELEMENTOS</b>	0.2 - 0.25 % C	0.3% C
<b>CONSTITUYENTES</b>	0.5 - 1 % Mn	0.5% Ni
	0.5 % Si	1.0% Mn
<b>ACEROS FORJADOS</b>	11 - 12.5 % Cr	1.27% Cr
	0.5 - 1 % Ni	1.25% Mo
<b>NOTA.</b>	0.9 - 1.25 % Mo	0.25% V
<b>TRABAJO °T ≤538 °C</b>	0.03 % P	
	0.025 % S	
	0.9 - 1.25 % W	
	0.2 - 0.3 % V	

**Recopilado por:** Autores

El desmontaje se procedió luego de conocer el requerimiento de reparación, el cual empezó con las paradas de producción, acondicionamiento y señalética del lugar de trabajo, para que la participación de personal técnico experimentado y calificado se haga efectiva con los recursos técnicos necesarios. Caso contrario se sugiere proceder con el análisis del material mediante procesos de estequiometría, métodos químicos, analizadores fluorescencia de rayos X “XRF” o métodos empíricos de reconocimiento de metales. Los materiales base más comunes y considerados como casos de estudio, que fueron tomados en cuenta para la estructuración de discos del rotor de procedencia americana, principalmente contienen elementos metálicos que podrían desmejorar la soldabilidad, los cuales se definen valores referenciales en la Tabla 1.

Además, para que se lleve a cabo el análisis de los materiales se tomó en cuenta los principales detalles de las propiedades mecánicas, físicas y tratamientos térmicos, y así fue dimensionado con certeza el fallo.

Figura 1. Diagrama de procedimientos de reparación



Elaborado por: Autores



Luego de conocer el material fue dimensionado el fallo conforme a la referencia del estado de rotura de los discos con inmensos desastres dentro de la turbina como límite superior, sea principalmente a las condiciones de trabajo. La superación de los límites permisivos de impactos de partículas sólidas, grietas, pérdida de recubrimiento, corrosión, roces, deformación por fluidez térmica y sobre temperatura, según (Mazur, 1999), hizo considerarlas como principales evidencias para decidir el remplazo del componente o la reparación. Para dimensionar la falla se consideraron los límites tolerables de los fallos manifestados en desgaste, rotura, o deformación, y para ello se tomó en cuenta las dimensiones referenciales estandarizadas conforme a la potencia de la turbina, velocidad angular de la turbina, el número de etapas y álabes. Al reconocer el daño o el área destinada a restaurarse mediante la verificación del grado de complejidad y límites permisibles de fallos de un material conocido, se tomó la decisión de reparar, sabiendo que estos temas definen las condiciones que intuyen la solución apropiada del problema.

Al conocer la dimensión del fallo y estar seguro de la solución, entonces se eligió el método que muy apropiadamente al tratase de soldadura se consideran a los casos con la presencia de desgaste, fracturas o deformaciones considerables hasta un límite permisible. Sin embargo, las deformaciones menores que prácticamente no son acompañadas de desgaste excesivo ni desperfectos considerables se mencionaron proceder con reparaciones menores de acuerdo con la lógica del proceso propuesto.

Para proceder a reparar por soldadura se debió primero seleccionar los consumibles necesarios mediante las interpretaciones del carbono equivalente (CE-AWS o CE-IIW) y diagrama de Shaeffler, y de esa manera fue identificada la soldabilidad y preparación térmica que debe recibir el metal base. La correcta selección del consumible sea en proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido SMAW, o protección gaseosa con electrodo de tungsteno GTAW, hizo que las propiedades mecánicas e imperfecciones sean cada vez menos probables. Los argumentos suficientes para definir el nivel de soldabilidad al caracterizar el cordón resultante mediante el diagrama de Shaeffler, tienen que ver con la ubicación del punto referencia níquel y cromo equivalente en cuanto se enmarque en las zonas de agrietamiento en frío o caliente, formación de microestructuras frágiles y/o crecimiento del tamaño de grano.

Para continuar con el proceso de reparación del componente definido como defectuoso reparable, se debió definir los recursos y variables necesarias para proceder con la soldadura SMAW o

GTAW, los cuales se resume en equipos de protección, elementos del equipamiento de soldadura, consumibles, y elementos de limpieza. El trabajo técnico de soldadura comenzó con la sujeción apropiada del disco del rotor en la mesa de trabajo, y con las previsiones necesarias se desarrolla la limpieza superficial. La limpieza debe cumplir con el objetivo de liberar de agentes extraños a las paredes que muestran deterioro o fractura. Según sea el problema se realizó los rellenos o uniones de soldadura conforme a dimensiones definidas bajo criterios estandarizados como el caso de la sociedad americana de soldadores AWS D1.6 y la sociedad americana de ingenieros mecánicos ASME Sección IX.

Antes de empezar con el aporte de la soldadura para fines de recuperación de la pieza, fue necesario tomar en cuenta las recomendaciones de soldabilidad y los criterios definidos en el seleccionamiento del consumible, y así llevar a efecto el proceso de preparación térmica para los discos del rotor que responden a espesores iguales o mayores a 1 pulgada. En muchas ocasiones los pases de soldadura fueron realizándose a la par, sin embargo, los pases de relleno y peinado son los más populares para las reparaciones debido a que no son muy frecuentes las uniones a tope por ende los pases de raíz no son comunes. Para casos de discos del rotor de turbinas que presentaron agrietamiento se propuso resolver con uniones a tope, de tal manera que se proteja la zona agrietada con algún material de similares o superiores propiedades mecánicas.

La limpieza después de cada pase de soldadura realizada indudablemente fue de vital importancia, y según el proceso de soldadura seleccionado fue diferente el uso de herramientas e insumos, debido a la presencia de escoria y materiales extraños en las superficies de los cordones elaborados. No se descartó el desarrollo de un normalizado como tratamiento térmico para efectuarse luego de proceder con los recargues de soldadura, labor que permite facilitar el mecanizado y la disminución de las tensiones internas.

El uso de máquinas herramientas para liberar el material adicional, se limitó al acabado superficial y al cumplimiento de las dimensiones referenciales establecidas por el diseño del fabricante. El acabado superficial del mecanizado de discos del rotor se pudo mejorar mediante la implementación del proceso complementario de bruñido con bola o rodillo para poder mejorar la rugosidad, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga y aumentar la dureza, mismas propiedades necesarias para que los elementos reparados puedan acoplarse nuevamente al contexto operacional de trabajo.

En la mayoría de las empresas de alto prestigio el control de calidad fue indispensable en todos los procesos importantes que forman parte de la reparación, y es por eso que el aporte de soldadura y el mecanizado fueron revisados sus resultados de manera apropiada por ensayos no destructivos, pero según las posibilidades, el caso de discos como son componentes recuperables con menores posibilidades de agrietamiento adquirido en la soldadura, la inspección visual es el método junto con sus técnicas destacadas como recomendables para evaluar las demás imperfecciones. Cabe recalcar que el proceso de control de calidad o inspección de los resultados vino incluido en los procesos de soldadura y mecanizado como parte de la garantía que debe darse a los resultados, y es que el proceso a llevarse a cabo en la reparación debe ser integral y según las condiciones que tenga la empresa, pues se llevará a efecto la inspección. Los ensayos de tintas penetrantes y partículas magnéticas fueron necesarios para descartar grietas principalmente a los materiales de baja soldabilidad, y el caso de radiografía, partículas magnéticas o ultrasonido fue direccionado para evaluar casos de soldadura GTAW en donde las posibilidades apuntaban a la aparición de incrustaciones.

Luego de obtener un acabado superficial aceptable y cumplir con las propiedades mecánicas necesarias, se garantizaron los terminados y posiblemente una mejora en las propiedades mecánicas, mediante el desarrollo de tratamientos térmicos que en su materia fueron muy apropiados para los metales en estudio. Los tratamientos térmicos liberaron tensiones internas generadas en la soldadura de mantenimiento y haciendo que el metal sea menos duro para mecanizarlo, por tal virtud el normalizado junto con el recocido fueron las principales alternativas. El revenido y/o temple en algunos casos se recomendó implementar luego de mecanizar y así conseguir el acabado superficial con máximo aumento posible de la tenacidad medible con pruebas Charpy.

Casi al finalizar el proceso técnico de reparación se conllevó un proceso de montaje de acuerdo con las recomendaciones de ajuste, protección, lubricación, ajuste, calibración, y limpieza que muy seguramente estuvieron tipificadas en manuales de fabricantes. Sin embargo, al tratar el montaje estrictamente de discos del rotor se debió considerar la ubicación e inclinación correcta en el rotor y tomar en cuenta todas las recomendaciones técnicas de funcionamiento y manipulación segura.

## Resultados y discusión

A continuación, se exponen los principales resultados a obtener en una reparación de discos del rotor de acuerdo con el proceso propuesto, conforme a la revisión de casos documentados en turbinas de 20.65 MW (Mazur, 1999) y 65MW (Mecanalis SA, 2021), con el propósito de interpretar resultados puntuales de soldabilidad y los más posibles logros en propiedades mecánicas necesarias para soportar las condiciones de trabajo agresivas.

Para el desmontaje se logró obtener las piezas debidamente limpias, separadas y ordenadas de acuerdo con recomendaciones del fabricantes y criterios de los técnicos principalmente mecánicos. El cumplimiento de instrucciones definidas en manuales apropiados de la turbina que recopila varias normativas, así como los reglamentos de seguridad industrial ASME B30.20 e izaje de cargas ASME B30.9 para casos de tecnologías americanas, ha notado resultados del desmontaje exitoso, con un mínimo porcentual de riesgos y eficacia del trabajo, aunque difieren en los tiempos de cumplimiento los dos casos de diferente potencia.

**Figura 2.** Desmontaje de turbina de vapor 65MW.

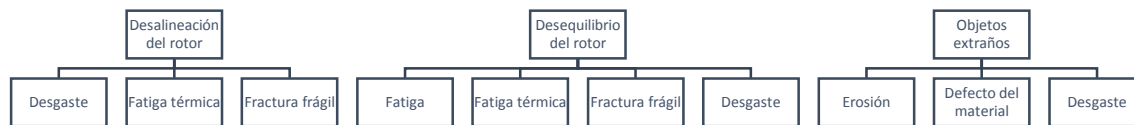


**Fuente:** (Mecanalis SA, 2021)

En cuanto al reconocimiento del metal base se muestra que los resultados más inmediatos serían mediante la aplicación de analizadores fluorescencia de rayos X “XRF”, aunque los estudios en laboratorios por estequiometría son más demorados en obtener resultados, pero son más reales para el caso de no conocer el material. Sin embargo, los resultados mostrados por (Mazur, 1999) hacen prever un análisis de fallas para cada caso, de tal manera que en el presente trabajo se

muestran los casos de discos del rotor y álabes con mecanismos de fallos manifestados principalmente en fragilidad de revenido, fatiga, fatiga térmica, erosión, desgaste y defecto del material.

**Figura 3.** Relación de mecanismos de fallas y sus causas más probables en los discos de rotores estudiados.



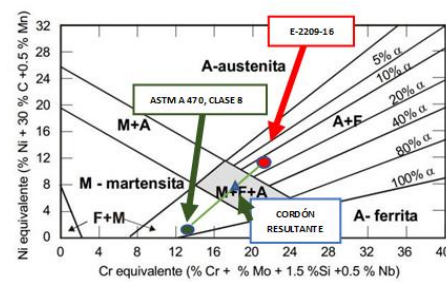
**Elaborado por:** Autores

Analizando la relación que existe entre los mecanismos de fallos y las causas hace prever que los elementos del rotor son reparables por soldadura cuando presentan casos de desgaste y fatiga ya que muestran la mayor probabilidad de ocurrencia, y se establecería un límite de tolerancia que responde a la dimensión del espesor de los dientes y alojamientos del disco hasta un 25% de pérdida de material respecto a la dimensión referencial del diseño. Las fracturas podrían ser tratadas mediante la preparación previa de las superficies y compromete mayores recursos en el mecanizado siempre y cuando la fractura no sea desde la parte interior longitudinal.

Para el estudio de la soldabilidad del material base a reparar se tomó en cuenta el cálculo referencial máximo del carbono equivalente CE-AWS de los casos de estudio ASTM A470 CLASE 8 y ASTM A565 GRADO 616 de 1.05 y 3.41 respectivamente. Lo mencionado destaca una pobre soldabilidad y de acuerdo a las dimensiones del espesor que oscila entre  $\frac{3}{4}$ " a  $1\frac{1}{2}$ " y temperaturas de precalentamiento entre  $120^{\circ}\text{C}$  a  $250^{\circ}\text{C}$ . Los electrodos fueron elegidos de acuerdo con la existencia de formaciones microestructurales martensíticas y ferríticas que establece el electrodo en el cálculo del Ni y Cr equivalente, y procurando que se de una dilusión referencial del 30% necesarias para que el cordón resultante se forme en condiciones térmicas favorables.

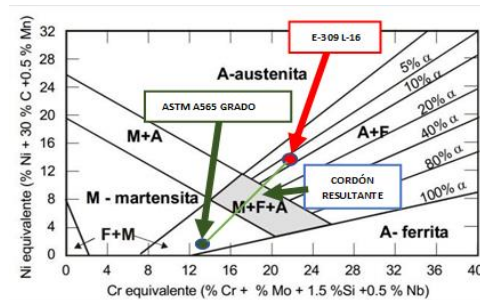
## Los resultados de la soldadura por

**Figura 4.** Determinación de cordón resultante de un relleno o unión soldada SMAW en los discos del rotor de turbina de vapor con material ASTM A 470, CLASE 8 y un caso de electrodo para aceros inoxidables duplex.



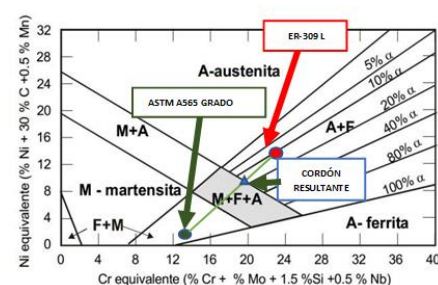
Elaborado por: Autores

**Figura 5.** Determinación de cordón resultante de un relleno o unión soldada SMAW en los discos del rotor de turbina de vapor con material ASTM A565 GRADO 616 y un caso de electrodo para aceros inoxidables austeníticos.



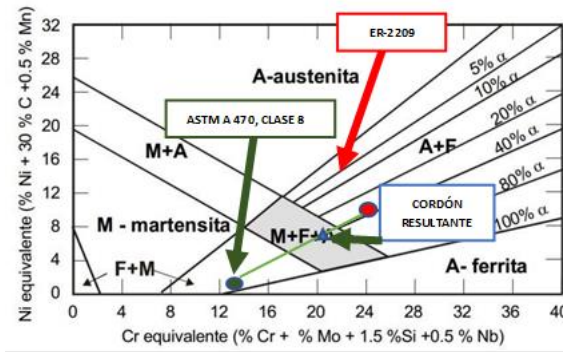
Elaborado por: Autores

**Figura 6.** Determinación de cordón resultante de un relleno o unión soldada GTAW en los discos del rotor de turbina de vapor con material ASTM A565 GRADO 616 y un caso de electrodo para aceros inoxidables austeníticos.



Elaborado por: Autores

**Figura 7.** Determinación de cordón resultante de un relleno o unión soldada GTAW en los discos del rotor de turbina de vapor con material ASTM A 470, CLASE 8 y un caso de electrodo para aceros inoxidable duplex.



Elaborado por: Autores

La interpretación del estudio de soldabilidad resume que la reparación de los discos de rotores de aceros ASTM A565 GRADO 616 y ASTM A 470 CLASE 8 es favorable acorde al uso de electrodos inoxidable austenítico y duplex, debido a que el cordón resultó austeno-ferrítico, entre el 10% al 40% de ferrita, y sin riesgo de defectos graves durante el proceso de soldeo, a un mínimo de 30% de dilución bajo condiciones térmicas de precalentamiento controladas entre el 120°C a 250°C.

De acuerdo con las condiciones de soldabilidad favorables definidas, y con la aplicación de tratamientos térmicos progresivos en el margen de la preparación para poder mecanizar las ranuras con fresadoras in situ, se provee obtener interesantes propiedades mecánicas para el contexto de operacional de turbinas con potencia de trabajo entre 20 MW a 60MW de la siguiente manera:

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas referenciales del material del rotor de turbina de 20.6MW después de la soldadura GTAW con y sin tratamiento térmico definido electrodos duplex.

	<i>Especificaciones</i> ASTM A 470, CLASE 8 (Bringas, 2016)	<i>Material base del rotor</i> (Mazur, 1999)	<i>Zona afectada de calor</i>	<i>Soldadura</i>			
	<i>Antes de soldar</i>	<i>3 recargues + revenido al normalizado y maquinado</i>	<i>3 recargues + revenido al normalizado y maquinado</i>	<i>3 recargues + revenido al normalizado y maquinado</i>			
<i>Límite de tensión (MPa)</i>	725 – 860	780	760	680	672	665	645
<i>Dureza (Hv<sub>10</sub>)</i>	212 – 235	204 – 212	202 – 211	232 – 244	242 – 260	210 – 218	234 – 248

Impacto Charpy (J)	8.2	7	18.70	98	117	30	54
--------------------	-----	---	-------	----	-----	----	----

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas referenciales del material del rotor de turbina de 20.6MW después de la soldadura SMAW con y sin tratamiento térmico definido electrodos austeníticos.

	<i>Especificaciones</i> ASTM A565 GRADO 616 (Bringas, 2016)	<i>Material base del rotor</i>		<i>Zona afectada de calor</i>		<i>Soldadura</i>	
	<i>Antes de soldar</i>	<i>3 recargues normalizado y maquinado</i>	<i>+ revenido al horno máx °T</i>	<i>3 recargues normalizado y maquinado</i>	<i>+ revenido al horno máx °T</i>	<i>3 recargues normalizado y maquinado</i>	<i>+ revenido al horno máx °T</i>
Límite de tensión (MPa)	825 - 965	882	860	680	658	665	657
Dureza (Hv <sub>10</sub> )	253 - 300	240 - 285	320	244 - 312	267 - 321	210 - 218	224 - 252
Impacto Charpy (J)	11	9.6	23	108.4	128	48	52

Finalmente se puede obtener resultados alentadores en las propiedades de dureza y tenacidad del material, sabiendo que en la Zona Afectada de Calor ZAC se ganarían los mayores valores con respecto a los obtenidos en el metal base y el cordón. Al cumplir con los procedimientos a seguir en la reparación, mecanización efectiva de las ranuras a dimensiones correspondientes al diseño, con la implementación de bruñido o recubrimiento metálico, y el desarrollo de un revenido a máxima temperatura, se define un incremento límite del 16% las propiedades de dureza y tenacidad en las zonas de contacto directo con los álabes. Sin embargo, se puede notar que la mayoría de los casos intervenidos han respondido con 3 pases de soldadura al tratarse de la recuperación dimensional de la ranura, de tal manera que se deba aliviar las tensiones mediante el recocido para poder llevar a efecto la mecanización con ciertas limitaciones en el desbaste regular. En el montaje del disco en el rotor se tomando en cuenta la ubicación de los elementos mecánicos de sujeción con el cuidado direccionado en la ubicación, alineación, y balanceo, lo que forma parte del control de resultados obtenidos en la reparación.

## Conclusiones y recomendaciones



Los casos analizados de turbinas de 20.6MW y 60MW hacen notar que su reparación es procedente de forma similar para conseguir un incremento de las propiedades mecánicas de tenacidad y dureza de 2% al 16% en el resultado general de la reparación, a pesar de que la aplicación de los procesos de soldadura GTAW vs SMAW con electrodos austeníticos y duplex se notan resultados diferentes en el terminado, tasa de deposición y eficiencia. Al realizar al menos tres pases de soldadura con previo calentamiento del metal base se puede notar un incremento de dureza y resistencia al impacto de forma progresiva, por ello se debe realizar el pase caliente para recocido, de tal manera se pueda tener la posibilidad de mecanizarlo sin inconveniente. Para el revenido en horno con temperaturas de 600°C, más tratamiento posterior entre 700 y 780°C con enfriamiento en aire, se debe tener en cuenta que el fenómeno de fragilidad el proceso térmico puede aparecerse es que no se cumple con los tiempos de ejecución, control de los niveles de temperatura en el calentamiento y enfriamiento.

## Referencias

1. ARES, J. A. (2021). El metal: técnicas de conformado, forja y soldadura. Parramón Paidotribo.
2. EN UNE. (2016). Definiciones del mantenimiento industrial.
3. ESPINILLA PEÑA, F. J. (2019). Elaboración de un modelo 3D de una turbina de vapor. Santa Cruz de Tenerife: RIULL.
4. FIGUEROA GARCÍA, D. Á. (2019). Implementación de un plan de inspección y reparación por soldadura de rodetes Pelton, para la planta hidroeléctrica Aguacapa. Guatemala: Tesis Doctoral. Universidad de San Carlos de Guatemala.
5. HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, R. A. (2018). Evaluación de un prototipo de fundente aglomerado para la recuperación de piezas sometidas a desgaste abrasivo. HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, Rancel Alejandro. Evaluación de un protoUniversidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
6. Mazur, Z. K. (1999). Reparación por Soldadura de Rotores de Turbinas de Vapor y de Gas Fabricados con aceros al Cr-Mo-V. Revista de metalurgia, 100-110.
7. Mecanalis SA. (03 de 03 de 2021). Reparación en sitio de Turbina de vapor de 65 MW. Obtenido de [www.mecanalis.com.ar](http://www.mecanalis.com.ar): <https://youtu.be/ZQ0B034ZiJM>

8. PÉREZ, O. H. (2020). Defectos y controles de las uniones soldadas en soldadura manual. Cuba: Editorial Universitaria.
9. PINO GÓMEZ, J. (2017). Importancia para el mantenimiento de elementos mecánicos y fallos en turbinas de vapor: Análisis de históricos. La Habana: Ingeniería Energética.
10. RIVERA, G. (2009). Reacondicionamiento de los álabes directrices de una turbina hidráulica tipo francis en hidroeléctrica los esclavos y su análisis de costos. Guatemala: Universidad de San Carlos.
11. SÁNCHEZ ARCOS, M. (2019). Análisis técnico de la recuperación de piezas. . Sevilla: Universidad de Sevilla.
12. SÁNCHEZ, O. A. (2018). Análisis de falla en los sistemas de bombeo mecánico del campo LISAMA. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.