

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Reemplazo de Revestimiento de Cromado Duro por
Carburo de Tungsteno por HVOF para Motores de
Perforación**

Proyecto de investigación

Edwin Andrés Moreno Viteri

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 7 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Reemplazo de Revestimiento de Cromado Duro por
Carburo de Tungsteno por HVOF para Motores de
Perforación**

Edwin Andrés Moreno Viteri

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico:

Alfredo Valarezo, PhD.

Firma del profesor:

Quito, 07 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

De la misma manera, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Edwin Andrés Moreno Viteri

Código: 00108959

Cédula de Identidad: 1714438833

Lugar y fecha: Quito, 07 de mayo de 2019

AGRADECIMIENTOS

Con inmensa gratitud a todos los que inspiraron este trabajo.

A mi abuelo, Servio Moreno, de quien herede mi perseverancia.

A mis padres, Edwin y Jacqueline, por todo el cariño y apoyo que me han brindado durante mi vida.

En el cielo, a mis abuelas por el amor que siempre me dieron

A mis profesores que aportaron a que ame mi carrera y

a Dios por ser el pilar de mi vida.

RESUMEN

El enfoque de la investigación presenta en dos partes, el remplazo del recubrimiento de cromado duro de un rotor de motor de perforación con recubrimiento de carburo de tungsteno (WC-CoCr) utilizando termo-rociado de combustible y oxígeno a alta velocidad, HVOF por sus siglas en inglés. La primera parte trata la obtención de la geometría de la pieza para poder realizar una galga que permitirá determinar si el nuevo recubrimiento fue aplicado uniformemente en la pieza; luego se procede a obtener la microestructura del revestimiento para poder observar uniformidad en el mismo y se finaliza haciendo un análisis de micro dureza bajo la norma ASTM E-384-1 con el objetivo de ver la resistencia al desgaste del cromado duro. La segunda parte consiste en remover el cromado duro del rotor con ácido clorhídrico, una mezcla de 30% ácido clorhídrico y 70% agua destilada. Posteriormente se procede a aplicar el nuevo recubrimiento de (WC-CoCr) mediante HVOF y se realizan pruebas de adherencia bajo la norma ASTM C633 con el fin de verificar que las partículas se hayan adherido correctamente al acero. Una vez que se verificó su correcta adherencia, se obtuvo la microestructura del (WC-CoCr) y se hicieron nuevamente ensayos de micro dureza de este revestimiento para proyectar su resistencia al desgaste contra la del cromado duro. Los resultados muestran la microestructura deseada con baja porosidad, lo que brinda mejores propiedades mecánicas. Lo mencionado permitió obtener buenos resultados en los ensayos de dureza con los cuales se concluye que el recubrimiento de (WC-CoCr) tiene mejor rendimiento al desgaste que el cromado duro y proporcionará un mayor tiempo de vida para el rotor.

Palabras clave: Cromado duro, WC-CoCr, HVOF, Termo-rociado, resistencia al desgaste, microestructura

ABSTRACT

The focus of the investigation presents the replacement of the hard chrome plating of a drilling motor rotor with a coating of tungsten carbide plus cobalt chrome (WC-CoCr) using high velocity oxygen fuel (HVOF), in two parts. The first part deals with the obtainment of the geometry of the piece to make a gauge that will allow to determine if the new coating was applied uniformly on the piece. From here the obtainment of the microstructure of the coating allows the observation of the uniformity on it and is finalized by doing a micro hardness analysis under the ASTM E-384-1 standard in order to see the wear resistance of hard chrome plating. The second part consists of removing the hard chrome from the rotor with hydrochloric acid, a mixture of 30% hydrochloric acid and 70% distilled water. From here, the next step is to apply the new coating (WC-CoCr) by HVOF and to perform adhesion tests under the ASTM C633 standard in order to verify that the particles have adhered to the steel correctly. Once the correct adherence was verified, the microstructure of WC-CoCr was obtained, and the coating underwent micro hardness tests again to project its wear resistance against that of hard chromium plating. The results show the desired microstructure with low porosity, which provides better mechanical properties. This allowed a retrieval of positive results in the hardness tests which allows to conclude that the coating (WC-CoCr) has better wear performance than hard chromium plating and provide a longer life time for the rotor.

Key words: Hard Chrome, WC-CoCr, HVOF, Thermal spray, wear resistance, microstructure

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. MÉTODOS.....	15
2.1. GEOMETRÍA.....	16
2.2. REMOCIÓN DE CROMADO	17
2.3. SOLDADURA DE CORRECCIÓN	18
2.5. METALOGRAFÍA.....	20
2.6. MICRO-DUREZA.....	20
2.7. DISEÑO DEL ROTOR.....	20
3. RESULTADOS	27
2.8. MICROESTRUCTURA.....	27
2.9. ENSAYO DE ADHERENCIA	32
2.10. MICRO-DUREZA.....	34
2.11. DISEÑO	36
4. CONCLUSIONES	43
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
6. ANEXO	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de rociado.....	19
Tabla 2. Estadísticas de espesor de Cromado Duro.....	29
Tabla 3. Estadísticas de espesor de WC-CoCr.....	32
Tabla 4. Resultados de ensayos de adherencia	34
Tabla 5. Resultados de análisis de flexión.....	36
Tabla 6. Resultados de análisis de torsión	37
Tabla 7. Esfuerzo de amplitud y medio	37
Tabla 8. Factores de modificación por fatiga.....	37
Tabla 9. Esfuerzo de rendimiento y factor de seguridad	38
Tabla 10. Valores de ecuación de desgaste.....	38
Tabla 11. Desgaste	39
Tabla 12. Valores para determinar factor de fricción	39
Tabla 13. Valores de factor de fricción.....	40
Tabla 14: Presupuesto	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rotor en estator.....	10
Figura 2. Flujograma de desarrollo de proyecto a nivel laboratorio.....	15
<i>Figura 3.</i> Galga para rotor de motor de perforación.....	16
Figura 4. Rotor sumergido en solución de ácido clorhídrico.....	17
Figura 5. Rotor antes y después de soldadura de corrección.....	18
Figura 6: Geometría de rotor para cálculo de momento de inercia.....	21
Figura 7. Diseño de rotor con momento y dimensiones para cálculo.....	22
<i>Figura 8.</i> Diseño de rotor con dimensiones y torque.....	23
Figura 9. Microestructura de Cromado Duro a 100X.....	27
Figura 10. Microestructura de Cromado Duro en SEM a 1000X.....	28
Figura 11. Medidas de Espesor de Cromado Duro.....	29
Figura 12. Microestructura de WC-CoCr con HVOF a 100X.....	30
Figura 13. Microestructura de WC-CoCr con HVOF en SEM a 1000X; a) carburo y b) porosidad.....	30
Figura 14. Medidas de Espesor de WC-CoCr.....	31
Figura 15. Prueba de adherencia.....	33
Figura 16. Micro dureza, a) Cromado duro; b) WC-CoCr.....	35
Figura 17. Micro dureza, a) Recubrimiento de Cromo; b) Recubrimiento de Carburo de Tungsteno.....	36
Figura 18. Flujograma de proceso industrial.....	41
Figura 19: Galga para rotor de motor de perforación.....	47

1. INTRODUCCIÓN

Los motores de perforación, también conocidos como motores de desplazamiento positivo (PDM), por sus siglas en inglés, son motores que se utilizan en la industria petrolera para convertir la potencia hidráulica de fluido en potencia mecánica, ocasionando la rotación de la broca. Estos motores están compuestos por dos partes principales: rotor y estator (Ranjba & Sababi, 2011), el rotor consiste en una forma helicoidal que va dentro de un estator, como indica la figura 1.

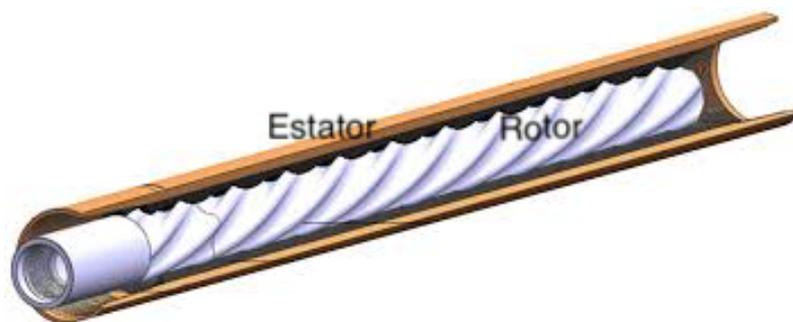


Figura 1. Rotor en estator

Fuente: *Rotor-Slide, 2015*

Los rotores están fabricados de acero inoxidable martensítico 17-4 (Dyna-Drill, 2016), los cuales llevan algún tipo de revestimiento, el cual cumple la función de proteger al acero de corrosión y desgaste debido a las condiciones de operaciones a las que son sometidos estos equipos. Por otro lado, el estator generalmente está compuesto por un elastómero, el cual es

un compuesto que incluye no metales en su composición y que muestra un comportamiento elástico.

El modo de fabricar los anteriormente mencionados elementos brinda las propiedades necesarias. El diseño del rotor de perforación consiste en que, el estator posea un diente o ranura más que el rotor, de esta manera permite que pueda rotar dentro del mismo (National Association of Corrosion Engineers, 1990). La función del motor es convertir la energía hidráulica del fluido de perforación a alta presión en energía mecánica, lo que brinda torque al rotor, provocando que este gire o rote excéntricamente (Zarchi, 2010). Dicha rotación, transforma la presión de la energía hidráulica del lodo de perforación en energía mecánica, lo que ocasiona el movimiento de la perforadora. Esto sucede debido a que el fluido de perforación no puede comprimirse dentro de la cavidad creada entre el estator y el rotor, de esta forma creando una cuña cuando es sometido bajo presión y de esta manera la fuerza aplicada en la parte superior de la cuña ocasiona que el rotor se mueva (Inglis, 2010).

Los elementos de los motores de lodo trabajan en condiciones extremas; el fluido de trabajo y las altas presiones a las que son sometidos pueden ocasionar fallas por diversos factores. Entre ellos, se menciona la mala elección del material del estator ya que este debería ser un polímero que permita el correcto funcionamiento del rotor, y a su vez pueda soportar las condiciones operatorias. Otro de los factores que pueden producir una falla, es el desgaste del revestimiento del rotor. La composición del lodo de perforación tiene una gran influencia, ya que entre más piedras y desechos contenga, causará más desgaste al recubrimiento del rotor, lo cual ocasionaría que se detengan las operaciones hasta volver a colocar el recubrimiento en el rotor. Cabe recalcar que, la temperatura y la presión a la que trabajan estos elementos, también son factores importantes de posibilidad de fallas. Finalmente, se puede mencionar que, el elastómero del que está hecho el estator posee alta resistencia a la

fricción, por lo que, es necesario que el revestimiento que se escoge para el rotor también sea de alta resistencia a la fricción.

Existen diversas técnicas para los recubrimientos de estos elementos, una de las más utilizadas es el revestimiento de cromado duro, que se utiliza en distintas industrias como la petrolera, aeroespacial, vehicular y militar (Ranjba & Sababi, 2011). Este tipo de recubrimiento tiene varias características ventajosas ante el desgaste; entre ellas las siguientes: dureza, reducción de la fricción y resistencia a ambientes corrosivos. Generalmente, se considera importante colocar una capa más gruesa de revestimiento, lo que brindará propiedades de mayor resistencia al desgaste (Ranjba & Sababi, 2011). El grosor de esta capa de cromo se conoce como cromo duro, ya que, pasa de ser un recubrimiento estético, a uno con función de prevenir agrietamientos creados por esfuerzos residuales que son superiores al esfuerzo máximo del revestimiento. El agrietamiento y la porosidad creadas por los mencionados esfuerzos residuales son característicos del cromado, los cuales forman un patrón de entrelazado en el metal base, permitiendo que el líquido corrosivo o gas penetre el mismo (ASM International, 1993).

Inicialmente, los lodos de perforación suelen ser a base de agua. estos lodos eran usados para levantar los residuos de la perforación a la superficie, sin embargo, en la actualidad con el crecimiento de la industria de perforación, su funcionamiento y uso ha variado y se ha incrementado (Ranjba & Sababi, 2011). Algunos de los aditivos que tiene el lodo de perforación afectan la eficiencia y la utilidad del rotor y el estator por lo que, es importante manejarlos con un alto contenido de agua. Para combatir las dificultades de corrosión y daños mecánicos causados por el lodo de perforación, fue necesario el uso del recubrimiento de cromo en los rotores y así se aumentó su tiempo de vida (National Association of Corrosion Engineers, 1990).

A lo largo de la historia de la industria de recubrimientos han existido diversos métodos para su colocación, entre ellos, el proceso tecnológico más utilizado es el termorociado de combustible de alta velocidad (HVOF), este proceso consiste en un flujo supersónico de gases calientes (aproximadamente 3000°C), el cual es producido por una combustión a alta presión de oxígeno y combustible gaseoso o líquido, junto con una expansión y aceleración del producto que se pasa por una boquilla que converge y diverge (Farokhian, Salehnasab, Zat Ajam & Nahidi, 2017). La razón por la que este proceso se ha popularizado, es porque extiende el período de duración de la protección, siendo este más largo que la de los otros materiales o tipos de revestimientos (Kawakita, Kuroda, Fukushima, & Koda, 2003); sus propiedades de alta dureza y buena resistencia a la fricción han hecho que este método sea ideal para el tipo de herramientas mencionadas y varias similares en la industria petrolera.

El cloruro en el lodo de perforación crea orificios en las superficies lisas del rotor, lo que ocasiona bordes ásperos que producen un desgaste en el estator. Estos cortes hacen que la eficiencia del sellado entre el rotor y estator vaya decayendo, lo que puede ocasionar que el motor se detenga a una baja presión diferencial (Zarchi, 2010). El cromado se deposita con una subcapa plana de níquel con el fin de prevenir contacto directo en el metal base debido al ambiente corrosivo, pues la composición de cloruro, sulfito de hidrógeno o dióxido de carbono pueden ocasionar corrosión y daño mecánico (National Association of Corrosion Engineers, 1990).

Sin embargo, a pesar de que el cromado duro es una excelente opción como recubrimiento para los rotores de los lodos de perforación, es tóxico y cancerígeno. Debido a que los niveles de emisiones aceptadas para el cromo hexavalente Cr^{6+} varían tanto en distintas partes del mundo, existen cada vez más restricciones para su uso (Yang, 2011). Uno de los factores principales que limitan la aplicación de cromado duro se encuentra en la etapa

de manufactura en el cual el rotor es sometido a un baño que contiene Cr^{6+} , el cual que provoca daño a la salud y al medioambiente. Estas emisiones de Cr^{6+} deben ser atrapadas en depuradores, aguas residuales contaminadas deben ser tratadas antes de ser liberadas a plantas de tratamiento público y los residuos sólidos deben ser desechados como residuos peligrosos (Flitney, 2007). Los efluentes de metales pesados llevan a un alto costo de eliminación, haciendo que este proceso no sea eficiente.

En la actualidad se busca remplazar el recubrimiento de cromo con uno de carburo de tungsteno (WC-CoCr), en muchas industrias se utiliza este revestimiento depositado por combustible de oxígeno a alta velocidad, ya que brinda un mejor rendimiento al desgaste, el cual es entre tres (3) a cinco (5) veces más que la del cromado duro, también tiene propiedades resistentes a la corrosión y un mejor tiempo de vida a la pieza (Farokhian, Salehnasab, Zat Ajam & Nahidi, 2017). Otra de las razones importantes por las que se utiliza WC-CoCr es porque tiene un efecto nocivo menor para el ecosistema.

En el presente estudio se desea observar la viabilidad de remplazar cromado duro usando HVOF por carburo de tungsteno como recubrimiento del rotor y los beneficios en su tiempo de vida y rendimiento en el PDM.

2. MÉTODOS

La figura 2 a continuación establece qué se realizó a lo largo del trabajo, desde el momento que se recibe el rotor hasta el momento que se lo entrega, incluyendo ensayos y pruebas que se llevaron a cabo para obtener un producto final para operaciones petroleras.

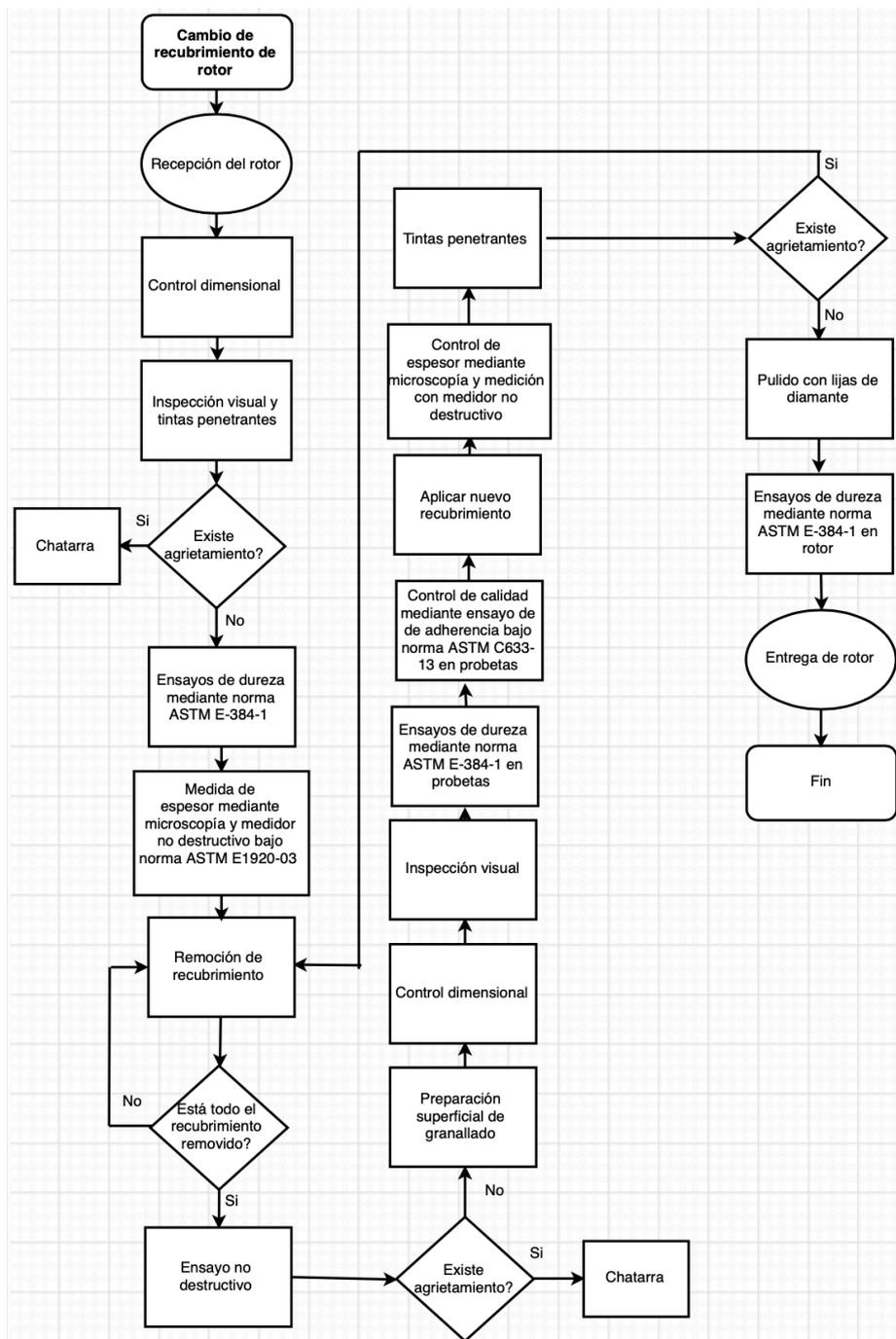


Figura 2. Flujograma de desarrollo de proyecto a nivel laboratorio

En resumen, la figura anterior destaca los pasos para lograr un cambio de recubrimiento del rotor efectivo. Es importante que se haya verificado que la pieza no esté dañada cuando se reciba, que se haya removido todo el cromado duro, y verificado que esté bien pulida y hecha soldadura de corrección, que se haya aplicado el nuevo recubrimiento, y verificado que esté uniforme y bien aplicado para finalmente ser pulida con lijas de diamante.

2.1. Geometría

Se inició tras obtener la geometría del rotor de acero inoxidable martensítico con la capa de cromado con el fin de poder verificar que se mantenga la forma original del rotor al momento de realizar la soldadura de corrección. Para esto, se realizó una galga, la misma que se puede observar en la Figura 3.

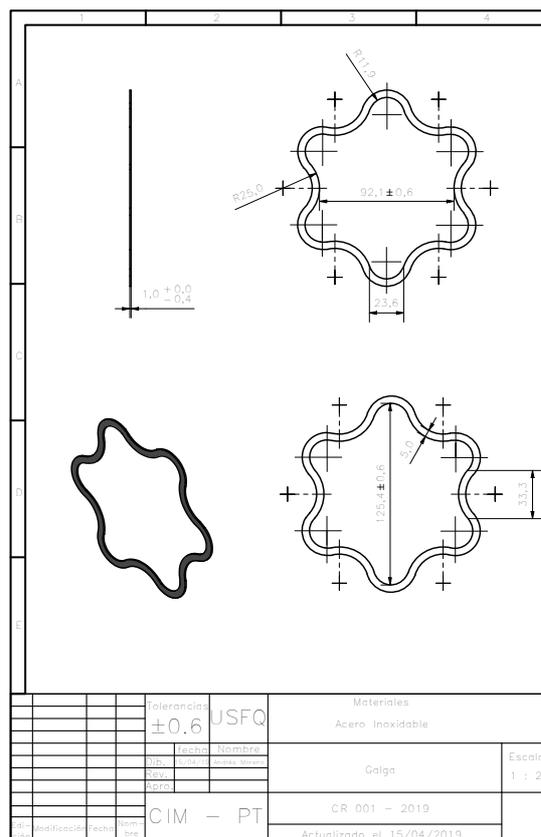


Figura 3. Galga para rotor de motor de perforación

Esta galga se realizó escaneando en 2D el rotor después de ser cortado con hilo, con el fin de colocar la geometría en AutoCAD para poder realizar el diseño con la geometría

exacta. Una vez que se dibujó la geometría externa, se procedió a darle un volumen para poder realizar el corte en agua de la galga.

2.2. *Remoción de cromado*

Tras obtener la geometría del rotor, se realizó un proceso para remover el recubrimiento de cromado duro del rotor, lo cual se llevó a cabo con una solución de ácido clorhídrico debido a que dicho ácido tiene propiedad corrosiva (CAMEO chemicals, 2017). En la Figura 4 se puede apreciar el rotor sumergido dentro el tubo de ensayo de 5 litros.



Figura 4. Rotor sumergido en solución de ácido clorhídrico.

Para lograr remover el cromo, se sumerge el rotor en una solución de ácido clorhídrico y agua destilada con una concentración del 30%, dejando la pieza sumergida por tres horas y media con el fin de remover toda la capa de cromado duro (Priddy, 2012). Se

sumergió la pieza en un volumen de 2.7 litros, el cual consta de 800 mililitros de ácido y 1900 mililitros de agua destilada.

2.3. Soldadura de corrección

Se hizo una soldadura de corrección de tipo TIG con acero inoxidable martensítico en los puntos desgastados del rotor y se realizó un maquinado con piedra de desbaste y mototool de estos puntos para pulir y volver a darle la forma eólica que tiene originalmente, con el fin de mantener esta pieza en el estado adecuado para su funcionamiento.



Figura 5. Rotor antes y después de soldadura de corrección

2.4. HVOF

Posteriormente, se procedió a realizar el proceso de termo rociado de HVOF con WC-CoCr con el sistema Diamond Jet. Para lo que se utilizó el polvo y las condiciones de rociado recomendadas por el fabricante de la pistola fueron usados para preparar el recubrimiento WC-CoCr; en la Tabla 1 podemos apreciar las condiciones de rociado.

Tabla 1. Condiciones de rociado

Sistema de HVOF	Diamond Jet
Combustible	Hidrógeno
Flujo de combustible (l/min)	667
Flujo de oxígeno (l/min)	214
Flujo de portador (l/min)	12.5
Tasa de polvo (g/min)	38
Distancia de rociado (mm)	216

Nota. Los datos fueron recuperados desde: (Reignier & Sturgeon, 2002)

El proceso de termo rociado con HVOF consiste en calentar el WC-CoCr y acelerarlo por una corriente de gas, de esta manera se adhiere a la superficie del rotor con el propósito de lograr mejores propiedades. Con el proceso de revestimiento HVOF, se produce una corriente de gas al mezclar y encender el oxígeno y el propano en una cámara de combustión, permitiendo que el gas a alta presión se acelere a través de una boquilla; el polvo se introduce en esta corriente, donde se calienta y acelera hacia la superficie del rotor. El recubrimiento de rociado térmico resultante consiste en plaquetas superpuestas finas a las que se les realizó un proceso de pulido con lijas de diamante con el objetivo de tener un acabado tipo espejo.

Una vez que se obtuvo el rotor con recubrimiento de WC-CoCr, se realizó una prueba de adherencia bajo la norma ASTM C633. Esta norma se conoce como Método de Prueba Estándar para Adhesión o Fuerza de Cohesión de Recubrimientos de Rociado Térmica y consiste en unir una cara del rotor con revestimiento con una cara de un accesorio de carga y someter este conjunto de rotor y accesorio a una carga de tracción normal al plano del revestimiento. Esta prueba se debe realizar a temperatura ambiente y con el uso de un espesor de 0.3mm de recubrimiento, este ensayo es considerado uno de los métodos para obtener un control de calidad en el revestimiento.

2.5. *Metalografía*

Se obtuvieron muestras del cromado duro y del WC-CoCr, las cuales fueron montadas en resina fenólica y pulidas según la norma ASTM E1920-03 (ASTM, 2016). Estas se pulieron usando suspensiones de alúmina de 9 μm , 5 μm y 1 μm con sus paños correspondientes, para de esta manera tener muestras tipo espejo y poder hacer un análisis metalográfico. Este análisis sirvió para ver la microestructura de las muestras y conocer el espesor del revestimiento aplicado, tanto del cromado duro como del WC-CoCr, para poder observar y verificar si existe porosidad en el material. Este proceso también sirvió para saber si el revestimiento de WC-CoCr fue aplicado de manera correcta mediante el rociado de HVOF.

2.6. *Micro-dureza*

Se realizaron ensayos de micro dureza, lo que permite proyectar la resistencia al desgaste tanto de cromado duro como de WC-CoCr (Callister, 2011). Este proceso se llevó a cabo con un durómetro Wilson Vickers 432 SVD usando una carga de 0.3 kg bajo la norma ASTM E-384-1, que es considerada como el Método de Prueba Estándar para Knoop y Vickers Dureza de los Materiales. El cálculo de micro dureza Vickers se realizó mediante la suma de ambas diagonales, con las cuales se obtuvo el promedio de la incisión piramidal realizado sobre el recubrimiento de cromo; esta fórmula para obtener la micro dureza se puede conseguir a partir de la norma ASTM E-384-1. En esta investigación, se tomaron 10 indentaciones para cada uno.

2.7. *Diseño del rotor*

Debido a que el rotor es sujeto a condiciones de trabajo extremas, se requiere conocer los esfuerzos a los que es sometido. Los rotores son sometidos a torque debido a las altas

presiones que reciben del fluido, mismo que, al no poder ser comprimido, crea la rotación del rotor dentro del estator. Primero, se considera el esfuerzo por flexión, el cual se crea en el lóbulo debido a un momento que se genera por la presión de agua. Se considera la geometría lateral del lóbulo como un rectángulo para poder calcular tanto el centroide, como el momento de inercia de la sección. Al observar el rotor de un lado, se puede considerar al lóbulo como una viga en cantiléver, lo cual se puede apreciar en la siguiente figura:

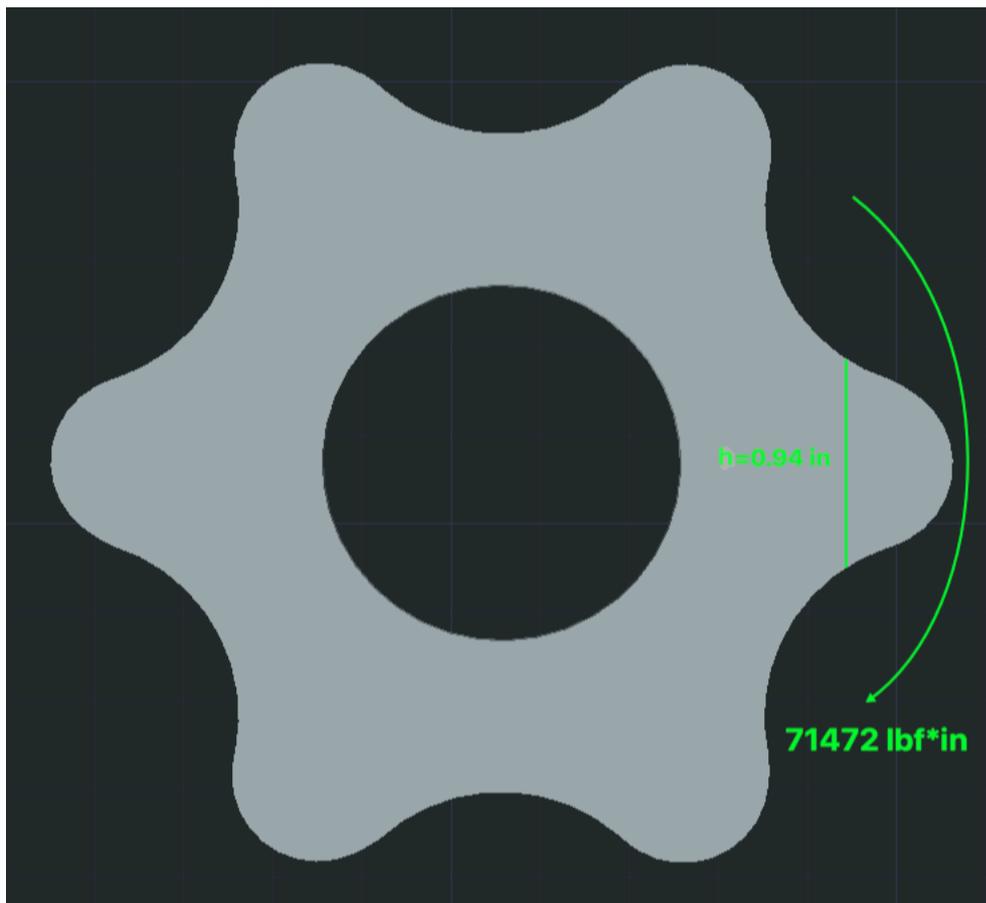


Figura 6. Geometría de rotor para cálculo de momento de inercia

En la Figura 6 se puede observar que el lóbulo tiene la forma de una viga saliendo de una pared, esto significa que donde está la base, se crea el mayor momento debido a la flexión, por ende, se puede considerar la geometría perpendicular de este plano como un rectángulo. Se puede apreciar esto a mayor detalle en la Figura 7. El cálculo se llevó a cabo en un solo lóbulo asumiendo que todo el esfuerzo se aplica en un punto, de esta manera

obteniendo el máximo momento posible, el cual es el valor máximo dado por la datasheet para el rotor. Para obtener el esfuerzo por flexión se utilizó la siguiente ecuación (Budynas and Nisbett, 2015):

$$\sigma = \frac{M\bar{C}}{I} \quad (1)$$

Para la ecuación se considera el momento que se genera, y se debe determinar la distancia desde el centroide hasta el extremo del lóbulo utilizado; tomando en cuenta que la en un rectángulo la distancia sería la mitad de la altura (Budynas and Nisbett, 2015). Se puede observar la altura y la base en la figura a continuación:

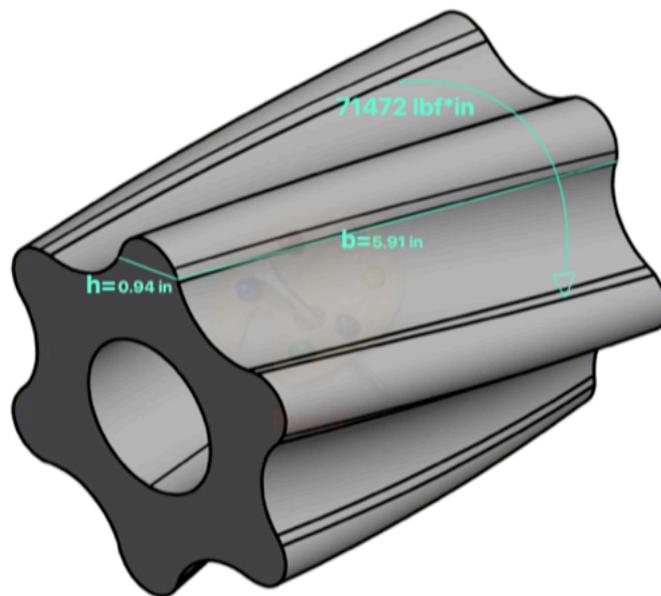


Figura 7. Diseño de rotor con momento y dimensiones para cálculo

Para determinar su momento se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{rec} = \frac{1}{12}hb^3 \quad (2)$$

La ecuación 2 permite conocer el momento de inercia para un rectángulo conociendo su base y su altura.

Se continua con el cálculo de esfuerzo máximo cortante el cual se lleva a cabo con la siguiente ecuación (Beer et al., 2015):

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (3)$$

Donde T es el torque al que es sometido, obtenido de la datasheet, c es la distancia del centro de la pieza al extremo y J es el momento polar de la sección.

Para obtener J se aplica la siguiente ecuación (Beer et al., 2015):

$$J = \frac{1}{2} \pi * (r_{ext}^4 - r_{int}^4) \quad (4)$$

Donde r_{ext} y r_{int} son el radio externo y radio interno, respectivamente, los cuales se pueden apreciar a continuación:



Figura 8. Diseño de rotor con dimensiones y torque

Los esfuerzos S_a y S_m se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$S_a = \sqrt{S_a'^2 + 3\tau_a^2} \quad (5)$$

$$S_m = \sqrt{S'_m{}^2 + 3\tau_m^2} \quad (6)$$

Donde S'_a y S'_m son los esfuerzos de amplitud y medio de flexión, respectivamente, mientras que τ_a y τ_m son los esfuerzos cortantes de amplitud y medio, respectivamente.

Tras conocer estos esfuerzos se procede a obtener los valores de los factores de modificación y a calcular el esfuerzo de rendimiento de la siguiente manera (Budynas and Nisbett, 2015):

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (7)$$

Donde S_e' es la mitad del esfuerzo último y los k son los factores de modificación.

A renglón seguido, con el esfuerzo de rendimiento, se calcula el factor de seguridad utilizando la ecuación de factor de seguridad para esfuerzos combinados (Budynas and Nisbett, 2015):

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{S_m} \right)^2 \frac{S_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2S_m S_e}{S_{ut} S_a} \right)^2} \right] \quad (8)$$

Donde S_a es el esfuerzo de amplitud, S_m es el esfuerzo medio, S_e es el esfuerzo de rendimiento y S_{ut} es el esfuerzo último del acero inoxidable martensítico. Si se obtiene un valor inferior a 1, se procede al siguiente paso que es calcular el número de ciclos que conducen a fatigar al rotor; de no ser así, este tendría vida infinita y no sería necesario obtener un número de ciclos.

Se llevó a cabo el cálculo del desgaste que se genera debido a la fricción que existe entre el rotor y el estator durante el momento de operaciones. Considerando una lubricación de límites debido al tipo de contacto que existe entre el rotor, fluido y estator, se puede llegar a calcular el desgaste; cabe recalcar que se deben conocer también los parámetros de funcionamiento y ciertas propiedades de los materiales. Además, se debe considerar una capa delgada del fluido, en este caso agua y, debido a que la cavidad entre el rotor y estator es mínima, se puede aplicar esta consideración dentro de este sistema (Budynas and Nisbett,

2015). Esta lubricación sucede ya que la cavidad por donde pasa el fluido es pequeña y una sección del rotor siempre estará en contacto con el estator. Para realizar este cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$w = f_1 * f_2 * K * PV * t \quad (9)$$

Donde f_1 es el factor relacionado con el movimiento, f_2 es el factor medioambiental, K es el factor de desgaste, PV es el producto presión velocidad, la cual tiene un máximo según el material con el que se trabaja, en este caso se considera el del estator ya que este valor será el limitante para el sistema y t es el tiempo de operación.

Es importante conocer qué relación tiene la rugosidad de la superficie con el factor de fricción que se crea, por lo cual se debe proceder utilizando la siguiente fórmula de mecánica de fluidos para determinar esta relación (White, 2009):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{e}{3.71D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

Donde f es el factor de fricción, e es la rugosidad del acero inoxidable martensítico, tanto nuevo como usado, Re es el número de Reynolds y D es el diámetro por donde pasa el fluido. Para poder obtener el valor del diámetro se asume que todo el fluido pasa por la cavidad más grande creada entre el rotor y el estator, dicha cavidad se asemeja bastante a un tubo, de esta manera permitiendo realizar los cálculos. Este valor de fricción permitirá conocer qué tanto influye la rugosidad del material, ya que a mayor fricción se necesitará un mayor diferencial de presiones y un mayor torque aplicado.

Para calcular el número de Reynolds se utiliza la siguiente ecuación (White, 2009):

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (11)$$

Donde V es la velocidad del fluido según su flujo volumétrico, D es el diámetro por donde pasa el fluido y la viscosidad es la del fluido.

3. RESULTADOS

3.1 Microestructura

En la Figura 9 se muestra la microestructura presente en la sección transversal del rotor con cromado duro, que se encuentra a una medida de 100X, la que nos permite observar que el acabado del revestimiento de cromado duro tiene baja porosidad y fue aplicado uniformemente. Esto significa que se aplicó el recubrimiento de manera adecuada y que brindará mejores propiedades mecánicas al revestimiento.

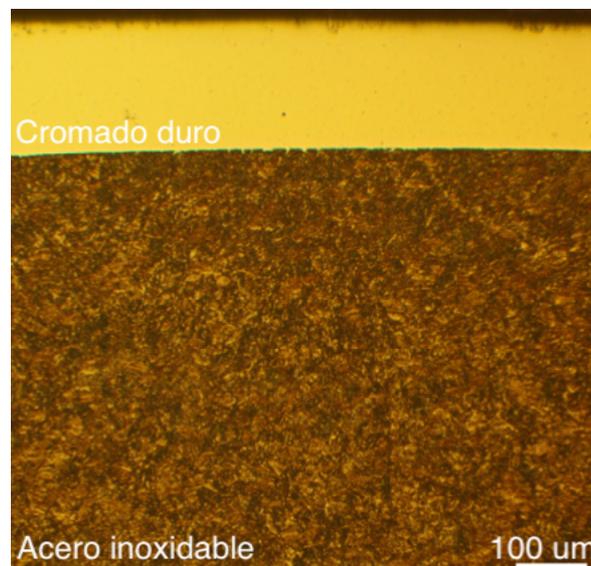


Figura 9. Microestructura de Cromado Duro a 100X

En la Figura 10 se muestra la microestructura presente en la sección transversal del rotor con cromado duro, que se encuentra a una medida de 1000X, la cual nos permite ver la baja porosidad del recubrimiento y a su vez observar el agrietamiento que se crea en el recubrimiento del cromado duro debido a esfuerzos residuales. Se puede observar una de las indentaciones que se hicieron para poder medir la dureza de este.

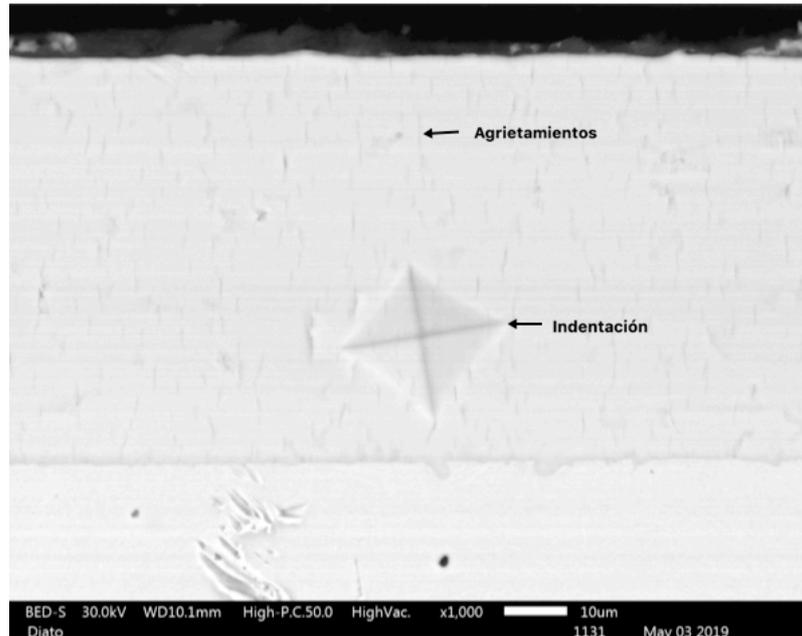


Figura 10. Microestructura de Cromado Duro en SEM a 1000X

En la Figura 11, se muestran las medidas de espesor de recubrimiento del cromado duro que fueron realizadas a lo largo de la probeta, con el fin de obtener un espesor promedio para dicha muestra con un Microscopio Metalográfico; en la Tabla 2 se pueden apreciar las estadísticas de las medidas de espesor, donde se observa que el promedio es de 183.52 μm , siendo la medida de espesor de mayor valor de 197.97 μm y la menor de 171.58 μm .

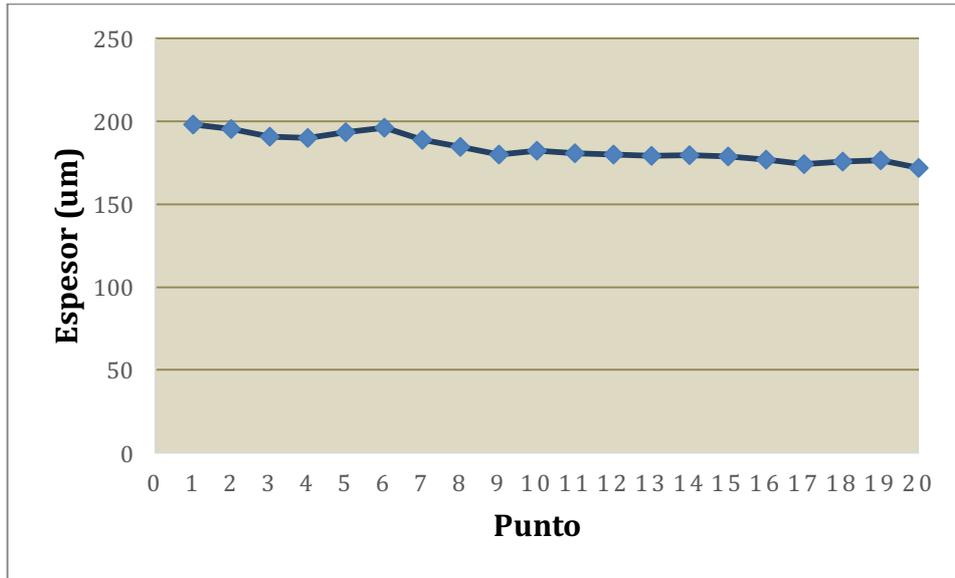


Figura 11. Medidas de Espesor de Cromado Duro

Tabla 2. Estadísticas de espesor de Cromado Duro

Estadísticas	
Número de medidas	20
Longitud promedio	183.52
Desviación estándar	7.98
Menor valor	171.58
Mayor valor	197.97
Mediana	180.30

En la Figura 12 se muestra la microestructura del WC-CoCr que se encuentra a una medida de 100X, donde a primera vista se observa una baja porosidad. Sin embargo, es importante observar la microestructura en SEM con el fin de determinar si en efecto la microestructura del WC-CoCr tiene porosidad baja, o solo se presenta así en la imagen con HVOF a 100x (Figura 12).

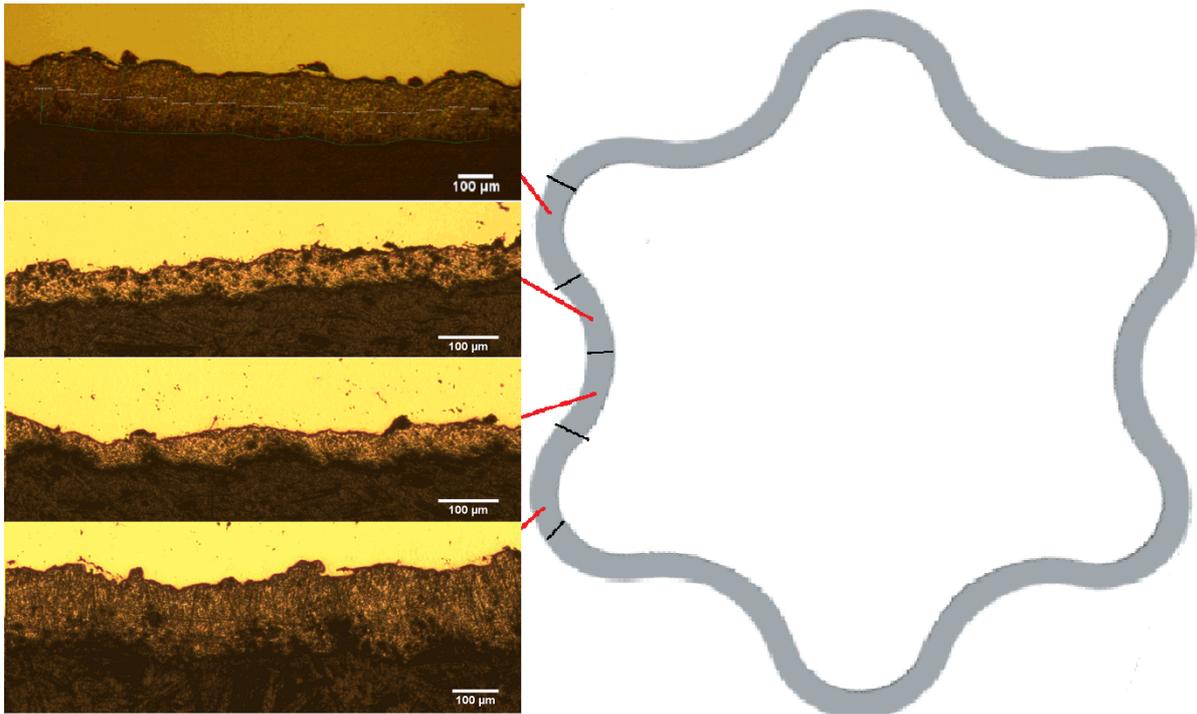


Figura 12. Microestructura de WC-CoCr con HVOF a 100X

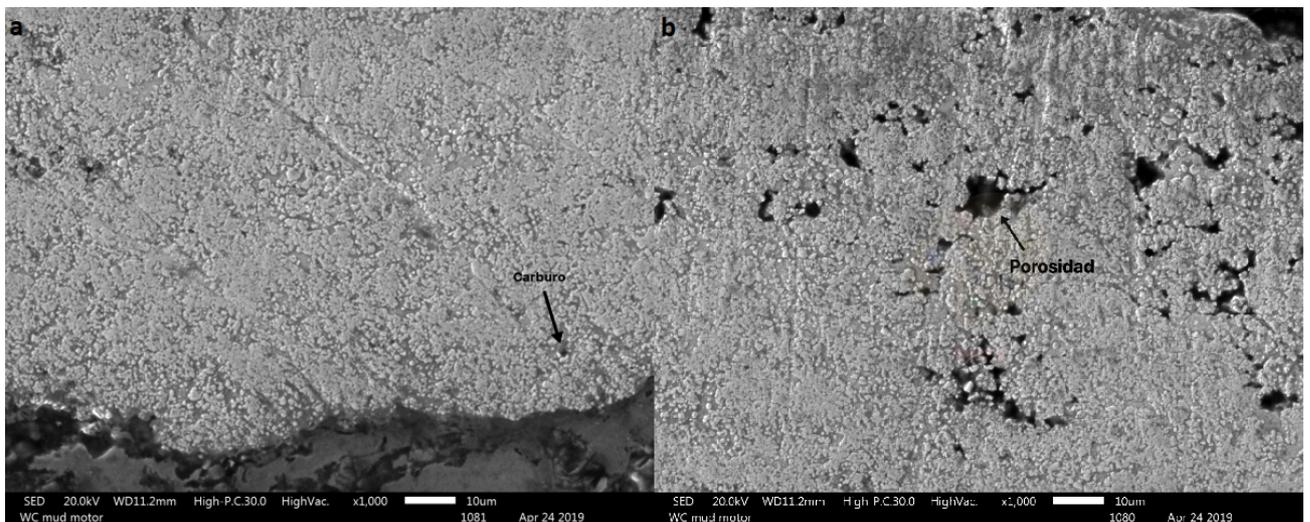


Figura 13. Microestructura de WC-CoCr con HVOF en SEM a 1000X; a) carburo y b) porosidad

En la Figura 13 se observa la microestructura de WC-CoCr a una escala de 1000X. Esta permite ver a mayor detalle el recubrimiento, en este caso en la parte *a)* nos permite ver los carburos que se encuentran en la base de cromo. En la parte *b)* se puede apreciar la porosidad que existe en el material. Es importante recalcar que estos son poros ya que su

tamaño no es de más de 10 micrómetros, por lo cual significa que no existe desprendimiento del material.

En la Figura 14 se muestran las medidas de espesor del recubrimiento WC-CoCr con HVOF, que fueron realizadas de la misma forma a lo largo de la probeta, con el fin de obtener un espesor promedio para dicha muestra con un Microscopio Metalográfico. En la tabla 3 se aprecian las estadísticas de las medidas de espesor, donde se observa que el promedio es de $126.80 \mu\text{m}$, donde la medida de espesor de mayor valor es de $212.54 \mu\text{m}$ y el menor de $52.73 \mu\text{m}$. Cabe mencionar que en las partes cóncavas se obtuvo un promedio de espesor mucho menor que en las partes convexas, lo cual produjo un promedio bajo de espesor en todas las secciones. El espesor promedio en la sección convexa es de $180.6 \mu\text{m}$, mientras que en la sección cóncava se obtuvo un promedio de $73.0 \mu\text{m}$. El cambio abrupto de espesor se encuentra en la parte donde cambia de convexo a cóncavo, lo cual se puede observar en la Figura 12.

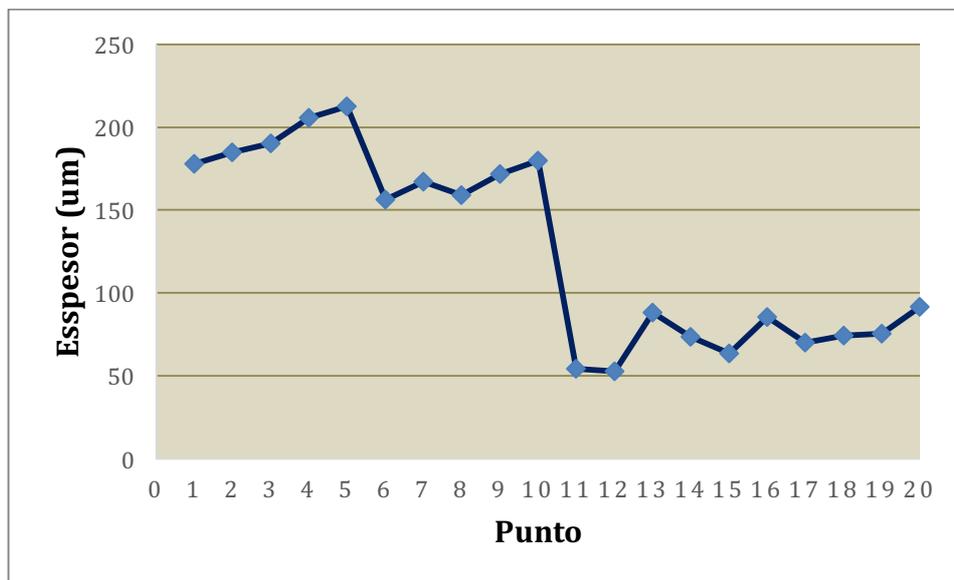


Figura 14. Medidas de Espesor de WC-CoCr

Tabla 3. Estadísticas de espesor de WC-CoCr

Estadísticas	
Numero de medidas	20
Longitud promedio	126.80
Desviación estándar	57.38
Menor valor	52.73
Mayor valor	212.54
Mediana	124.09

3.2 Ensayo de adherencia

El ensayo de adherencia se muestra en la Figura 15, en la que se utilizó la norma ASTM C633-13 para recubrimientos aplicados por HVOF. En esta prueba se determinó el grado de adhesión del revestimiento aplicado, con una tensión normal a la superficie. Los resultados obtenidos mediante esta prueba se observan en la Tabla 4; se ensayaron 5 probetas, las que se pueden observar tanto en la Figura 14 como en la Tabla 4.

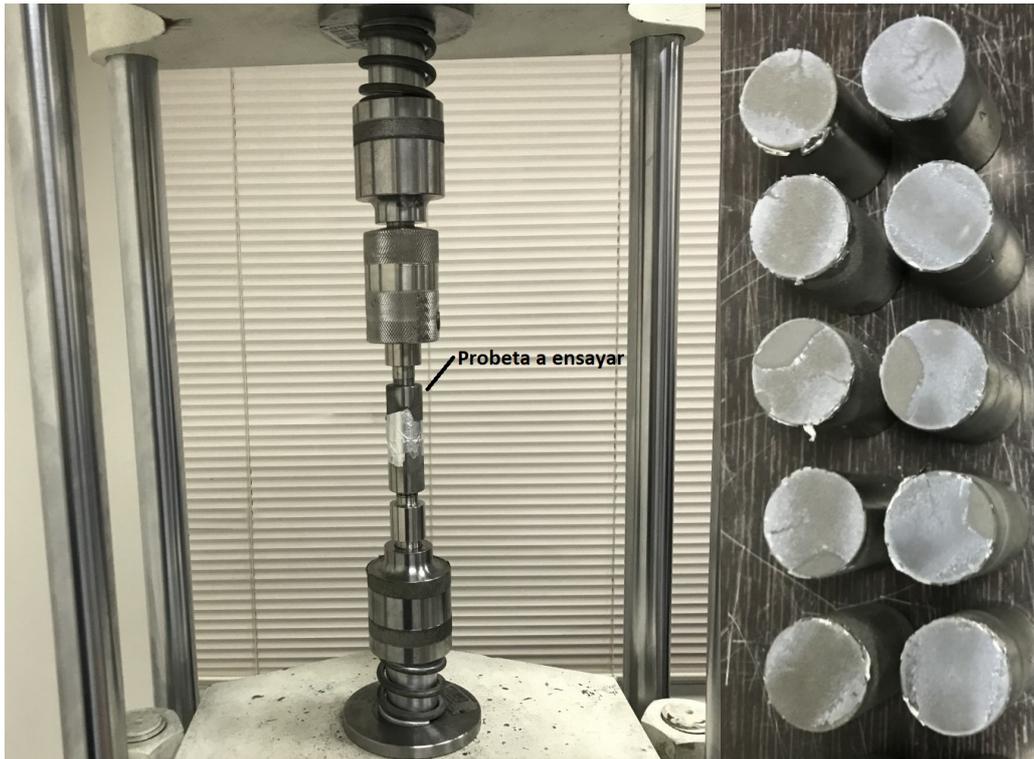
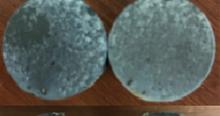


Figura 15. Prueba de adherencia

A partir de la Tabla 4, se puede observar que dos probetas en la prueba de adherencia superaron un esfuerzo mínimo de 10,000 PSI. Para calificar al recubrimiento como exitoso, se requiere que tanto el recubrimiento como la pega, soporten este valor. Dado que las dos probetas superaron el esfuerzo aplicado cuando el rotor está en funcionamiento en los pozos, se pueden calificar los valores de adherencia que se obtuvieron como malos ya que solo dos de cinco probetas ensayadas pudieron superar el valor necesario para que la aplicación del recubrimiento sea considerada como bueno mediante el proceso de HVOF.

Tabla 4. Resultados de ensayos de adherencia

Probeta	Imagen	Resistencia máxima a tracción (PSI)
1		2130
2		5170
3		6630
4		12400
5		11900

3.3 Micro-dureza

La micro dureza del cromado duro se encuentra valorada en las Figura 16a y del WC-CoCr en la Figura 16b - los valores que se observan, son un excelente punto de partida para estimar el comportamiento de los recubrimientos frente a efectos abrasivos; los revestimientos son considerados bastante más duros que los materiales base donde se aplican, como se puede apreciar en la Figura 17, cumpliendo de esta manera su propósito. Sin embargo, es necesario recalcar que lo que se desea en este estudio es verificar cuál revestimiento es considerado el mejor para proteger la superficie del rotor. Debido a los valores mencionados se considera que el valor promedio de la micro dureza para el cromado duro es 954.14 HV mientras que para el WC-CoCr es 1075.28 HV; esto demuestra una mayor resistencia al desgaste para el WC que para el cromado duro. Cabe insistir en la importancia

en esta diferencia de valores, pues permitirá que el rotor tenga un tiempo de operación superior con WC-CoCr que con cromado duro.

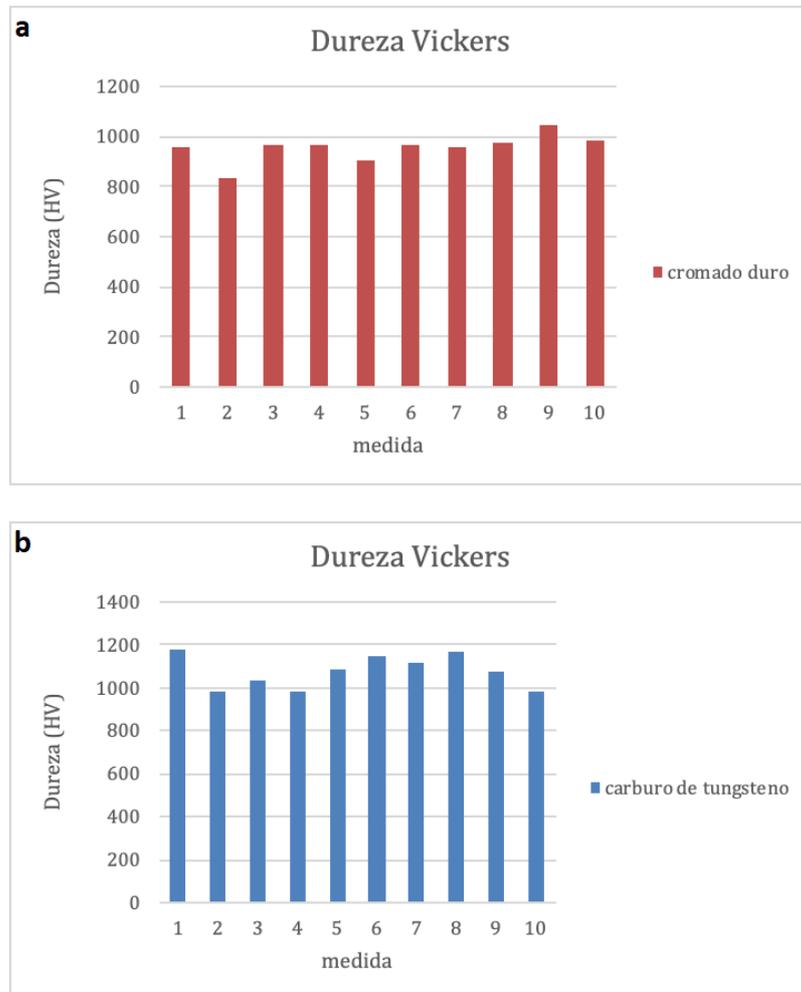


Figura 16. Micro dureza, a) Cromado duro; b) WC-CoCr

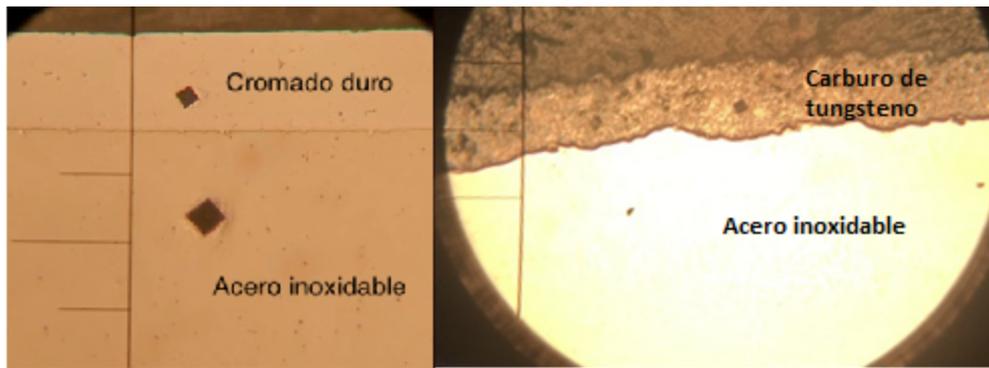


Figura 17. Micro dureza, a) Recubrimiento de Cromo; b) Recubrimiento de Carburo de Tungsteno

3.4 Diseño

Se inició haciendo el cálculo de flexión, para el cual se considera el área seccional como un rectángulo con base de 5.91 in y altura es de 0.47 in, como se puede apreciar en la Figura 6. Conociendo que \bar{C} es la mitad de la altura y usando la ecuación 2 para calcular el momento de inercia, se puede calcular el esfuerzo por flexión colocando estos valores en la ecuación 1 conociendo que el valor del momento es de 71472 lbf*in (6 Lobe Stage datasheet). Los resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 5. Resultados de análisis de flexión

	Resultado
\bar{C}	0.47 in
I	16.17 in ⁴
σ	2.08 KSI

Como se puede apreciar en la Tabla 5, el esfuerzo por flexión es de 2.08 KSI, debido a que los rotores operan bajo condiciones severas. Se debe considerar que este esfuerzo parte de 0 hasta su valor máximo que podría llegar a ser de 2.08 KSI en la sección donde golpea el fluido creando la flexión.

Se procedió con el cálculo del esfuerzo cortante debido a la torsión, la cual se realizó con la ecuación 3 teniendo un torque de 71472 lbf*in, obteniendo el momento polar de inercia con la ecuación 4. Los resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resultados de análisis de torsión

	Resultado
J	15.41 in ⁴
τ	8.39 KSI

Una vez obtenido el esfuerzo cortante máximo, se procedió a obtener los factores de modificación por fatiga, se procede a calcular los esfuerzos de fatiga de amplitud y medios para, estos se realizan con las ecuaciones 5 y 6. Los resultados se pueden observar a continuación:

Tabla 7. Esfuerzo de amplitud y medio

	Resultado
S_a	7.34 KSI
S_m	7.34 KSI

Los factores de modificación del esfuerzo de fatiga dependen de la geometría y condiciones a las cuales son sometidas; condiciones que se pueden observar a continuación:

Tabla 8. Factores de modificación por fatiga

Factor de modificación por fatiga	Valor
por condiciones de superficie; k_a	0.705
por tamaño; k_b	0.845
por tipo de carga; k_c	1
por temperatura; k_d	1.026
factor de confiabilidad; k_e	1
por efectos misceláneos; k_f	1

Nota. Los datos fueron recuperados desde: (Budynas & Nisbett, 2015)

Usando la ecuación 5 y conociendo que S_{ut} es 160KSI (UPMET, 2017), se obtuvo el esfuerzo de rendimiento y con la ecuación 6 se obtuvo el factor de seguridad, estos resultados se pueden apreciar a continuación:

Tabla 9. Esfuerzo de rendimiento y factor de seguridad

Esfuerzo de rendimiento, S_e	48.9 KSI
Factor de seguridad, n	6.13

Como se puede observar, el factor de seguridad excede a 1 lo que significa que el rotor tendrá vida infinita. Esto se debe a que el acero que se utiliza en los lodos de perforación es acero martensítico, que brinda una buena combinación de alta resistencia general, buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas a temperaturas de hasta $316^{\circ}C$.

Para poder calcular el desgaste, se deben conocer ciertos valores de los materiales desde un inicio; estos factores incluyen el desgaste del elastómero, el factor relacionado con el movimiento, el actor medioambiental y PV, que es el producto de presión y velocidad, en el cual se toma el valor máximo posible para poder realizar el análisis. Estos valores se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 10. Valores de ecuación de desgaste

Valores para ecuación de desgaste	
Factor de desgaste; K_1 ¹	$50 \times 10^{-10} \text{ (in}^3 \cdot \text{min) / (lbf} \cdot \text{ft} \cdot \text{h)}$
Factor de desgaste; K_2 ²	$4.88 \times 10^{-12} \text{ (in}^3 \cdot \text{min) / (lbf} \cdot \text{ft} \cdot \text{h)}$
Factor relacionado con el movimiento; f_1 ¹	1.8
Factor medioambiental; f_2 ¹	12
Tiempo de operación; t	8 horas/día (horas operando por día)
PV ¹	$5000 \text{ (lbf} \cdot \text{ft) / (in}^2 \cdot \text{min)}$

Nota. Los valores fueron recuperados desde: (Budynas and Nisbett, 2015); (McKellop, 1981)

Utilizando la ecuación 9, se calculó el desgaste tanto para el estator y rotor, se puede ver estos valores en la siguiente tabla:

Tabla 11. Desgaste

$w_{estator}$	$\frac{1.10 \times 10^{-1} mm}{día}$
w_{rotor}	$\frac{1.08 \times 10^{-4} mm}{día}$

De esta manera, se puede apreciar el desgaste que se genera del estator y del rotor según una operación de 8 horas al día. Cabe recalcar la importancia de los factores medioambientales al cual es sometido el equipo y cómo estos influyen dentro del desgaste que recibe el equipo. Las condiciones con las cuales se establecieron los datos previos fueron según el estator, ya que, si existe falla, será debido a este y no al rotor, como se puede apreciar ya que el desgaste del rotor es mucho menor que el desgaste del estator, bajo las mismas condiciones de operación.

Se ubicaron los valores que se van a utilizar para estos cálculos y para poder obtener el valor del número de Reynolds, se utilizó la ecuación 11; los valores utilizados para calcular el coeficiente de fricción se pueden observar a continuación:

Tabla 12. Valores para determinar factor de fricción

Valores para utilizar	
Flujo Volumétrico	2271 l/min
Velocidad, V	55.78 m/s
Viscosidad	$0.1878 \times 10^{-6} m^2/s$
Número de Reynolds	3.56×10^6
Rugosidad acero inoxidable nuevo	$1.6 \times 10^{-6} m$
Rugosidad acero inoxidable usado	$1.5 \times 10^{-4} m$
Diámetro; D	0.012 m (diámetro máximo de cavidad en un lóbulo)

Nota. Los datos fueron recuperados desde: (White, 2009); (6 Lobe Stage datasheet); (American Process Systems datasheet)

Conociendo estos valores se procedió a reemplazar en la ecuación de factor de fricción, cada uno de los valores de la rugosidad absoluta y se comparó los resultados.

Utilizando EES equation solver, se obtuvieron los valores del factor de fricción:

Tabla 13. Valores de factor de fricción

Tipo de Acero	Factor de fricción
acero inoxidable nuevo	1.31×10^{-2}
acero inoxidable usado	4.09×10^{-2}

Como se puede observar en la Tabla 12, el factor de fricción para un acero usado es aproximadamente tres (3) veces mayor que el de un acero nuevo; esto es importante pues, con un mayor coeficiente de fricción, se requerirá un mayor torque para poder ejecutar el trabajo del rotor. Debido a que la fricción es una fuerza en contra del movimiento y, a medida que esta aumenta, la presión del fluido disminuye, mientras que el coeficiente de fricción aumenta, se va a requerir más trabajo para poder llevar la misma función a cabo, por ende, es fundamental tener una superficie lisa, por lo cual es de suma importancia el acabado en estas aplicaciones.

SUGERENCIA DEL PROCEDIMIENTO INDUSTRIAL

En la Figura 18 se puede observar el flujograma del proceso industrial que lleva el cambio de recubrimiento del rotor. Este flujograma contiene el conjunto de operaciones unitarias diseñadas para la obtención del producto final. En esta figura no se toman en cuenta ensayos realizados.

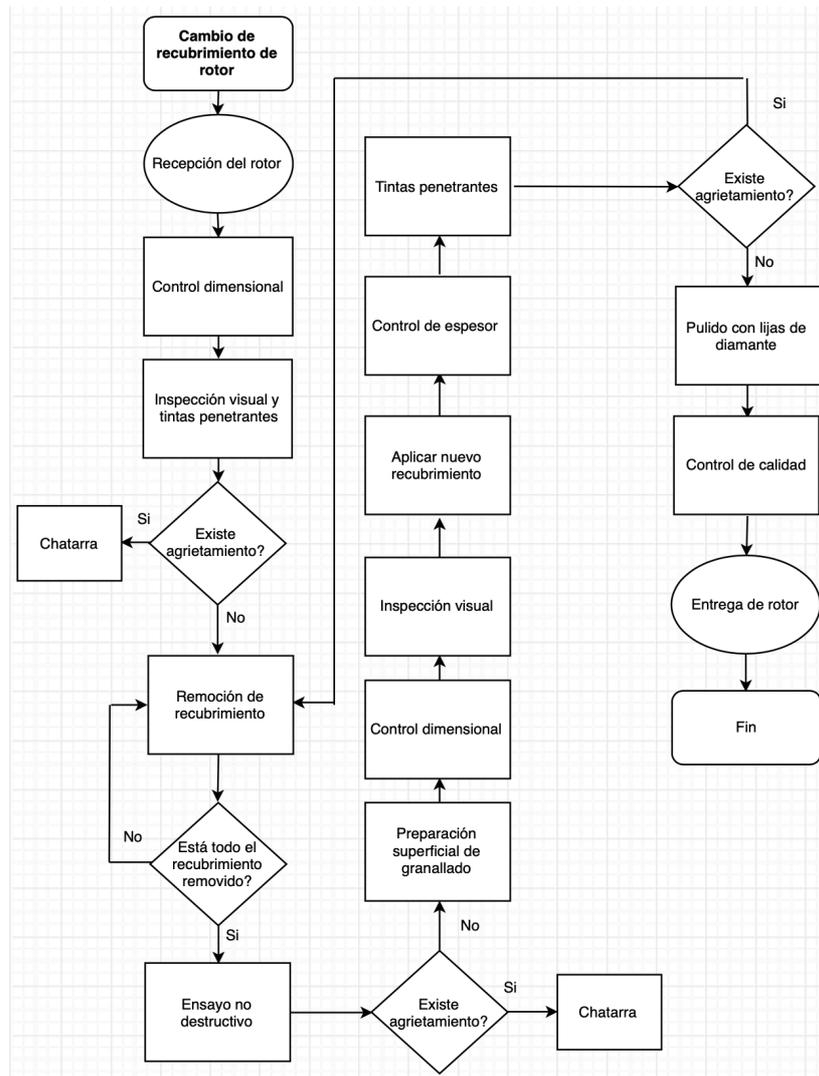


Figura 18. Flujograma de proceso industrial

Presupuesto

La Tabla 14 presenta el presupuesto para realizar el cambio de recubrimiento; en este se consideran todos los gastos que se llevaron a cabo desde que se recibe al rotor hasta el momento de entregarlo para operaciones.

Tabla 14: Presupuesto

Presupuesto	Costo por pie (\$/ft)
Polvo para termorociado	46.89
Gases (Oxígeno, propano, nitrógeno)	135.92
Pulido	30.48
Mano de obra termorociado y pulido	19.91
Ácido clorhídrico	12.97
Tratamiento/disposición de ácido clorhídrico	0.62
logística/traslado de ácido clorhídrico	0.33
Costo total	247.12

Como se puede observar, el costo total por pie de rotor es de \$247.12. Los rotores para estas aplicaciones en el campo petrolero son de 9 metros (29.71 ft), por lo cual el costo total para este equipo seria de \$7341.34.

4. CONCLUSIONES

Se realizó exitosamente el cambio del recubrimiento de cromado duro a WC-CoCr en una sección de rotor de motor de lodo con el proceso HVOF. A su vez se aplicó el nuevo recubrimiento con un método de contaminación mucho mejor que la del de cromado duro, haciéndolo un método más amigable al medio ambiente.

Se destaca la microestructura de ambos recubrimientos, que fueron probados con el fin de determinar la factibilidad de reemplazar cromado duro por WC-CoCr, como revestimiento para los rotores de los motores de perforación. Se analizó la microestructura bajo microscopio metalográfico micros ENS-07 de ambos recubrimientos y bajo SEM, lo que permitió ver que el revestimiento de cromado duro tiene una baja porosidad y muestra agrietamientos. También se puede apreciar la alta uniformidad que se presenta en este recubrimiento, la cual no es tan uniforme para el de WC-CoCr, el cual también tiene porosidad. Cabe recalcar que, en la sección cóncava del rotor se adhirió menos recubrimiento que en la sección convexa, lo cual produce un mayor espesor en esta sección.

Para verificar que el revestimiento de WC-CoCr haya sido aplicado de manera correcta, se realizó una prueba de adherencia bajo la norma ASTM C633, mediante el HVOF lo que se consideró importante ya que permite comprobar que el elemento podrá soportar los esfuerzos que reciba al ser utilizado con lodo de perforación. También se concluyó que, la adherencia del WC-CoCr en el rotor no es buena ya que solo se logró obtener un esfuerzo superior a 10,000 PSI en las probetas 4 y 5 para remover el recubrimiento, sin embargo, se esperaba que, para producción el ensayo pase en todas las pruebas. Además, para demostrar la resistencia al desgaste de ambos materiales, se llevaron a cabo ensayos de durezas que se aplicaron en diez (10) puntos distintitos de cada muestra, lo cual permitió confirmar que la dureza del revestimiento de WC-CoCr es superior a la dureza del revestimiento de cromado duro. Este resultado constató una diferencia de aproximadamente 124.14 HV, brindándole

mejores propiedades de resistencia al desgaste al WC-CoCr que al cromado duro. Luego de destacar lo mencionado anteriormente, se puede determinar la evidente superioridad del recubrimiento de WC-CoCr sobre el cromado duro; se estableció el tiempo de vida para el rotor y debido a que el valor del factor de seguridad es superior a 1, se determinó que el rotor tendrá vida infinita, por lo que es una pieza que no requiere cambio más que en cuanto al recubrimiento. Asimismo, se determinó el desgaste que tendrá el ensamble rotor-estator, y se calculó cuanto desgaste tiene por un periodo de 8 horas de trabajo al día; por lo cual se concluye que el rotor va a funcionar sin necesidad de ser cambiado, por al menos tres años.

Finalmente, se estableció la importancia que tiene la rugosidad de la superficie en cuanto a la operación del rotor, ya que, a mayor rugosidad, se obtiene un factor de fricción mayor, lo que haría que se requiera mayor torque para llevar las operaciones a cabo y un diferencial de presión superior; es decir que es importante que el rotor tenga un buen acabado (una superficie lisa) para poder trabajar de una manera más eficiente.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Process Systems. (2015). *Surface Texture of Stainless Steel*. Extraído desde https://www.eirichusa.com/images/downloads/downloads-page/APS%20Downloads/APS%20Product%20Brochures/Surface%20Textures%20of%20SS_TF.pdf
- ASM International. (1993). *Failure analysis and prevention*. American Society for Metals Handbook, vol. 11. Metals.
- Budynas, R and Nisbett, J. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10th edition. New York, NY: McGraw Hill Education.
- CAMEO Chemicals. (2007). *Hydrogen Chloride, Anhydrous*. Extraído desde <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8731>
- Callister, W. (2010). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Cougar Drilling Solution Inc. (2008). *Motor Operations Handbook*, pg.110-113.
- Dyna-Drill. (2016). *Rotors and Stators*. Extraído desde <https://www.dyna-drill.com/power-sections/rotors-and-stators>
- Flitney B. (October, 2007). *Alternatives to hard chrome for hydraulic actuators: why replace hard chrome*. Sealing Technology, 8-12.
- Inglis, T.A. (2010) *Directional drilling*. Dordrecht: Springer-Verlag New York.
- Gh. Farokhian, B. Salehnasab, H. Zat Ajam & H. Nahidi. (2017). *Influence of WC–20Co–1Ni coating by HVOF on lifespan of the downhole drilling motors*, *Surface Engineering*. Extraído desde <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670844.2017.1278643?scroll=top&needAccess=true>
- J. Kawakita, S. Kuroda, T. Fukushima, T. Koda. (2003). *Science and Technology of Advanced Materials*, pg. 281–289.
- McKellop, H. and Clark, I. (1981). Friction and wear properties of polymer, metal, and ceramic prosthetic joint materials evaluated on a multichannel screening device. Extracted from https://www.researchgate.net/publication/10836717_Friction_and_wear_properties_of_polymer_metal_and_ceramic_prosthetic_joint_materials_evaluated_on_a_multichannel_screening_device
- National Association of Corrosion Engineers. (1990). Plated and Galvanium Coating Lost Adherence and Became Detached by Ionized Coatings for Oilfield Applications, Technical Committee Report, 1G290.
- Priddy, B. (April, 2012). *Muriatic Acid Chrome Removal*. Extraído desde <https://ourpastimes.com/muriatic-acid-chrome-removal-6332204.html>
- Ranjba, K. y Sababi, M. (Noviembre, 2011). *Failure assessment of the hard chrome coated rotors in the downhole drilling motors*.
- Reignier, C. y Sturgeon, A. (marzo, 2002). *HVOF sprayed WC-Co-Cr as a generic coating type for replacement of hard chrome plating*. Extraído desde <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/hvof-sprayed-wc-co-cr-as-a-generic-coating-type-for-replacement-of-hard-chrome-plating-march-2002/>
- UPMET. (2017). *17-4PH Stainless Steel Sheet, Coil and Plate – AMS 5604, UNS S17400*. Extraído desde <https://www.upmet.com/products/stainless-steel/17-4-ph>

White, F. (2011). *Fluid Mechanics, 7th edition*. New York City. Mc-Graw-Hill

Yang, Z. (2011). *Alternatives to hard chromium plating on piston rods*. Extraído desde <http://kau.diva-portal.org/smash/get/diva2:452803/FULLTEXT01.pdf>

Zarchi, M. (Diciembre, 2010). Failure Analysis of Chromium Plated Rotor of Downhole Drilling Motors.

6. ANEXO

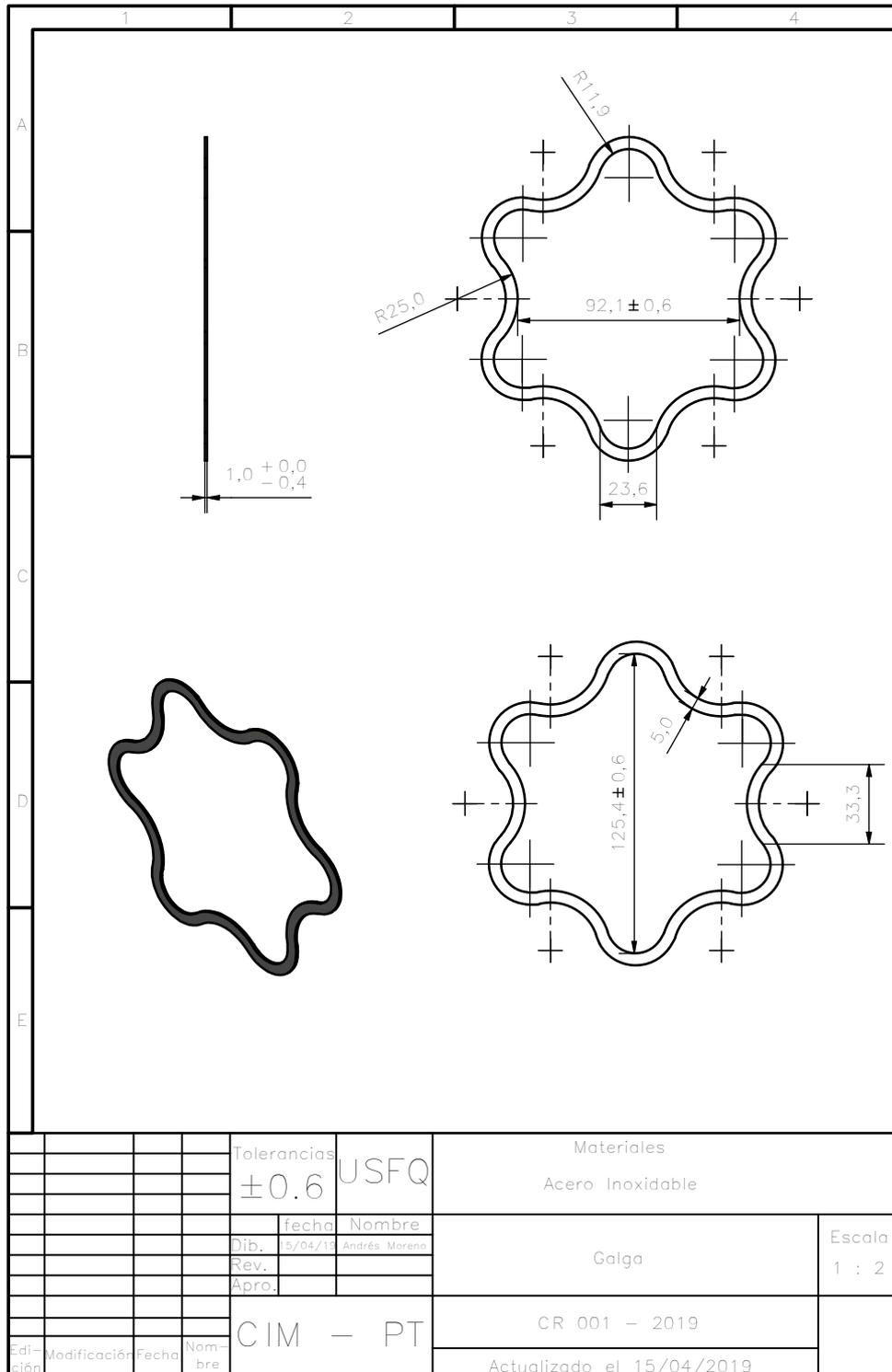


Figura 19. Galga para rotor de motor de perforación