

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Recuperación de Paredes Erosionadas en los Ductos de
Escape de Cabezotes de Motores de Generación a Crudo
Wärtsilä V1832LN, mediante Metalización
Proyecto de Investigación**

Javier Alejandro Miranda Coronel

Ingeniería Mecánica

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

Quito, 23 de julio de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Recuperación de Paredes Erosionadas en los ductos de Escape de Cabezotes de Motores de Generación a Crudo Wärtsilä V1832LN, mediante Metalización

Javier Alejandro Miranda Coronel

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico:

Alfredo Valarezo, PhD.

Firma del profesor:

Quito, 23 de julio de 2018

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.

Asimismo, 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: Miranda Coronel Javier Alejandro

Código: 00111307

Cédula de Identidad: 0604848879

Lugar y fecha: Quito, 23 de julio de 2018

RESUMEN

El trabajo presenta en dos partes el proceso de recuperación dimensional de paredes erosionadas en los cabezotes de motores a crudo Wärtsilä V1832LN. La primera parte es un estudio de la tasa y los mecanismos de erosión de recubrimientos duros. Se evalúa: CrC – NiCr por HVOF, Nanosteel por Arc Spray, NiCrBSi y NiCrBSi +WC por polvos en caliente. Las muestras de cada uno de los recubrimientos y el material base (hierro fundido gris) son evaluados mediante un ensayo de erosión a altas temperaturas, el cual consiste en proyectar partículas incisivas (óxido de aluminio) a través de un chorro de gas caliente durante 5 ciclos de 5 minutos cada uno. La superficie superior de la muestra debe estar a una temperatura de 450°C y la posterior a 90°C refrigerada por agua, de tal manera que emule las condiciones de operación de las paredes de los ductos de escape del cabezote. Las muestras erosionadas se caracterizan mediante EDS y SEM. Los resultados muestran la tasa de erosión y los mecanismos de erosión correspondientes a cada uno de los materiales. Estos resultados permitirán determinar el recubrimiento óptimo para esta aplicación en específico. La segunda parte de este trabajo corresponde a la aplicación del recubrimiento en las paredes del cabezote, se recopila información del funcionamiento de los cabezotes y se toman muestras sólidas y líquidas de los residuos de la combustión las cuales se analizan mediante difracción de rayos X para determinar las posibles causas del desgaste prematuro de este componente. Se brinda detalles del proceso de metalización, partiendo de la limpieza y transporte de la pieza, la temperatura de precalentamiento y tasa de enfriamiento según la composición del material base, la configuración del equipo y la evaluación del material mediante inspección con tintas penetrantes.

Keywords: Desgaste, re-manufactura, Thermal Spray, Cabezote, HVOF, Arc Spray, Powder Spray, Caracterización.

ABSTRACT

The document presented here shows the process of dimensional recovery of the eroded walls of the cylinder heads of Wärtsilä V1832LN heavy fuel engines. It includes two parts. The first part corresponds to the study of the erosion rate and erosion mechanisms of hard coatings. The coatings evaluated are: CrC - NiCr by HVOF, Nanosteel by Arc Spray, NiCrBSiFe and NiCrBSiFe + WC by powder spray welding. The samples of each of the coatings and the base material (gray cast iron) are evaluated by high temperature erosion test, which consists of projecting abrasive particles (aluminum oxide) through a hot gas jet for 5 cycles of 5-minute each. The upper surface of the sample should be at a temperature of 450 ° C and the subsequent surface at 90 ° C cooled by water, in such a way as to emulate the operating conditions of the walls of the exhaust ducts of the head. Eroded samples are characterized by EDS and SEM. The results show the erosion rate and erosion mechanisms corresponding to each of the materials. These results will allow to determine the optimum coating for this specific application. The second part of this work corresponds to the application of the coating on the walls of the cylinders head. Information is collected on the operation of the heads and solid and liquid samples are taken from the combustion residues which are analyzed by X-ray diffraction to determine the possible causes of premature wear of this component. Details of the metallization process are provided, starting with the cleaning and transportation of the piece, the preheating temperature and the cooling rate according to the composition of the base material, the configuration of the equipment and the evaluation of the material by inspection with penetrating inks.

Keywords: Cast Iron, Wear, Maintenance, Thermal Spray, Characterization, HVOF, Arc Spray, Powder Welding, Engine head.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Antecedentes.....	10
2.	Resistencia al Desgaste por Erosion en Caliente de Recubrimientos	
Duros	13	
2.1.	Introducción a la primera parte.....	13
2.2.	Métodos Experimentales	15
2.2.1.	Materiales y Proceso de Rociado térmico	15
2.2.2.	Metalografía y Micro - Dureza	17
2.2.3.	Ensayo de Erosion por Impacto de Particulas a Altas Temperaturas.....	17
2.3.	Resultados y Discusiones.....	19
2.3.1.	Microestructuras	19
2.3.2.	Micro-dureza vickers	22
2.3.3.	Tasa de erosion	22
2.3.4.	Mecanismos de Erosion por Particulas Solidas	24
2.4.	Conclusiones	29
3.	Proceso de Recuperacion de Ductos Erosionados en el Cabezote	
Wärtsilä V1832LN	31	
3.1.	Introducción.....	31
3.2.	Diseño Asistido por Computador-CAD.....	31
3.3.	Información y Condiciones de Operación del Motor Wärtsilä V1832LN	
32		
3.3.1.	Información del Motor.....	32
3.3.2.	Condiciones de operación del Cabezote Wartsilla.....	35
3.3.3.	Análisis de los Residuos de la Combustion.....	36
3.4.	Pre calentamiento	39
3.5.	Diseño Del Proceso De Recuperación Por Metalización.....	42
3.6.	Conclusiones	51
4.	Referencias	53
5.	Anexos	55
Anexo A:	Planos Cabezote Wärtsilä V1832LN	55
Anexo B:	Análisis de la Composición Química de los Cabezotes Mediante Ensayos de Espectrometría de Luz.....	56

Anexo C: Caracterización Mediante SEM Y EDS. De Los Residuos Sólidos Encontrados en el Motor WÄRTSILÄ V1832LN	57
--	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Espesores promedio de las muestras recubiertas.....	21
Tabla 2. Información General del Motor Wärtsilä vasa 18v32ln – CRO	33
Tabla 3. Condiciones de Operación de los motores Wartsilla. SPF Bloque 16.....	36
Tabla 4. Resultados del ensayo de difracción de rayos X de los residuos sólidos encontrados en los cilindros del motor.	39
Tabla 5. Presupuesto del Proyecto	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. A) Motor a crudo Wartsilla V1832LN b) Cabezote Vasa con erosión en las paredes de los ductos de escape. c) Ampliación de los ductos de escape con erosión en la pared inferior. La pieza esta manufacturada en Hierro Fundido Gris (3.2% C, 1.7% Si, 0.46% Mn, 0.46% P y 0.25% S)	12
Figura 2. Espectros EDS de a) NiCrBSiFe - matriz depositado mediante PSW, y b) aleación a base de Fe depositada por TWAS.....	17
Figura 3. a) Esquema del sistema de erosión por impacto de partículas en caliente. b) Configuración actual del sistema.	18
Figura 4. Morfología de las partículas erosivas Al ₂ O ₃	18
Figura 5 Microestructuras transversales: a) PWS -NiCrBSi reforzado con WC, b) Fundición gris utilizada como sustrato, c) HVOF-CrC-NiCr, d) TWAS – aleación basada en Fe.	21
Figura 6. Durezas Vickers HV 0.3 de las muestras estudiadas.	22
Figura 7. Tasas de erosión de cada uno de los recubrimientos estudiados vs Material de referencia (Hierro Fundido Gris	24
Figura 8. NiCrBSiFe++WC por PSW a) Recién depositado b) Después del ensayo de erosión.....	25
Figura 9. Aleación basa den Fe por TWAS a) Recién depositada con fisuras debido a esfuerzos residuales. b) Después del ensayo de erosión, se muestra evidencia del mecanismo predominante, el frágil (flechas blancas) y deformaciones dúctiles (flechas negras)	26
Figura 10. NiCr CrC por HVOF a) Recién depositado. b) Después del ensayo de erosión en caliente.	28
Figura 11. Dimensiones especificadas por el fabricante Wartsilla para los ductos de escape de los cabezotes.....	32
Figura 12. Esquema vista transversal Motor Wartsilla	33
Figura 13. Partes del Cabezote VASA. En Manual de Instrucciones, Vasa Factory. Derechos de Autor por Wärtsilä Finland Oy.....	34
Figura 14. Condiciones de operación del Cabezote VASA	35
Figura 15. Residuos de la combustión A) Toma de muestras en campo. B) Almacenamiento de las muestras.....	36
Figura 16. Principales reacciones durante la combustión del crudo pesado.....	37
Figura 17. Efecto del CE y Temperatura de no agrietamiento en Fundiciones de Hierro. En ASM Handbook Volume 6 Welding Brazing and Soldering, (pp. 1751), por Richard alley et al,1990, USA. Derechos de Autor por ASM International.....	41
Figura 18. Modelo computacional Precalentamiento. a) Se observan las zonas que se verán afectadas por esfuerzos termo mecánicos durante la metalización. b) Temperaturas en la zona de interés.	42
Figura 19. A) Transporte del Cabezote B) Limpieza de la zona de trabajo.....	43
Figura 20. Inspección mediante ensayos no destructivos	44
Figura 21. Sistema de Precalentamiento para el Cabezote Wärtsilä	45
Figura 22. Capa inicial de NiCrBSiFe para evitar oxidación en el área de trabajo.....	46
Figura 23. Configuración correcta del equipo de metalización. Eutalloy Super Jet-S.....	46
Figura 24. Proceso de Metalización.....	47
Figura 25. A) Inspección visual del recubrimiento. B) Ensayo tintas penetrantes.	48
Figura 26. A) Ducto de escape recuperado. B) Remoción de los excesos con mototool C) Recuperación de la base donde se apoya el asiento de la válvula.	49

1. ANTECEDENTES

Líderes industriales en manufactura de componentes mecánicos de motores han optado por crear una línea de re-manufactura, tal es el caso de CUMMINS, GM, John Deere, CAT-REMAN, entre otros. CAT-Reman es la división de la mundialmente conocida CATERPILLAR, famosa por ser el más grande fabricante de maquinaria para construcción, minería, transporte y generación eléctrica. Esta división recupera materiales por medio de procesos tecnológicos ambientalmente sostenibles, restaurando y certificando componentes a los cuales los re-catalogan a como “nuevos” (CAT REMAN, 2018). A esta iniciativa se han sumado empresas de mucha trayectoria como Cummins que con su programa ReCon® Engines asegura al cliente beneficios como: un mejor desempeño y durabilidad, garantía sobre los motores que han sido probados antes del envío, un bajo costo comparado con la adquisición de uno nuevo y sobre todo rapidez (Cummins, 2018).

Se considera a la re manufactura una industria prometedora ya que, comparada con los procesos de manufactura original y reciclaje, esta podría aprovechar sustancialmente el valor contenido en el producto a reparar. Además, los procesos de re-manufactura poseen características como la alta eficiencia, calidad y notable conservación de material (Id, Binshi, Key, Fuqiang, & Co, 2005)

En el Ecuador la demanda de procesos de re-manufactura ha incrementado en los últimos años por la necesidad de ahorrar en el sector industrial. El sector petrolero es la industria más grande y técnica en el país y ha sido golpeada por los precios bajos del petróleo y altos de producción, provocando una reducción importante en los presupuestos de mantenimiento y adquisición de nuevos equipos, dejando como alternativa de ahorro la recuperación de piezas de maquinaria, lo cual implica un menor costo comparado con los de importación.

La planta de generación a crudo de REPSOL en el bloque 16 opera mediante 7 motores finlandeses marca Wartsilla modelo V1832LN, cuyos cabezotes tienen un costo de 27 mil

dólares cada uno, y un tiempo de vida de 48 mil horas especificadas por el fabricante. Cada uno de los motores utiliza un set de 18 cabezotes. Estos motores requieren de un mantenimiento cada 16.000 horas. A las 32.000 horas de operación, los cabezotes presentan erosión acelerada en los conductos de salida de gases. Los cabezotes son dados de baja debido a la pérdida de espesor en las paredes que delimitan las cavidades de refrigeración y los ductos de escape, producidos especialmente por erosión en caliente.

La erosión producida en el interior de los ductos de escape puede ser fruto de dos fenómenos que juntos causan un daño progresivo a los cabezotes, sobre todo porque estos en sus condiciones de operación están sometidos a altas temperaturas. Los motores Wartsilla V1832LN funcionan con una mezcla de petróleo, diésel y aditivos químicos que mejoran la calidad de la mezcla. La combinación produce una variedad de residuos sólidos al momento de la explosión en el cilindro del motor. Estos residuos sólidos al pasar a los conductos de escape chocan en la superficie de las paredes debilitándolas gradualmente y afectándolas por efecto de la corrosión de los gases de combustión del crudo. Se genera pérdida de material, poniendo en riesgo el límite dimensional de la pared entre las cavidades de refrigeración y escape.

Existen varias alternativas para recuperar el material perdido de dichas superficies, uno de ellos y el que mejor se acopla a las necesidades de restablecer dimensiones o espesores críticos es el Hardfacing o metalización en caliente (en inglés Powder Spray Welding, PWS) el cual asegura una unión del recubrimiento con el sustrato por medio de difusión a alta temperatura. Los materiales que se depositan pueden ser aleaciones que aumenten las propiedades de dureza y resistencia a la corrosión en altas temperaturas. La recuperación de los cabezotes garantiza un mejor desempeño y mayor tiempo de vida útil, dando como resultado menores costos de mantenimiento. A continuación se muestra en la figura 1, el motor a crudo a) que es motivo de este estudio. Se trata de un motor de 18 cilindros en V. La

erosión en las paredes de los ductos de escape se ilustran en b) y en c) a mayor magnificación. La pieza esta manufacturada en Hierro Fundido Gris, cuya composición química es: 2% C, 1.7% Si, 0.46% Mn, 0.46% P y 0.25% S)

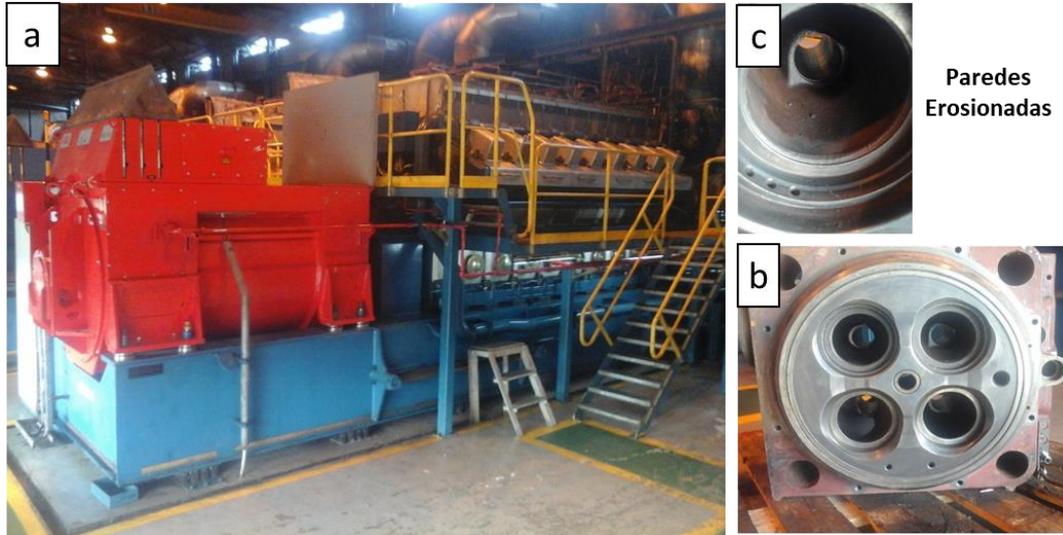


Figura 1. Motor a crudo con erosión en las paredes de los ductos de escape. La pieza esta manufacturada en Hierro Fundido Gris (3.2% C, 1.7% Si, 0.46% Mn, 0.46% P y 0.25% S)

2. RESISTENCIA AL DESGASTE POR EROSION EN CALIENTE DE RECUBRIMIENTOS DUROS

2.1. INTRODUCCIÓN A LA PRIMERA PARTE

La industria del petróleo utiliza motores a crudo para la generación de electricidad, especialmente cuando sus instalaciones están ubicadas en áreas de difícil acceso. El uso de crudo pesado puede comprometer el funcionamiento de los motores debido a la composición química de este combustible de baja calidad. La combustión de crudo pesado genera partículas sólidas compuestas principalmente de C-, S- (sulfatos y carbonatos) y óxidos de Vanadio, suspendidos en un medio de alta velocidad que puede causar erosión en los conductos de escape. En este caso de estudio, las paredes de los ductos de escape en los cabezotes pierden material debido al efecto erosivo producido por el impacto de partículas incisivas. Este fenómeno es acelerado por las altas temperaturas (la temperatura promedio de los gases de escape es 450°C) de operación y la naturaleza corrosiva de la combustión del crudo mezclado con Diesel. Las paredes están refrigeradas por agua en su parte trasera, los cabezotes se descartan cuando las paredes han perdido un máximo de 10 mm espesor (ver Fig. 1.). Esto pone en riesgo los límites operacionales de los conductos de escape y las cámaras de enfriamiento.

En erosión por partículas sólidas, la pérdida de material depende de la energía cinética (velocidad y tamaño de la partícula), los ángulos de impacto, dureza y morfología de las partículas incisivas. Durante el impacto la energía involucrada se disipará mediante deformaciones plásticas y / o fractura del material. Los mecanismos de erosión se clasifican de acuerdo al tipo de fractura presente en el material afectado, si el material es eliminado por deformación plástica, esto es característico de erosión dúctil; mientras que la nucleación y propagación de micro fisuras es característico de erosión frágil. Tanto la tasa como el mecanismo de erosión se verán afectados directamente por el ángulo en el que impacten los

residuos sólidos. Con el objetivo de disminuir el daño por erosión, el equilibrio entre la fragilidad y la ductilidad debe alcanzarse seleccionando un recubrimiento con dureza y tenacidad a la fractura adecuados (Ahmad Alidokht, Vo, Yue, & Chromik, 2017). La selección del material de recuperación está ligado al entendimiento de los mecanismos de erosión y ahí la importancia de este estudio especialmente porque la pieza opera a altas temperaturas involucrando un cambio en las propiedades mecánicas, corrosión a altas temperaturas y esfuerzos residuales.

El hierro fundido gris se usa a menudo para fabricar cabezotes, la adición de elementos de aleación, como Mn, P, Cr, Ni, S, etc., varían entre los fabricantes. El hierro fundido se usa generalmente en esta aplicación debido a la facilidad de fabricación de piezas de gran tamaño, y su capacidad para tolerar vibraciones. Sin embargo, cuando una pieza de hierro fundido falla, por ejemplo, por una grieta, es bastante difícil repararlo ya que es propenso a continuar fracturándose durante la soldadura debido a tensiones residuales. Esta naturaleza frágil está determinada por la presencia de "hojuelas" de grafito en la microestructura, cualquier técnica utilizada para la reparación debe tener una baja densidad de potencia para junto con un proceso controlado de precalentamiento evitar una falla total de la pieza debido a los esfuerzos residuales térmicos generados durante el proceso. En este estudio tres técnicas y 4 materiales: se proponen para la recuperación de la superficie: 1) NiCrBSiFe- con WC mediante metalización por polvos calientes (Powder Spray Welding, PWS), 2) NiCrBSiFe- mediante PWS; 3) CrC-NiCr por proyección térmica High Velocity Oxy-Fuel (HVOF), y 4) Aleación a base de Fe mediante arco eléctrico (Twin Wire Arc Spray, TWAS) . Estos recubrimientos duros pueden aumentar la vida útil de la pieza mejorando las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste (erosión-corrosión)

La metalización en caliente (PSW) y el termo-rociado (Thermal Spray, TS) son técnicas típicas para la recuperación de superficies desgastadas. En la metalización mediante polvos

en caliente las aleaciones como Ni-Cr-B-Si-Fe se eligen tradicionalmente porque cumplen los requisitos de bajo punto de fusión, alta dureza, alta fuerza de adhesión y resistencia a la erosión. El bajo punto de fusión es esencial porque el hierro fundido gris tiene un punto de fusión en un rango de 1130 °C - 1250 °C y el proceso evita cambiar la microestructura del sustrato (Womersley, 1990) mientras está creando un vínculo metalúrgico. En este estudio se utiliza la aleación de NiCrBSiFe sin refuerzo, y NiCrBSiFe con refuerzo de carburos de tungsteno de escala micrométrica, de tal manera que el polvo utilizado para la metalización por polvos en caliente es una premezcla de NiCrBSiFe y WC.

En TS, la alta velocidad de las partículas en vuelo y las temperaturas de fusión logradas en el proceso dan como resultado recubrimientos con alta densidad y dispersión uniforme a una temperatura baja del sustrato (Liu, Shieu, & Wei-Tien, 2014). El recubrimiento de acero Fe-Cr-W-Nb-Mo es una alternativa válida debido a su resistencia a la oxidación y corrosión a altas temperaturas (Wielage et al., 2013), este revestimiento se deposita aquí por TWAS. El CrC-NiCr por HVOF también es usado típicamente en aplicaciones de alta resistencia al desgaste en temperaturas elevadas (Liu et al., 2014).

Con el objetivo de simular las condiciones de los ductos de escape y obtener criterios comparativos para la selección del recubrimiento óptimo para esta aplicación en específico se propone una prueba de erosión a alta temperatura (basada en la norma ASTM G211). La prueba consiste en proyectar partículas a través del aire a altas temperaturas, de tal manera que las caras superior e inferior de la muestra se encuentran a 450 °C y 90 °C (refrigerado por agua) respectivamente. El criterio de selección se genera a partir de la comparación de las tasas de erosión y la caracterización de las muestras por SEM / EDS.

2.2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

2.2.1. MATERIALES Y PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO

Las muestras de fundición gris de 25x25x6 mm se cortan de un cabezote dado de baja y serán utilizados como sustrato y referencia para los estudios de metalografía, dureza y resistencia a la erosión en caliente. Se depositaron tres tipos de recubrimientos: NiCrBSiFe en PSW (Eutalloy Torch, Eutectic Castolin, Reino Unido), aleación a base de Fe mediante TWAS (TAFAs 8830, Tafa-Praxair, USA) y CrC-NiCr por HVOF (Terojet, Eutectic Castolin, REINO UNIDO). En la Figura 2 se presentan resultados de EDS para la composición de la aleación basada en Fe (acero Fe Cr-W-Nb-Mo) y el aglutinante NiCrBSiFe

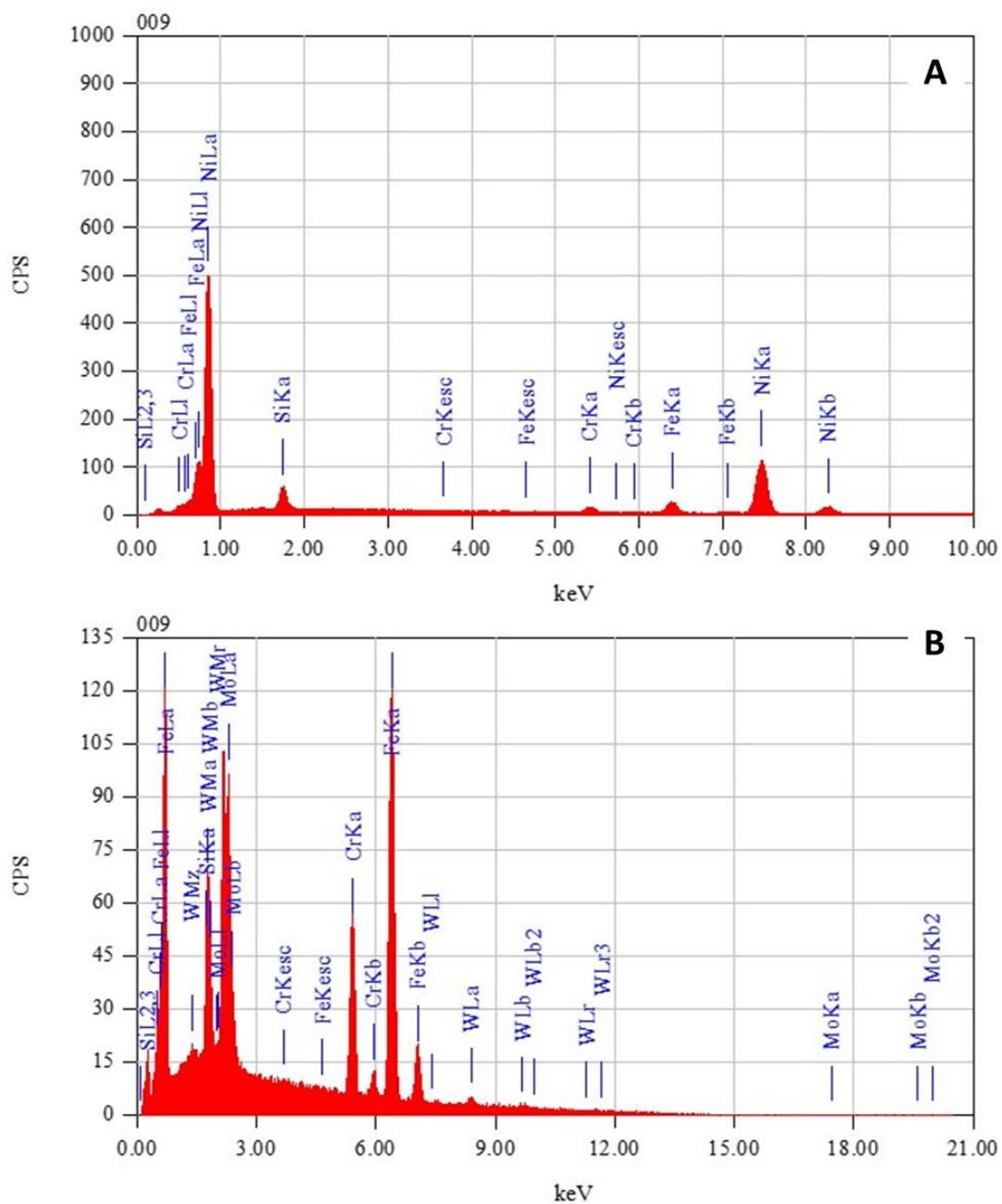


Figura 2. Espectros EDS de a) NiCrBSiFe - matriz depositado mediante PSW, y b) aleación a base de Fe depositada por TWAS.

2.2.2. METALOGRAFÍA Y MICRO – DUREZA

Las secciones transversales de cada muestra de los recubrimientos duros y hierro fundido gris (sustrato) se prepararon para ser analizadas usando técnicas metalográficas. Las muestras fueron montadas en resina fenólica y pulida según la norma ASTM E1920-03 (ASTM, 2016a). Los cupones fueron pulidos usando suspensiones de alúmina de 9 μm , 5 μm y 1 μm con sus paños correspondientes. Las mediciones de macro y micro-dureza fueron tomadas usando un durómetro Wilson Vickers 432 SVD usando una carga de 0.3 Kg.

2.2.3. ENSAYO DE EROSION POR IMPACTO DE PARTICULAS A ALTAS TEMPERATURAS.

El ensayo de erosión por impacto de partículas en caliente se lleva a cabo usando un sistema basado en las especificaciones de la norma ASTM G211 (ASTM, 2015). Se usaron como partículas incisivas Oxido de Aluminio (Al_2O_3) cuyo tamaño se midió mediante un microscopio de barrido de electrones JEOL IT300. El esquema mostrado en la Figura 3 muestra los componentes principales del sistema usado para las pruebas de erosión, el sistema está compuesto por un módulo de calentamiento, un módulo de proyección de partículas y un sistema de enfriamiento. El módulo de calentamiento contiene dos quemadores de GLP que calientan la superficie de la muestra a una temperatura entre 450 ° C y 500 ° C. La Figura 4 muestra la morfología angular de las partículas erosivas. La proyección de partículas se lleva a cabo mediante un sistema Venturi a través del cual circula aire seco con las partículas dosificadas a 4 g / min. La presión del aire se establece en 100 psi para todas las pruebas. Como boquilla se utilizó un tubo no poroso de alúmina por su alta

resistencias al desgaste. La distancia entre la superficie de la muestra y la boquilla de alúmina es de 14 mm y el ángulo de incidencia es 90° . La muestra se enfría por conducción y convección forzada, inducidos por un sistema de enfriamiento por agua. El agua de enfriamiento está a 25°C (temperatura ambiente). Las dimensiones de las muestras para la prueba son de 25x25x6 mm recubiertas por cada una de las técnicas de metalización estudiadas en este trabajo.

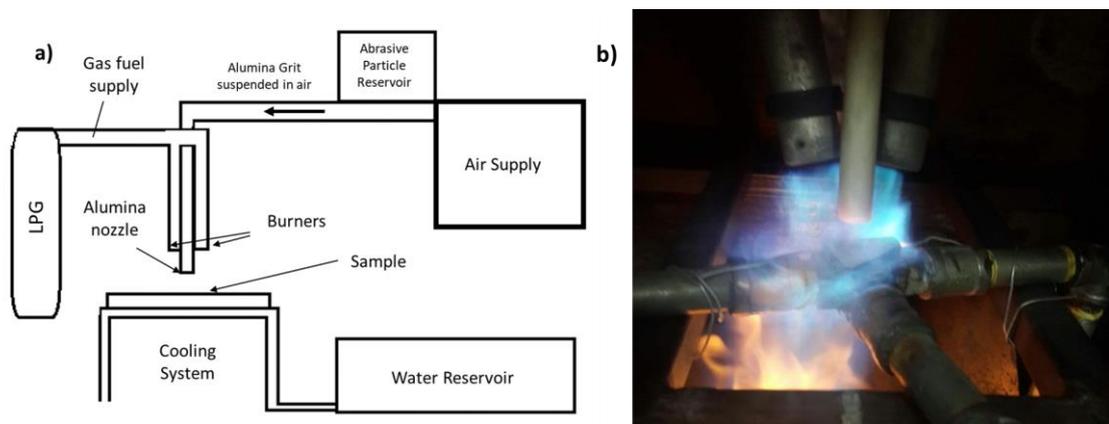


Figura 3. a) Esquema del sistema de erosión por impacto de partículas en caliente. b) Configuración actual del sistema.

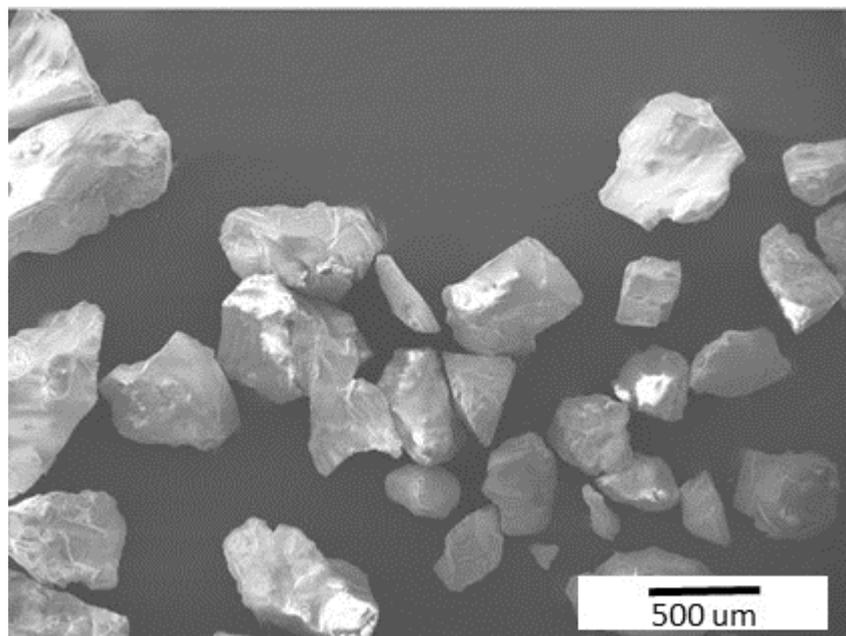


Figura 4. Morfología de las partículas erosivas Al_2O_3

El ensayo empieza pesando la muestra con una balanza de alta precisión Mettler Toledo (resolución 0.1 mg), luego las muestras se calientan a 450 ° C durante 7 minutos, el sistema de enfriamiento se mantiene encendido durante toda la prueba, y al estar la superficie entre 450 ° C - 500 ° C el sistema Venturi se activa para proyectar las partículas sobre la muestra durante un minuto. Se establece un periodo de 2 minutos entre proyecciones para la recuperación de la temperatura de la muestra (> 450 ° C), ya que la superficie se enfría durante la proyección de alúmina. El tiempo total de exposición de la muestra a las partículas erosivas a alta temperatura es de 25 minutos, dividido en 5 series de 5 minutos, proyectando en cada uno 20 g de partículas. Después de cada serie, la muestra se limpia en un baño de ultrasonidos (Buehler Limpiador ultrasónico) y es secada con aire comprimido seco. Finalmente, la tasa de erosión es calculada mediante la normalización de la pérdida de masa por la masa total de partículas incidentes utilizadas (20 g). Para estudiar los mecanismos de erosión presentes en la superficie desgastada, esta es caracterizada mediante SEM y EDS. Los resultados muestran la tasa de erosión de cada material, se probaron tres muestras de cada condición para el cálculo estadístico

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.3.1. MICROESTRUCTURAS

En la figura 5 se muestran las microestructuras presentes en las secciones transversales de cada uno de los recubrimientos duros y del sustrato de hierro fundido gris. la figura 5b muestra la presencia de "hojuelas" de grafito característicos del hierro fundido gris. en la figura 5c y 5d se observa que en las técnicas de HVOF y TWAS no hay cambios en la microestructura del sustrato debido a que durante el proceso no alcanzan temperaturas mayores a 200 °C. por otro lado, en la figura 5a en el recubrimiento de NiCrBSiFe reforzado con WC por PWS, se puede observar una zona afectada por el calor (HAZ) en el sustrato de

hierro fundido, con un espesor de aproximadamente 473 μm cerca de la interfaz. En la HAZ se muestra una distribución diferente de "hojuelas" de grafito, siendo estas más pequeñas y delgadas que el resto, en esta técnica la temperatura en que se fundió el recubrimiento fue de alrededor de 800°C de acuerdo con el fabricante del polvo. el tamaño promedio de los carburos de tungsteno es de aproximadamente 80 micras y la fracción de volumen medida por análisis de imagen reveló una presencia del 48.2% en fracción de volumen. En la figura 5c se observa una capa de CrC-NiCr recubierta por HVOF con un espesor promedio de 152,15 μm , en la que resalta la presencia de porosidad (aproximadamente 6% medido por análisis de imágenes a alta resolución) y contaminación ya que se encontró rastros de "splats" de WC-Co. La presencia de porosidades en el recubrimiento compromete su rendimiento frente al impacto de alúmina erosiva ya que esta se incrusta en los poros causando concentradores de esfuerzos que finalmente terminarán con el desprendimiento del recubrimiento por falla frágil. La relevancia de todas las imperfecciones es analizada mediante SEM. La aleación con base en Fe proyectado por TWAS mostrado en la figura 5d muestra un espesor promedio de 152,15 μm y se observaron grietas a lo largo de la superficie del recubrimiento, probablemente causadas por tensiones residuales durante el proceso de depósito.

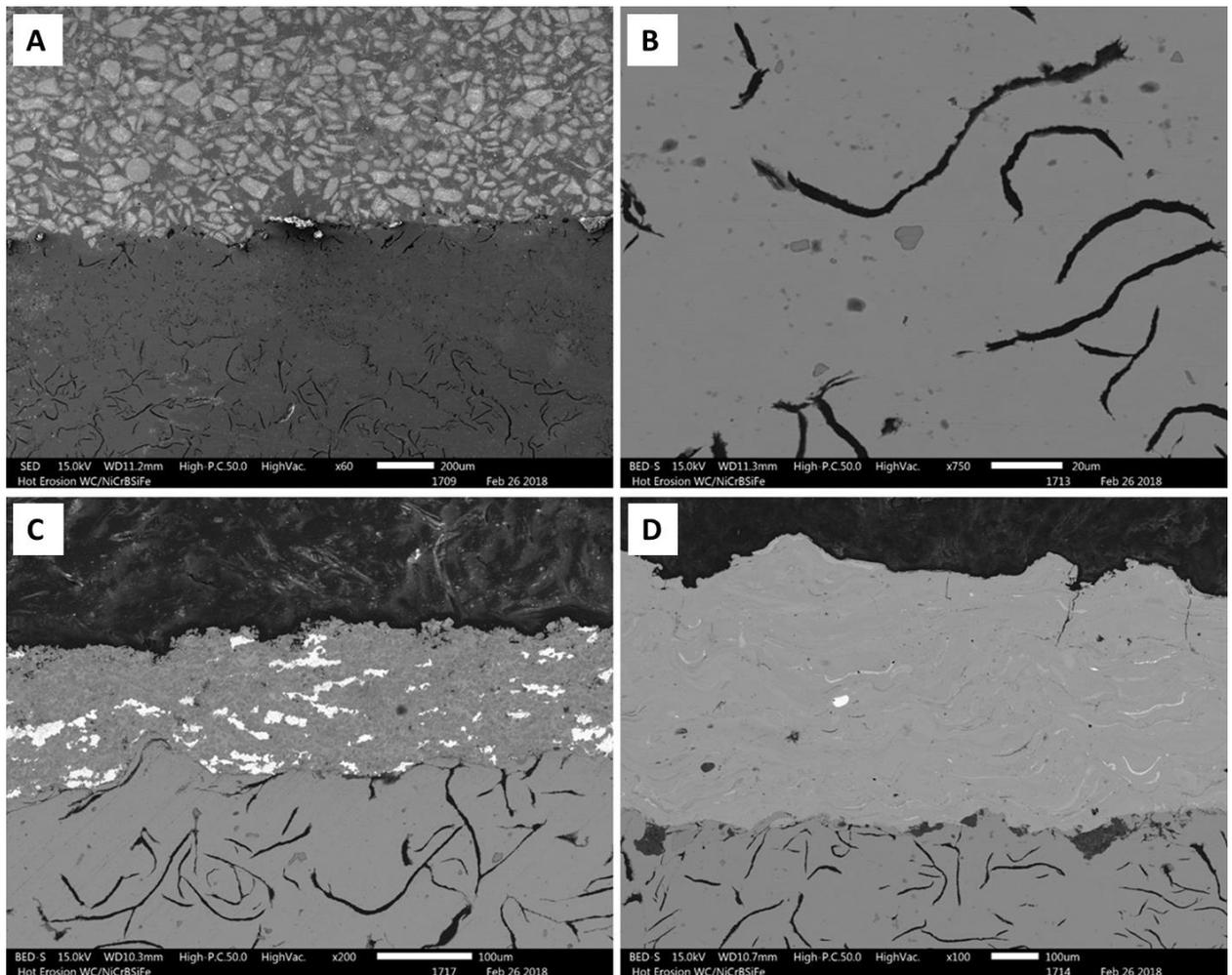


Figura 5 Microestructuras transversales: a) PWS -NiCrBSi reforzado con WC, b) Fundición gris utilizada como sustrato, c) HVOF-CrC-NiCr, d) TWAS – aleación basada en Fe.

La Tabla 1 resume el espesor promedio de los recubrimientos. A diferencia de HVOF y TWAS, el PWS no tiene un espesor máximo recomendado que comprometa sus propiedades de adherencia o resistencia al desgaste, por lo que es un proceso útil para recuperar superficies altamente erosionadas (Womersley, 1990). Los procesos de HVOF y de TWAS son de interés debido a que pueden ser utilizados para recubrir la capa final una vez recuperadas las dimensiones erosionadas.

Tabla 1. Espesores promedio de las muestras recubiertas

Técnica de Recubrimiento	Espesor (μm)
CrC-NiCr - HVOF	805.75 \pm 28
NiCrBSiFe+WC - PWS	551.15 \pm 15

NiCrBSiFe	550.15±15
Aleación basada en Fe TWAS	152.15±7

2.3.2. MICRO-DUREZA VICKERS

Las micro durezas de las muestras estudiadas (a excepción de la muestra de NiCrBSiFe-PSW) son mostradas en la Figura 6, estos valores de dureza sirven como punto de partida para estimar el comportamiento de los recubrimientos frente a efectos abrasivos o erosivos. Los recubrimientos son significativamente más duros que el sustrato (a excepción del CrC-NiCr que tiene muy poca diferencia) cumpliendo el objetivo de proteger la superficie. Sin embargo, el objetivo principal es identificar el recubrimiento que protegerá mejor la superficie de las paredes de los conductos de escape (sometidas a erosión en caliente). El NiCrBSiFe + WC muestra mayor dureza, por lo que es un excelente candidato para esta aplicación. Para NiCrBSiFe + WC la dureza en la matriz es de 735 HV0.3 mientras que la dureza en carburos esta en un promedio de 2017 HV0.3. La matriz puede considerarse representativa del material de la probeta de NiCrBSiFe sin refuerzos de WC

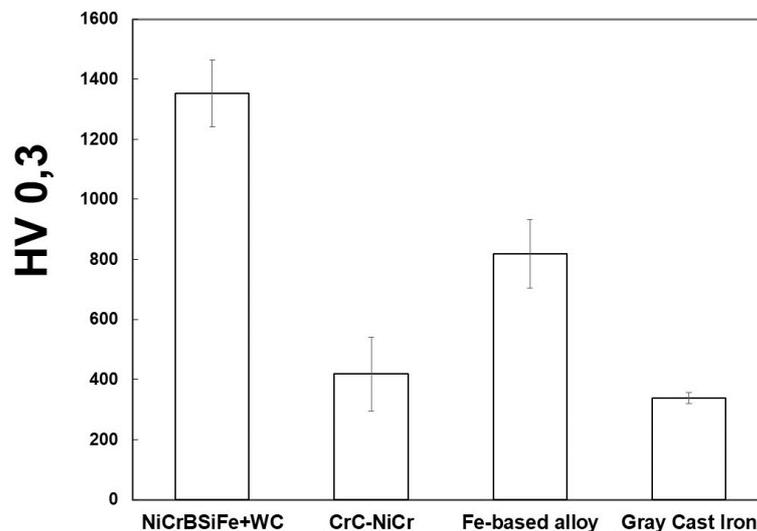


Figura 6. Durezas Vickers HV 0.3 de las muestras estudiadas.

2.3.3. TASA DE EROSION

Las tasas de erosión de los diversos recubrimientos duros y el sustrato (considerado como valor de referencia) se ilustran en la Figura 7. Se produce una pérdida de peso lineal a medida que se extiende el tiempo de exposición a las partículas erosivas. En el ángulo de impacto de 90°, se espera que los materiales que son más propensos a la fractura frágil presenten una alta tasa de erosión (Ahmad Alidokht et al., 2017). Los carburos pueden considerarse como regiones propensas a fractura, y las regiones metálicas (NiCrBSiFe o NiCr) a deformaciones plásticas pero tomando en cuenta el estudio previo de microdurezas, figura 6, el recubrimiento más resistente debería ser la aleación de Fe por TWAS pero esta presenta una alta tasa de erosión, por otro lado tanto los Carburos de Cromo por HVOF y los Carburos de Tugsteno por PSW deberían tener una tasa de erosión superior por su naturaleza frágil pero estos reflejan una tasa promedio entre los recubrimientos estudiados, los posibles motivos de esta contradicción se aclaran identificando cada uno de los mecanismos de erosión presentes en la superficie de los recubrimientos duros, ya que los términos dúctil y frágil para el fenómeno de erosión no se aplica ampliamente y en general el comportamiento de los materiales depende mucho de las condiciones en que se lleva a cabo la erosión (ángulos de impacto, tamaño de las partículas, efectos de temperatura sobre el revestimiento, etc.) (G. Sundararajan, Manish Roy, 1997).

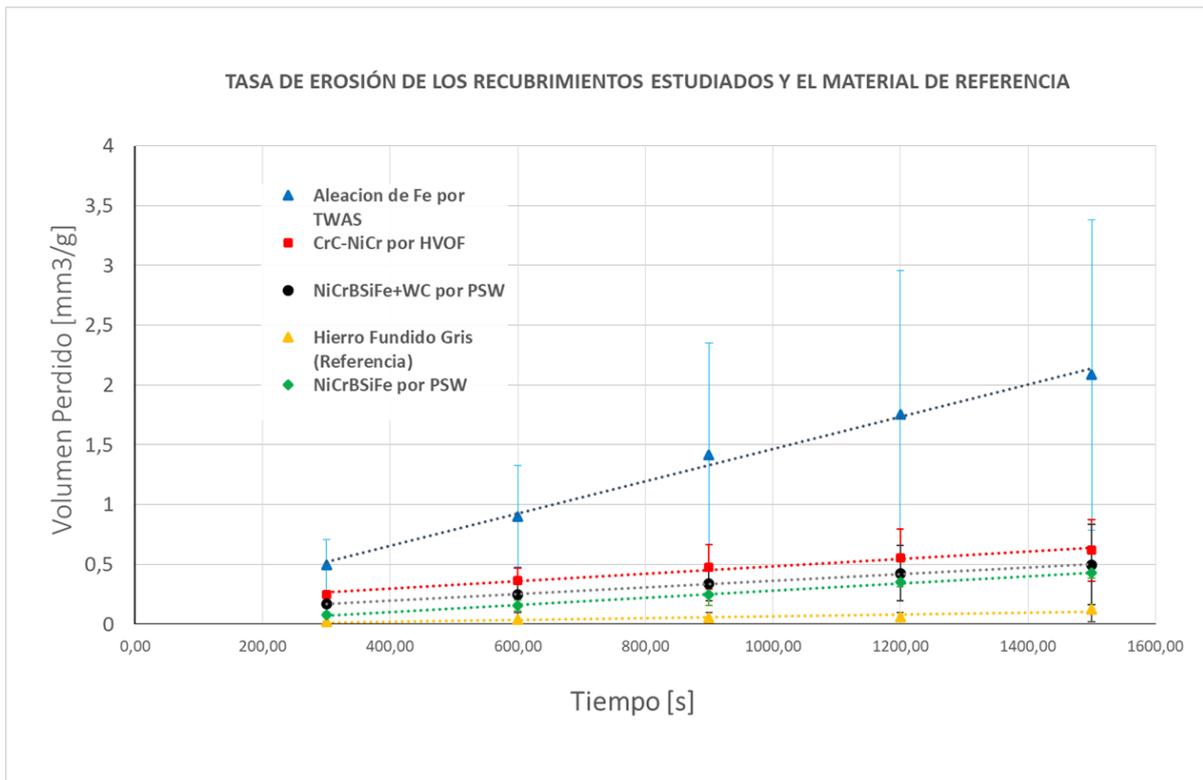


Figura 7. Tasas de erosión de cada uno de los recubrimientos estudiados vs Material de referencia (Hierro Fundido Gris)

2.3.4. MECANISMOS DE EROSION POR PARTICULAS SOLIDAS

En la Figura 8a se observa la superficie del recubrimiento de NiCrBSiFe+WC el cual presenta un aspecto irregular y áspero donde predominan grandes carburos en una matriz metálica. A mayor aumento en la Figura 8b en la región erosionada se observan mecanismos de erosión de dos materiales diferentes. Los carburos muestran fractura y desprendimiento de material debido a su naturaleza frágil, mientras que la matriz (NiCrBSiFe) muestra un comportamiento dúctil ya que presenta evidencia de deformaciones plásticas (desgarre de

splats y deformación plástica). También hay fragmentos dispersos más pequeños de carburos y residuos de Al_2O_3 incrustado en la matriz como resultado de los impactos.

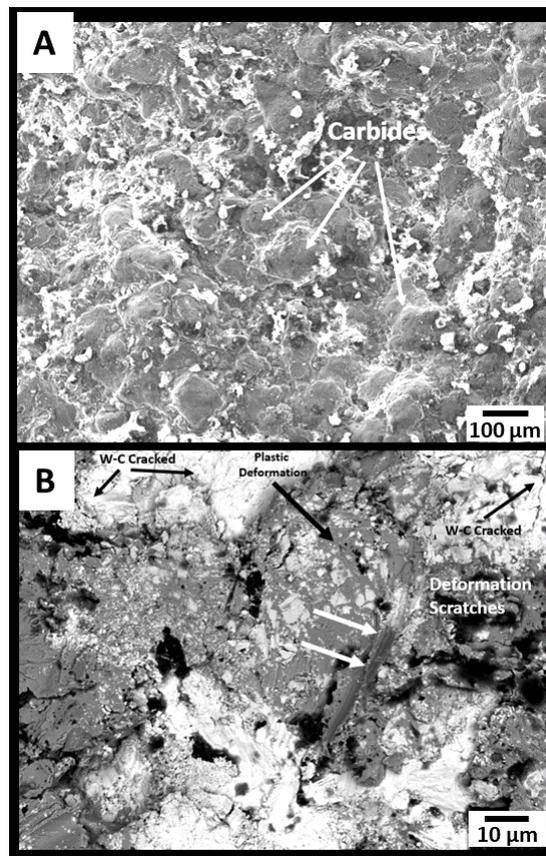


Figura 8. NiCrBSiFe+WC por PSW a) Recién depositado b) Después del ensayo de erosión

En la figura 9a, se puede observar micro-fisuras (mud-cracking) en la superficie del recubrimiento de la aleación basada en Fe. Estas grietas probablemente son causadas por tensiones residuales al momento de la deposición mediante TWAS. Durante el tiempo en el que el recubrimiento está expuesto al impacto de partículas angulares, el fenómeno de la erosión ocurre removiendo pedazos grandes de material. Como la superficie tiene ya iniciadores de grietas, la propagación de estas causan erosión frágil produciendo el desprendimiento parcial o completo de splats (o piezas más grandes) del recubrimiento, la evidencia de esto se puede observar en la Figura 9b donde se muestran planos fractales señalados con flechas blancas, de modo que en este tipo de recubrimiento el mecanismo predominante es el frágil.

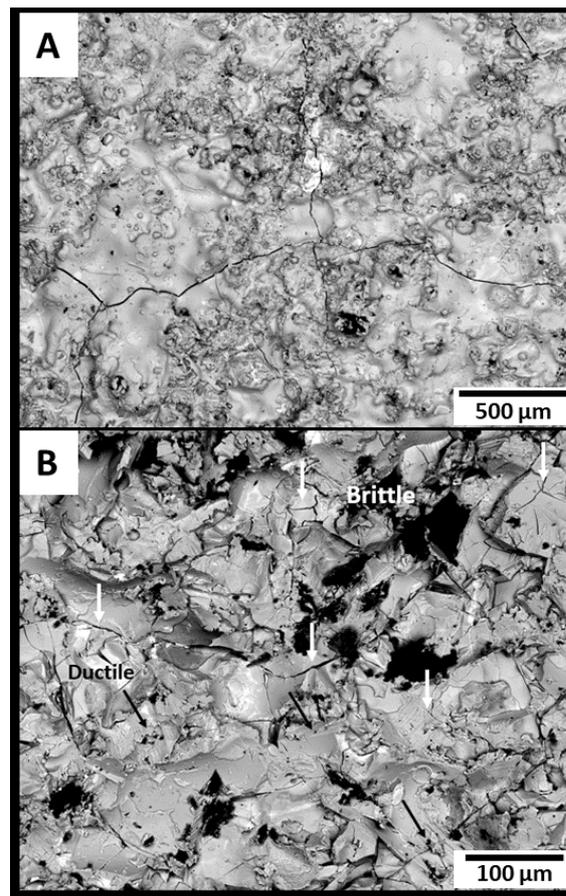


Figura 9. Aleación basada en Fe por TWAS a) Recién depositada con fisuras debido a esfuerzos residuales. b) Después del ensayo de erosión, se muestra evidencia del mecanismo predominante, el frágil (flechas blancas) y deformaciones dúctiles (flechas negras)

Algunas áreas de deformación plástica son observadas como raspaduras dúctiles (flechas negras figura 9b). Estas áreas probablemente son el resultado del efecto del calentamiento durante el ensayo de erosión, ya que la fragilidad del recubrimiento se ve afectada por las altas temperatura de la prueba. En esta muestra, prevalece el desprendimiento debido a una falla frágil y por lo tanto la tasa de erosión aumenta dramáticamente como se ve en la Figura 7. También, se encontraron un gran número de fragmentos de óxido de aluminio incrustados en toda la muestra.

En la Figura 10a se muestra la superficie del recubrimiento de CrC+NiCr depositado por HVOF. Los carburos de Cromo (CrC) están presentes en una aparente combinación no uniforme con el material aglutinante (NiCr). Algunas áreas muestran carburos expuestos que pueden estar sueltos de la matriz. Además, las porosidades del recubrimiento discutido en la Figura. 5 permite retener las partículas de alúmina durante los impactos, para evidencia de esto se encuentran residuos grandes de Al_2O_3 atrapados en las porosidades abiertas. Varios mecanismos de erosión se observan en la superficie, especialmente deformación plástica (deformación plástica y desprendimiento de splats). Se observa también algo de delaminación en las capas del recubrimiento cerca de los residuos de Al_2O_3 , probablemente causados por la incrustación de las partículas en las porosidades. En general, las deformaciones plásticas a lo largo del área erosionada están presentes en mayor número comparadas con fallas frágiles.

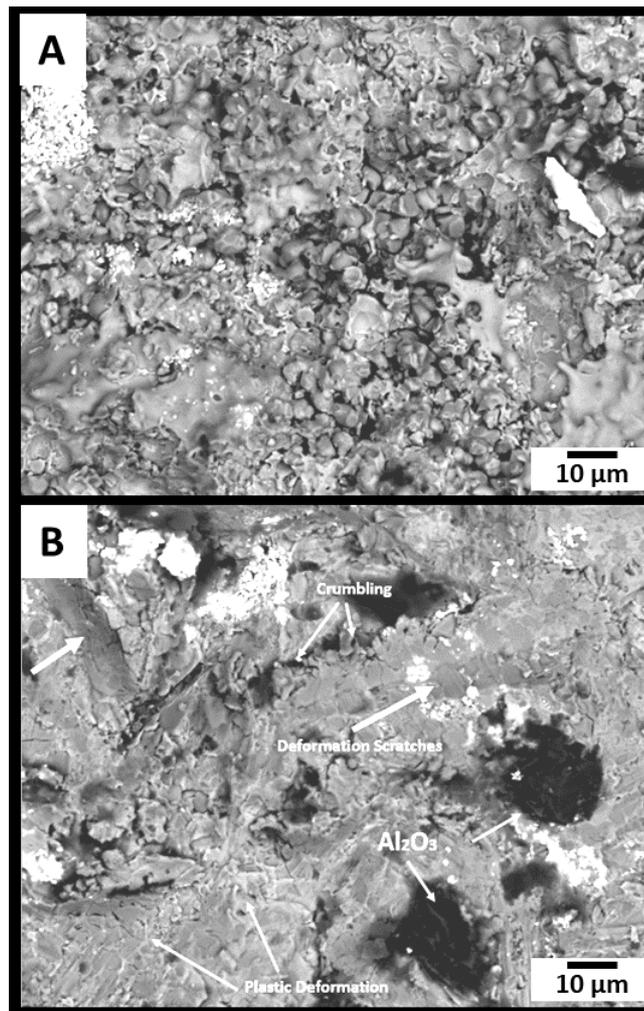


Figura 10. NiCr CrC por HVOF a) Recién depositado. b) Después del ensayo de erosión en caliente.

Todos los resultados anteriores indican que el recubrimiento de NiCrBSiFe es el mejor candidato para la recuperación de las superficies de hierro fundido gris que enfrentan un fenómeno de erosión en caliente. El recubrimiento presenta la tasa de desgaste más baja, una alta densidad y probablemente la más alta fuerza de adherencia a medida que se deposita a altas temperaturas. En comparación con los otros dos materiales, el NiCrBSiFe y el NiCrBSiFe +WC presentan un HAZ en el sustrato y la dureza de este es ligeramente inferior al material base original y por ende el HAZ no es necesariamente una preocupación en este tipo de solución. Sin embargo, el precalentamiento de la pieza en donde se aplicará el proceso es motivo de preocupación ya que se debe alcanzar el gradiente térmico mínimo frente a los 800°C del proceso sin comprometer al material base ($< 720^{\circ}\text{C}$). Los otros dos materiales

evaluados muestran características perjudiciales de su procesamiento (microfracturas y porosidad) que afectan directamente su rendimiento. En el futuro más muestras con un mejor control de procesamiento serán probadas y otras técnicas como PTA, Cold Spray y deposición de polvo por láser

Todos los recubrimientos probados se erosionan a un ritmo mayor que el hierro fundido gris (material base) probablemente debido a la naturaleza frágil de los carburos u óxidos presentes en los revestimientos. Más investigación debe llevarse a cabo para optimizar la combinación de fragilidad y ductilidad para mejorar la resistencia a la erosión de los recubrimientos.

2.4. CONCLUSIONES

En este trabajo, la resistencia a la erosión en caliente de varios recubrimientos ha sido probada, con el objetivo de seleccionar el material óptimo para recuperar las paredes erosionadas de los ductos de escape de los cabezotes de un motor Wartsilla V1832LN. Un módulo de pruebas para erosión por impacto de partículas fue construido de acuerdo con la norma ASTM G211, con quemadores de combustible para probar la erosión en caliente. Tres tipos de recubrimientos fueron ensayados: NiCrBSiFe + WC y NiCrBSiFe por PSW, Aleación basada en Fe (Nanosteel) TWAS, y CrC-NiCr por HVOF. El recubrimiento NiCrBSiFe + WC presenta la tasa de erosión más baja, la dureza y la densidad más alta. Se observa un HAZ debido al depósito del material a temperaturas superiores a 800°C. La respuesta de este recubrimiento frente a la erosión por partículas angulares a 90° es una combinación de mecanismos de erosión dúctil y frágil. Los carburos presentan fracturas, lo cual evidencia comportamiento frágil, mientras que el aglutinante NiCrBSiFe se comporta de forma dúctil, perdiendo material debido a deformaciones plásticas. Para recuperar la superficie de las paredes erosionadas (10 mm de espesor) el proceso de PSW es seleccionado

debido a la ventaja de poder agregar varias capas sin un límite de espesor a diferencia de los otros procesos de metalización estudiados. La aleación basada en Fe presenta la menor resistencia a la erosión debido a la presencia de micro fisuras (por esfuerzos residuales luego de ser depositado) que compromete directamente la resistencia de la superficie causando desprendimiento parcial o total de los splats del recubrimiento. Por otro lado, el recubrimiento de CrC-NiCr-HVOF presenta porosidades que permiten que los fragmentos de las partículas erosivas se incrusten en la superficie comprometiendo la adherencia entre splats.

3. PROCESO DE RECUPERACION DE DUCTOS EROSIONADOS EN EL CABEZOTE WÄRTSILÄ V1832LN

3.1. INTRODUCCIÓN

Para conocer de mejor manera los detalles técnicos de la pieza que necesita re manufacturar, se realiza un levantamiento técnico que consta de:

- 1) El diseño CAD utilizando el software INVENTOR 2016 el cual permite realizar los planos y el modelo en tres dimensiones del cabezote en estudio,
- 2) En el diseño CAD también se establecen las dimensiones que se deben respetar al momento de realizar los procesos de re manufactura (diámetros internos en los ductos).
- 3) Se obtiene también información del fabricante al revisar tanto los manuales de funcionamiento como los informes previos de Wärtsilä sobre la presencia de desgaste; De la planta de generación se obtienen las condiciones de operación de los motores Wärtsilä en el SPF y entre ellas están: la presión de los cilindros, la temperatura de salida de gases, la temperatura de funcionamiento del cabezote, el tipo de refrigerante, temperatura de salida del refrigerante y temperatura para el apagado de emergencia.
- 4) Por último, en el lugar de operaciones se recolectan residuos de la combustión ubicados en los ductos de escape y en los cilindros del motor, con el objetivo de indagar las posibles causas de la pérdida de material en las paredes de los ductos de escape.

3.2. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR-CAD

Mediante el software INVENTOR 2016 se realiza una representación en 3D del cabezote con el objetivo de manipular de manera digital las áreas de interés para el proceso de Re-manufactura. Se establecen las medidas originales del equipo las cuales deben ser verificadas al final del procedimiento. En la Figura 11 se muestran las medidas del ducto de escape que

será reparado, se pueden apreciar los límites entre los ductos de escape y las cavidades de refrigeración.

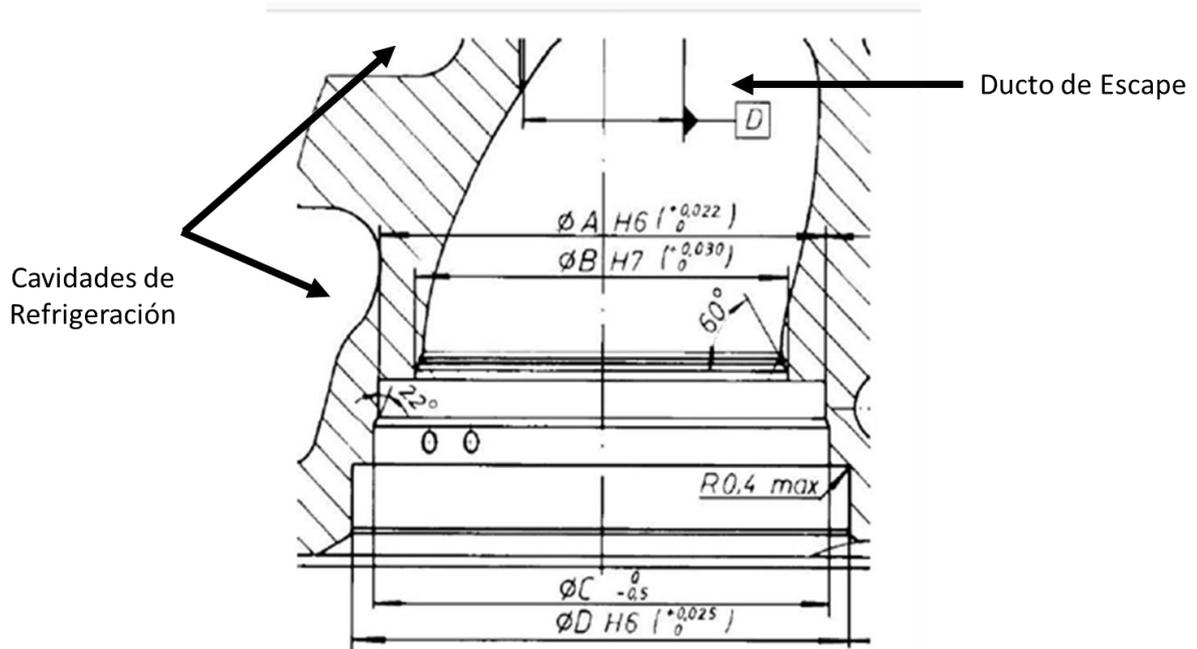


Figura 11. Dimensiones especificadas por el fabricante Wartsilla para los ductos de escape de los cabezotes.

En el Anexo 1 se encuentra el plano completo del cabezote que fue entregado en la USFQ para el estudio, en esta representación se toman en cuenta todas las medidas especificadas por el fabricante y de igual manera se identifican todas las regiones de interés (cavidades de refrigeración y ductos de escape); este recurso digital será de utilidad para realizar de manera adecuada la técnica de precalentamiento.

3.3. INFORMACIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOTOR WÄRTSILÄ V1832LN

3.3.1. INFORMACIÓN DEL MOTOR

Cada uno de los grupos electrógenos están compuestos por un motor WÄRTSILÄ V1832LN (de 4 tiempos, inyección directa, con turbina alimentadora e intercooler, la Figura 12 tomada del manual de motor se muestra un esquema general de los componentes del motor) y un generador auto refrigerado trifásico de corriente alterna ABB. Los dos equipos

están rígidamente montados en una estructura común, la cual está instalada sobre resortes de acero empernados a la cimentación para reducir las vibraciones (Vaasa Factory, 2001). El acoplamiento flexible asegura que el generador y el motor no se afecten mutuamente debido a pequeñas desviaciones en alineación o movimientos por las fuerzas dinámicas libres. La Tabla 2 resume datos relevantes acerca de este equipo.

Tabla 2. Información General del Motor Wärtsilä vasa 18v32ln – CRO

INFORMACION DEL MOTOR WÄRTSILÄ VASA 18V32LN	
Combustible Utilizado	Crudo a 957 CST a 50 °C
Combustible Sugerido	Diesel a 700 CST a 50°C
Potencia Máxima	6582 KW
Máxima Velocidad	720 rpm
Diámetro del Cilindro	320 mm
Carrera	350 mm
Cilindrada	28.151 mm ³
Tiempo de una revolución	83 ms
Tiempo de Carrera	41 ms
Velocidad Media del Pistón	8.4 m/s

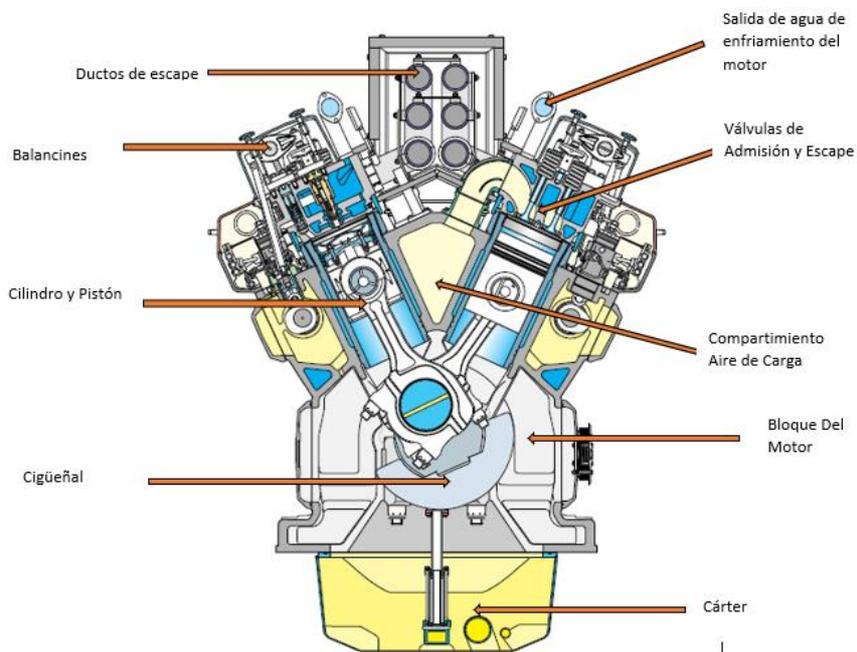


Figura 12. Esquema vista transversal Motor Wartsilla

La culata o cabezote del motor es de acero fundido especial, está fijado por 4 tornillos apretados hidráulicamente, el agua de refrigeración es forzada desde la periferia hacia el centro y la culata tiene un diseño de doble pared haciendo más eficiente la refrigeración en las zonas más importantes. El esquema de la Figura 13 ofrece detalles de las partes de este componente (Vaasa Factory, 2001).

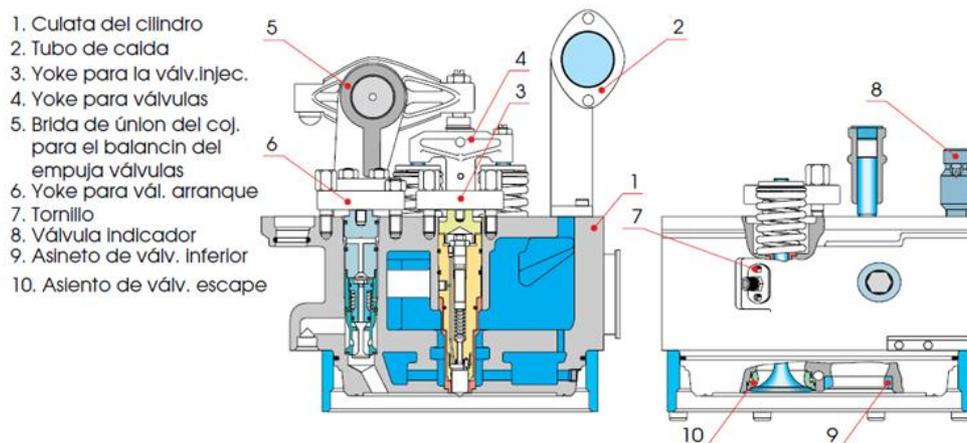


Figura 13.Partes del Cabezote VASA. En Manual de Instrucciones, Vasa Factory. Derechos de Autor por Wärtsilä Finland Oy

3.3.2. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CABEZOTE WARTSILLA

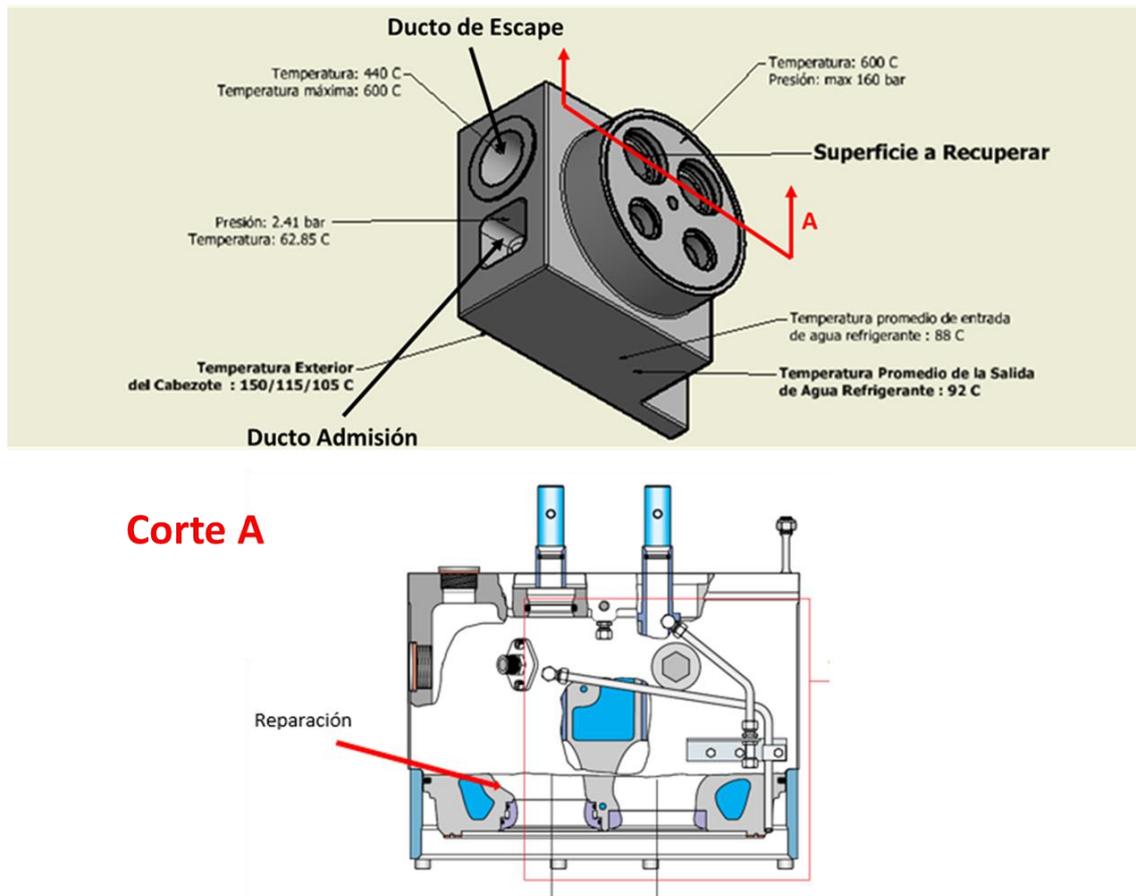


Figura 14. Condiciones de operación del Cabezote VASA

Para especificar las condiciones de operación del cabezote esquematizado en la Figura 14 se analizan las temperaturas y presiones de funcionamiento promedio de cada uno de los motores (7 motores) tal y como muestra la Tabla 3, así como el trayecto que deben atravesar los gases de escape hasta salir por la chimenea, la Figura 15 brinda un esquema que representa las áreas por donde pasan los gases de escape hasta ser emitidos a la atmosfera a través de la chimenea, de tal manera que se pueda identificar fácilmente zonas vulnerables. El turbo es un elemento vulnerable que está situado al final del trayecto del múltiple escape y es susceptible a daños por residuos sólidos provenientes del cabezote (de tamaños considerables), este parámetro se debe tomar en cuenta al momento de seleccionar el

recubrimiento para la recuperación pues se espera que tenga un desgaste gradual mas no un desprendimiento completo del material de relleno.

Tabla 3. Condiciones de Operación de los motores Wartsilla. SPF Bloque 16

Número de Motor	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura Promedio de Entrada de Agua Refrigerante (°C)	88	89	88	87	88	87	88
Presión Promedio de Entrada de Agua Refrigerante (bar)	2.4	2.2	2.2	2.3	3.1	2.3	2.4
Temperatura Promedio de Salida de Agua Refrigerante (°C)	92	94	93	92	92	92	92
Temperatura Promedio de las Termocuplas de las Válvulas de Escape. (°C)	445	456	442	453	452	453	435

3.3.3. ANALISIS DE LOS RESIDUOS DE LA COMBUSTION

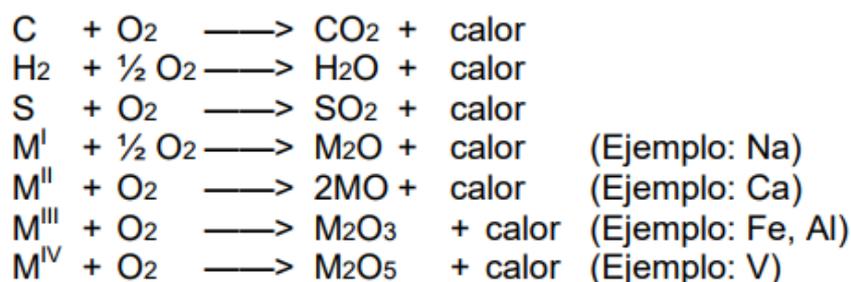
Con el objetivo de determinar la causa raiz del desgaste en los ductos de escape, se toman muestras de los residuos sólidos encontrados al momento de la extraccion de un cabezote averiado, como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Residuos de la combustión A) Toma de muestras en campo. B) Almacenamiento de las muestras

Debido a la naturaleza corrosiva de la combustión del crudo pesado se deben tomar en cuenta todos los constituyentes presentes en el combustible. Estos pueden ser: Hidrocarburos líquidos, sólidos y gaseosos, agua emulsionada, sales metálicas, metales ocultos, compuestos organometálicos e inorganometálicos, componentes de azufre, etc. Dentro de los metales que pueden estar presentes tenemos: Vanadio, Níquel, Hierro, Aluminio, Zinc, Cobre, Sodio y Calcio.

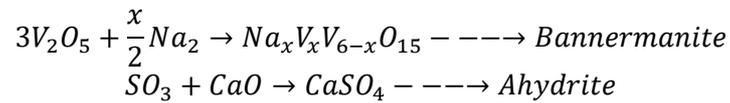
Las principales reacciones presentes durante la combustión del crudo pesado son: las reacciones del Carbono, el Hidrógeno molecular y el Azufre con el oxígeno, las cuales son de importancia para el aprovechamiento energético pero a su vez producen Dióxido de Carbono, vapor de agua y Dióxido de Azufre. Los metales también reaccionarán creando compuestos y óxidos de acuerdo a su valencia. En la Figura 16 se muestran las reacciones químicas principales durante la combustión de crudo pesado, las reacciones de C, H y S son las principales para el aprovechamiento energético, las demás son reacciones de oxidación de metales de diferentes valencias.



M significa metal de valencia I a V.

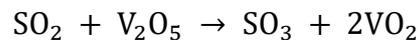
Figura 16. Principales reacciones durante la combustión del crudo pesado.

Pero los residuos sólidos que erosionan el cabezote no solo son óxidos que se forman durante la combustión, también existen compuestos que se forman a partir de reacciones que suceden de manera paralela debido a las impurezas del combustible y se mantienen en estado sólido durante la salida de los gases, así tenemos la formación de:

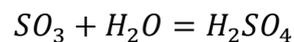


Por otro lado, también existen mecanismos de corrosión a altas temperaturas debido a los componentes de azufre y Vanadio. Es así como el dióxido de azufre pasa a ser óxido de azufre mediante catalizadores basados en vanadio (Ejemplo: Oxido de Vanadio) , y a su vez este óxido al reaccionar con vapor de agua forma ácido sulfúrico un compuesto químico extremadamente corrosivo .

La formación de trióxidos de azufre catalizados por óxido de vanadio esta dado por la reacción:



Lo cual da lugar posteriormente a la formación de ácido sulfúrico:



El Vanadio por otro lado, aparte de formar trióxidos durante la combustión y con estos catalizar la formación de óxido de azufre también puede atacar la superficie de los ductos de escape en forma de meta-vanadatos de hierro ($Fe(VO_3)_3$) (Colom, 2015)

Para corroborar la presencia de estos mecanismos de corrosión y también la presencia de impurezas que producen partículas erosivas después de la combustión se realizó un ensayo de difracción de rayos x para identificar la composición de los residuos extraídos en campo. Se obtuvieron resultados para muestras incineradas y con humedad. En la Tabla 4 se muestran los resultados del ensayo en donde se puede apreciar la existencia de Bannermanite, Anhydrite, compuestos de Calcio, Vanadio y Azufre. La dureza aproximada de estos

minerales es aproximadamente 3.5 Mohs, lo que equivale a alrededor de 32 HRC (Rockwell C de rango 19 – 69) . La información completa de la caracterización mediante SEM y EDS de una partícula de la muestra de residuos sólidos se presenta en el Anexo C.

Tabla 4. Resultados del ensayo de difracción de rayos X de los residuos sólidos encontrados en los cilindros del motor.

Mineral	Formula	Muestra húmeda Contenido (%)	Muestra seca Contenido (%)
Gypsum	$CaSO_4H_2O$	36	7
Bannermanite	$Na_{0.76}V_5O_{15}$	31	33
Scherbinaite	V_2O_5	21	25
Anhydrite	$CaSO_4$	10	21
Bassanite	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$	1	13
Retgersite	$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	1	1

3.4. PRECALENTAMIENTO

El proceso escogido para recuperar las paredes erosionadas de los ductos de escape es la soldadura por rociado de polvos (PSW-descrito en capítulo 2), utilizando una flama neutra oxyacetilénica para depositar NiCrBSiFe. El material original del que esta hecho la pieza es Hierro Fundido Gris y para corroborarlo y definir el procedimiento de pre-calentamiento, se realizaron estudios de su microestructura y de su composición, en el Anexo 2 y el apartado 2.2.2 se discute con detalle la composición del material base, el hierro fundido gris es soldable solamente con métodos apropiados y su ejecución es común en la industria.

El cabezote está manufacturado de una fundición gris especial según describe el fabricante con alrededor de 3.2% C y 1.7% Si. La composición no esta dentro de ningún rango establecido por la ASTM para la clasificación de fundiciones de hierro, pero según Borui Casting LTda en su página web donde describe las composiciones de las fundiciones de hierro el material esta dentro de los rangos de composición del ASTM clase 35 solamente

con la composición del C y el Si (C = 2.8-3.3, Si = 1.2-1.7) (Borui Casting International Ltda, n.d.).

El precalentamiento es una forma de reducir la velocidad de enfriamiento de tal manera que el material no se ve afectado por esfuerzos residuales termomecánicos o difusión metalúrgica durante o después del proceso. Las temperaturas varían desde los 50°C hasta los 450°C. Para definir la temperatura a la que se debe elevar el cabezote se debe realizar el cálculo del carbono equivalente (CE), de esta manera se podrá definir la soldabilidad de la fundición. La idea es lograr que a cierta temperatura el material no sea propenso a agrietarse debido a esfuerzo termomecánicos. El CE se calcula mediante la fórmula:

$$CE = C + 0.31Si + 0.33P + 0.45S - 0.028Mn + Mo + Cr - 0.02Ni - 0.01Cu$$

Una vez obtenido el CE del material (en este caso el CE= 4.23) es necesario recurrir a un gráfico como el que se muestra en la Figura 17, donde se muestra el efecto del CE con la temperatura de no agrietamiento (no cracking temperature)(Alley, Alia, & Lamet, 1993).

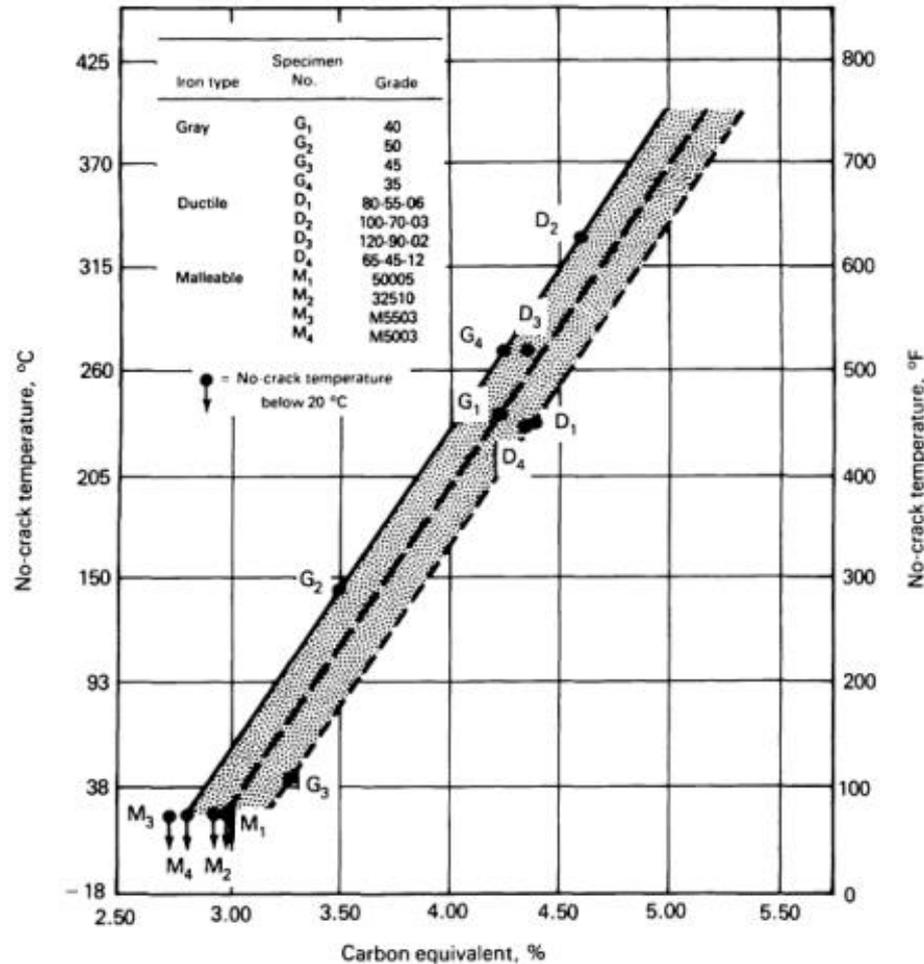


Figura 17. Efecto del CE y Temperatura de no agrietamiento en Fundiciones de Hierro. En ASM Handbook Volume 6 Welding Brazing and Soldering, (pp. 1751), por Richard alley et al,1990, USA. Derechos de Autor por ASM International

En la Figura 18 se puede identificar el punto G4 correspondiente al material similar con el que se trabaja en la remanufactura, la temperatura de no agrietamiento es de $260 \pm 20^\circ\text{C}$.

Se plantea alcanzar una temperatura de 425°C para el proceso de recuperacion, las ventajas de lograr altas temperaturas en el precalentamiento (por debajo de la temperatura critica $<720^\circ\text{C}$) son: prevenir fisuras por esfuerzos termomecanicos, reducir esfuerzos residuales, reducir distorsiones, reduce la dureza en el HAZ, evapora y elimina cualquier tipo de contaminante. Mientras mas alto sea el CE mayor será la temperatura de precalentamiento.

La Figura 18 muestra el modelo computacional realizado en el software abaqus, el cual refleja un estudio transitorio (15 seg) del comportamiento del cabezote frente a una

carga termica de de 10^7 W/m² en la pared inferior del ducto de escape, el modelo contempla un precalentamiento de 425 °C , en la Figura 18 A se aprecian las zonas que se veran afectadas por esfuerzos termomecanicos durante la metalización. Los alrededores de la zona soldada no presentan esfuerzos superiores al límite de fluencia 290 Mpa, ni temperaturas superiores a los 600°C .

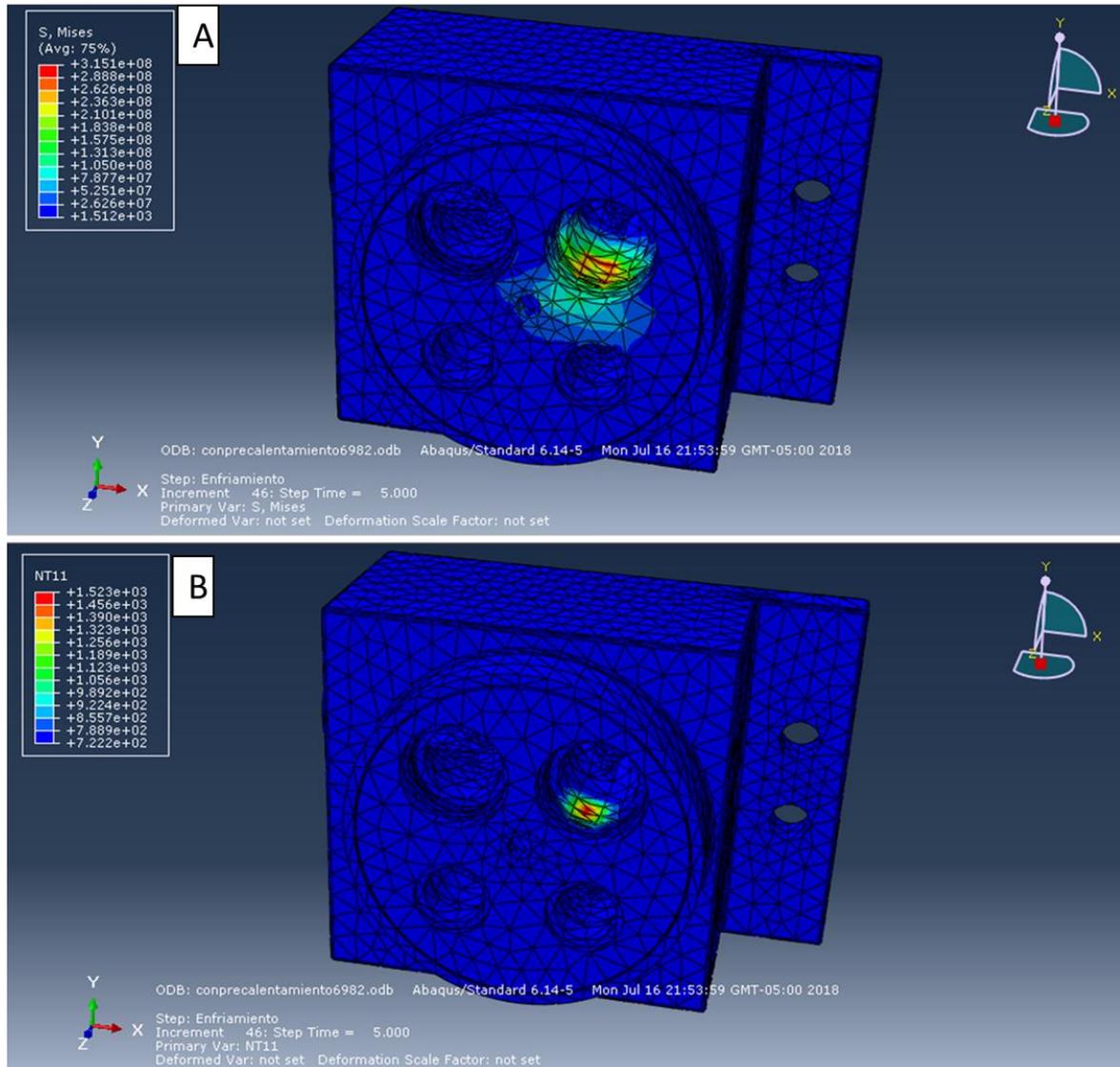


Figura 18. Modelo computacional Precalentamiento. a) Se observan las zonas que se verán afectadas por esfuerzos termo mecánicos durante la metalización. b) Temperaturas en la zona de interés.

3.5. Diseño Del Proceso De Recuperación Por Metalización.

Basado en lo expuesto en 3.1 a 3.3, se desprende el siguiente procedimiento bajo las consideraciones de: temperatura de operación, tipo de residuos, durezas, materiales, precalentamiento y temperatura de enfriamiento.

1. **Limpieza y Transporte:** Como se muestra en la Figura 19A debido al peso del cabezote (525 Kg aproximadamente) las tareas de limpieza y de precalentamiento se deben realizar en una mesa reforzada construida de acero. Antes de someter la pieza al precalentamiento se realiza una limpieza con granalla eliminando pintura y oxido, la Figura 19B muestra el aspecto del ducto con restos de oxido y pintura los cuales son removidos por sandblasting dando como resultado una superficie limpia. La granalla a su vez cumple el papel de formar puntos de anclaje para el recubrimiento.

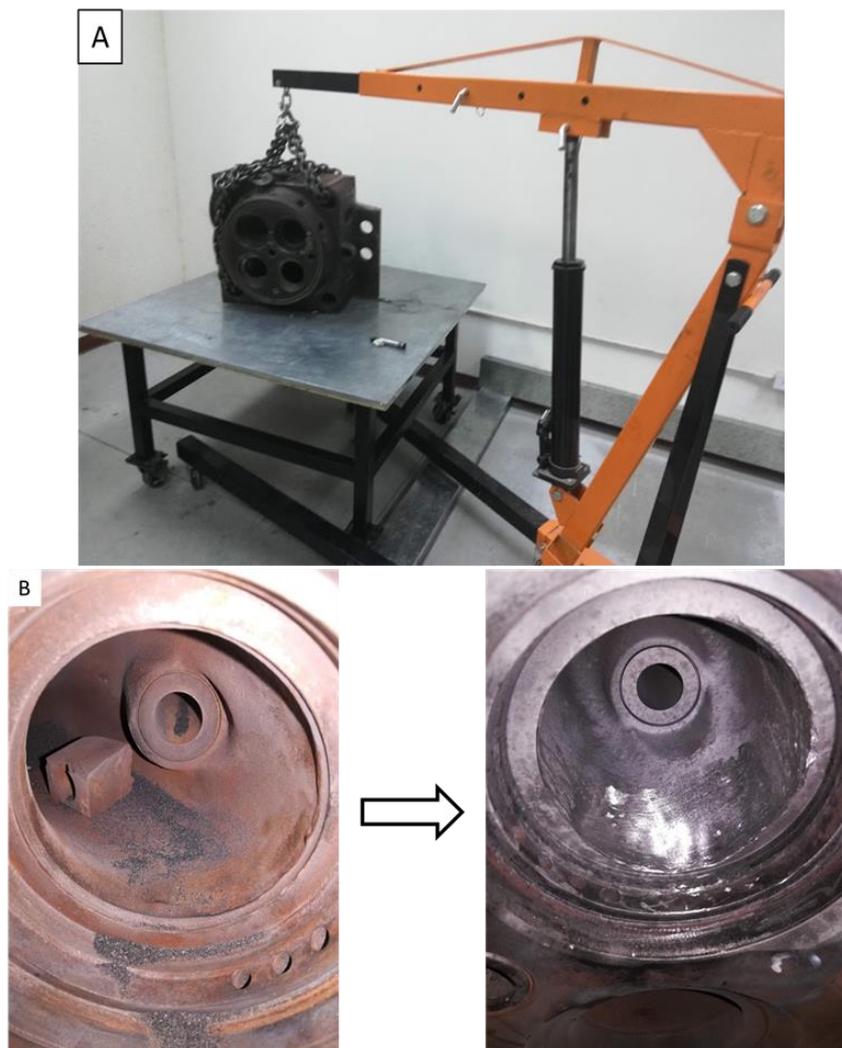


Figura 19. A) Transporte del Cabezote B) Limpieza de la zona de trabajo.

2. Ensayos no destructivos: La norma ASTM E270 es empleada para identificar discontinuidades en la superficies del material donde se va a realizar la metalización. La Figura 20 muestra la aplicación y la posterior observacion de imperfecciones en la superficie del ducto debido a los rastros de la erosion.

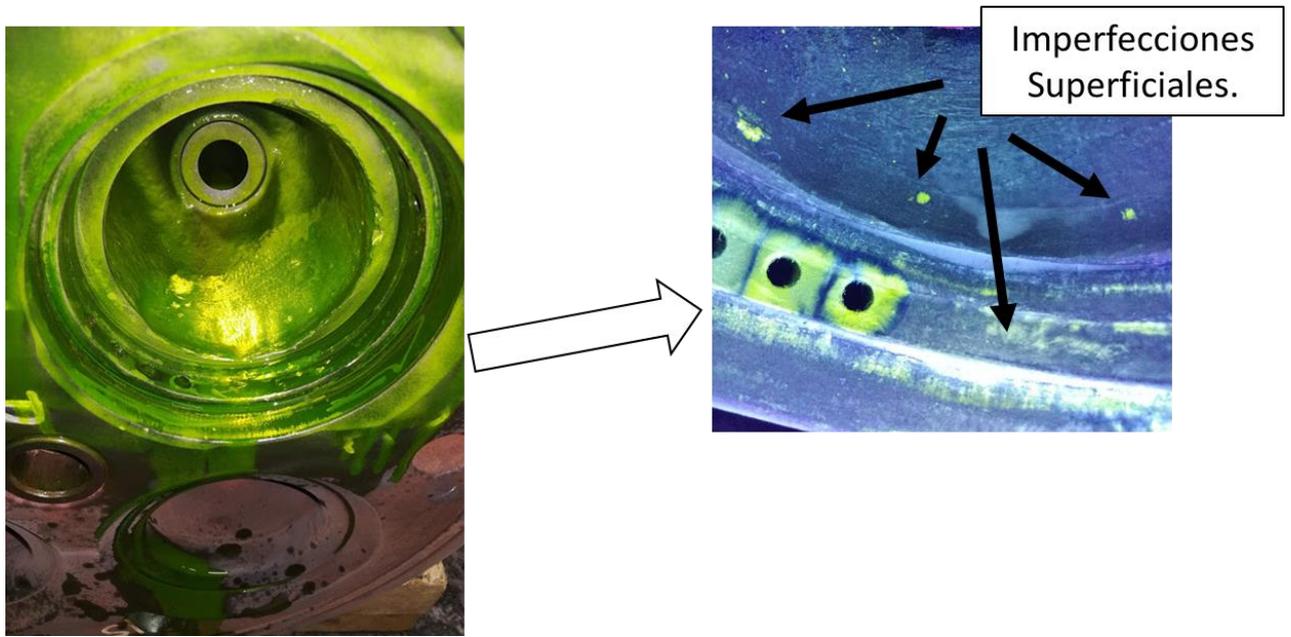


Figura 20. Inspección mediante ensayos no destructivos

3. Eliminacion de Poros o imperfecciones Superficiales: Con la ayuda de una herramienta neumatica se retira todas las imperfecciones superficiales, estas pueden ser porosidades, grietas, estrias o pittings. La figura 19B muestra el resultado de la limpieza con granalla y moto-tool.

4. Sistema de Pre calentamiento: En la Figura 21 se muestran como con ayuda de ladrillos refractarios y jaboncillo se construye un horno alrededor de la pieza para crear una cámara aislante para el pre-calentamiento. Para mejorar el rendimiento del horno se utiliza lana ceramica que va tanto en la parte interior del horno como en las zonas expuestas (parte superior y la zona de trabajo). Como fuente de calor se emplea un quemador industrial de GLP, tanto el cilindro como las conexiones deben ser industriales, para salvaguardar la

seguridad del operador y el rendimiento del sistema. Se monitorea la temperatura con una termocupla de contacto. El proceso demora alrededor de 4h hasta llegar a la temperatura deseada (425°C) que es superior a lo que indica el número del carbono (CE=4.23).



Figura 21. Sistema de Pre calentamiento para el Cabezote Wärtsilä

5. Primera capa de Recubrimiento: Con el objetivo de evitar la oxidación superficial en el área de trabajo durante el calentamiento, una vez alcanzado los 100°C se deposita una capa delgada de NiCrBSiFe, como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Capa inicial de NiCrBSiFe para evitar oxidación en el área de trabajo.

6. Preparación del Equipo de Metalización: Para el proceso se utiliza la pistola Eutalloy Superjet-S, la cual viene con un kit que incluye lanzas de diferentes longitudes y diámetros de acuerdo a las necesidades del operador, para este caso se utilizó la lanza C5S (la más larga). Las presiones especificadas de trabajo son : Acetileno a 15 psi y Oxígeno a 60 psi. La flama debe ser neutra como se muestra en la figura 23. Algunas características de esta flama son: un cono interno blanco o azul brillante, una flama externa azulada degradándose hasta el naranja y una flama aun mas externa casi sin color.



Figura 23. Configuración correcta del equipo de metalización. Eutalloy Super Jet-S

7. Limpieza y Metalización: Se realiza una última limpieza de la zona de trabajo con ayuda de un cepillo de acero inoxidable. Una vez alcanzados los 425°C se prepara el lugar de

trabajo de tal manera que el operador este comodo y sin riesgo de quemadura. Entre los equipos de protección personal es necesario: Guates de asbesto, mandil de asbesto o de soldadura, gafas obscuras para soldadura oxyacetilenica, máscara facial transparente resistente al calor, calzado adecuado. La Figura 23 muestra al operador especializado realizando el deposito de NiCrBSiFe recuperando el espesor de la pared inferior del ducto. A medida que se realiza la deposición del material, es muy importante prestarle atención a la boquilla de la lanza que al estar expuesto a alta temperatura, la llama empieza a tener una coloración verde, al ocurrir esto es necesario apagar el equipo enfriarlo con ayuda de agua y continuar. El efecto se produce por posible fusión de los componentes de la boquilla.



Figura 24. Proceso de Metalización.

8. Postcalentamiento: El postcalentamiento se realiza inmediatamente despues de realizada la metalización, tiene el mismo objetivo del precalentamiento, reducir la velocidad de enfriamineto y por ende daños en el area reparada o sus alrededores. Una vez terminado el proceso, se cubrió con manta ceramica todo el cabezote y se elevo la llama para que el

cabezote recuperará temperatura, treinta minutos después se apaga el fuego y se deja enfriar en el sistema, puede durar días para este trabajo fueron necesarias alrededor de 30 horas.

9. Ensayo Tintas Penetrantes: Finalizado todo el proceso de metalización, se procede a realizar una inspección visual del recubrimiento en búsqueda de porosidad, delaminación, grietas o fisuras. La figura 25 muestra los resultados de la inspección mediante tintas penetrantes para resaltar aquellas imperfecciones difíciles de detectar a simple vista, el resultado es un recubrimiento con correcta fusión en la parte central de la deposición, pero con fusión incompleta en los bordes (no todos), la fusión incompleta se puede dar cuando el operador no logra llevar al material base a su punto de fusión al momento de depositar el recubrimiento para lograr unión metalúrgica. Lo que se observa con tintas penetrantes no necesariamente son grietas, el recubrimiento debería ser sometido a pruebas de golpe para verificar su adherencia, el excedente no adherido debe ser retirado con herramienta de desbaste.

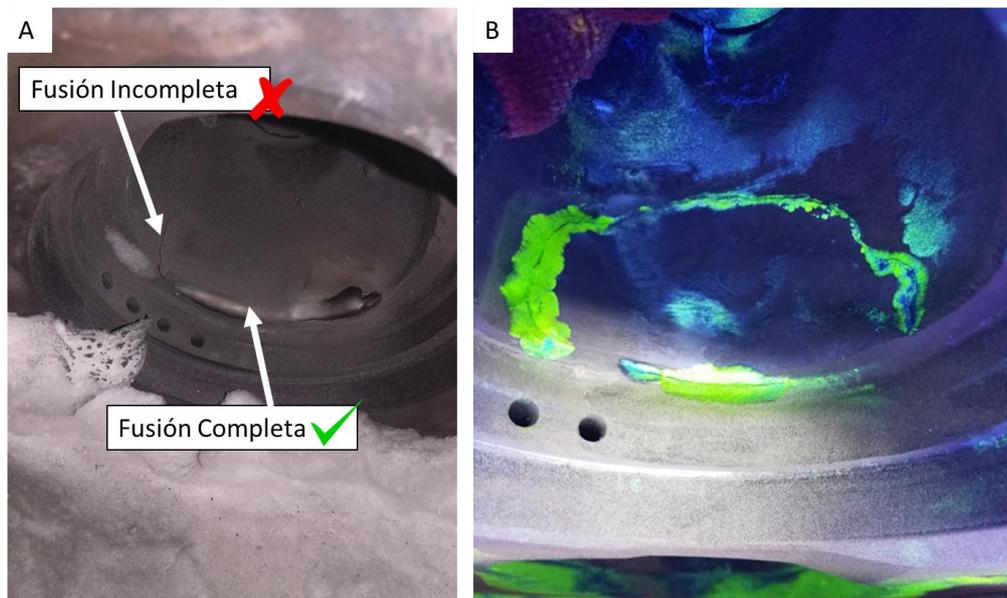


Figura 25. A) Inspección visual del recubrimiento. B) Ensayo tintas penetrantes.

10 Remoción del exceso de material y limpieza del apoyo del asiento de válvula: Si bien el área donde se realizó la metalización no cumple ningún papel mecánico más que

delimitar los ductos de refrigeración y los ductos de escape, se puede hallar sobrantes del recubrimiento que sobresalen en la zona de apoyo de los asientos de válvula, estos deberán ser removidos con ayuda de una herramienta especial para la geometría de los asientos o una herramienta neumática manual. En la Figura 26 observa cual es el acabado con un mecanizado manual realizado con una fresa y un moto – tool neumático, luego de ser depositado el recubrimiento, algunas partes de este se depositan en exceso comprometiendo la zona donde va el asiento de la válvula, este exceso debe ser retirado con ayuda de una herramienta especial capaz de remover el material hasta lograr obtener las tolerancias descritas en los planos del Anexo A.

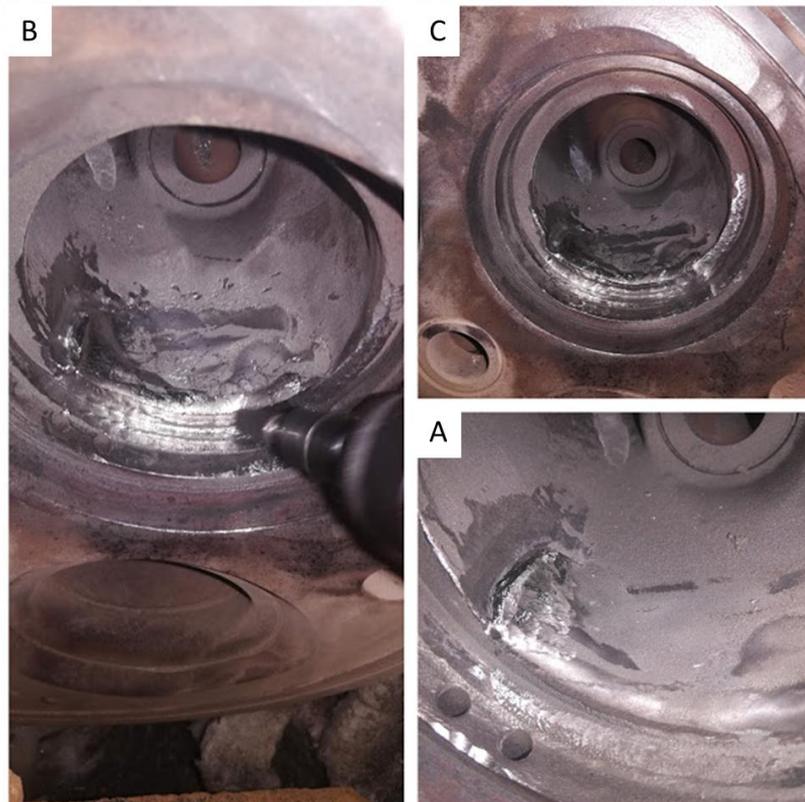


Figura 26. A) Ducto de escape recuperado. B) Remoción de los excesos con mototool C) Recuperación de la base donde se apoya el asiento de la válvula.

Se llegó sin dificultad a la temperatura de 425°C necesaria para llevar a cabo el proceso de metalización sin ningún riesgo, la temperatura se controla mediante una termocupla de contacto de tal manera que se monitorea tanto el calentamiento como el enfriamiento, pero se debe evitar descubrir el cabezote durante la etapa de enfriamiento por lo cual es necesario un sistema que monitoree la temperatura sin necesidad de quitar el aislante. Se recupera la superficie inferior del cabezote que presentaba aproximadamente 10 mm de erosión y mediante la prueba de golpe se observan desprendimientos en el sector donde existe fusión incompleta, mostrado en la Figura 26, esta parte del recubrimiento es retirada con una fresa y un moto-tool neumático. Debido a que todo el material sobrante debe ser retirado de zonas que albergan partes funcionales del cabezote, es necesario un maquinado posterior, lo cual implica la construcción de una herramienta especial tomando en cuenta la alta dureza del recubrimiento, para esta operación es necesario una madrinadora este equipo permite realizar agujeros en piezas cúbicas con tolerancias muy estrechas y que necesiten una calidad de mecanizado alta.

La operación de metalización no conlleva altos costos, la parte más costosa del proceso es la adquisición tanto de infraestructura como del equipo de metalización y mecanizado. En la Figura 27 se especifica el presupuesto del proyecto. Una inversión inicial es necesaria para la compra de: equipo de metalización, infraestructura (mesa y ladrillos para el horno) y tanques de acetileno y oxígeno. Por otro lado se encuentran los costos menores que están relacionados con todos los consumibles del proceso: los gases, el suministro de NiCrBSiFe y el GLP necesario para calentar los cabezotes, deben tomarse en cuenta las horas de laboratorio (caracterización) necesarias para especificar el material original de fabricación.

Finalmente, se logró rellenar el sector afectado por erosión en la pared inferior del ducto de escape del cabezote con un recubrimiento que garantiza una alta resistencia a la erosión y

corrosión, ambos a altas temperaturas. Ya aplicado el recubrimiento muestra una buena adherencia, principal aspecto solicitado por REPSOL para no comprometer el turbo de los motores.

Tabla 5. Presupuesto del Proyecto

Elemento	Cantidad	Precio Total
Difraccion de RX	1	120
Microscopio de Barrido (horas)	8	480
Espectrometría de luz	3	150
Pluma hidraulica	1	520,74
Ladrillos Refractarios	20	148,8
Manta Ceramica	1	133,6
Kit Eutalloy Super Jet	1	4424
Mesa de Acero	1	400
Total		6377,14

3.6. CONCLUSIONES

Como parte del proceso de recuperación de los cabezotes Wartsilla, se realizó trabajo de campo en el cual se recopiló información necesaria para entender las condiciones de operación y las especificaciones del fabricante con respecto al rendimiento del equipo, También se recuperan del motor residuos sólidos y líquidos en cuya composición se hallan las evidencias de ciertos mecanismos de corrosión y erosión presentes en los ductos de escape y que causan el desgaste prematuro de los cabezotes. Mediante técnicas de caracterización se identifica al material original de manufactura como hierro fundido gris se obtiene el carbono equivalente, con esta información se establece una temperatura apropiada de precalentamiento de 425°C. Con ayuda del estudio de los mecanismos de erosión en caliente, el cual evalúa recubrimientos duros sometidos a condiciones similares a las de los ductos de escape, se selecciona la técnica de Powder Spray Welding para depositar NiCrBSiFe en la zona erosionada. Se detalla paso a paso el proceso de metalización, partiendo desde la preparación de la superficie a recubrir, la configuración del equipo de

metalización, sistema de precalentamiento y post calentameinto, tambien se identifica mediante ensayos no destructivos (tintas penetrantes) la calidad del recubrimiento al igual que recomendaciones en caso de tener algun tipo de imperfección superficial.

4. REFERENCIAS

- Ahmad Alidokht, S., Vo, P., Yue, S., & Chromik, R. R. (2017). Erosive wear behavior of Cold-Sprayed Ni-WC composite coating. *Wear*, 376–377, 566–577.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.052>
- Alley, R., Alia, B., & Lamet, U. (1993). Volume Handbook . the Volume Was Prepared Under the Direction of the Asm Handbook. *Welding Brazing and Soldering*, 6, 2873.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ASTM. (2015). Standard Test Method for Conducting Elevated Temperature Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets 1. *ASTM International*, 1–15.
<https://doi.org/10.1520/G0211-14.2>
- ASTM. (2016a). Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings 1. *ASTM International*, 03(Reapproved 2014), 1–5.
<https://doi.org/10.1520/E1920-03R14.2>
- ASTM. (2016b). Standard Practice for Liquid Penetrant Testing. *ASTM International*.
https://doi.org/10.1520/E1417_E1417M-16
- Borui Casting International Ltda. (n.d.). ASTM A48 CLASS 35 CAST IRON. Retrieved from <http://www.iron-foundry.com/astm-a48-class-35.html>
- CAT REMAN. (2018). CAT REMAN. Retrieved from <https://www.caterpillar.com/es/company/brands/cat-reman.html>
- Colom, J. (2015).). *Estudio de la reacción de oxidación de SO₂ a SO₃ con catalizadores basados en Vanadio. Aplicación a motores diésel marinos de dos tiempos*. Universidad de Zaragoza.
- Cummins. (2018). ReCon® Engines. Retrieved from <https://salesandservice.cummins.com/content/recon®-engines>
- G. Sundararajan, Manish Roy. (1997). Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures. *Tribology International*, 30(5), 339–359. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(96\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(96)00064-3)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X96000643>)%0AKey words: erosion; solid particle erosion; erosive wear; erosion-oxidation; erosion-corrosion; elevated temperature erosion%0A
- Id, A., Bin-shi, X. U., Key, N., Fuqiang, J., & Co, P. (2005). Benefit analysis and contribution prediction of engine remanufacturing to cycle economy ®, *12*(50235030), 12–16.
- Liu, W.-H., Shieu, F.-S., & Wei-Tien, H. (2014). Enhancement of wear and corrosion resistance of iron-based hard coatings deposited by high-velocity oxygen fuel (HVOF) thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*, 249(1), 24–41.
[https://doi.org/10.1016/S0733-8619\(03\)00096-3](https://doi.org/10.1016/S0733-8619(03)00096-3)
- Vaasa Factory. (2001). Instruction Manual REPSOL VASA 18V32LN.
- Wielage, B., Pokhmurska, H., Student, M., Gvozdeckii, V., Stupnyckij, T., & Pokhmurskii, V. (2013). Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 220, 27–35.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.013>

Womersley, D. (1990). *Thermal Spraying and Powder Spray Grey Cast Iron*. *Materials & Design* (Vol. 11). [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(90\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0261-3069(90)90005-5)

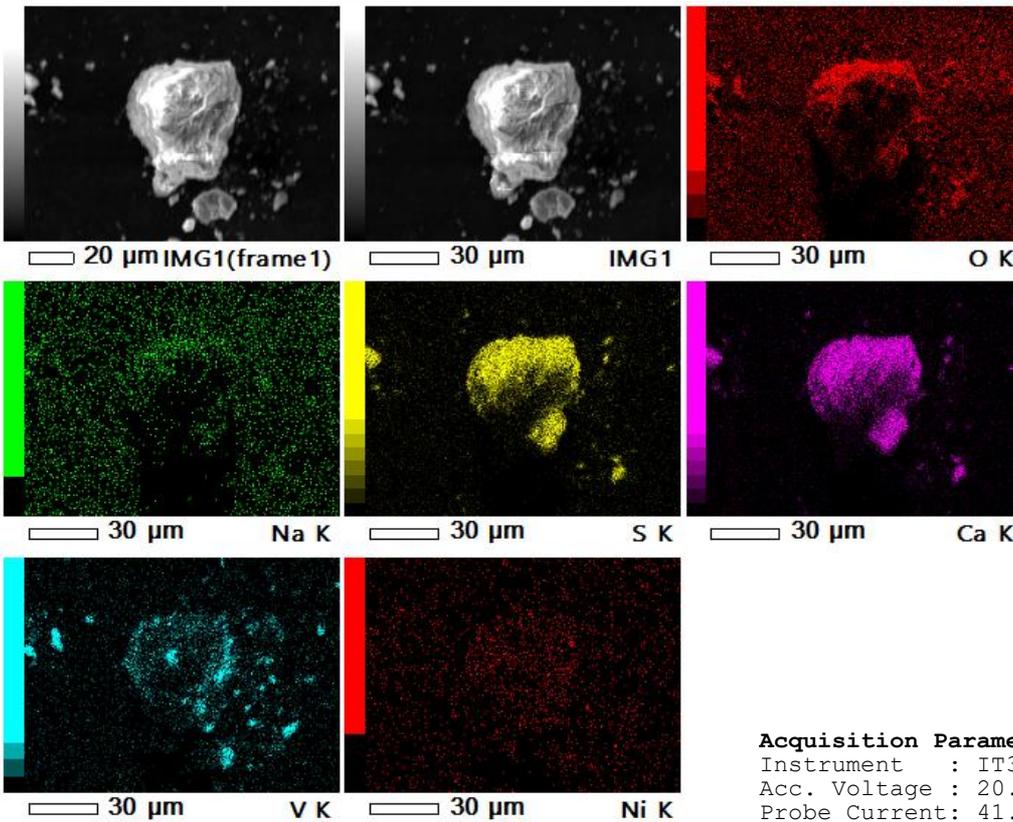
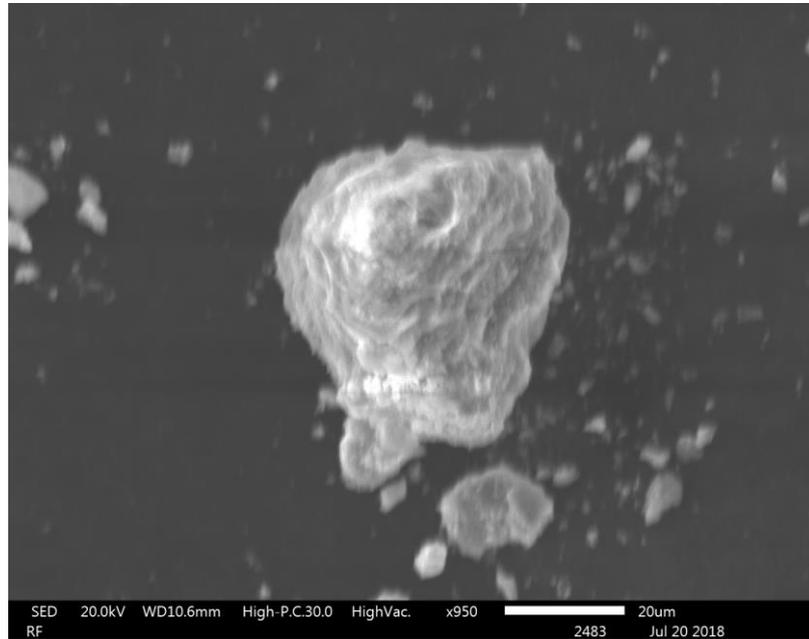
5. ANEXOS

Anexo A: Planos Cabezote Wärtsilä V1832LN

Anexo B: Análisis de la Composición Química de los Cabezotes Mediante Ensayos de Espectrometría de Luz

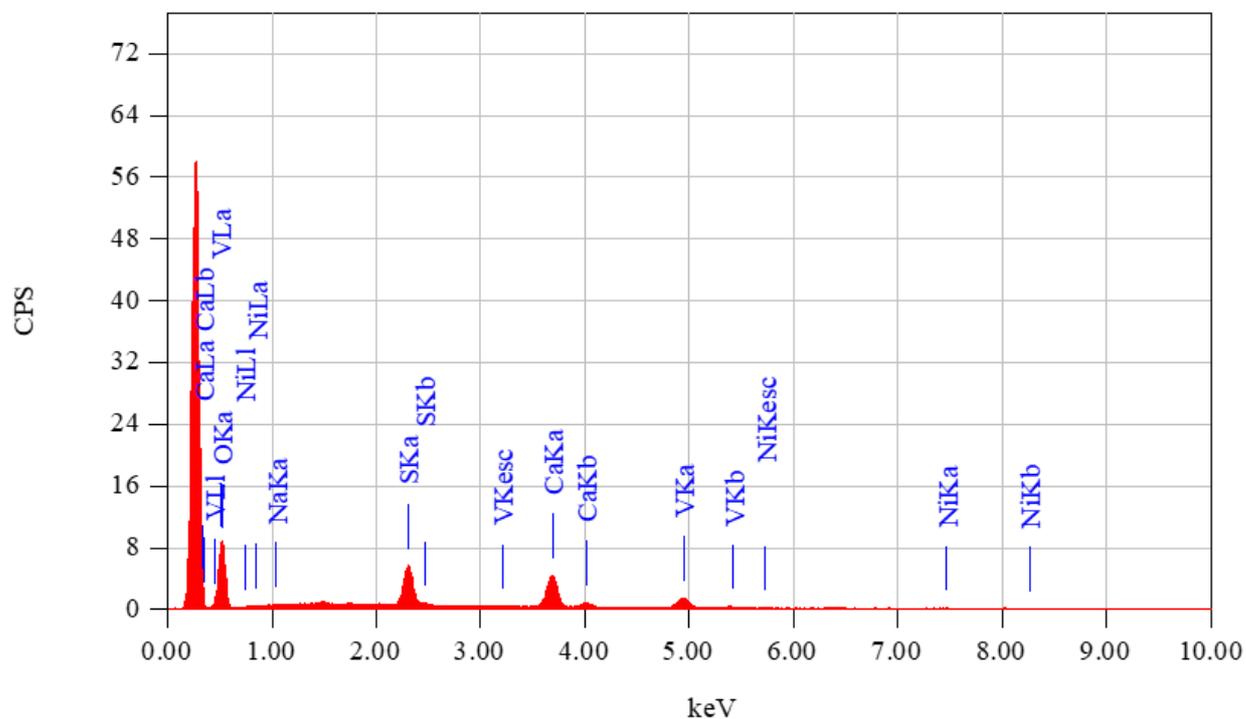
Metales	Wartsilla (%)
Carbono (C)	3,219
Silicio (Si)	1,709
Manganeso (Mn)	0,467
Fósforo (P)	0,467
Azufre (S)	0,254
Cromo (Cr)	0,272
Níquel (Ni)	0,065
Cobre (Cu)	0,521
Bismuto (Bi)	0,020
Cerio (Ce)	0,001
Plomo (Pb)	0,037
Titanio (Ti)	0,015
Hierro (Fe)	92,77
Carbono Equivalente	4,23

Anexo C: Caracterización Mediante SEM Y EDS. De Los Residuos Sólidos Encontrados en el Motor WÄRTSILÄ V1832LN .



Acquisition Parameter

Instrument : IT300(LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 41.10000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 502.74 sec
 Live Time : 450.21 sec
 Dead Time : 9 %
 Counting Rate: 894 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient: 0.7549

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
O	0.525	67.92	0.75	83.73				56.4346
Na	1.041	0.25	0.06	0.22				0.1705
S	2.307	10.30	0.12	6.34				14.5226
Ca	3.690	13.44	0.18	6.61				19.5612
V	4.949	7.38	0.17	2.86				8.4567
Ni	7.471	0.71	0.10	0.24				0.8544
Total		100.00		100.00				