

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE MUÑONES DE MOTORES DIESEL ROCIADOS TÉRMICAMENTE BAJO RÉGIMEN DE LUBRICACIÓN LÍMITE.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Andrade D, Aldo J.
Pule V, Christian D.
para optar al Título
De Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2001

*A Dios por darme salud y fuerza en
este largo recorrido.*

*A la Universidad Central de Venezuela,
Patrimonio de la Humanidad, por darme
la oportunidad de formarme profesionalmente
y abrirme las puertas del mundo.*

*A las personas que más quiero en el mundo
mis padres, hermana y sobrino ya que este logro
no hubiese sido posible sin el apoyo, el amor
y el ejemplo de ellos.*

*Principalmente a mi novia por compartir este arduo
camino y ayudarme a alcanzar lo que era un sueño,
todo esto te lo debo a ti.*

*A mis tíos y primos por ese cariño y preocupación
que ha existido y existirá por siempre.*

*A la familia Suárez Guerra por todo el apoyo
y el afecto, siempre se los agradeceré.*

*A todos mis amigos por estar siempre presentes
y demostrarme el verdadero significado de esa palabra.*

Aldo Andrade.

*A Dios,
por darme una nueva oportunidad
y por brindarme su fuerza
cuando más lo necesito.*

*A mi Mamá, Hermana y Abuela,
que son los tesoros más preciados que tengo
y una de las razones por la cual tendré
siempre una razón por la cual luchar.*

*A mi Familia,
por demostrar que las distancias son nulas
si el cariño es verdadero.*

*A la Universidad Central De Venezuela,
por darme la oportunidad más importante
de mi vida.*

*A todos mis Amigos y sus Padres,
que de una u otra manera me ayudaron
y apoyaron para lograr esta meta,
parte de este título es de ustedes.*

A Todos Gracias.

Christian.

AGRADECIMIENTOS.

A la tutora Prof. María Rodríguez, por su invaluable ayuda, impartiéndonos sus conocimientos y orientación en la realización de este trabajo.

Al Ing. Andrea Scagni conjuntamente con la Empresa Plasmatec Ingenieros S.A. por todo su apoyo, orientación y colaboración.

Al personal y a los equipos con los cuales cuenta. la Escuela de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería, en especial al profesor Crisantos Villalobos por su valiosa y desinteresada ayuda.

Al Laboratorio de Microscopia Electrónica del Instituto Universitario de Tecnología (I.U.T) por prestar sus servicios.

A la constructora 1121 por su colaboración.

A todas aquellas personas que de una u otra forma ayudaron a la realización del presente trabajo.

Gracias.

ÍNDICE

PÁGINA

DEDICATORIA.

AGRADECIMIENTOS.

RESUMEN.

INTRODUCCIÓN.

CAPÍTULO 1.

1. ANTECEDENTES. 1

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

2.1 MOTORES DIESEL. 3

2.2 CAUSA DE DESGASTE EN COJINETES LISOS. 7

2.3 LA LUBRICACIÓN. 8

2.4 ROCIADO TÉRMICO. 10

2.5 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE. 16

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.1 MATERIALES. 17

3.2 PREPARACIÓN SUPERFICIAL. 19

3.3 PROCESOS 19

3.4 ENSAYOS REALIZADOS. 22

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

4.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO. 25

4.2 ANÁLISIS DE RUGOSIDAD. 32

4.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE PESO DE LOS COJINETES. 34

4.4 ANÁLISIS DE DUREZA. 35

4.5 ANÁLISIS DE TEMPERATURA. 37

5. CONCLUSIONES. 39

6. RECOMENDACIONES. 40

BIBLIOGRAFÍA. 41

ANEXOS. 43

ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>PÁGINA</u>
FIGURA 1. CICLO DE CUATRO TIEMPOS	4
FIGURA 2. SISTEMA BIELA-PISTÓN.	5
FIGURA 3. GRÁFICA DE LOS HERMANOS MCKEE	10
FIGURA 4. MORFOLOGÍA DE UN RECUBRIMIENTO ROCIADO TERMICAMENTE.	11
FIGURA 5. MUÑONES, PASADORES Y EJE.	17
FIGURA 6. COJINETES DE DESLIZAMIENTO	17
FIGURA 7. EDS DEL RECUBRIMIENTO METCO 1	18
FIGURA 8. PROCESO ARCO ELÉCTRICO .	20
FIGURA 9. PROCESO HVOF.	20
FIGURA 10. PROCESO LLAMA SUSÓNICA	20
FIGURA 11. BANCO DE ENSAYOS.	23
FIGURA 12. SISTEMA DE POTENCIA.	23
FIGURA 13. MICROGRAFÍA ACERO INOXIDABLE AISI 420 DEPOSITADO MEDIANTE ARCO ELECTRICO.	25
FIGURA 14. MICROGRAFÍA METCO-1 DEPOSITADO MEDIANTE ARCO ELECTRICO.	26
FIGURA 15. MICROGRAFÍA ACERO INOXIDABLE AISI 420 DEPOSITADO MEDIANTE HVOF.	26
FIGURA 16. MICROGRAFÍA METCO 449P DEPOSITADO MEDIANTE LLAMA SUBSÓNICA.	27
FIGURA 17. MICROGRAFÍA DE UN ACERO TEMPLADO.	28
FIGURA 18. SUPERFICIE DE DESGASTE ACERO INOXIDABLE AISI 420 DEPOSITADO MEDIANTE ARCO-ELÉCTRICO.	29
FIGURA 19. SUPERFICIE DE DESGASTE METCO 1 DEPOSITADO MEDIANTE ARCO-ELÉCTRICO.	30
FIGURA 20. DESGASTE SUPERFICIAL ACERO INOXIDABLE AISI 420 DEPOSITADO MEDIANTE HVOF.	30

FIGURA 21	DESGASTE SUPERFICIAL METCO 449P DEPOSITADO MEDIANTE LLAMA SUBSÓNICA.	31
FIGURA 22	DESGASTE SUPERFICIAL DE UN ACERO TEMPLADO.	32
FIGURA 23	RUGOSIDAD PROMEDIO RA POR MUÑÓN (ANTES-DESPUÉS).	32
FIGURA 24	RUGOSIDAD PROMEDIO RA POR ENSAYO (ANTES-DESPUÉS).	33
FIGURA 25	PORCENTAJE DE DESGASTE DE RUGOSIDAD PROMEDIO RA POR ENSAYO.	34
FIGURA 26	PÉRDIDA DE PESO EN LOS COJINETES DESPUÉS DE ENSAYADOS.	35
FIGURA 27	MACRODUREZA [HRC]	50
FIGURA 28	MICRODUREZA [HV]	51
FIGURA 29	TEMPERATURAS PROMEDIO DE TRABAJO DE LOS ENSAYOS.	52
FIGURA 30	TEMPERATURA DE TRABAJO ARCO ELECTRICO METCO 1.	76
FIGURA 31.	TEMPERATURA DE TRABAJO LLAMA SUBSÓNICA 449P.	76
FIGURA 32	TEMPERATURA DE TRABAJO ARCO ELECTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.	77
FIGURA 33	TEMPERATURA DE TRABAJO HVOF ACERO INOXIDABLE AISI 420.	77
FIGURA 34	TEMPERATURA DE TRABAJO TEMPLE.	78

INDICE DE TABLAS

	<u>PÁGINA</u>
TABLA 1. COMPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS.	18
TABLA 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ROCIADO TÉRMICO.	21
TABLA 3. RUGOSIDAD PROMEDIO RA EN LOS MUÑONES ANTES DE SER ENSAYADOS.	50
TABLA 4. RUGOSIDAD PROMEDIO RA DEPURADA EN LOS MUÑONES ANTES DE SER ENSAYADOS.	51
TABLA 5. RUGOSIDAD PROMEDIO RA EN LOS MUÑONES DESPUÉS DE SER ENSAYADOS	52
TABLA 6. RUGOSIDAD PROMEDIO RA DEPURADA EN LOS MUÑONES DESPUÉS DE SER ENSAYADOS.	53
TABLA 7. RUGOSIDAD PROMEDIO RY EN LOS MUÑONES ANTES DE SER ENSAYADOS.	54
TABLA 8. RUGOSIDAD PROMEDIO RY DEPURADA EN LOS MUÑONES ANTES DE SER ENSAYADOS.	55
TABLA 9. RUGOSIDAD PROMEDIO RY EN LOS MUÑONES DESPUÉS DE SER ENSAYADOS.	56
TABLA 10. RUGOSIDAD PROMEDIO RY DEPURADA EN LOS MUÑONES DESPUÉS DE SER ENSAYADOS.	57
TABLA 11. DUREZA VICKERS LLAMA SUBSÓNICA 449P.	58
TABLA 12. DUREZA VICKERS ARCO METCO 1.	59
TABLA 13. DUREZA VICKERS ARCO ELÉCTRICO ACERO AISI 420.	60
TABLA 14. DUREZA VICKERS HVOF ACERO AISI 420.	61
TABLA 15. DUREZA VICKERS TEMPLE.	62
TABLA 16. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO LLAMA SUBSÓNICA 449P MUÑON 1.	63

TABLA 17. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO LLAMA SUBSÓNICA 449P MUÑON 2.	64
TABLA 18. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO LLAMA SUBSÓNICA 449P MUÑON 3.	65
TABLA 19. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO ARCO ELÉCTRICO METCO 1 MUÑON 1.	66
TABLA 20. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO ARCO ELÉCTRICO METCO 1 MUÑON 2.	67
TABLA 21. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO ARCO ELÉCTRICO METCO 1 MUÑON 3.	68
TABLA 22. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO ARCO ELÉCTRICO ACERO AISI 420 MUÑON 1.	69
TABLA 23. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO ARCO ELÉCTRICO ACERO AISI 420 MUÑON 2.	70
TABLA 24. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO ARCO ELÉCTRICO ACERO AISI 420 MUÑON 3.	71
TABLA 25. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO HVOF ACERO AISI 420 MUÑON 1.	72
TABLA 26. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO HVOF ACERO AISI 420 MUÑON 2.	73
TABLA 27. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO HVOF ACERO AISI 420 MUÑON 3.	74
TABLA 28. REPORTE DE PARÁMETROS DEL ENSAYO TEMPLE.	75

Andrade D., Aldo J., Pule V., Christian D.

EVALUACIÓN DE MUÑONES DE MOTORES DIESEL ROCIADOS TÉRMICAMENTE BAJO RÉGIMEN DE LUBRICACIÓN LÍMITE.

**Tutor Académico: Prof. Ing. María A. Rodríguez. Tutor Industrial:
Ing. Andrea Scagni. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de
Ingeniería Mecánica. 2001, 84 p.**

Palabras Claves: Rociado Térmico, Proyección Térmica de Alta Velocidad, Arco-Eléctrico, Llama Subsónica, Desgaste Superficial, Lubricación límite, Motores Diesel, Cigüeñales.

El presente trabajo tiene por objeto el estudio del comportamiento de cigüeñales de motores Diesel que han sido rociados térmicamente mediante tres técnicas de deposición. Para la deposición con el proceso de Arco Eléctrico se utilizó alambre acero Inoxidable AISI 420 y una aleación de NiSiMoCrFeMn conocida comercialmente como Metco 1, como materiales de alimentación. Para el proceso alta velocidad oxígeno combustible conocido por sus siglas HVOF se utilizó el alambre acero Inoxidable AISI 420 y finalmente para la técnica de Llama Subsónica se utilizó una aleación FeMoAlBoC conocida comercialmente como Metco 449P. Para el presente estudio se simuló las cargas soportadas por los ejes en régimen de lubricación límite con el fin de aplicar a nivel comercial éstas técnicas para la recuperación de dichos elementos de máquinas.

Se fabricaron 13 muñones divididos en cuatro grupos de tres y uno adicional como parámetro de comparación para los ensayos de desgaste y temperatura. El primer grupo de muñones se recubrió mediante la técnica HVOF, el segundo y tercer grupo con la técnica Arco Eléctrico, el último con Llama Subsónica y el muñón restante (sin recubrimiento) se le realizó un tratamiento térmico (temple). Después de estos ensayos se practicaron además pruebas de rugosidad, dureza, microdureza, microscopía óptica y electrónica.

A partir de los resultados obtenidos se pudo determinar que el recubrimiento Metco 449P depositado mediante Llama Subsónica presentó la menor tasa de desgaste en régimen de lubricación límite.

INTRODUCCIÓN.

Uno de los problemas que se presenta en los motores es el desgaste de los cigüeñales debido a los esfuerzos de compresión y tracción que producen deformación en el alojamiento de la biela. Si a ello se le añade que los motores han incrementado su potencia en número de revoluciones por minuto, pero no así su tamaño, no resulta irracional pensar que solicitaciones con valores cercanos a los 7000 Kg, durante cuatro a cinco años de funcionamiento, casi con seguridad, generarán deformaciones permanentes que deben ser corregidas al reacondicionar el motor.

Este problema que afecta el comportamiento del cigüeñal, tiene su origen en su fase más exigente o etapa de combustión, siendo las muñequillas del cigüeñal el lugar donde se aplica la carga máxima. Estas solicitaciones se minimizan por medio de una película de aceite, siendo ésta como una cinta delgada formada por millones de bolitas que ruedan entre el espacio del muñón y el cojinete. Cuando esta película de aceite se encuentra en condiciones extremas (lubricación límite), se produce el contacto metal con metal que trae como consecuencia el desgaste del conjunto.

El rociado térmico es un proceso que se ha venido convirtiendo en una técnica muy importante de deposición de material a nivel industrial, tanto para la fabricación de piezas como para la recuperación de otras. Esta técnica involucra tantos componentes y variables, que cuando se combinan y se aplican correctamente, producen mejores resultados a los obtenidos cuando estos son aplicados individualmente. En el campo automotriz se ha estado desarrollando para la reconstrucción y mejoramiento de elementos del motor, que se encuentran sometidos a las solicitaciones más fuertes, evitando el reemplazo total de la pieza y otorgándole propiedades mas favorables a la resistencia al desgaste.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento experimentado por muñones con rociado térmico, bajo la condición de lubricación límite, evaluando la resistencia al desgaste entre el cojinete y el cigüeñal debido al contacto directo entre ambos.

1. ANTECEDENTES

A fin de buscar una solución al problema de desgaste de los cigüeñales se han realizado algunos trabajos, que han puesto en marcha el estudio del comportamiento de materiales que han sido recubiertos utilizando la técnica de rociado térmico. Andara y García (1991) realizaron un trabajo en el cual se diseñó y construyó un banco de ensayos para evaluar la interacción entre cojinetes y cigüeñales de motores Diesel que habían sido recubiertos térmicamente mediante la técnica de llama subsónica. Los cojinetes fueron recubiertos con una aleación de babbitt mediante la técnica llama subsónica y evaluados mediante microscopía electrónica de barrido permitió observar los cambios que sufrieron las superficies al ser sometidas a altas cargas, también se estudió la distribución del lubricante en el cojinete y la fragilidad del material. El funcionamiento del banco de ensayos fue satisfactorio, ya que en el mismo se pudo evaluar parámetros de desgaste similares a los de un motor Diesel con la recomendación de realizar en futuros estudios un análisis de Espectrometría de Energía de Dispersión de Rayos X (EDX), para determinar la procedencia de las partículas depositadas en ambas superficies.

En el año 1998 Arthur y Martínez realizaron un trabajo que sirvió de soporte para futuras investigaciones ya que se diseñó y construyó un banco de ensayos el cual simula los parámetros de operación de una máquina rotativa, tales como la carga aplicada, la velocidad de rotación, el registro de temperatura, el control de flujo y presión de lubricante. En este trabajo se evaluaron cojinetes sometidos a ensayos de desgaste en condiciones de lubricación límite y se hicieron pruebas de capacidad de carga en régimen hidrodinámico. Estos investigadores encontraron que los cojinetes de deslizamiento recubiertos con babbitt mediante rociado térmico de alta velocidad (conocido por sus siglas en inglés HVOF), presentan características de desempeño muy satisfactorias en cuanto a propiedades de resistencia y servicio, por el contrario los cojinetes fabricados por el método de soldadura T.I.G. con metal babbitt base estaño, no fueron muy confiables para aplicaciones a altos niveles de cargas.

En ese mismo año Lozada y Paolillo (1998) realizaron un trabajo utilizando para ello el banco de ensayos construido por Arthur y Martínez, simulando las sollicitaciones encontradas en las muñequillas de cigüeñales de motores Diesel, con el fin de determinar el

mejor comportamiento entre recubrimientos depositados mediante HVOF y Arco Eléctrico. En ese trabajo se realizó una base de datos de los motores de camiones Diesel mas difundidos en el mercado venezolano, con dichos valores y a través de un programa de computación, se calculó la carga máxima permitida en la muñequilla del cigüeñal, la cual representaría la condición de trabajo menos favorable para ser aplicada en las pruebas experimentales.

Estos investigadores encontraron que los valores obtenidos de porosidad permiten señalar que gracias a las altas velocidades alcanzadas por las partículas rociadas por medio de la técnica HVOF alambre se hace posible que el aplastamiento y la compactación entre capas sea mucho mayor a la encontrada en aquellos recubrimientos hechos por Arco Eléctrico. Los recubrimientos depositados por la técnica HVOF recubiertas con Acero de alto carbono y sometidas a lubricación límite sufrieron menos desgaste.

2.1 MOTORES DIESEL.

Un motor Diesel es un motor de ignición por compresión, de combustión interna. El combustible se inyecta en el cilindro en forma de chorro de rocío atomizado y la ignición ocurre debido a la elevada temperatura del aire que hay dentro del cilindro en el cual se inyecta el combustible. Los motores Diesel se diseñan con relaciones de compresión muy altas, que producen presiones elevadas y generan altas temperaturas en las cámaras de combustión del motor. Estas temperaturas son lo bastante altas para hacer que se inflame el combustible que en forma de chorro de rocío es atomizado en la cámara de combustión.

Los pistones se mueven en los cilindros y se conectan con el cigüeñal por medio de las bielas. La fuerza de los gases de la combustión que actúa sobre la parte superior del pistón, lo obliga a bajar dentro del cilindro. Este movimiento se transmite, mediante la biela, al cigüeñal para hacerlo girar.

El movimiento recíproco se debe a que el pistón se desplaza hacia arriba y hacia abajo dentro del cilindro. El movimiento del pistón es una línea recta y se debe convertir en movimiento rotatorio. Para ello se utiliza el cigüeñal y la biela. El muñón o codo del cigüeñal es la parte descentrada del mismo que gira en círculo cuando gira el cigüeñal. La biela sirve para conectar el pistón con el muñón del cigüeñal y la misma se sujeta en el pistón con el perno de pistón y en el muñón del cigüeñal por medio de la tapa del cojinete y tornillos.

Ciclo del funcionamiento del motor.

Dentro del motor ocurren ciertos eventos que lo hacen funcionar. Estos se repiten para formar un ciclo. La mayor parte de los motores Diesel funcionan con el ciclo de cuatro tiempos. El ciclo completo del motor Diesel requiere comprimir el aire en el cilindro, inyectar el combustible para que ocurra la combustión, luego se produce la expansión de los gases que produce presión sobre el pistón y finalmente la expulsión de los gases quemados del cilindro.

El motor Diesel de cuatro tiempos cuyo esquema puede observarse en la Figura.1 funciona con cuatro carreras de los pistones: admisión de aire, compresión, potencia y escape. Las válvulas de admisión y de escape abren y cierran en el momento exacto en

relación con el pistón. El árbol de levas, impulsado desde el cigüeñal abre y cierra las válvulas.

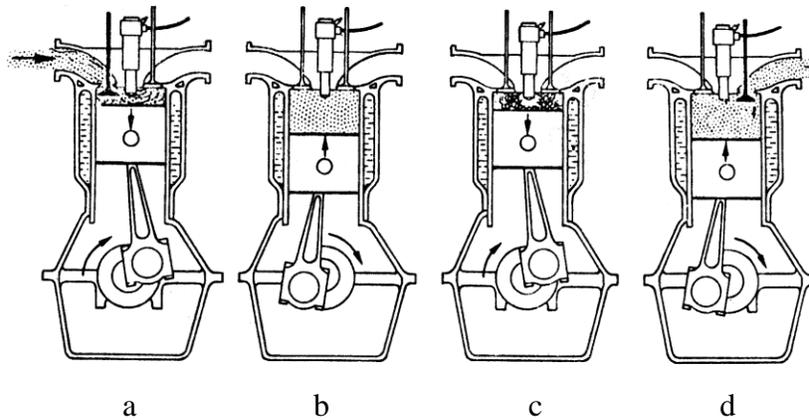


Fig.1. Ciclo Cuatro Tiempos.

En la carrera de admisión de aire, la válvula de admisión está abierta y el pistón se mueve hacia abajo, como se observa en la figura 1.a. El aire entra al cilindro por el orificio de la válvula de admisión. En el punto muerto inferior, el cilindro está lleno de aire. Después que el pistón llega al punto muerto inferior empieza a moverse hacia arriba (ver figura 1.b), luego se cierra la válvula de admisión. La válvula de escape también está cerrada con lo cual el cilindro está hermético.

Cuando el cigüeñal en rotación y la biela empujan el pistón hacia arriba, se comprime el aire. Para el momento en que el pistón llega al punto muerto superior, el aire ha sido comprimido alrededor de 1/16 de su volumen original o quizás más todavía. La compresión del aire en el cilindro no sólo la aumenta su presión sino también su temperatura. El aire que hay en la cámara de combustión está lo bastante caliente para inflamar el combustible Diesel que se inyectará en él.

En la figura 1.c. se observa que justo antes del punto muerto superior se atomiza una pequeña cantidad de combustible desde el inyector hacia la cámara de combustión en el cilindro. El aire caliente en la cámara no sólo forma una mezcla combustible con la atomización, sino que además la inflama. La combustión o el quemado ocurre con rapidez y aumenta la presión dentro del cilindro. Los gases calientes hacen presión contra el cilindro y el pistón y proporcionan la fuerza que obliga al pistón a bajar en el cilindro. Este

movimiento se transfiere por medio de la biela al cigüeñal para hacerlo girar y que funcione el motor. Las dos válvulas permanecen cerradas durante la carrera de potencia, pero casi al final de ella se abre la válvula de escape.

Con la válvula de escape abierta y la válvula de admisión cerrada, el pistón se mueve hacia arriba en la carrera de escape para expulsar los gases quemados del cilindro por el orificio de la válvula de escape, como puede observarse en la Fig.1.d, cuando el motor llega al punto muerto superior, se cierra la válvula de escape.

Bielas.

Las bielas (ver figura 2), son las encargadas de transformar el movimiento alternativo del pistón en movimiento rotativo del cigüeñal. Para ello las bielas tienen que ser lo suficientemente resistentes para transmitir dicho empuje sin deformarse por flexión, constituidas con partes móviles permitiendo la intercambiabilidad y el equilibrio del sistema.

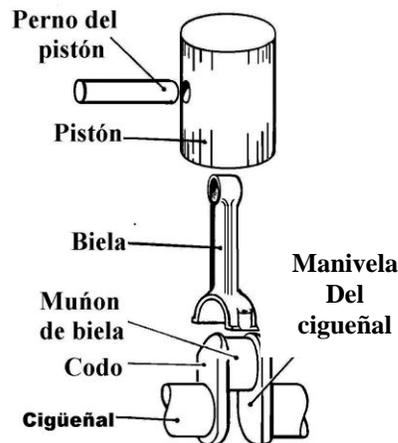


Fig.2. Sistema Biela-Pistón

Cojinetes.

El extremo inferior o cabeza de la biela está partido con el fin de permitir el montaje y contiene un cojinete que se apoya en la muñequilla. La tapa del cojinete se sujeta a la biela mediante tuercas y espárragos. El cojinete está revestido por un metal antifricción.

Los cojinetes de biela son del tipo de sustitución y se componen de dos piezas postizas de acero o de bronce recubiertas de una capa delgada de material para cojinetes. Los cojinetes se componen de dos mitades; la mitad superior se monta en la biela y la inferior en el sombrerete. Un labio o resalte existente en cada una de las dos mitades impide el desplazamiento longitudinal o el giro del cojinete dentro de la biela.

Materiales para los cojinetes.

Los materiales a ser utilizados para la fabricación de cojinetes deben exhibir ciertas propiedades tales como:

- Deberán tener bajo coeficiente de fricción con relación al material usado comúnmente para las flechas.
- No deberá tener acción abrasiva o de desgaste del material de la flecha.
- Deberá conservar sus propiedades en todo el rango de temperaturas de trabajo sin fluir, sin roturas o fatiga y deberá tener resistencia al impacto.
- Deberá ser capaz de absorber las partículas abrasivas dentro del mismo cojinete, que de no ser así rayarían la flecha.
- No será susceptible de ser atacado ni por aceite, ni por las contaminaciones de éste.
- Deberá adherirse o ligarse al material que le sirve de apoyo.
- Deberá ser un buen conductor del calor generado en el aceite del cojinete.
- Deberá ser maquinable con rapidez, o bien, fácil de fundir, siendo barato para producirlo.

Uno de los materiales más utilizados como materiales para cojinetes es el babbit, este es un término general que se refiere a una aleación ya sea de estaño o de plomo como el elemento principal y con diferentes metales como soluto. El de base de estaño, es generalmente preferible para trabajos pesados. El estaño y el plomo son blandos, con un bajo punto de fusión que le permite a la aleación fluir y contrarrestar la falta de alineamiento, mientras que las adiciones de cobre y antimonio para formar la aleación, suministran la resistencia necesaria. Sin embargo, debido al bajo punto de fusión del metal base, falla la resistencia de la aleación. El babbit es popular, porque las fallas parciales

permiten el flujo plástico y el cojinete puede seguir funcionando; además si la falla es completa, no aparecen daños en la flecha.

Los cojinetes pueden funcionar rápidamente y presentar superficies muy lisas. La aplicación es usualmente hecha en un sustrato de acero. El espesor del revestimiento es por lo común de 0.015". Se usa también cojinetes de babbitt delgado con recubrimientos de 0.002 a 0.005" de espesor que pueden soportar cargas mas pesadas. Los cojinetes de Babbitt tienen buena conformabilidad, es decir, la propiedad de ajustarse a sí mismo a pequeños deslizamientos o deflexiones del eje. También constituyen excelentes cojinetes desde el punto de vista de la incrustabilidad, porque una cantidad razonable de basura o materia extraña en el lubricante puede ser absorbida por el material blando del cojinete quedando así el eje protegido.

2.2 CAUSA DE DESGASTE EN COJINETES LISOS.

a) Desgaste abrasivo: es un desgaste causado cuando numerosas partículas duras de una superficie o partículas externas tales como escombros de metal, óxidos metálicos y polvo proveniente del ambiente, se encuentran presentes entre las superficies en contacto, estas partículas desgastan ambas superficies. La selección del material de revestimiento para estas aplicaciones debe realizarse generalmente basadas en la temperatura de operación y el acabado de la superficie que se desee. En cualquier caso la acción abrasiva implica el rayado y desgaste de la segunda superficie para formar y remover partículas de desgaste, resultando una progresiva pérdida del material. Este tipo de desgaste produce marcas de rayado longitudinal en dirección del movimiento relativo.

b) Desgaste Adhesivo: es el desgaste causado cuando dos superficies deslizan una contra otra a través de un movimiento intenso, produciendo fragmentación de una superficie que se encuentra adherida a la otra, posteriormente esta partícula puede nuevamente retornar a la superficie de origen. Generalmente esta situación ocurre cuando la lubricación es inadecuada resultando así una transferencia de material.

c) Desgaste Oxidante: en este mecanismo de desgaste, una delgada película superficial se forma por oxidación u otras reacciones químicas. Dado que la película es mas débil que el material base, se facilita la remoción de las capas superficiales por abrasión y

otras acciones de desgaste. La remoción de la película superficial expone una nueva superficie al ataque químico, que es removida constantemente.

Para evitar el desgaste en los cojinetes se debe, en primer lugar, controlar y detectar a tiempo la concentración de partículas abrasivas contenidas en el lubricante, con el fin de conocer con antelación sus valores admisibles para que éstos no provoquen averías y desgastes prematuros en el motor. En segundo lugar se deben conocer las principales características físico-químicas del lubricante en servicio, con el fin de aconsejar al usuario los períodos de cambio más idóneos en función de su estado y condiciones de servicio para lograr una mayor vida útil del motor.

2.3 LA LUBRICACIÓN.

Todo desplazamiento relativo entre dos superficies con tendencia a contacto, se efectúa con frotamiento. Este frotamiento constituiría, si la concepción de la máquina fuera teóricamente perfecta, la totalidad de las resistencias pasivas de la misma.

La pérdida de energía que se produce por frotamiento, puede estimarse en un 5 % del total de energía suministrada, porcentaje que asciende a valores de un 12 % en el caso de los motores de combustión interna.

Un lubricante es una sustancia que cuando se introduce entre superficies móviles logra reducir la fricción, el desgaste y el calentamiento de partes de máquina en contacto que tengan movimiento relativo entre sí. La lubricación busca reducir esta enorme pérdida de energía. Ésta no sólo combate las resistencias pasivas de la fricción y sus problemas de desgaste, si no que disminuye la energía motriz empleada, aumenta la vida útil de máquinas y motores y, también, la perfección de su servicio.

La viscosidad es la característica más importante de un fluido, porque es la que determina su capacidad física para mantener la lubricación, es decir, es la que fija las pérdidas por fricción, el rendimiento mecánico, la capacidad de carga y el gasto de fluido para unas condiciones fijas de velocidad, temperatura, carga y dimensiones del elemento que se calcula. En términos sencillos, la viscosidad de un líquido puede definirse como su resistencia a fluir y como una medida al rozamiento entre sus moléculas.

Lubricación de Cojinetes.

La lubricación de cojinetes se suele efectuar bajo dos sistemas distintos:

- a) Sistema de inmersión o salpicado.
- b) Circulación a presión.

Para el primero existe una gran variedad de métodos, uno es el salpicado o rociado, en el que se introducen las bielas en el interior del aceite contenido en el cárter o depósito, otro es el de inmersión donde el aceite es elevado por medio de unos discos existentes en el cigüeñal o anillos de engrane.

Lo más frecuente es el sistema de circulación a presión, en el cual una bomba de aceite aspira del cárter del compresor y lo distribuye a los distintos cojinetes, o sea, a los principales, a los de las muñequillas y a las crucetas si las hubiese. Los sistemas de lubricación por presión llevan incorporados unos filtros y válvulas reguladoras de presión y de control, también suelen incorporarles enfriadores de aceite y dispositivos de seguridad por presión, con el fin de detener el compresor en el caso de un fallo en la presión del aceite.

Lubricación límite.

Una insuficiente área de contacto, una disminución en la velocidad de la superficie móvil, una reducción en la cantidad de lubricante suministrada a una chumacera, una intensificación en la carga del cojinete, o bien una elevación en la temperatura del lubricante, cualquiera de estas condiciones que resulte en una disminución en la viscosidad, puede impedir la formación de la película de lubricante suficientemente gruesa que permita tener la lubricación hidrodinámica, lo que origina que las asperezas superficiales de mayor tamaño queden separados por una delgada capa de lubricante llamada lubricación límite. El cambio de lubricación hidrodinámica a lubricación límite nunca es brusca o repentina, primero ocurre una lubricación combinada entre ambas, luego cuando las superficies en contacto se acercan se vuelve predominante la lubricación límite.

Un lubricante límite queda definido habitualmente por su posibilidad de formación de una película fijada sobre superficie metálica y además porque posee otras cualidades, como son una gran fuerza de adherencia así como una débil resistencia al cizallamiento. En el régimen de lubricación límite, los coeficientes de frotamiento se sitúan entre 0.01 y 0.1 y

son independientes de la velocidad del lubricante y de la velocidad de desplazamiento relativo de las superficies.

La diferencia entre lubricación límite e hidrodinámica puede explicarse mediante la figura 3 la cual fue obtenida por los hermanos McKee en un ensayo real de fricción, la figura es importante porque define la estabilidad de un lubricante y ayuda a establecer los parámetros de trabajo de aceites de los cigüeñales.

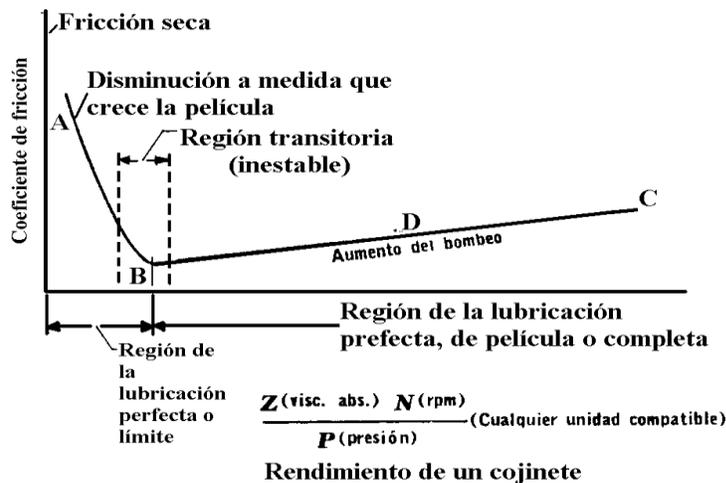


Fig.3. Gráfica de los hermanos McKee.

2.4 ROCIADO TÉRMICO.

El rociado térmico es un proceso que se ha venido convirtiendo en una técnica muy importante de deposición de material a nivel industrial, tanto para la fabricación de piezas como para la recuperación de otras. Esta técnica involucra tantos componentes y variables, que cuando se combinan y se aplican correctamente, producen mejores resultados a los obtenidos cuando éstos son aplicados individualmente. El rociado térmico es un término genérico que involucra un grupo de procesos que emplean energía química o eléctrica para calentar, acelerar y depositar materiales metálicos, intermetálicos, cerámicos, polímeros y compuestos sobre sustratos preparados previamente.

En estos procesos el material a rociar es alimentado en forma de polvo, alambre o varilla, en pistolas o antorchas en donde el material es calentado hasta temperaturas cercanas o relativamente superior a las de su punto de fusión. Posteriormente a través de una corriente de aire o gases comprimidos, son rociadas en estado plástico o en estado de fusión, a velocidades que excedan los 600 m/s para sistemas de hiper velocidad. Esto permite que sobre el substrato las partículas impacten fuertemente haciendo posible que se vayan formando capas delgadas relativamente homogéneas con una microestructura refinada. Estas capas se van refinando y solidificando progresivamente, adhiriéndose en forma continua sobre la superficie rugosa y del substrato (ver figura.4). El espesor total del revestimiento es conseguido normalmente a través de múltiples pasadas.

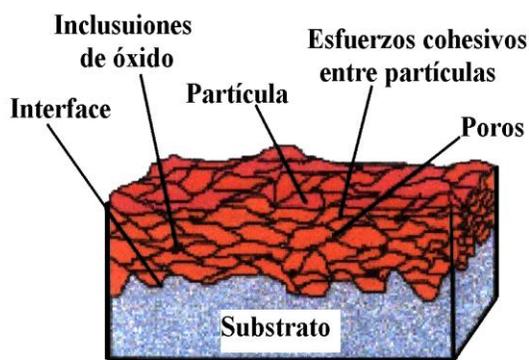


Fig.4 Morfología de un recubrimiento rociado térmicamente.

En general una de las mayores ventajas del rociado térmico es su amplia variedad de materiales que pueden llegar a ser usados como revestimiento (de hecho cualquier material que pueda fundirse sin descomponerse, puede llegar a ser rociado térmico). Por otra parte esta técnica permite aplicar los revestimientos sin llegar a calentar significativamente la superficie; por lo general esta temperatura se encuentra por debajo de los 200C°, eliminándose así los posibles cambios metalográficos y las posibles distorsiones en el material del substrato. Las variaciones básicas de los procesos de rociado térmico se presentan en el material a depositar, en el método de calentamiento y el medio en el que se aplica.

Uno de los aspectos más resaltantes de los revestimientos hechos por medio de las técnicas de rociado térmico es probablemente su diversidad de aplicaciones; en parte a dos razones principales. La primera se refiere a la casi ilimitada selección de materiales (más de 200 materiales de revestimiento con diferentes características de dureza, coeficiente de fricción y resistencia), pudiéndose agrupar estos en: metales puros, aleaciones metálicas, cermetes, cerámicos, polímeros, materiales compuestos tales como polvos de Al-Ni y Ni-grafito. La segunda, referidas hacia las distintas propiedades que pueden ser controladas, a la vez de la baja temperatura que se logra alcanzar en el sustrato (100 a 260°C); lo cual hace posible que cambios metalúrgicos, distorsión y oxidación sean evitados.

Todo esto permite que los revestimientos hechos por medio de las técnicas de rociado térmico sean aplicados prácticamente a cualquier sustrato (metálicos, plásticos, compuestos, etc.). A su vez, estos revestimientos pueden en cierta forma, ser aplicados a partes o elementos con: maquinado final, tratamiento térmico, en donde se ha practicado soldadura y otros procesos de altas temperaturas.

Los revestimientos del rociado térmico ofrecen propiedades en los materiales que no pueden ser encontradas en las piezas metálicas forjadas. Estos revestimientos pueden ser aplicados en áreas selectas en vez de aplicarse a la pieza entera, lo cual permite que los costos disminuyan en vista de la eliminación de procesos innecesarios.

Restauración de dimensiones en piezas desgastadas.

La técnica del rociado térmico en este ámbito es empleada para reparar o dimensionar partes corroídas o desgastadas, reparar elementos con errores dimensionales, reparar picaduras, imperfecciones o para renovar superficies semi-desgastadas durante su operación. En ocasiones revestimientos con pocos esfuerzos residuales y/o pocos costos, son empleados para reconstruir áreas críticamente desgastadas, que luego son maquinadas.

Dentro del gran número de piezas que pueden recuperarse a través de las técnicas del rociado térmico, las más comunes son los asientos de algunos cojinetes y engranajes, áreas donde se ubican los sellos de aceite, carcasas de turbomáquinas (turbinas, bombas, compresores, etc.), elementos de turbomáquinas (álabes, tuberías, ejes, etc.).

Una gran variedad de aplicaciones del rociado térmico se ha desarrollado con el transcurrir de los años. Estas incluyen las de control de fricción en algunos elementos, cubriendo un amplio espectro desde baja fricción hasta una alta fricción.

Otra protección incluye la de protección a la oxidación, la cual es muy empleada a nivel industrial para proteger componentes y grandes estructuras del calor y la oxidación a temperaturas en la superficie que pueden sobrepasar los 1000°C. Algunas aleaciones utilizadas son el Aluminio, Hierro-Aluminio, Níquel-Cromo. En los últimos años se han desarrollado revestimientos que incluyen moderadores nucleares, partes de filamentos para retener el calor isostático y finalmente para revestir componentes tales como las toberas de propulsores de cohetes, crucetas y moldes.

Técnicas del Rociado Térmico.

Arco Eléctrico

Es un proceso de rociado térmico en el cual el material de alimentación se encuentra en forma de alambre. Este proceso difiere de otros procesos de rociado térmico ya que no necesita de una fuente de calentamiento externa tal como una llama de gas o como el de plasma eléctrico inducido. La elevada eficiencia del proceso hace que ésta sea la más rápida, menos complicada y menos costosa manera de producir revestimientos metálicos.

Este proceso opera mediante el calentamiento y la fundición de dos alambres consumibles cargados con cargas eléctricas opuestas, un alimentador empuja los dos alambres a través de la pistola por medio de un motor, el cual controla que estos dos alambres se intercepten en la punta de la pistola para que produzcan un arco eléctrico que hace que ambos alambres se fundan a temperaturas por encima de 5500 °C. En la pistola se encuentra incorporada una tobera que dirige un chorro de aire a elevada velocidad (o en casos especiales, gas inerte) hacia la punta de los alambres de manera tal que proyecta y atomiza las partículas de metal derretidas formadas por el arco eléctrico acelerándolas hacia la superficie del sustrato formando un recubrimiento.

Los revestimientos realizados por Arco Eléctrico son caracterizados por presentar una adhesión fuerte en vista de la alta velocidad con la que las partículas impactan en el sustrato, al igual de la alta temperatura que logran alcanzar. Los equipos de arco eléctrico aplican dos tipos básicos de revestimientos: los resistentes al desgaste que proporcionan

barreras resistentes a la abrasión, corrosión, erosión, fricción o raspadura y revestimientos reaфинados, usados para reconstruir áreas desgastadas, restaurar áreas mecanizadas inadecuadamente o para mejorar las características de partes acabadas.

Alta Velocidad Oxígeno-Combustible (HVOF).

La técnica del rociado térmico a través de HVOF emplea una mezcla de combustible (normalmente Propano, Propileno, Metil-Acetileno-Propadeno (MAPP), o Hidrógeno) junto con Oxígeno para generar la energía requerida en una cámara de combustión: en ciertos casos se emplea Kerosén líquido más aire que funciona como el oxidante. Los productos de la combustión son expandidos por medio de una tobera, en la cual se llegan a alcanzar velocidades supersónicas. El material a rociar es introducido normalmente de forma axial en la tobera en donde es calentado (llevándolo hasta un estado de fusión o de plasticidad) y acelerado a velocidades comprendidas entre 610-1060 m/s. Hoy en día la técnica del HVOF se subdivide en dos grupos:

Combustión pulsante: El grupo de "Combustión Pulsante" lo comprende la Pistola de Detonación, el cual fue el primer método introducido en el rociado térmico por HVOF y el cual ha sido desarrollado para la deposición de revestimientos duros y resistentes al desgaste tales como carburos y óxidos. La D-Gun emplea una serie de explosiones controladas productos de una mezcla normalmente de oxígeno y acetileno, estas detonaciones originan altas presiones (aproximadamente 10 atmósferas) altas temperaturas (por encima de los 3900 °C o 7.000 °F) dentro de la pistola, las cuales llegan a niveles cercanos o en ocasiones por encima del punto de fusión de los materiales rociados, además de producir altas aceleraciones que permiten que las partículas del material lleguen a alcanzar velocidades cercanas a los 760 m/s (2.500 pies/s). Cambiando el combustible y algunos parámetros se pueden llegar a alcanzar velocidades cercanas a los 1.000 m/s. Este proceso que emplea la D-Gun es cíclico y luego de cada detonación la cámara es purgada mediante nitrógeno y el proceso se repite de cuatro a diez veces por segundo.

Combustión continua: comprende los otros tres (3) métodos del HVOF. Estos operan con una mezcla de combustible que consiste en Oxígeno más Propileno, Propano, Hidrógeno y en determinadas aplicaciones emplea combustible líquido como el Kerosene. Las pistolas de este grupo tienen ductos de refrigeración (por aire o por agua), y ductos

donde se realiza la mezcla Oxígeno / combustible bajo cierta presión controlada, luego los gases acelerados producen una corriente la cual arrastra el material de revestimiento (en forma de polvo), el cual circula a través de una tobera para luego salir expulsado hacia el sustrato.

La gran velocidad alcanzada por las partículas produce una característica única de estos métodos de HVOF, el llamado "Choque de Diamante". La temperatura de combustión alcanza los 2.750°C y forma una configuración circular en la llama.

El material de recubrimiento generalmente es introducido en la pistola de forma axial (lo que permite un calentamiento uniforme de éstos), la velocidad promedio alcanzada por las partículas del revestimiento esta dentro de un rango de 760 m/s a más de los 900 m/s, producto de las altas velocidades alcanzadas por los gases de la combustión, la cual oscila entre 1.370 m/s a 2.160 m/s.

Los procesos de Combustión Continua están separados en cuatro diseños, los cuales presentan en común a todos los métodos de HVOF las siguientes características: los gases son quemados bajo una presión mayor a la atmosférica, a la vez de que estos junto con el material de revestimiento (polvo) son acelerados a lo largo de la boquilla de la pistola. Por el contrario estos diseños difieren en la longitud de la boquilla (la cual esta en el rango de 75 a 305 mm o de 3 a 12 pulg.), el diseño de la cámara de combustión, la geometría y localización del alimentador del polvo y el refrigerante empleado para evitar la degradación y fusión de la boquilla.

Estos diseños de pistolas son:

- Jet Kote.
- Top Gun.
- JP-5000.
- Diamond Jet Gun.
- CDS.
- M-Jet 5

Llama Subsónica

La técnica del rociado térmico a través Llama Subsónica emplea una tolva integrada a una pistola (mas liviana que en otros equipos), que almacena polvo el cual puede ser un metal puro, una aleación, un carburo o una combinación de éstos, luego es transportado a la corriente de oxígeno y gas combustible, donde el polvo es fundido y transportado por la llama hasta el sustrato.

La velocidad de alimentación es importante dentro de este proceso ya que si es baja algunas partículas rociadas pueden volatizarse, deteriorando la calidad superficial del recubrimiento y si la velocidad es alta algunas partículas no pueden ser fundidas disminuyendo la eficiencia y aumentando la probabilidad de que estas queden dentro del recubrimiento. Para evitar que esto ocurra las pistolas de rociar poseen dispositivos que regulan la velocidad de alimentación del polvo, pero de igual forma las características de estos recubrimientos es que poseen una menor adhesión y mayor porosidad que en otros tipos de recubrimientos como el HVOF.

2.5 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.

La preparación de la superficie es al proceso más crítico en la operación de rociado térmico. La calidad de adhesión de los revestimientos se relaciona directamente con la limpieza y rugosidad de la superficie del sustrato. La adherencia para procedimientos aceptables en la preparación de la superficie del sustrato es necesaria para asegurar una exitosa aplicación del revestimiento que ha sido rociado térmicamente.

El material del revestimiento y el tipo de sustrato son el factor más importante para determinar cual tipo superficial es necesaria para alcanzar una adherencia consistente. En partes mecánicas muy solicitadas, una breve inspección del revestimiento es necesaria para detectar defectos en el metal base. Esto se realiza por medio de métodos de inspección no destructivos. Los defectos estructurales en las piezas, producirían defectos similares en los revestimientos. Los materiales depositados por rociado térmico no incrementan la resistencia del sustrato.

El primer paso para la preparación de un sustrato para su rociado térmico, es remover de toda la superficie los contaminantes tales como costras, aceites, grasa y pinturas. El calor del rociado no removerá los contaminantes lo cual provocará la inhibición de la adherencia.

Después de que todos los contaminantes hayan sido removidos la limpieza debe ser mantenida hasta que el ciclo del rociado se haya completado. Las piezas deben ser protegidas de la transferencia aérea de escoria y de huellas digitales, y deben ser manipuladas con sujetadoras y materiales limpios.

3.1. MATERIALES.

En los ensayos se utilizaron trece muñones y tres ejes con pasadores de Acero AISI 4140 (ver figura 5). Se utilizó una biela de motor marca Renault modelo G-230 TI y cojinetes de biela de aleación de babbit con base de estaño y plomo (ver figura 6). Los materiales para ser utilizados en la fabricación de los recubrimientos fueron acero inoxidable AISI 420 y dos aleaciones a base de hierro conocidas comercialmente como Metco 449P y Metco 1, cuyas composiciones puede verse en la tabla 1. La composición y el porcentaje en peso del recubrimiento Metco 1 se determinó mediante un EDS (ver figura 7) debido a que no se consiguió información de dichos valores.

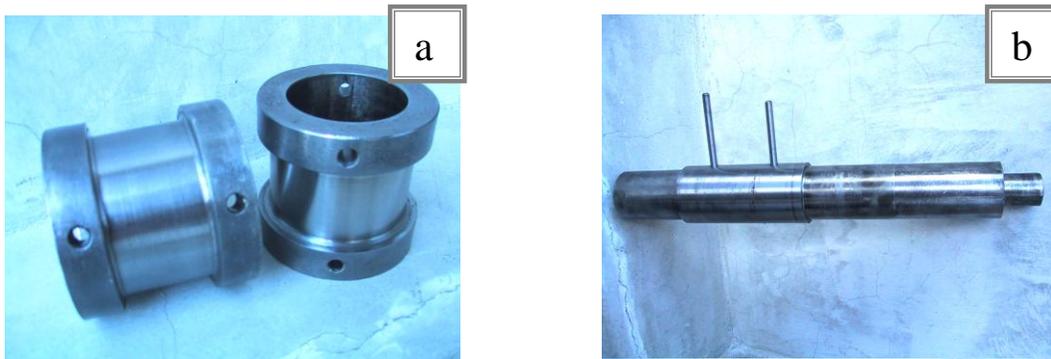


Fig.5 a) Muñones b) Pasadores y eje.



Fig.6 Cojinetes de deslizamiento.

Tabla 1.- Composición de los recubrimientos.

Acero inoxidable AISI 420	% Peso
Carbón	0.3
Fósforo	Trace
Sulfuro	Trace
Magnesio	1.0
Níquel	1.0
Cromo	12/14
Silicio	0.08
Acero	Balance
Metco 449P	% Peso
Acero	Balance
Molibdeno	2-3
Aluminio	2-3
Boro	0.1-0.3
Carbón	2-3
Metco 1	% Peso
Fe	0.57
Mo	0.04
Cr	0.22
Ni	0.09
Mn	0.01
Si	0.01

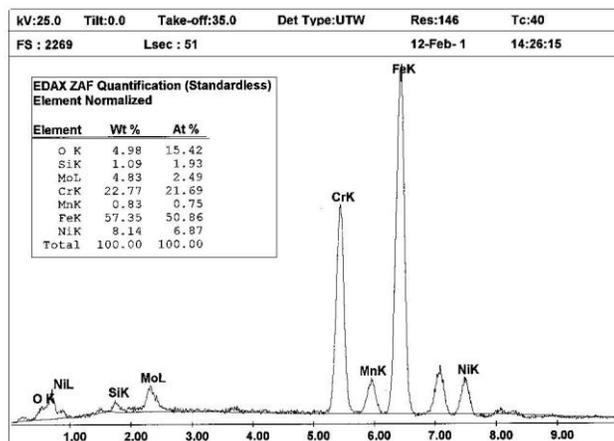


Fig. 7 EDS del recubrimiento Metco 1.

3.2. PREPARACIÓN SUPERFICIAL.

Antes de aplicarles el recubrimiento a los muñones, se les realizó un previo lavado con vapor y un desengrasante industrial para así remover la grasa o cualquier otro contaminante sobre el substrato, la cual afecta o impide la adhesión del recubrimiento. A fin de lograr un mejor enlace entre el recubrimiento y el substrato, la superficie del substrato debe estar libre de impurezas, ya que la limpieza y la rugosidad afectan enormemente las fuerzas de enlace entre el recubrimiento y el substrato. Se procedió a eliminar la humedad existente en la superficie con la acción de una llama o soplete durante aproximadamente treinta segundos.

Para otorgarle la rugosidad requerida para la aplicación del recubrimiento, las probetas fueron sometidas a un proceso de erodación (Blasting), para lo cual se empleó Óxido de Aluminio con Chorro Abrasivo, Alúmina Grano 36, por medio de una boquilla de 5/16 a una presión de 0.4 MPa. Con la finalidad de no aplicar el recubrimiento a partes indeseadas como los agujeros donde se colocan los pasadores de los muñones, se realizó la colocación de un producto de protección industrialmente llamado Maskin, que evita que el recubrimiento se adhiera a cualquier superficie.

Es necesario elevar la temperatura de los muñones aproximadamente hasta 80°C, para mejorar las condiciones de adherencia del substrato, esto se realiza a través de un soplete. La primera capa de recubrimiento que se colocó fue una base Bronce-Aluminio, denominada capa de enlace, a una presión de atomización de 0.3 a 0.4 MPa, por medio de una boquilla de aire a una distancia aproximada de 125 a 150 mm.

3.3 PROCESOS.

Luego de realizar todos los pasos necesarios para la preparación de las piezas se procedió a la colocación de los recubrimientos. Por medio del proceso Arco Eléctrico se depositaron los recubrimientos Metco 1 y acero inoxidable AISI 420 (ver figura 8). Por medio de HVOF fue depositado acero inoxidable AISI 420 (ver figura 9), mediante Llama Subsónica se depositó Metco 449P (ver figura 10), regulando los parámetros de acuerdo a las recomendaciones realizadas por los fabricantes de los recubrimientos (ver Tabla 1), con el cual se recubrieron todos los muñones.

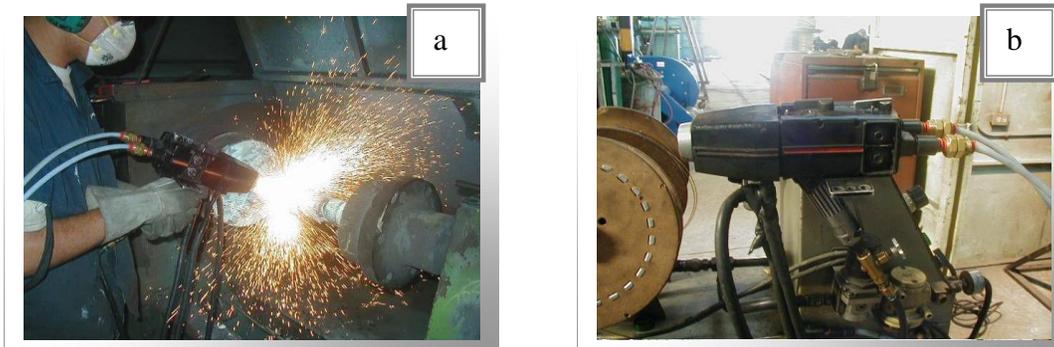


Fig. 8 a) Proceso Arco Eléctrico b) Pistola Arco Eléctrico.



Fig. 9 a) Proceso HVOF. b) Pistola M-Jet 5 de HVOF.

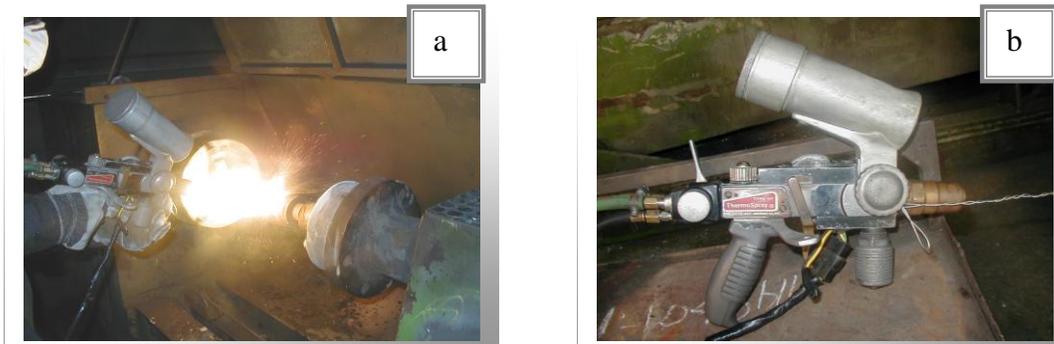


Fig.10 a) Proceso de Llama subsónica. b) Pistola Llama subsónica 5P

Posteriormente se le coloca un sello Celonítico (Eutectil+Castolin) para garantizar una superficie homogénea, rellenando así cualquier tipo de poro existente en la superficie del material. Por último se rectificaron los muñones aproximadamente hasta 64.84 mm con dos tipos de piedra (Óxido de Aluminio y Carburo de Silicio) y se pulieron con una cinta 3M Trizact A16, para garantizar una superficie lisa libre de rugosidades. A través de una cinta plástica (3M) que se adhirió a la superficie, se realizó un estudio microscópico a las partículas resultantes del proceso de pulitura para verificar su composición.

Tabla 2. Especificaciones Técnicas del Rociado Térmico.

Material de alimentación	Metco 1
Proceso	Arco Eléctrico.
Distancia de Rociado	125-150 mm
Protección	Maskin
Pre calentamiento	80 °C
Capa de Enlace	Base Bronce Aluminio
Presión de Atomización	55-60 PSI.
Boquilla	Aire
Intensidad	150-200 A.
Tensión	32 V.
Pistola	Marca Tafa.
Consola de Control	Alimentación de alambre.
Sello	Celonítico Eutectil+Castolin.
Material de alimentación	Acero Inoxidable AISI 420.
Proceso	Arco Eléctrico.
Distancia de Rociado	125-150 mm
Protección	Maskin
Pre calentamiento	80 °C
Capa de Enlace	Base Bronce Aluminio
Presión de Atomización	55-60 PSI.
Boquilla	Aire.
Intensidad	200 A.
Tensión	32 V.
Pistola	Marca Tafa.
Consola de Control	Alimentación de alambre.
Sello	Celonítico Eutectil+Castolin.

Material de alimentación	Acero Inoxidable AISI 420.
Proceso	HVOF.
Distancia de Rociado	125-150 mm
Protección	Maskin
Pre calentamiento	80 °C
Capa de Enlace	Base Bronce Aluminio
Presión de Atomización	90 PSI.
Boquilla	Aire.
Oxígeno	75 PSI
Propano	68 PSI
Sello	Celonítico Eutectil+Castolin.
Material de alimentación	Metco 449P
Proceso	Llama Subsónica
Distancia de Rociado	180-200 mm
Protección	Maskin
Pre calentamiento	100 °C
Capa de Enlace	Base Bronce Aluminio
Presión de Atomización	60-70 PSI.
Boquilla	P7-G.
Pistola	5-P
Sello	Celonítico Eutectil+Castolin.

3.4 ENSAYOS REALIZADOS.

Desgaste.

Para la realización del ensayo de desgaste se utilizó el banco de ensayos construido por Arthur y Martínez (ver figura 11) que simula el comportamiento de los cigüeñales en motores Diesel optimizando el mismo para garantizar parámetros que permitan trabajar en lubricación límite, en los cálculos tipos (ver anexos) se detallan los valores de presión y

velocidad que son necesarios para obtener parámetros de lubricación límite. Se procedió a insertar los muñones en los ejes, se unió el muñón con la biela la cual tenía montada las conchas. El cárter se colocó alrededor del sistema Biela-Ejes-Muñones, garantizando que el exceso de aceite que la bomba envíe a la biela no se derrame, utilizando un ciclo abierto de lubricación. Posteriormente este sistema Biela-Ejes-Muñones se montó en el banco de ensayos, se encendió la bomba de aceite y el motor encargado de hacer girar los muñones por medio de unas poleas (ver figura 11) que están en contacto con la biela, y paulatinamente se fue aumentando la carga en el gato hidráulico.



Fig. 11 Banco de ensayos



Fig. 12 Sistema de potencia.

Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Se extrajo dos muestras a cada muñón en aproximadas de 1.5 cm de largo y 2 cm de alto con un disco de corte de carburo de silicio y posteriormente con un disco de corte de diamante a 180 rpm. Las muestras fueron divididas en dos grupos, el primero destinados para el estudio de desgaste en la superficie y el segundo para observar la microestructura de los recubrimientos.

Para poder observar la microestructura del recubrimiento, las piezas necesitan una preparación metalográfica, se procedió a desbastarlas y pulirlas, empezando con un papel de lija de Carburo de Silicio desde el número 300 pasando por el 400, 600,800 hasta el número 1200 utilizando un equipo Buehler con un plato giratorio y culminando con alúmina (Al_2O_3) con un tamaño de partículas inicialmente de 3 micrones, siguiendo con 1, 0.05 micrones y culminando con 0.01 micrones.

Se limpiaron las muestras mediante ultrasonido durante una hora, sumergiéndolas en alcohol isopropílico para eliminar el exceso de aceites, grasa u otros contaminantes. Se

atacó la muestra correspondiente al muñón templado con Nital 2% (HNO_3 + Metanol) ya que es una de las soluciones más utilizadas para poder observar la microestructura de los aceros al carbono. Seguidamente se procedió a observar las muestras en el microscopio óptico.

Microdureza

Para la realización del ensayo de microdureza se procedió a utilizar las mismas muestras que se utilizaron en la micrografía. Los ensayos fueron realizados en un microdurómetro Micromet Plus Buheler. Se aplicó una carga de 300 gr (durante 10 segundos) sobre las muestras. Se realizaron 6 identaciones a lo largo del recubrimiento. Con los promedios de los diámetros se procedió al cálculo de los valores de microdureza Vickers (ver anexos de cálculos tipo).

4.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO.

La figura 13.a corresponde a una micrografía de un recubrimiento de acero inoxidable AISI 420 depositado por Arco Eléctrico. El recubrimiento es característico de aquellos depositados por rociado térmico en la cual una estructura en forma de capas o “lamellas” es observada. El círculo en la figura 13.a muestra una grieta entre dos lamellas en la cual se observa a lo largo de todo el recubrimiento, la interfase presenta una buena adhesión con el sustrato. En la figura 13.b la cual corresponde al mismo recubrimiento pero a un aumento mayor, se observa con mas detalle la estructura lamellar así como también algunas partículas no fundidas (encerradas en el recuadro) y óxidos entre lamellas también son observados (ver círculo). En estos procesos se forman algunos óxidos debido a las altas temperaturas generadas por el proceso y al contacto con el ambiente.

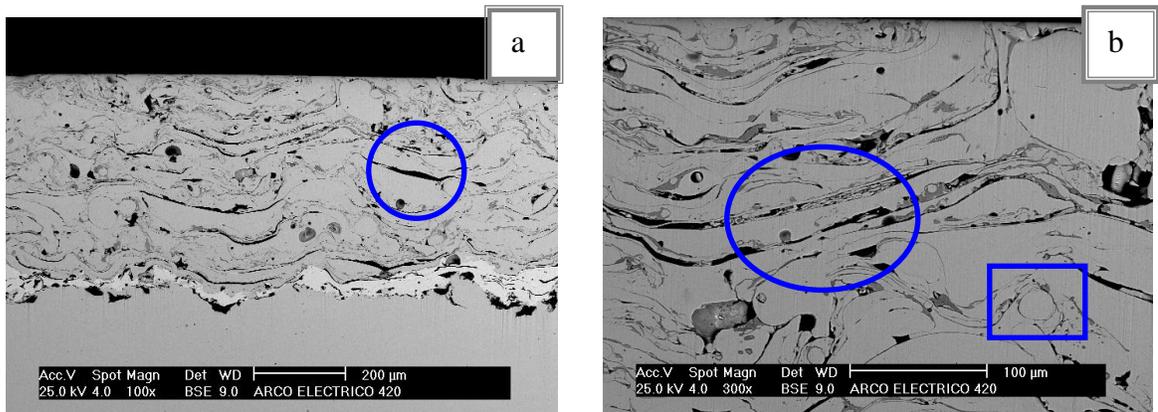


Fig.13 a) Micrografía en MEB a 100X de un recubrimiento de acero inoxidable 420 mediante Arco Eléctrico. b) Aumento a 300X.

La figura 14.a corresponde a una micrografía de un recubrimiento depositado con Metco 1, mediante la técnica de Arco Eléctrico, en la cual igualmente se observa, una estructura lamellar con algunos agrietamientos producto del rápido enfriamiento de las capas subsecuentes. La interfase presenta una buena adhesión con el sustrato y algunas porosidades debido al granallado. También se distinguen partículas no fundidas, las partículas oscuras pudieran ser óxidos y/o poros producto del proceso de deposición. Existe poco espesor de NiCr entre el recubrimiento y el sustrato. La flecha detalla algunos desprendimientos de material producto del mecanizado o del desgaste de los ensayos.

En la figura 14.b se distinguen agrietamientos entre lamellas y algunos poros, dentro del recuadro se observa una partícula que no llegó a fundirse y algunas manchas difusas posiblemente de aceite como se ve en el círculo.

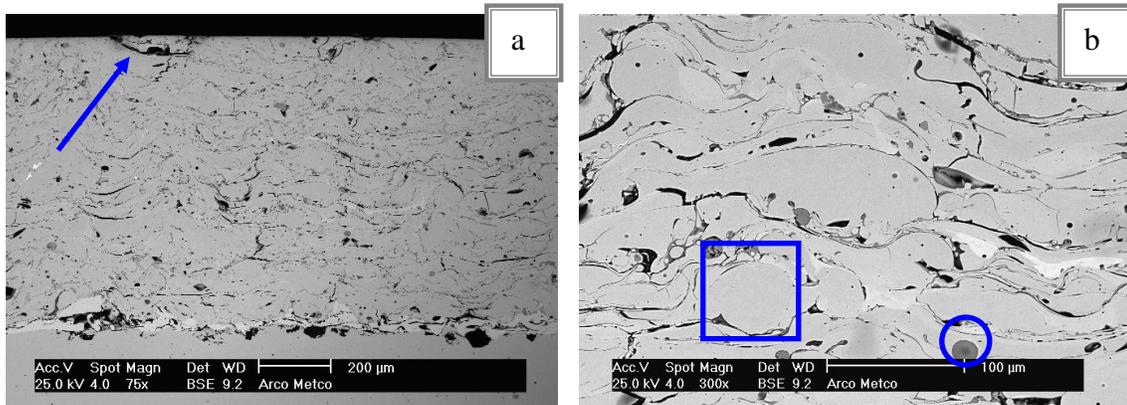


Fig.14 a) Micrografía en MEB a 75X de recubrimiento Metco 1 mediante Arco-Elec.
 b) Aumento a 300X.

La figura 15.a corresponde a una micrografía de un recubrimiento de acero Inoxidable AISI 420 depositado mediante la técnica HVOF, el cual muestra una mejor cohesión comparándolo con el proceso anterior, probablemente debido a la gran velocidad con la cual es depositado el recubrimiento, presentando una forma más homogénea y densa. En las capas superiores se observa algunas grietas (encerradas en el óvalo), posiblemente producto del gradiente de temperaturas entre las diferentes capas del recubrimiento. La Fig. 15.b es un detalle de la figura anterior, la flecha señala una partícula sin fundir que a diferencia de los otros recubrimientos se presentan en menor cantidad, también se puede diferenciar encerrado en el recuadro posibles óxidos.

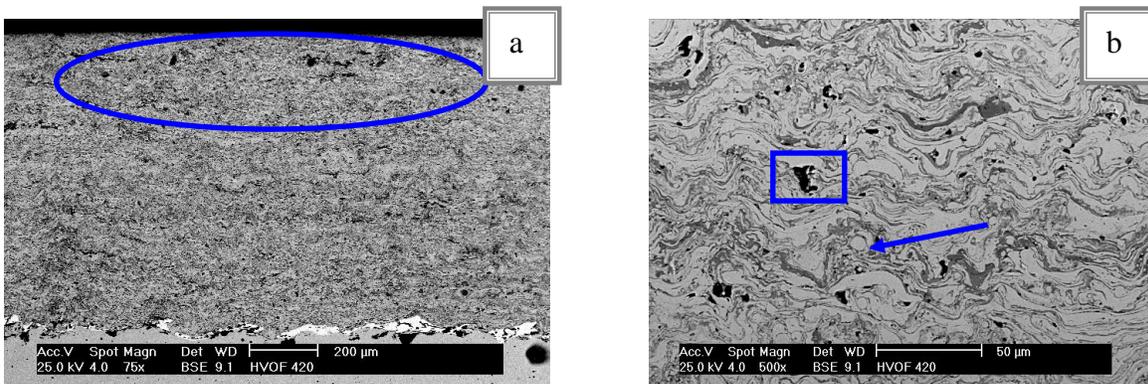


Fig.15 a) Micrografía en MEB a 75X de un recubrimiento de acero inoxidable AISI 420 mediante HVOF. b) aumento 500X.

Mediante un corte realizado al recubrimiento Metco 449P, y al realizarle una micrografía se puede observar en la Fig. 16.a, una estructura poco homogénea y con menor densidad, debido a las bajas velocidades y temperaturas con que el material es depositado, siendo el más heterogéneo comparándolo con los recubrimientos obtenidos por las otras técnicas. En la Fig. 16.b se observa la existencia de partículas no fundidas encerradas en el recuadro y la presencia de un agrietamiento dentro de un óxido, encerrado en el círculo. Un análisis puntual (EDS) realizado en la partícula blanca, el cual puede observarse en la figura 16.c, indicó que la misma está compuesta principalmente de molibdeno no fundido. En la figura 16.d se evidencia una posible existencia de óxidos ya que se realizó un EDS a la zona gris presentando valores de Fe y O en su composición, si los mismos están bien adheridos al recubrimiento ayudan a que exista un menor desgaste.

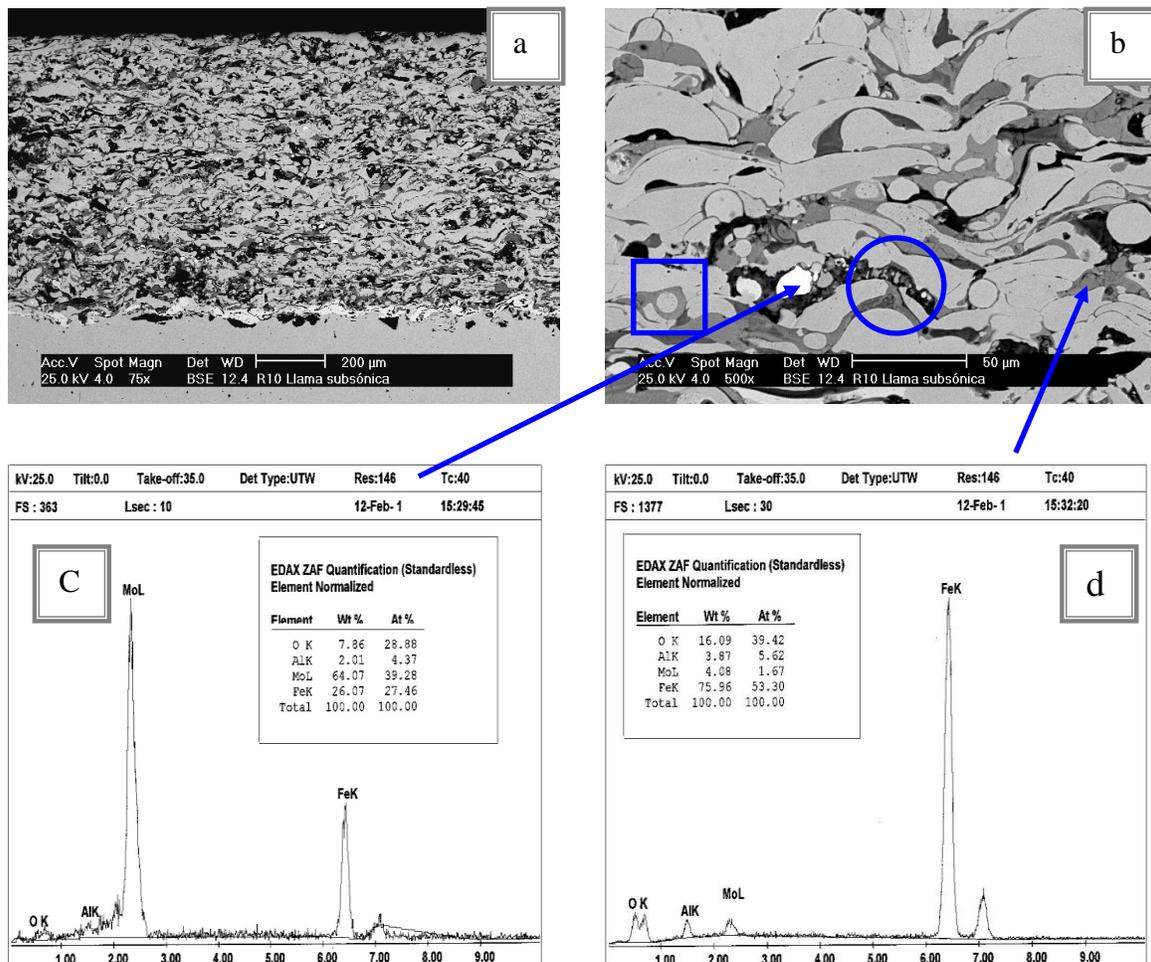


Fig.16 a) Micrografía en MEB a 75X de un recubrimiento Metco 449P mediante Llama Subsónica. b) Detalle recubrimiento a 500X. c) EDS de una partícula de molibdeno. d) EDS de la fase gris

La figura 17 muestra una micrografía de un acero AISI 4140 al cual se le realizó el tratamiento térmico de temple, se observa una estructura martensítica y agujas de martensita revenida encerradas en el círculo, características de estos tratamientos.

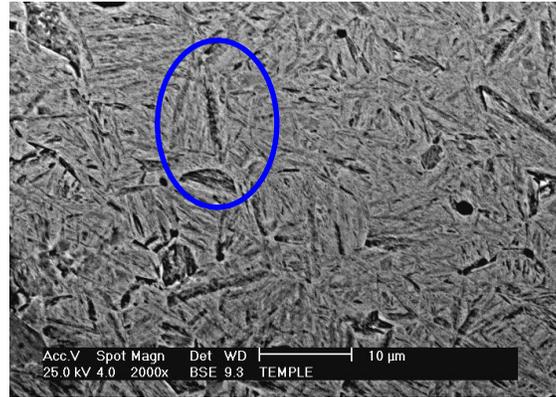


Fig.17 Micrografía en MEB 2000X de un acero templado.

La figura 18.a corresponde a una microscopía electrónica de barrido (MEB) de electrones secundarios realizada en la superficie de ensayo de un acero inoxidable 420 depositado mediante Arco Eléctrico. Dentro del óvalo se puede observar que hubo partículas desprendidas de diferente tamaño. Este tipo de desgaste se conoce como “micro-cutting”. El desprendimiento posiblemente surgió por no haber buena cohesión entre las partículas del recubrimiento o debido a la formación de óxidos (como se vio en la figura 13).

En el detalle de la figura a 18.b se puede observar la presencia de posibles óxidos, lo cual nos permite deducir que la formación los mismos impidió la cohesión entre lamellas permitiendo el desprendimiento de partículas por “micro-cutting”. En la figura 18.c se muestra un análisis químico de partículas que se encontraban en la superficie de los muñones, las cuales fueron dejadas durante el proceso de rectificado ya que son partículas que contienen Fe y Al.

Lo anteriormente mencionado nos permite deducir que probablemente las partículas que han quedado en la superficie de la pieza después del rectificado permitiendo el desgaste abrasivo del recubrimiento, lo que promueve el micro-cutting, posteriormente las partículas desprendidas en este proceso desgastan la pieza.

A fin de determinar el origen de las partículas que producen la abrasión de la pieza se tomaron muestras en la superficie de los muñones antes de los ensayos con la ayuda de una cinta plástica adhesiva la cual fue llevada a microscopía electrónica y analizada químicamente. Este ensayo nos permitió conocer que sobre la superficie de los muñones se encontraban partículas de la piedra utilizada para el rectificado y también del recubrimiento.

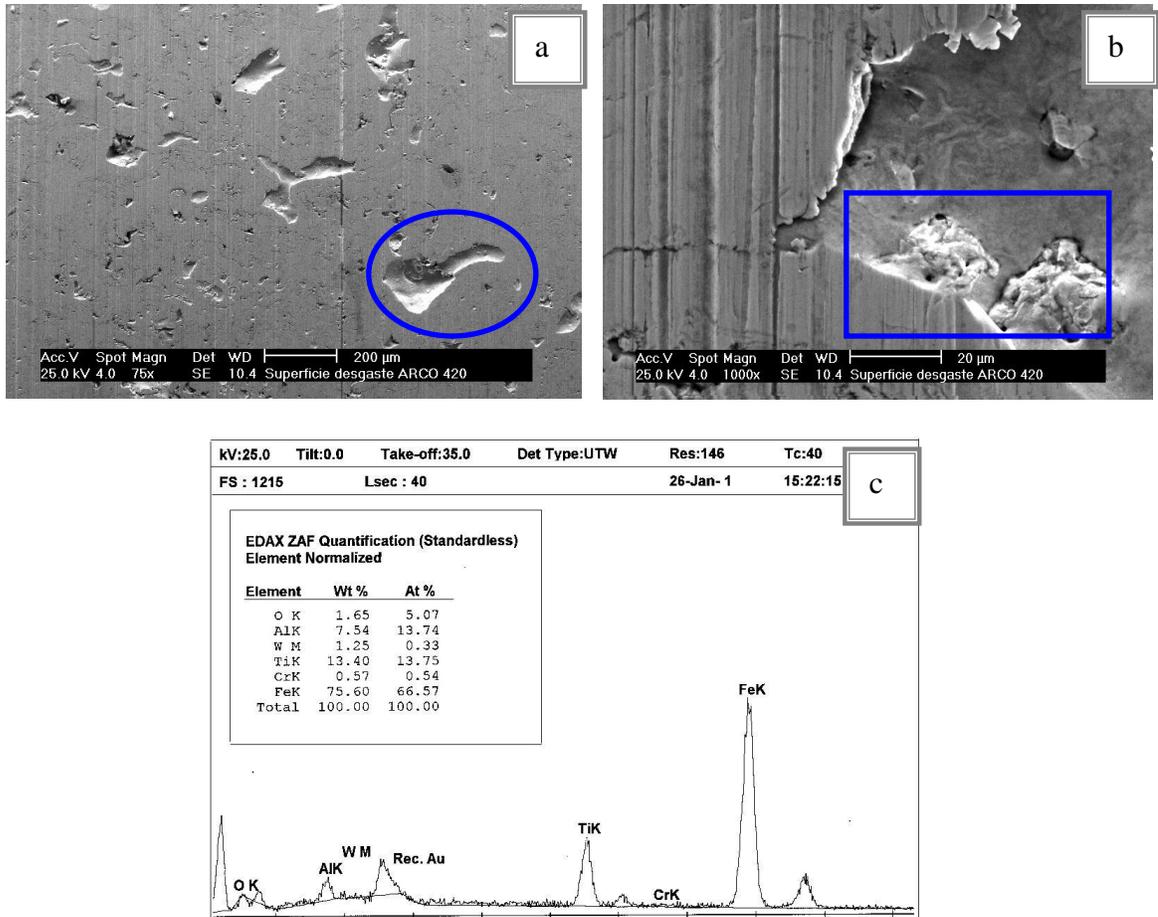


Fig.18 a) Superficie de desgaste acero inoxidable AISI 420 por Arco-Eléctrico., MEB a 75 X. b) aumento a 1000 X. c) EDS de partículas de la superficie.

La figura 19.a corresponde a una microscopía electrónica de barrido en modo de electrones secundarios en la superficie de desgaste del recubrimiento Metco 1 depositado por Arco Eléctrico. En esta figura podemos observar huellas producidas por “micro-cutting”, encerrado en el óvalo podemos ver una partícula probablemente de óxido la cual no fue removida durante el ensayo. No se observa un desgaste superficial muy pronunciado

debido a que el proceso de Arco Eléctrico funde el material a depositar, lo cual mejora la cohesión del recubrimiento.

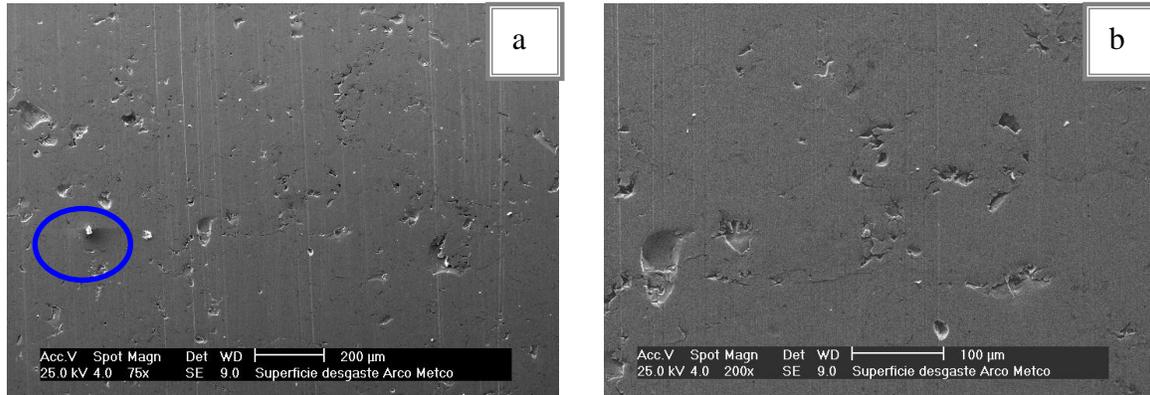


Fig.19 a) Desgaste superficial de un recubrimiento Arco-Eléctrico Metco 1, MEB a 75 X.
b) aumento a 200 X.

La figura 20.a corresponde a una microscopía electrónica de barrido en modo de electrones secundarios en la superficie de ensayo de un acero inoxidable 420 depositado mediante el proceso HVOF donde se observa que el desgaste por micro-cutting no es tan notoria como en los otros recubrimientos, posiblemente debido a las altas velocidades con que es depositado el material lo que permite una buena cohesión en el recubrimiento, poca oxidación y escasa partículas no fundidas. La flecha indica una partícula con posibilidad de desprendimiento. En el recuadro de la figura 20.b se puede se detalla la presencia de posibles óxidos superficiales, los cuales fueron observados en la figura 15 que pueden haber salido a la superficie después de realizado el ensayo.

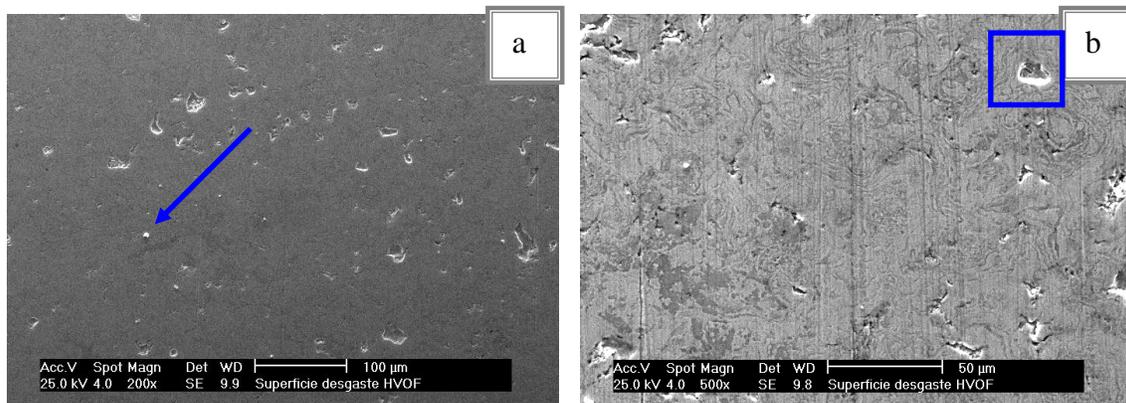


Fig.20 a) Superficie de desgaste de un acero AISI 420 mediante HVOF, aumento a 200 X.
b) aumento a 500 X.

La figura 21.a corresponde a una microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios en la superficie del material Metco 449P depositado mediante el proceso de llama subsónica en la que se observa una topografía más irregular, debido posiblemente a una mayor rugosidad. Dentro del óvalo de la figura 21.b se observa que el mecanismo predominante de desgaste fue la deformación plástica. En la flecha se observa tres poros producto posiblemente del desprendimiento de las partículas no fundidas después de realizado el ensayo o producidas durante el proceso de deposición.

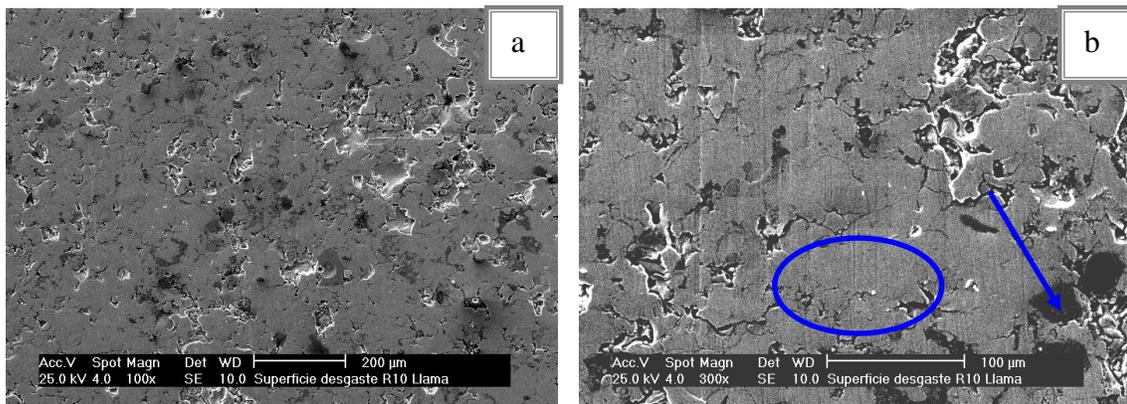


Fig.21 a) Desgaste superficial de un recubrimiento de Llama subsónica Metco 449P, MEB a 100X. b) aumento a 300 X.

La figura 22.a corresponde a una microscopía electrónica de barrido en electrones secundarios en la superficie de un muñón que fue templado. Se observa gran cantidad de líneas producto de la abrasión. No se observa el desprendimiento de partículas como en el caso de las piezas recubiertas, solo pérdida de material por abrasión, dicha deformación es generada por el arrastre de partículas, durante el ensayo, la superficie presenta un desgaste mayor al de los recubrimientos, probablemente por no poseer las características de los materiales rociados térmicamente.

En la Fig. 22.b se puede observar la presencia posibles óxidos, en un grado mayor al de los recubrimientos (observar dentro del recuadro), generados posteriormente a los ensayos. Dentro del óvalo se destacan las huellas transversales de desgaste de los ensayos, las cuales dejaron líneas de desgaste en toda la superficie.

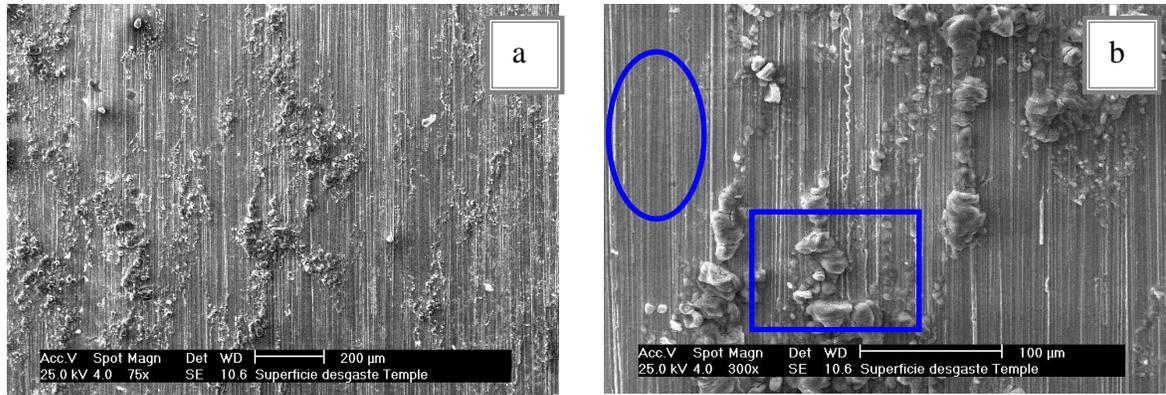


Fig.22 a) Desgaste superficial de acero templado, MEB a 75 X.
 b) aumento a 300 X.

4.2. ANÁLISIS DE RUGOSIDAD.

La figura 23 corresponde a la rugosidad promedio RA de cada muñón antes y después de ser ensayados. Se puede observar al analizar cada proceso por separado que la rugosidad presentada en los muñones antes de los ensayos es relativamente constante, esto refleja que los parámetros con que son depositados los materiales están controlados de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes (ver tabla 1). El muñón templado presenta una rugosidad promedio inicial dentro de la desviación estándar de los demás procesos, permitiendo así tener parámetros de comparación iniciales iguales, para muñones con o sin recubrimientos.

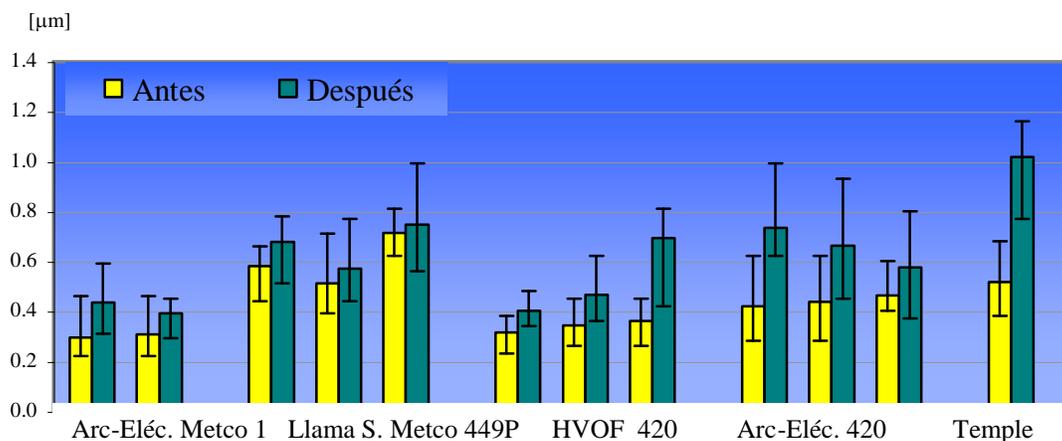


Figura 23 Rugosidad Promedio RA por muñón (Antes-Después).

La figura 24 corresponde a los valores de rugosidad promedio de cada proceso. Se observa en ella que los valores más altos de rugosidad antes los ensayos los presentó el proceso de llama subsónica posiblemente por las bajas velocidades con las cuales es depositado el recubrimiento lo cual permite la formación de irregularidades en la superficie como se observó en la figura 16.

El material acero inoxidable AISI 420 depositado mediante HVOF presentó menores valores de rugosidad (antes y después de los ensayos) comparando con aquellos obtenidos por el proceso de Arco Eléctrico. Probablemente porque es depositado con más velocidad mediante el proceso HVOF, permitiendo un mayor aplastamiento de las partículas rociadas.

Se observa que el recubrimiento Metco 1 depositado mediante Arco Eléctrico presentó menores valores de rugosidad, antes y después de los ensayos, que el acero AISI 420 depositado mediante el mismo proceso, esto se puede verificar al comparar las figuras 18 y 19 donde el acero inoxidable AISI 420 presenta una superficie con mayor desgaste que el Metco 1.

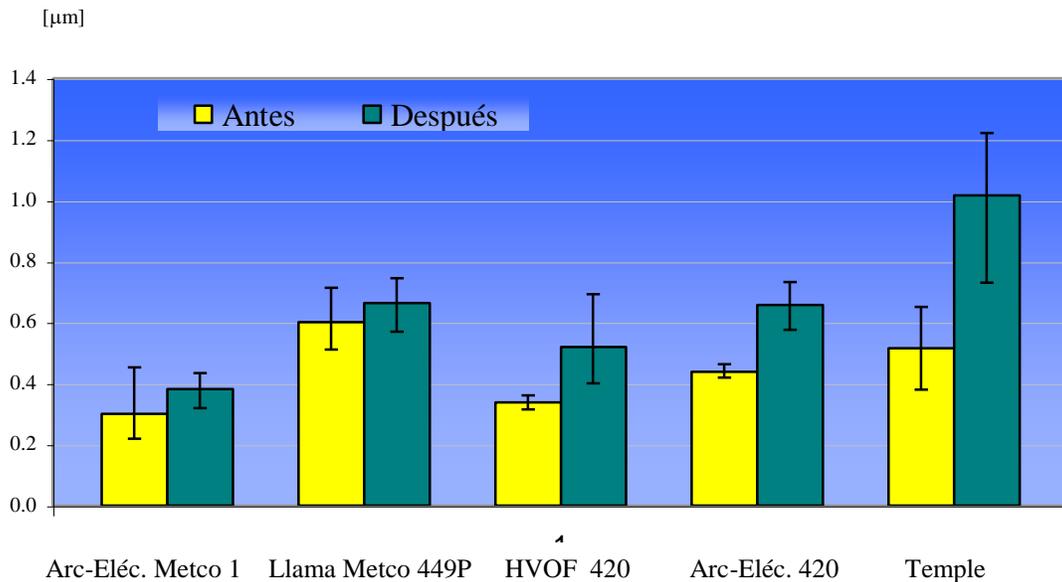


Figura 24. Rugosidad Promedio RA por ensayo (Antes-Después).

La figura 25 representa los porcentajes de desgaste presentado por los procesos. Se puede observar que el menor porcentaje de desgaste lo presentó el material Metco 449P depositado mediante Llama Subsónica, posiblemente por presentar alta rugosidad que permite tener un reservorio de aceite mayor a los demás recubrimientos, facilitando de esta manera el deslizamiento de los muñones. El muñón que fue templado presentó el mayor porcentaje de desgaste. Se observa que el material Metco 1 depositado mediante Arco Eléctrico presentó menos desgaste que cuando se deposita acero inoxidable AISI 420 con el mismo proceso. Cuando se deposita acero inoxidable AISI 420 mediante HOVF y mediante Arco Eléctrico se observa que el desgaste de ambos procesos está dentro de valores desviación estándar, observados en la figura 24, por lo que no se puede decir que el proceso produciría un menor desgaste.

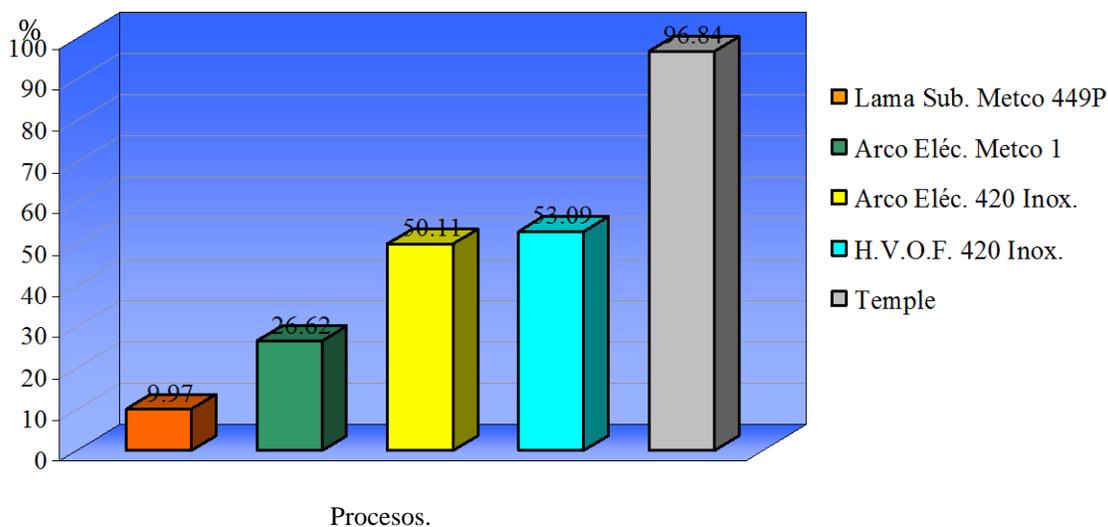


Figura 25.- Porcentaje de Desgaste de la Rugosidad Promedio RA por Ensayo.

4.3. ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE PESO DE LOS COJINETES.

El desgaste en los cojinetes se representa en la figura 26 en forma de pérdida de peso de los mismos después de los ensayos. Los cojinetes del muñón templado, los muñones con recubrimiento Metco 1 y acero inoxidable AISI 420 (depositado mediante HVOF) presentaron una pérdida de peso equivalente. En la figura 26 se observa que los recubrimientos acero inoxidable AISI 420 depositado por Arco Eléctrico y el Metco 449P

presentaron la mayor pérdida de peso en los cojinetes, era de esperarse ya que fueron estos recubrimientos los que presentaron la mayor rugosidad promedio (ver figura 24).

De igual forma el temple, que ha presentado un comportamiento más irregular en todos los análisis, se encuentran dentro del promedio. Por lo tanto queda demostrado que el material de recubrimiento de los cojinetes (babbitt), al ser dúctil, permite adaptarse y presentar un buen comportamiento sobre cualquier de estos materiales ensayados.

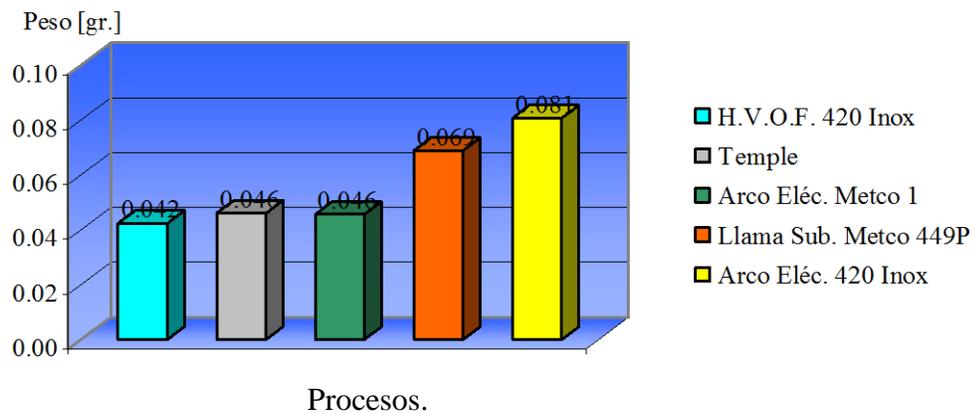


Fig.26 Pérdida de peso en los cojinetes después de ensayados.

4.4. ANÁLISIS DE DUREZA.

Macro dureza.

Como se observa en la Fig.27 el material que mas opuso la resistencia al rayado fue el Metco 1, depositado por la técnica Arco Eléctrico. El muñón templado, debido al tratamiento térmico, presenta de igual forma una alta resistencia al rayado al compararlo con el resto de los materiales. El material Metco 449P, depositado por Llama Subsónica, y el acero inoxidable AISI 420, depositado por Alta Velocidad (HVOF), presentaron aproximadamente la misma resistencia al rayado superficial. Por último el proceso de Arco Eléctrico que utilizó como material un acero inoxidable AISI 420 alambre fue el que ofreció la menor resistencia al rayado.

Se observa que a pesar de que el muñón recubierto con acero 420 y el muñón templado presentan valores de macrodureza aproximados, el primero presentó una menor superficie de desgaste (ver figura 22) que el muñón templado (ver figura 22), por lo que se puede decir que la dureza no influye directamente sobre el desgaste.

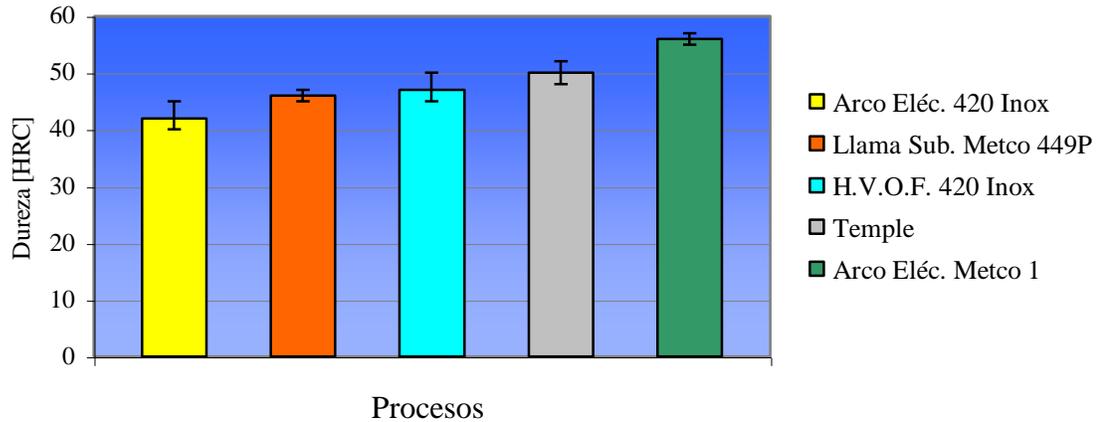


Fig. 27 Macro dureza.

Microdureza.

La resistencia a la penetración, de los distintos materiales, registrado en los ensayos de dureza Vickers se encuentran muy próxima unos valores con los otros. Esto se comprueba en la figura 28, donde se representa de igual forma el error para cada medición.

Los recubrimientos Metco 1 y 449P obtuvieron los valores más altos de microdureza, con una desviación estándar alta debido probablemente a las posibles partículas de óxido y otras partículas no fundidas que hacen que no se tenga una superficie homogénea, pero a la vez no se relacionan directamente con el desgaste. Los materiales que presentaron los valores mas constantes fueron el muñón templado y el acero inoxidable 420, depositado por Alta Velocidad (HVOF).

Esto es logrado gracias al tratamiento térmico que se realizó al primero, y por la superficie densa y homogénea que permite obtener la técnica de HVOF. El material acero inoxidable 420 depositado por el proceso Arco Eléctrico puede decirse que presenta la menor dureza, la desviación estándar de los valores fue baja lo cual indica su homogeneidad.

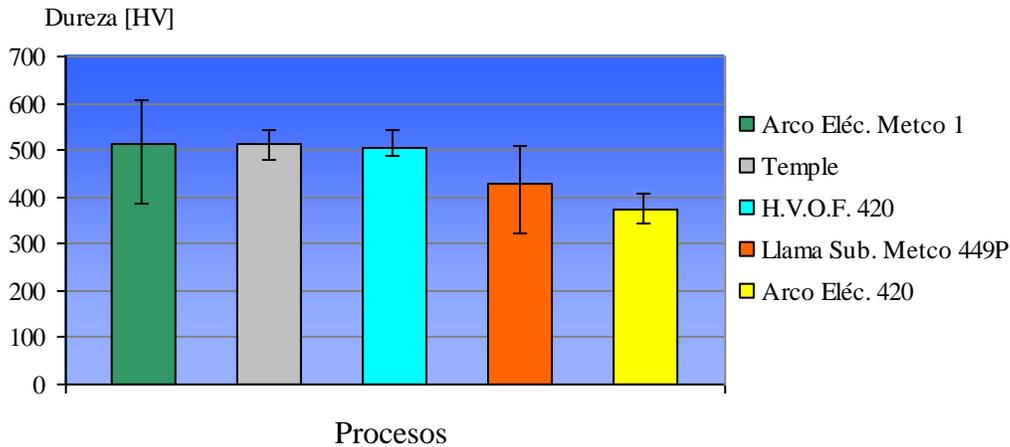


Fig. 28 Dureza Vickers.

4.5. ANÁLISIS DE TEMPERATURA.

La figura 29 corresponde a la temperatura promedio de trabajo de los recubrimientos. En ella se observa como todos los ensayos presentan un incremento en la temperatura de trabajo durante los primeros 25 minutos. Esto se debe a la alta fricción que se genera entre el muñón y el cojinete y la poca lubricación existente al inicio de los ensayos. Posterior a estos minutos los valores de temperatura tienden a estabilizarse ya que el lubricante comienza a trabajar en mejores condiciones y éste se distribuye de una forma mas uniforme.

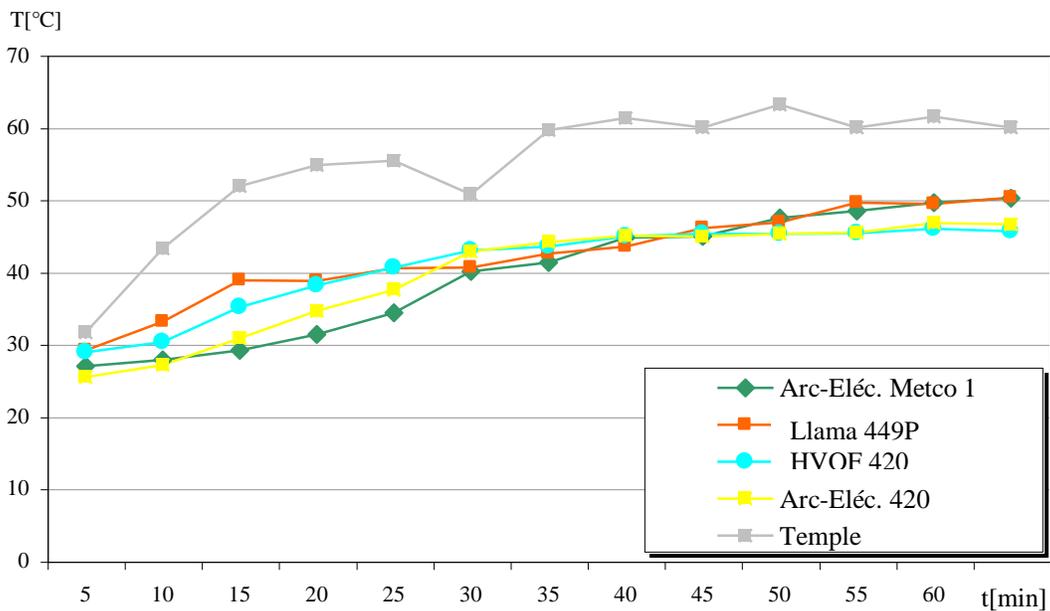


Figura 29 Temperaturas Promedio de Trabajo de los ensayos.

Para estos primeros minutos de ensayos el material Metco 449P, depositado por medio de la técnica de Llama Subsónica, presentó el mayor registro de temperatura de los materiales rociados, esto puede ser resultado a la alta rugosidad superficial que presenta este proceso, de ahí que se genere una mayor fricción entre el muñón y el cojinete.

La temperatura correspondiente al muñón templado presenta una caída brusca a los 30 minutos de iniciado el ensayo, esto se debe a la parada que sufrió el muñón. En ese instante se detuvo el banco de ensayos por unos segundos para solucionar el problema, permitiendo una refrigeración del muñón que resultó en una pequeña disminución en su temperatura. Estas paradas forzadas se pueden observar en las tablas de reporte de parámetros de los ensayos que se encuentran en los anexos.

En general las temperaturas de trabajo presentaron valores similares a lo largo de todos los ensayos, por el contrario la temperatura de trabajo del temple resultó la más elevada de todos los ensayos, demostrando con ello que los recubrimientos tienen la propiedad de disminuir el roce entre la superficie del muñón y los cojinetes, generando una menor elevación de los valores de temperatura.

5. CONCLUSIONES.

- El recubrimiento Metco 449P depositado mediante la técnica de llama subsónica presentó el menor porcentaje de desgaste, siendo aproximadamente un 10 %, corroborando el comportamiento que presenta industrialmente.
- El material Metco 1 presenta una estructura más homogénea que el acero inoxidable 420 al ser depositados mediante el proceso de Arco Eléctrico, probablemente porque las partículas de acero requieren una temperatura de fusión mas elevada.
- Se evidenció que la dureza no está relacionada directamente con la tasa de desgaste de los recubrimientos.
- El recubrimiento acero inoxidable AISI 420 presentó mayor desgaste que el Metco 1 posterior a los ensayos, al ser depositados ambos mediante el proceso de Arco Eléctrico. Encontramos que los porcentajes de desgaste del recubrimiento acero inoxidable AISI 420 duplican a los del Metco 1.
- La mejor alternativa entre el proceso HVOF y Arco Eléctrico depositando acero inoxidable AISI 420 la presenta el segundo, debido a los bajos costos de operación a la diferencia de desgaste entre ambos es aproximadamente de un 3%.
- Los porcentajes de desgaste de los recubrimientos oscilan entre un 50% y un 80% por debajo de los valores del muñón que fue templado.
- Los recubrimientos con una buena adhesión de sus óxidos presentaron menor desgaste, como es el caso del recubrimiento Metco 449P depositado por Llama Subsónica.
- Las piedras con que fueron rectificadas los muñones desprendieron partículas sobre los recubrimientos.

6. RECOMENDACIONES.

- Para una mejor evaluación de los recubrimientos sobre cigüeñales se recomienda la utilización de un banco de ensayos que simule los parámetros de trabajo reales de un motor Diesel ya que el empleado en los ensayos no considera la carga fluctuante a los cuales están sometidos los cigüeñales, por el contrario actúa solo como freno.

- Para poder analizar la verdadera causa de fallas de los muñones se recomienda realizar el ensayo de “Pin-on-disk” sobre los materiales ensayados.

- Se recomienda realizar un estudio mas profundo de las piedras que se utilizaron para maquinar los muñones, así como también de otras existentes en el mercado las cuales puedan ofrecer mejores resultados ya que se comprobó la existencia de partículas de las mismas en la superficie de los muñones.

- Para tener unos resultados confiables se recomienda la realización de un número mayor de ensayos ya sea utilizando materiales de un mismo proceso o un mismo material para varios procesos, teniendo la posibilidad de un mayor rango de comparación.

- Para la una mejor transferencia de calor del lubricante, se recomienda utilizar como depósito de aceite un recipiente de metal y no de plástico como el utilizado en el banco de ensayos.

BIBLIOGRAFÍA.

ARTHUR C., WILLIS J., y MARTÍNEZ V., LICCIO E., 1998, Evaluación de las Propiedades Mecánicas de Cojinetes de Deslizamiento con Metal Babbit Depositado por Termorrociado y Soldadura T.I.G. Tesis, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela. de Ingeniería Mecánica, Venezuela, 133 pág.

BENLLOCH, JOSÉ, Los Lubricantes, Ediciones CEAC, Barcelona (España), 1990, pág. 374.

BILLIET, WALTER, Entrenamiento y Reparación de Motores de Automóvil, Editorial Reverté, Barcelona (España), 1979, pág. 548.

CAMERON, A., The Principles of Lubrication, editorial Longmans, Londres (Inglaterra), 1966, pág. 574.

FULLER, DUDLEY, Teoría y Práctica de la Lubricación, Ediciones Interciencia, Madrid (España), 1961, pág. 544.

HOBART TAFE TECHNOLOGIES. Technical data, File 1.9.1.2-60T, Issue No H11123, Supercedes G10115, N.H. (USA), 1992.

KATES, EDGAR, Motores Diesel y de Gas de Alta Compresión, Editorial Reverté, 2º Edición, Barcelona (España), 1982, pág. 542.

LOZADA F., RAFAEL E., y PAOLILLO M., FABIO B., 1998, Evaluación de la Capacidad de Carga en Ejes que Han Sido Termorrociados por Medio de Técnicas de Deposición de Arco-Eléctrico y High Velocity Oxi-Fuel (HVOF). Tesis, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela. de Ingeniería Mecánica, 197 pág.

MOTT, ROBERT L., Diseño de Elementos de Máquinas, Editorial Prentice Hall, 2º Edición, México, pág. 787.

MUNDI CRESPA, ELSY, Los Lubricantes y sus Aplicaciones, Editorial Interciencia, Madrid (España), 1972, pág. 437.

OBERT, EDWARD F., Motores de Combustión Interna, Editorial CECSA, 12º Edición, México (México), 1980, pág.753.

SHIGLEY, JOSEPH y MISCHKE, CHARLES, Diseño en Ingeniería Mecánica, Editorial Mc Graw Hill, 5º Edición, México (México), 1990, pág. 883.

SPOTTS, M. F., Proyecto de Elementos de Máquina, Editorial Reverté, Barcelona (España), 1966, pág 690.

CÁLCULOS TIPO

Para lograr los parámetros necesarios de lubricación límite se realizaron modificaciones en el banco de ensayos. Para ello se recalculó la presión en el cojinete, velocidad de giro del eje, relación de transmisión y número de bandas; como se muestra a continuación:

-Presión:

$$P = \frac{F}{A}$$

-En el gato:

Diámetro	26.01mm
Área de contacto	0.000531 m ²
Presión	7000psi = 48.26 MPa.
Fuerza sobre la biela	25627.81 N

-Sobre el cojinete:

Diámetro	64.9mm
Longitud	37.4mm
Area	0.002427m ²
Presión	1531.41psi

-Viscosidad:

$$\mu = v * \gamma$$

$$\mu = 11.5 \times 10^{-6} \text{ reyn @ } 50^{\circ}\text{C (fig 12-11 Shigley)}$$

$$1 \text{ reyn} = 6895 \text{ Pa.s}$$

$$1 \text{ Pa.s} = 1000 \text{ centipoise.}$$

$$\mu = 79.29 \text{ cp.}$$

- Número de Mc Kee:

$$\# Mc Kee = \frac{\mu * N}{P}$$

$$\# Mc Kee = \frac{79.29 * 100}{1531.41}$$

$$\# Mc Kee = 5.17$$

-Velocidad:

$$V = \frac{\pi.D.rpm}{12}$$

$$V = \frac{\pi.(2.52).100}{12}$$

$$V = 65.97 \text{ ft/min}$$

-Presión por velocidad:

Presión	1531.41psi
Velocidad	65.97 ft/min

$$PV = 1531.41 \text{ PSI} * 65.97 \text{ f / min}$$

$$PV = 101027.11 \text{ psi ft / min}$$

-Poleas:

Distancia entre centros:0.6 m	Rpm:100
-------------------------------	---------

De la tabla 17-11 (Shigley)

Longitud efectiva:

$$L_p = 2c + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 * c}$$

$$L_p = 2 * 23.622 + 1.57(12 + 5.4d) + \frac{(12 - 5.4)^2}{4 * 23.622}$$

$$L_p = 75.02 \text{ in}$$

Numero de bandas:

$$N = \frac{Hp}{H}$$

H=0.44 (factor de corrección, fig 17-7 Shigley)

$$N = \frac{0.75}{0.44} = 1.7 \approx 2$$

El número de correas es igual a dos, para así garantizar la potencia mínima requerida para vencer la presión del gato sobre el muñón. Igualmente fue necesario sustituir el motor eléctrico por un moto-reductor, ya que el antiguo motor proporcionaba 1700 rpm y los nuevos cálculos indican la necesidad de tener una velocidad de aproximadamente 100 rpm en el eje. Por otro lado se calcularon nuevamente los diámetros de las poleas, obteniendo una relación de uno a dos que permite duplicar la velocidad obtenida por el moto-reductor.

Con estos cálculos y modificaciones se garantiza los parámetros requeridos para trabajar en régimen de lubricación límite.

-Coeficiente de fricción:

$$\begin{aligned}
 r &= 1.26 \text{ in} \\
 \mu &= 4.5 \times 10^{-6} \text{ reyn} \\
 P &= 1531.41 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= .0018 \text{ in} \\
 n &= 1.66 \text{ r.p.s.} \\
 \frac{L}{D} &= 1/2
 \end{aligned}$$

$$S_o = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\mu \cdot n}{P}\right)$$

$$S_o = 2.39 \times 10^{-3}$$

$$\frac{r}{c} \cdot f = 0.25 \text{ (según fig. 12.17 Shigley, 1990)}$$

$$f = 3.57 \times 10^{-3}$$

-Espesor de mínimo película:

$$\frac{h_0}{c} = \text{variable de espesor mínimo de película.}$$

$$\text{Con } S_o = 2.39 \times 10^{-3} \text{ y } \frac{L}{D} = 1/2, \text{ de la figura 12-14 Shigley}$$

$$\frac{h_0}{c} = 0.02,$$

$$\text{Con } c = .0018 \text{ in ,}$$

$$h_o = 0.02 * 0.0018 \text{ in}$$

$$h_o = 3.6 \times 10^{-5} \text{ in}$$

Dureza Vickers:

$$-P = \text{carga [Kgf]}$$

-d= diámetro de huella.

$$HV = \frac{1.854 * P}{d^2} ; \quad HV = \frac{1.854 * 0.3}{(0.038)^2}$$

$$HV = 385.18$$

Depuración de la Dureza Vickers.

Arco-Eléctrico Metcol.		Carga 300gr		
Mediciones	D1[mm]	D2[mm]	Promedio D[mm]	Dureza Vickers
1	0,0385	0,0375	0,03800	385,1801
2	0,0420	0,0385	0,04025	343,3201
3	0,0320	0,0305	0,03125	569,5488
4	0,0370	0,0310	0,03400	481,1419
5	0,0350	0,0300	0,03250	526,5799
6	0,0320	0,0285	0,03025	607,8273

Mediciones	Diferencia Dureza Vickers.	Dureza Vickers
1	485,59-385,18=100,4196	385,1801
2	458,59-343,32=142,2796	Se elimina
3	569,54-485,59=83,9491	569,5488
4	485,59-481,14=4,4578	481,1419
5	526,57-485,59=40,9802	526,5799
6	607,82-485,59=122,2277	607,8273

Se elimina el valor de la diferencia mas elevada, en este caso la segunda medición
Nuevo promedio Dureza Vickers=514,055

Mediciones	Diferencia
1	100,4196
2	-
3	83,9491
4	4,4578
5	40,9802
6	122,2277
Promedio=	70,4068

Valor eliminado menos el nuevo promedio	514,05- 343,32=170,7355
Valor a comparar	170,7355

Como el valor a comparar (170,7355) es mayor que el promedio de la diferencia (70,4068), no hay que introducir el valor eliminado, por lo tanto el promedio final de la Dureza Vickers es 514,055

Promedio Dureza Vickers	error	
	Arriba	abajo
514,055	93.7717	128.8756

Depuración de la Rugosidad Promedio.

Material: Arco Eléctrico Metco 1.

Muñón Número: 1.

Número de mediciones: 10.

0.37	0.24	0.70	0.27	0.46
0.65	0.69	0.57	0.21	0.22

Promedio de las diez mediciones: 0.438

Diferencia entre cada medición y el promedio: $0.438 - 0.37 = 0.068$

0.068	0.198	0.262	0.168	0.022
0.212	0.252	0.132	0.228	0.218

Se elimina el valor de la medición que tenga la diferencia mas elevada: 0.262 , perteneciente a la medición 0.70

Se promedia las nueve mediciones restantes y se promedian las nueve diferencias.

Nuevo promedio: 0.368

Promedio de las nueve diferencias: 0.1664

Valor eliminado menos el nuevo promedio: $0.70 - 0.368 = 0.332$

Valor a comparar: 0.332

Como el valor a comparar (0.332) es mayor que el promedio de la diferencia (0.1664), no hay que introducir el valor eliminado, por lo tanto el nuevo promedio de la Rugosidad Promedio es 0.368.

Promedio Rugosidad Promedio.	error	
	Arriba	abajo
0.368	0.322	0.148

NOTA: Como el error por arriba y el error por debajo son aún extremadamente elevados, hay que repetir la depuración hasta garantizar que los valores que se van a tomar para el promedio final sean confiables.

Tabla 11. Dureza Vickers de la Llama Subsónica (Metco 449P).

Carga 300gr

	D1	D2	Promedio	Dureza
Mediciones	[mm]	[mm]	D[mm]	Vickers
1	0.0310	0.0350	0.0330	510.7
2	0.0355	0.0315	0.0335	495.6
3	0.0390	0.0340	0.0365	417.5
4	0.0455	0.0420	0.0438	290.6
5	0.0390	0.0365	0.0378	390.3
6	0.0430	0.0400	0.0415	322.9

Depuración

	Dureza
Mediciones	Vickers
1	510.7
2	495.6
3	417.5
4	-
5	390.3
6	322.9

Dureza Vickers

427.4

ERROR

Dureza Vickers	ARRIBA	ABAJO
427.4	83.33	104.47

Tabla 12. Dureza Vickers del Arco Eléctrico (Metco 1).

Carga 300gr

Mediciones	D1 [mm]	D2 [mm]	Promedio D[mm]	Dureza Vickers
1	0.0385	0.0375	0.0380	385.2
2	0.0420	0.0385	0.0403	343.3
3	0.0320	0.0305	0.0313	569.5
4	0.0370	0.0310	0.0340	481.1
5	0.0350	0.0300	0.0325	526.6
6	0.0320	0.0285	0.0303	607.8

Depuración

Mediciones	Dureza Vickers
1	385.2
2	-
3	569.5
4	481.1
5	526.6
6	607.8

Dureza Vickers

514.1

ERROR

Dureza Vickers	ARRIBA	ABAJO
514.1	93.77	128.88

Tabla 13. Dureza Vickers del Arco Eléctrico (Acero AISI 420).

Carga 300gr

Mediciones	D1 [mm]	D2 [mm]	Promedio D[mm]	Dureza Vickers
1	0.0400	0.0355	0.0378	390.3
2	0.0410	0.0350	0.0380	385.2
3	0.0400	0.0340	0.0370	406.3
4	0.0425	0.0380	0.0403	343.3
5	0.0425	0.0365	0.0395	356.5
6	0.0400	0.0385	0.0393	361.0

Depuración

Mediciones	Dureza Vickers
1	390.3
2	385.2
3	406.3
4	-
5	356.5
6	361.0

Dureza Vickers

379.86

ERROR

Dureza Vickers	ARRIBA	ABAJO
379.9	26.43	36.54

Tabla 14. Dureza Vickers del High Velocity Oxi-fuel (Acero AISI 420)

Carga 300gr

Mediciones	D1 [mm]	D2 [mm]	Promedio D[mm]	Dureza Vickers
1	0.0345	0.0315	0.0330	510.7
2	0.0350	0.0325	0.0338	488.3
3	0.0350	0.0320	0.0335	495.6
4	0.0355	0.0315	0.0335	495.6
5	0.0350	0.0315	0.0333	503.1
6	0.0345	0.0295	0.0320	543.2

Depuración

Mediciones	Dureza Vickers
1	510.7
2	488.3
3	495.6
4	495.6
5	503.1
6	-

Dureza Vickers

498.7

ERROR

Dureza Vickers	ARRIBA	ABAJO
498.7	12.07	10.37

Tabla 15. Dureza Vickers Acero Templado (AISI 4140)

Carga 300gr

Mediciones	D1 [mm]	D2 [mm]	Promedio D[mm]	Dureza Vickers
1	0.0295	0.0355	0.0325	526.6
2	0.0305	0.0350	0.0328	518.6
3	0.0300	0.0340	0.0320	543.2
4	0.0300	0.0380	0.0340	481.1
5	0.0310	0.0365	0.0338	488.3

Depuración

Mediciones	Dureza Vickers
1	526.6
2	518.6
3	-
4	481.1
5	488.3

Dureza Vickers

503.6

ERROR

Dureza Vickers	ARRIBA	ABAJO
511.6	31.61	30.41

Tabla 16. Reporte de Parámetros del Ensayo
LLAMA SUBSÓNICA METCO 449P.
MUÑÓN 1

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	30.2	29.6	30.9	70
5	32.5	30.8	31.6	70
10*	33	28.5	33	70
15	34.3	31.8	35.5	70
20	39.1	31.5	36	70
25	42.2	31.4	33	70
30	43.5	33	36.2	70
35	43	30.8	36.3	70
40*	37	32.9	40	70
45	37.3	31.7	38.8	70
50	37	32.8	37.1	70
55	38	31.7	34.1	70
60	38.3	32.9	34.8	70

* El eje se detuvo en dos ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Tabla 17 Reporte de Parámetros del Ensayo
LLAMA SUBSÓNICA METCO 449P.
MUÑÓN 2

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	30.8	30.6	30.7	80
5	35.7	31.9	33.6	70
10	37.8	32.8	37.5	70
15	39.7	33.5	40.3	70
20	41.2	34.1	42.7	70
25	42.2	34.5	44.3	70
30	45.6	34.8	45.3	70
35	47	34.6	46.1	70
40	45.7	34.4	46.3	70
45	44.9	34.6	47.3	70
50	44.9	35.2	48.6	70
55	45.3	35.4	49.5	70
60	45.2	35.9	49.9	70

Tabla 18 Reporte de Parámetros del Ensayo
LLAMA SUBSÓNICA METCO 449P.
MUÑÓN 3

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	24	25.6	25.9	70
5	25.9	27.8	34	70
10*	29.4	29.5	46	70
15	31.7	29.5	40.5	70
20	32.5	29.6	42.7	70
25	33.6	30.2	44.6	70
30	34.2	30.6	46.2	70
35	34.7	31	48.2	70
40	35	31.5	51.9	70
45	35.3	31.9	54.4	70
50*	35.7	32.5	62.9	70
55*	36.5	33	64.6	70
60*	37.2	33.2	66	70

* El eje se detuvo en cuatro ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Tabla 19 Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO METCO 1.
MUÑÓN 1

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	32	26	27.3	75
5	33.6	27.7	28.4	75
10	32	30	31.4	75
15	32.3	31	36.3	70
20	32.6	32.5	42.2	75
25*	33.6	34.1	54	70
30	37	35.2	56.8	70
35*	39.4	36.2	62.2	70
40	42	36	64.3	70
45*	41	35.4	70	70
50	42.3	36.8	69.2	70
55	41	37.9	70.5	70
60	41.5	37.5	71.5	70

* El eje se detuvo en tres ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Tabla 20 Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO METCO 1.
MUÑÓN 2

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	30.6	25.3	27.8	75
5	31.7	26.4	28.3	75
10	39.5	27.2	29.7	70
15	30.3	27.8	31	70
20	29.5	28.7	33.7	70
25	29.3	29.3	38.2	70
30	35.8	29.8	38.3	75
35	31.7	30.8	42.4	75
40	39.2	31.4	40.5	75
45	38.7	32	42	75
50	35.5	33.2	45.5	75
55	34.4	33.6	47.5	75
60	35.1	34.2	48.2	75

Tabla 21 Reporte de Parámetros del Ensayo
 ARCO ELÉCTRICO METCO 1.
 MUÑÓN 3

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	24.2	21.3	25.7	90
5	25.4	22	26.7	90
10	26.9	22.6	26.3	80
15	28.7	23.2	26.8	75
20	31	23.8	27	75
25	31.3	24.1	27.9	70
30	33.4	24.5	28.7	75
35	33.5	24.6	29.5	75
40	31.6	24.6	30	75
45	32.7	24.8	30.4	75
50	32.3	25.1	30.6	72
55	36	25.4	30.7	72
60	34.8	25.5	30.9	72

Tabla 22 Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 1

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	21.5	19.1	20.3	90
5	24.7	22.1	21.5	85
10	28.6	25.5	26.7	80
15	34.5	28.9	33.3	80
20*	33.9	27.9	38.2	80
25*	32.2	29.3	51	75
30	31.6	31.2	52	75
35	33.6	31.2	52	75
40	34.3	31	50.7	75
45	35.6	30.8	48.9	75
50	36	30.6	46.9	75
55	35.7	30.2	45.1	75
60	35.3	29.9	43.6	75

* El eje se detuvo en dos ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Tabla 23 Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 2

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	28.5	25	26.3	80
5	29.3	25.4	27.4	80
10	34.8	26.5	30	80
15	41.6	27.7	31.8	80
20	32.3	28.5	32.9	80
25	32.3	29.1	34	80
30	30.9	29.3	35.5	80
35	35.7	30	35.4	80
40	32.4	30.6	36.4	80
45	44.3	30.4	36.8	80
50	40	31.1	39	80
55	37	31.7	39.6	80
60	35.4	32.5	39.7	80

Tabla 24 Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 3

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	32.1	29.7	29.7	80
5	36.4	31.2	32.5	75
10	37.8	32.2	35.8	75
15	39.1	32.6	38.6	75
20	40.2	32.8	41.4	70
25	41	33.3	43.3	70
30	41.3	33.9	44.8	70
35 *	41.7	33.6	47.6	70
40 *	42.3	33.4	47.6	70
45 *	41.6	33.9	50	70
50 *	43.1	33.2	50.3	70
55 *	44	34.8	55.6	70
60 *	42	33.8	56.5	70

* El eje se detuvo a partir del minuto 35 con intervalos de 5 minutos, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Tabla 25 Reporte de Parámetros del Ensayo
 HIGH VELOCITY OXI-FUEL ACERO INOXIDABLE AISI 420.
 MUÑÓN 1

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	37.2	26.3	27.6	85
5	38.1	27.6	28.2	85
10	40.1	28.5	30.8	80
15	42.3	29.6	34.2	80
20	43.3	30.2	36.2	70
25	44.5	30.7	37.9	70
30	45.1	31.1	38.9	70
35	45.7	31.4	39.6	70
40	45.2	32.8	41.8	70
45	46.3	32	42	70
50	44.5	32.2	42.4	70
55	43.3	32.4	42.5	70
60	44.6	32.6	43.1	70

Tabla 26 Reporte de Parámetros del Ensayo
HIGH VELOCITY OXI-FUEL ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 2

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	28.1	28.9	29	85
5	34.1	30.7	31.6	80
10	36.3	32.2	37.2	80
15	37.9	33.2	42.7	77.5
20	39	34	46	80
25	39.7	34.8	48.1	80
30	40.6	35.3	50	80
35	41.5	35.5	50.8	80
40	41.8	35.8	51.8	80
45	42.8	35.9	52.3	77.5
50	43	35.8	52.3	77.5
55	43.5	36	52.5	75
60	43.7	36.1	52.7	75

Tabla 27 Reporte de Parámetros del Ensayo
 HIGH VELOCITY OXI-FUEL ACERO INOXIDABLE AISI 420.
 MUÑÓN 3

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	25.1	26.1	30.1	90
5	26.7	27.5	31	90
10	28.5	28.6	37.4	80
15	32.5	29.6	37.5	80
20	35.3	29.8	39.6	70
25	32.7	30	42.8	70
30	31.4	30.8	41.6	70
35	32	31.2	44.2	70
40	31.3	31.5	42.3	70
45	31.4	31.4	41.4	70
50	32.5	30.9	41.4	70
55	33.8	31.2	42.8	70
60	33.2	31.7	41	70

Tabla 28 Reporte de Parámetros del Ensayo
 TEMPLE.
 MUÑÓN 1.

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	27	28.3	31.6	80
5	28	29.5	43.2	75
10	32.5	29.7	51.9	70
15	30.6	29.9	54.8	70
20	40.7	30.1	55.4	70
25	45	31	50.7	70
30	45	31.5	59.6	70
35	44.7	31.7	61.3	70
40*	49.9	32	60	70
45	42	32.3	63.1	70
50	43.3	32.5	60	70
55	44.8	32.6	61.5	70
60*	39.3	32.1	60	70

* El eje se detuvo en dos ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

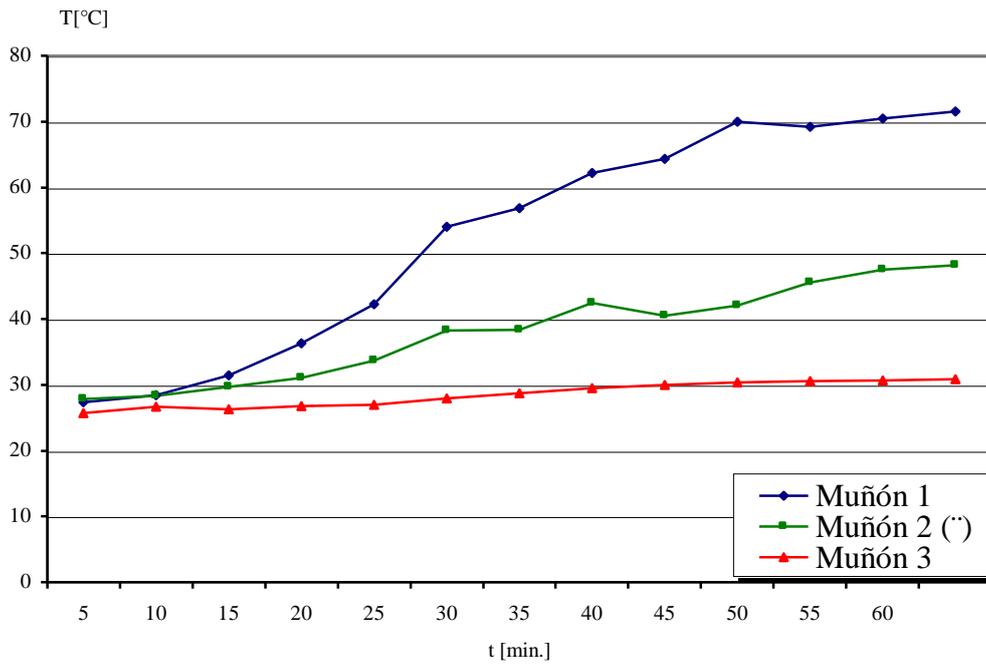


Figura 30. Temperaturas de Trabajo Arco Eléctrico (Metco 1).

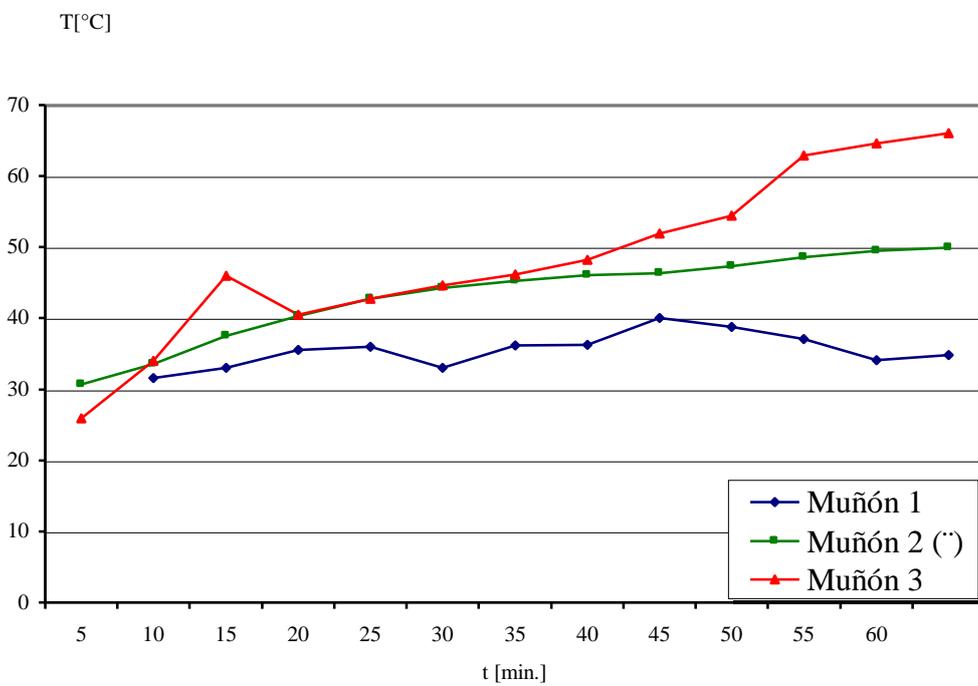


Figura 31. Temperaturas de Trabajo Llama Subsónica (Metco 449P).

(") Muñones maquinados con la piedra de Óxido de Aluminio.

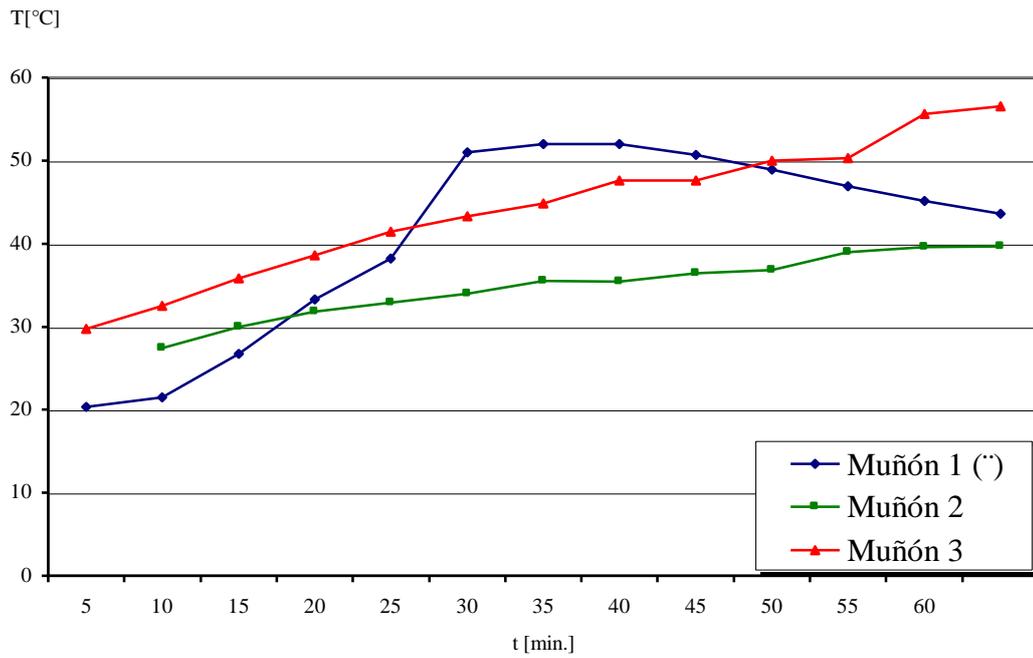


Figura 32. Temperaturas de Trabajo Arco Eléctrico (Acero Inoxidable AISI 420).

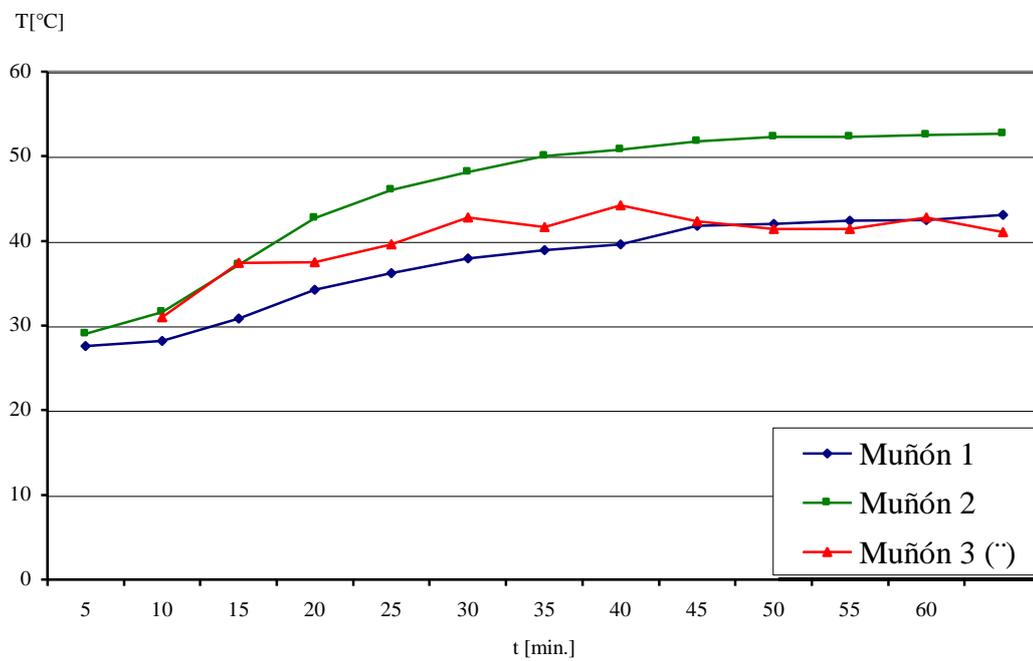


Figura 33. Temperaturas de Trabajo HVOF (Acero Inoxidable AISI 420).

(°) Muñones maquinados con la piedra de Óxido de Aluminio.

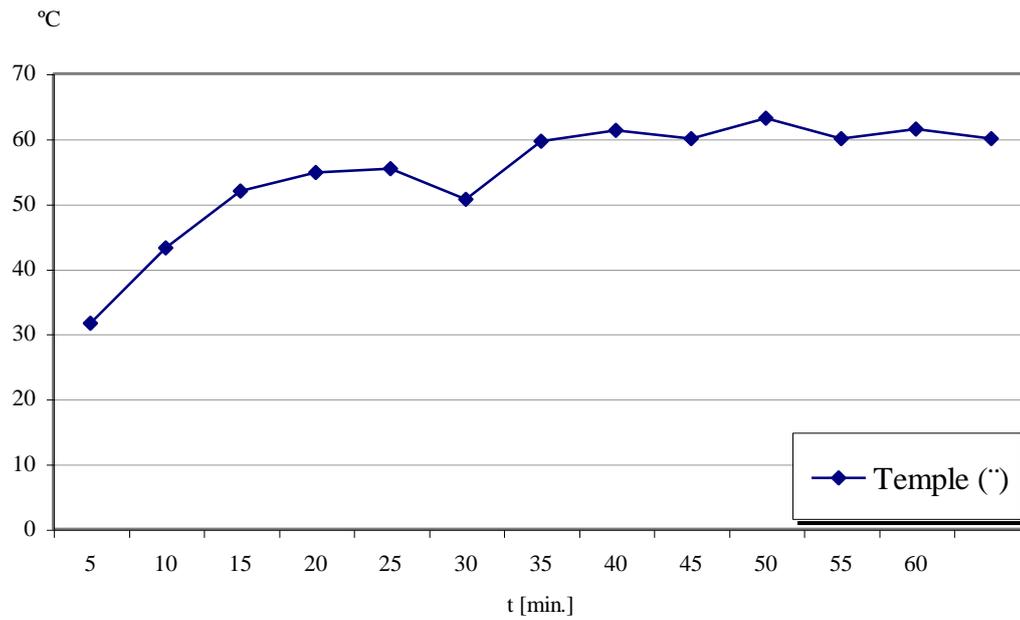


Figura 34. Temperaturas de Trabajo del Temple
(Acero AISI 4140).

(°) Muñones maquinados con la piedra de Óxido de Aluminio.

Tabla 11. Dureza Vickers de la Llama Subsónica (Metco 449P).

Carga 300gr

Mediciones	D1 [mm]	D2 [mm]	Promedio D[mm]	Dureza Vickers
1	0,0310	0,0350	0,0330	510,7
2	0,0355	0,0315	0,0335	495,6
3	0,0390	0,0340	0,0365	417,5
4	0,0455	0,0420	0,0438	290,6
5	0,0390	0,0365	0,0378	390,3
6	0,0430	0,0400	0,0415	322,9

Depuración

Mediciones	Dureza Vickers
1	510,7
2	495,6
3	417,5
4	-
5	390,3
6	322,9

Dureza Vickers

427,4

ERROR

Dureza Vickers	ARRIBA	ABAJO
427,4	83,33	104,47

Tabla 7. Rugosidad Máxima (R_y) en los muñones antes de ser ensayadas.

Material	Muñón	Mediciones[mm]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	2,16	2,65	7,57	3,23	5,08	6,97	5,76	4,65	1,97	2,3
Arco-Eléc.	2 *	2,09	2,92	3,45	2,55	5,7	3,58	3,99	9,74	4,13	4,44
Metco 1	3	1,77	1,75	6,75	1,97	3,13	5,35	6,21	3,52	5,75	2,71
	1	4,45	4,62	4,63	4,65	6,7	6,78	5,63	4,33	4,63	5,2
Metco 449P	2 *	3,68	4,98	6,3	5,49	3,68	3,53	4,69	2,91	4,24	5,22
	3	8,03	7,06	6,44	8,09	8,45	6,37	8,33	8,43	7,9	6,68
	1	2,44	3,76	3,22	2,44	1,71	2,95	1,58	2,09	1,84	1,76
H.V.O.F.	2	3,05	2,04	3,02	2,4	2,51	3,17	3,42	2,4	2	3,18
420	3 *	2,79	1,95	1,74	2,03	2,51	2,62	2,15	5,28	1,21	2,13
	1 *	3,91	7,53	3,5	10,56	3,37	1,86	1,64	4,79	5,57	8,83
Arco-Eléc	2	4,15	1,48	4,92	9,7	8,72	4,86	4,17	3,38	3,58	3,01
420	3	4,16	6,26	4,84	5,42	6,98	3,1	6,38	4,68	5,62	4,73
Temple	1 *	2,79	2,05	1,83	2,86	1,73	1,81	3,38	2,1	3,08	2,47

*Muñones pulidos con piedra gris (Óxido de Aluminio).

Tabla 9. Rugosidad Máxima (Ry) en los muñones después de ser ensayadas.

Material	Muñón	Mediciones[um]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arco-Eléc. Metco 1	1	5,19	6,17	8,21	4,54	2,05	2,67	3,59	2,24	9,1	7,45
	2 *	2,72	4,15	2,36	1,83	2,64	1,71	4,07	3,4	6,25	4,51
	3	3,42	6,63	3,59	3,54	8,08	2,5	3,22	3,55	3,69	3,87
Metco 449P	1	6,79	5,27	8,55	3,61	6,79	5,56	6,1	6,8	6,85	7,35
	2 *	3,92	7,99	7,43	3,79	7,91	7,4	10,82	6,89	6,29	5,15
	3	8,43	6,35	7,45	8,35	8,87	6,81	7,52	6,44	8,79	5,98
H.V.O.F. 420	1	2,15	3,62	2,77	3,88	2,99	4,17	2,98	3,41	3,45	3,56
	2	6,02	2,36	4,97	4,74	2,46	3,39	2,64	4,97	3,07	6,97
	3 *	5,49	3,68	5,84	3,59	7,79	6,47	2,41	6,11	3,55	5,01
Arco-Eléc 420	1 *	2,14	6,69	6,04	4,45	8,79	6,44	6,85	9,34	13,46	10,44
	2	4,87	6,48	4,7	2,91	15,12	7,81	2,04	7,2	5,52	6,22
	3	2,78	9,66	3,17	9,52	4,54	14,53	10,92	3,49	5,79	4,43
Temple	1 *	7,66	5,98	7,67	6,93	6,57	6,19	7,47	7,28	5,3	6,47

*Muñones pulidos con piedra gris (Óxido de Aluminio).

Tabla 8. Rugosidad Máxima (RY) Depurada en los muñones antes de ser ensayadas.

Material	Muñón	Mediciones[mm]										Promedio
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	1	2,16	2,65	-	3,23	-	-	-	4,65	-	2,3	2,998
Arco-Eléc.	2 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metco 1	3	1,77	1,75	-	1,97	3,13	-	-	3,52	-	2,71	2,475
	1	4,45	4,62	4,63	4,65	-	-	5,63	4,33	4,63	5,2	4,768
Metco 449P	2 *	3,68	4,98	-	5,49	3,68	3,53	4,69	-	4,24	5,22	4,439
	3	8,03	7,06	-	8,09	8,45	-	8,33	8,43	7,9	6,68	7,871
	1	2,44	-	3,22	2,44	1,71	2,95	-	2,09	1,84	1,76	2,306
H.V.O.F.	2	3,05	2,04	3,02	2,4	2,51	3,17	-	2,4	-	3,18	2,721
420	3 *	2,79	1,95	1,74	2,03	2,51	2,62	2,15	-	-	2,13	2,240
	1 *	3,91	-	3,5	-	3,37	1,86	1,64	-	-	-	2,856
Arco-Eléc	2	4,15	-	4,92	-	-	4,86	4,17	3,38	3,58	3,01	4,010
420	3	4,16	6,26	4,84	5,42	-	-	6,38	4,68	5,62	4,73	5,261
Temple	1 *	2,79	2,05	1,83	2,86	-	1,81	-	2,1	3,08	2,47	2,374

*Muñones pulidos con piedra gris (Óxido de Aluminio).

El muñón número 2 del Arco Eléctrico Metco 1 fue eliminada por presentar un comportamiento anormal.

Tabla 10. Rugosidad Máxima (RY) Depurada en los muñones después de ser ensayadas.

Material	Muñón	Mediciones[um]										Promedio
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Arco-Eléc. Metco 1	1	5,19	6,17	-	4,54	-	2,67	3,59	-	-	-	4,432
	2 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	3,42		3,59	3,54	-	2,5	3,22	3,55	3,69	3,87	3,423
Metco 449P	1	6,79	5,27	-	-	6,79	5,56	6,1	6,8	6,85	7,35	6,439
	2 *	-	7,99	7,43	-	7,91	7,4	-	6,89	6,29	5,15	7,009
	3	8,43	6,35	7,45	8,35	8,87	6,81	7,52	6,44	8,79	5,98	7,499
H.V.O.F. 420	1	-	3,62	2,77	3,88	2,99	-	2,98	3,41	3,45	3,56	3,333
	2	-	2,36	4,97	4,74	2,46	3,39	2,64	4,97	3,07	-	3,575
	3 *	5,49	3,68	5,84	3,59	-	-	-	6,11	3,55	5,01	4,753
Arco-Eléc 420	1 *	-	6,69	6,04	-	8,79	6,44	6,85	9,34	-	-	7,358
	2	4,87	6,48	4,7	-	-	-	-	7,2	5,52	6,22	5,832
	3	-	9,66	-	9,52	-	-	-	3,49	5,79	4,43	6,578
Temple	1 *	7,66	5,98	-	6,93	6,57	6,19	7,47	7,28	-	6,47	6,819

*Muñones pulidos con piedra gris (Óxido de Aluminio).

El muñón número 2 del Arco Eléctrico Metco 1 fue eliminada por presentar un comportamiento anormal.

Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
HIGH VELOCITY OXI-FUEL ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 1

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	37,2	26,3	27,6	85
5	38,1	27,6	28,2	85
10	40,1	28,5	30,8	80
15	42,3	29,6	34,2	80
20	43,3	30,2	36,2	70
25	44,5	30,7	37,9	70
30	45,1	31,1	38,9	70
35	45,7	31,4	39,6	70
40	45,2	32,8	41,8	70
45	46,3	32	42	70
50	44,5	32,2	42,4	70
55	43,3	32,4	42,5	70
60	44,6	32,6	43,1	70

H.V.O.F. 420

Muñón

1.

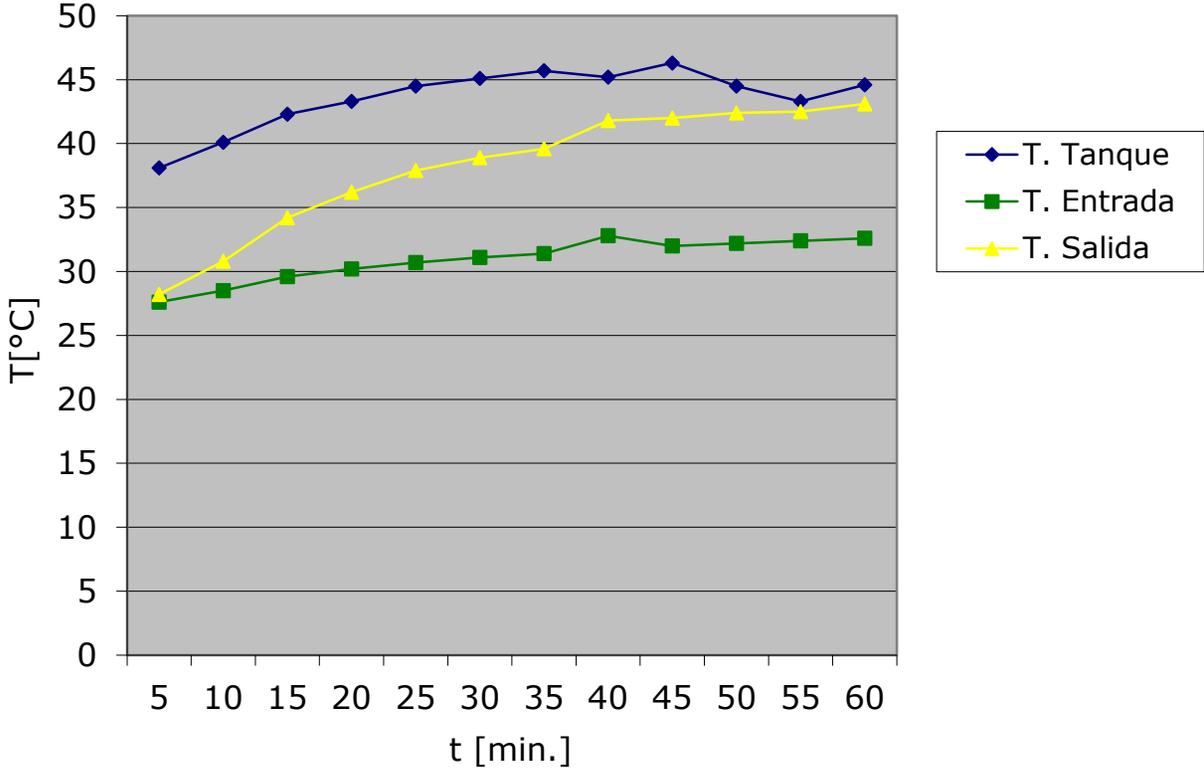


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
HIGH VELOCITY OXI-FUEL ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 2

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	28,1	28,9	29	85
5	34,1	30,7	31,6	80
10	36,3	32,2	37,2	80
15	37,9	33,2	42,7	77,5
20	39	34	46	80
25	39,7	34,8	48,1	80
30	40,6	35,3	50	80
35	41,5	35,5	50,8	80
40	41,8	35,8	51,8	80
45	42,8	35,9	52,3	77,5
50	43	35,8	52,3	77,5
55	43,5	36	52,5	75
60	43,7	36,1	52,7	75

H.V.O.F. 420

Muñón

2.

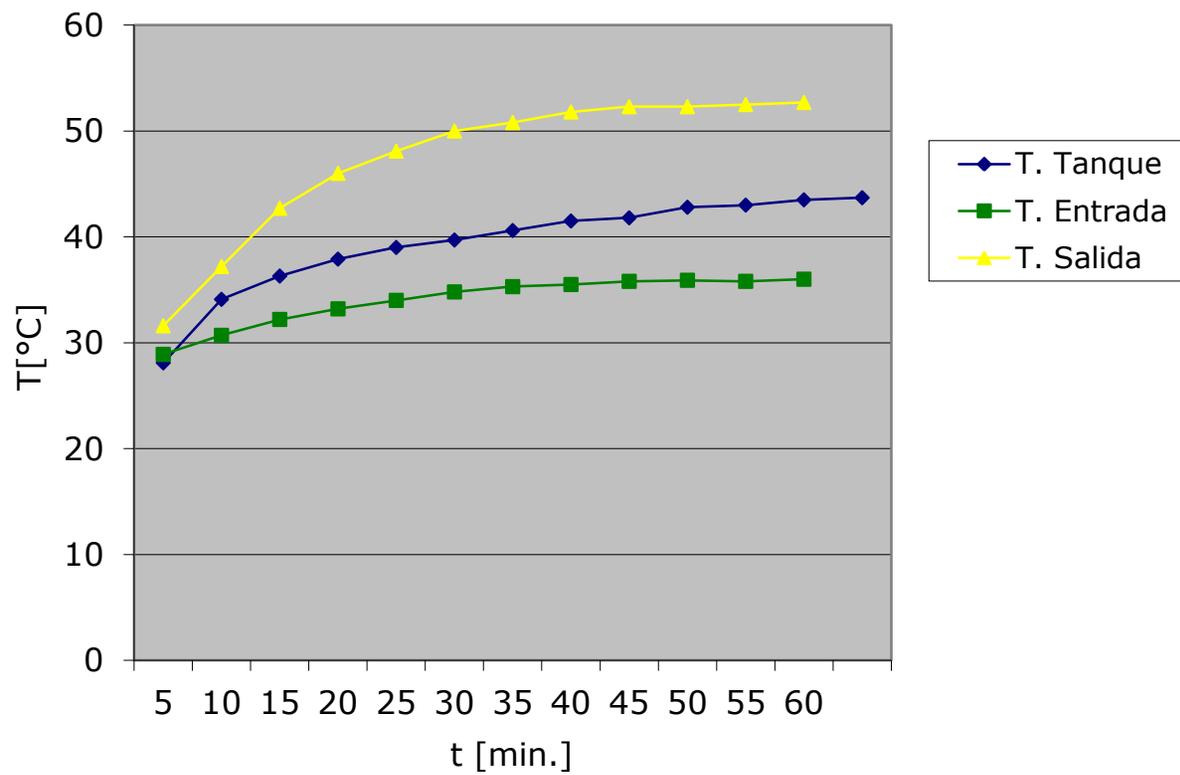


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
HIGH VELOCITY OXI-FUEL ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 3

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	25,1	26,1	30,1	90
5	26,7	27,5	31	90
10	28,5	28,6	37,4	80
15	32,5	29,6	37,5	80
20	35,3	29,8	39,6	70
25	32,7	30	42,8	70
30	31,4	30,8	41,6	70
35	32	31,2	44,2	70
40	31,3	31,5	42,3	70
45	31,4	31,4	41,4	70
50	32,5	30,9	41,4	70
55	33,8	31,2	42,8	70
60	33,2	31,7	41	70

H.V.O.F. 420

Muñón

3.

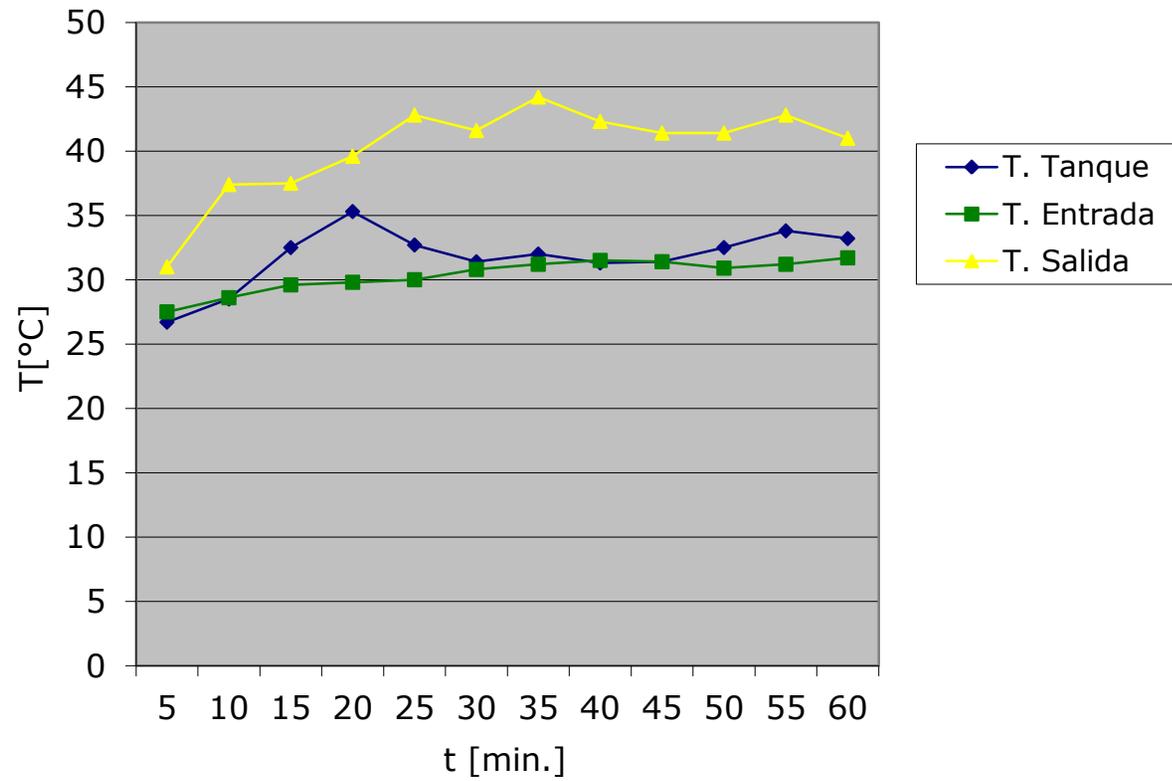


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
 LLAMA SUBSÓNICA R-10.
 MUÑÓN 3

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	30,2	29,6	30,9	70
5	32,5	30,8	31,6	70
10*	33	28,5	33	70
15	34,3	31,8	35,5	70
20	39,1	31,5	36	70
25	42,2	31,4	33	70
30	43,5	33	36,2	70
35	43	30,8	36,3	70
40*	37	32,9	40	70
45	37,3	31,7	38,8	70
50	37	32,8	37,1	70
55	38	31,7	34,1	70
60	38,3	32,9	34,8	70

* El eje se detuvo en dos ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

R-10 Muñón 1.

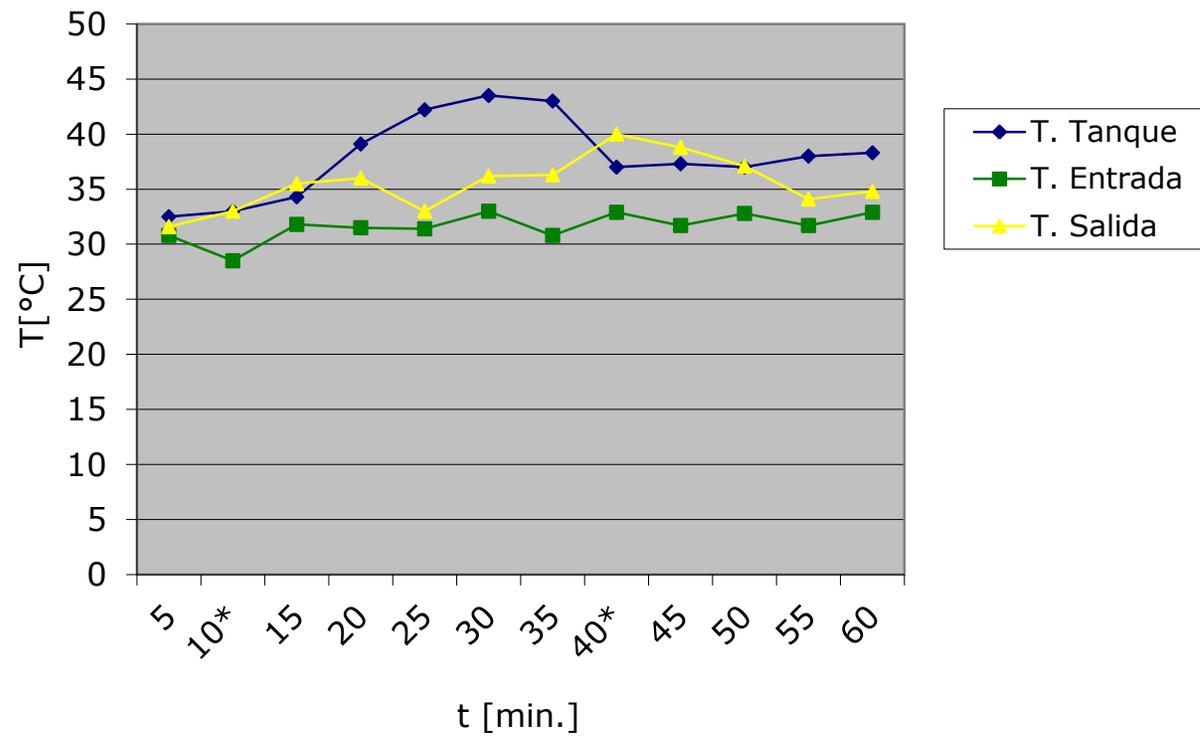


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
LLAMA SUBSÓNICA R-10.
MUÑÓN 3

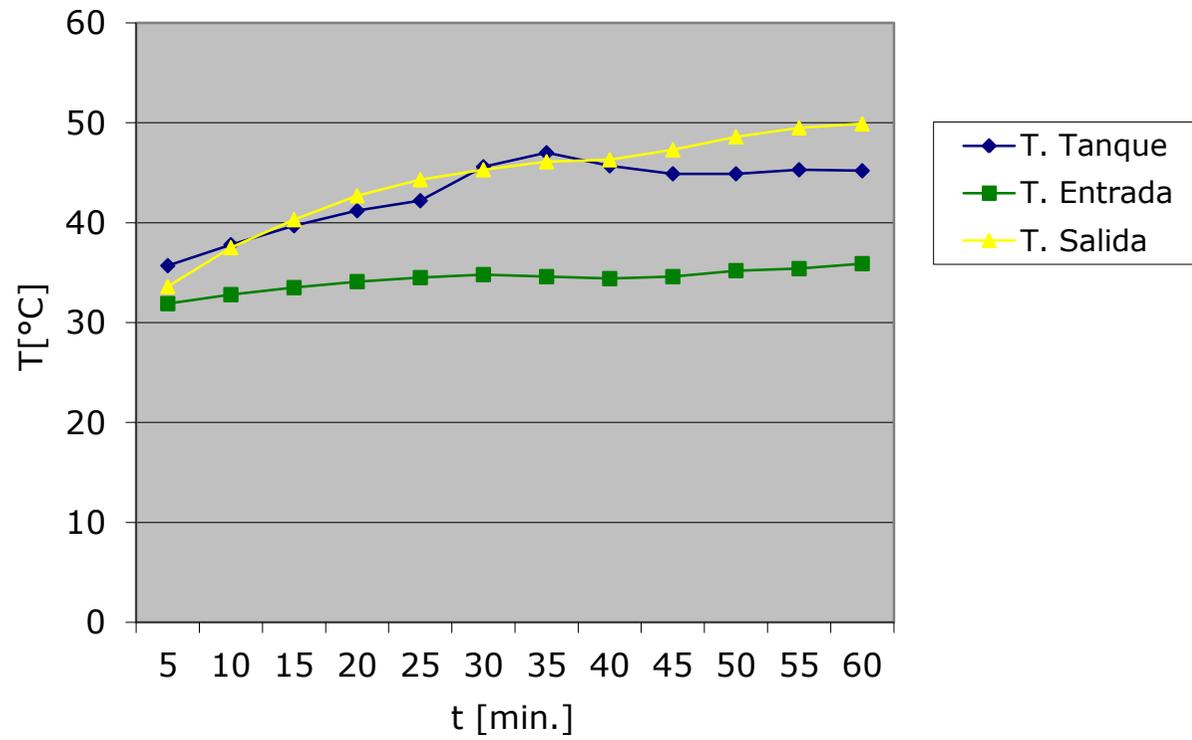
Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	30,8	30,6	30,7	80
5	35,7	31,9	33,6	70
10	37,8	32,8	37,5	70
15	39,7	33,5	40,3	70
20	41,2	34,1	42,7	70
25	42,2	34,5	44,3	70
30	45,6	34,8	45,3	70
35	47	34,6	46,1	70
40	45,7	34,4	46,3	70
45	44,9	34,6	47,3	70
50	44,9	35,2	48,6	70
55	45,3	35,4	49,5	70
60	45,2	35,9	49,9	70

R-10 Muñón 2.



R-10

Muñón 3.

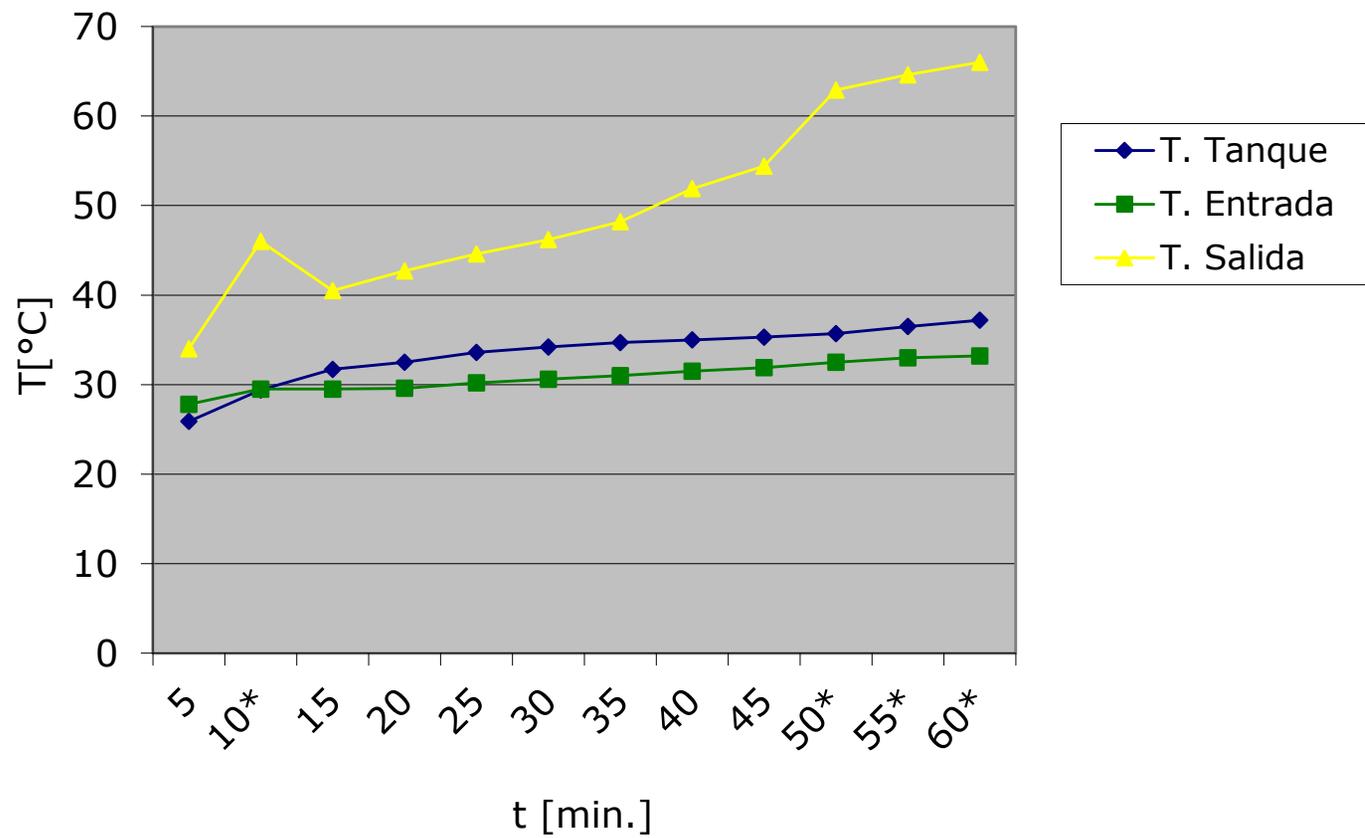


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
 ARCO ELÉCTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.
 MUÑÓN 1

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	21,5	19,1	20,3	90
5	24,7	22,1	21,5	85
10	28,6	25,5	26,7	80
15	34,5	28,9	33,3	80
20*	33,9	27,9	38,2	80
25*	32,2	29,3	51	75
30	31,6	31,2	52	75
35	33,6	31,2	52	75
40	34,3	31	50,7	75
45	35,6	30,8	48,9	75
50	36	30,6	46,9	75
55	35,7	30,2	45,1	75
60	35,3	29,9	43,6	75

40,784615

34,875

44,130769

39,930128

* El eje se detuvo en dos ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

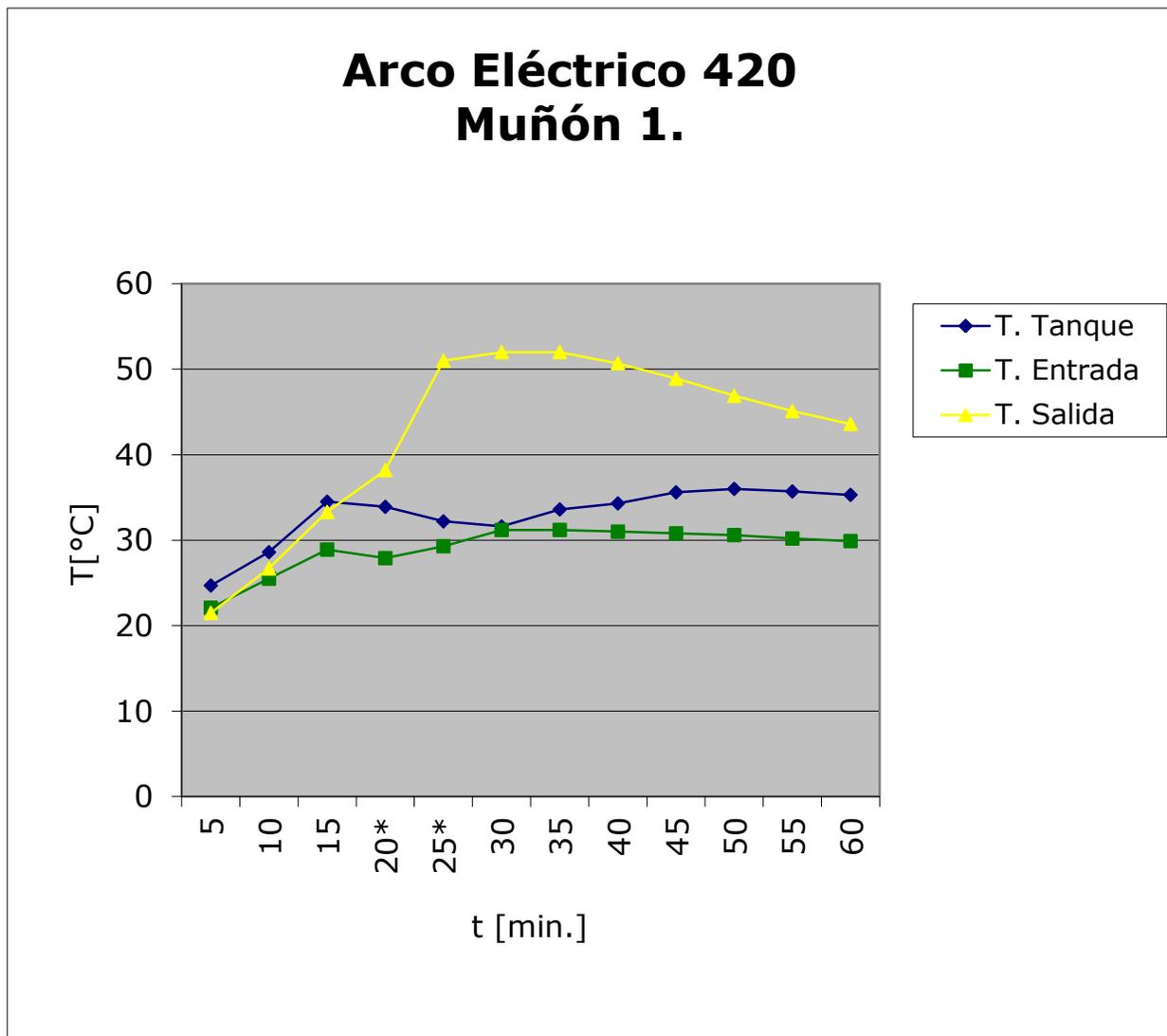


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.
MUÑÓN 2

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	28,5	25	26,3	80
5	29,3	25,4	27,4	80
10	34,8	26,5	30	80
15	41,6	27,7	31,8	80
20	32,3	28,5	32,9	80
25	32,3	29,1	34	80
30	30,9	29,3	35,5	80
35	35,7	30	35,4	80
40	32,4	30,6	36,4	80
45	44,3	30,4	36,8	80
50	40	31,1	39	80
55	37	31,7	39,6	80
60	35,4	32,5	39,7	80

Arco Eléctrico 420 Muñón 2.

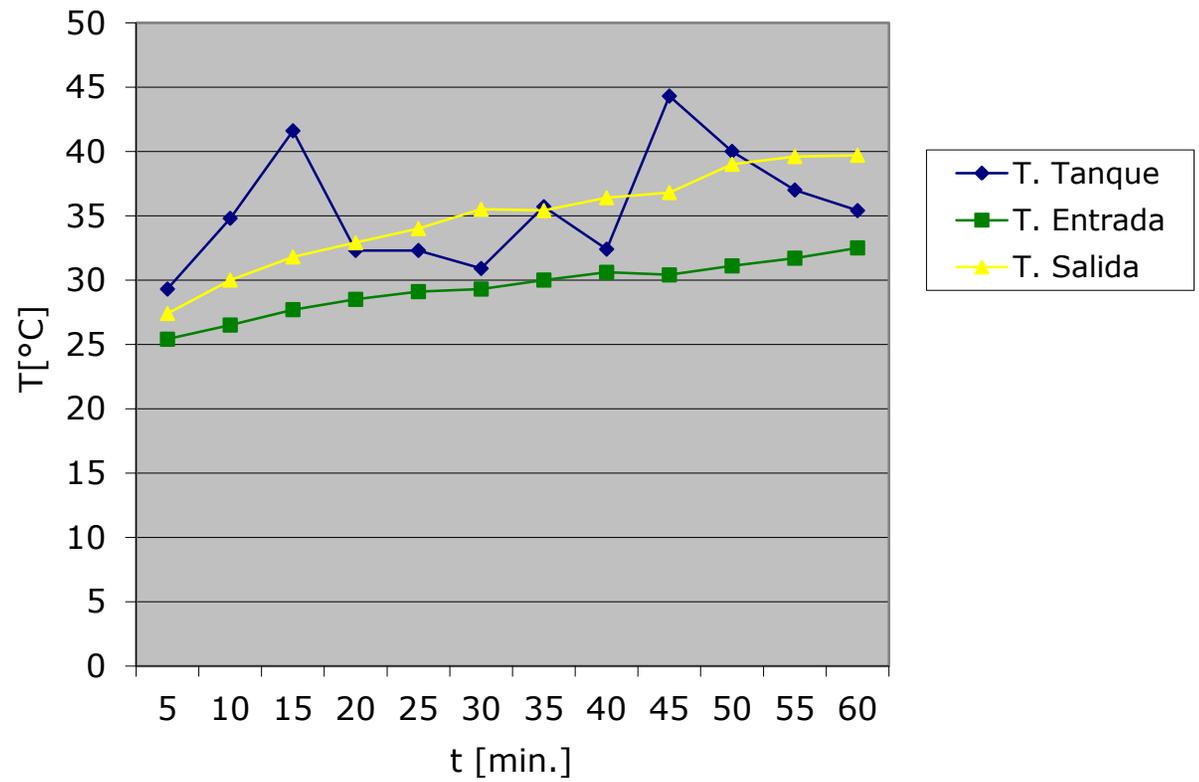


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
 ARCO ELÉCTRICO ACERO INOXIDABLE AISI 420.
 MUÑÓN 3

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	32,1	29,7	29,7	80
5	36,4	31,2	32,5	75
10	37,8	32,2	35,8	75
15	39,1	32,6	38,6	75
20	40,2	32,8	41,4	70
25	41	33,3	43,3	70
30	41,3	33,9	44,8	70
35 *	41,7	33,6	47,6	70
40 *	42,3	33,4	47,6	70
45 *	41,6	33,9	50	70
50 *	43,1	33,2	50,3	70
55 *	44	34,8	55,6	70
60 *	42	33,8	56,5	70

* El eje se detuvo a partir del minuto 35 con intervalos de 5 minutos, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Arco Eléctrico 420 Muñón 3.

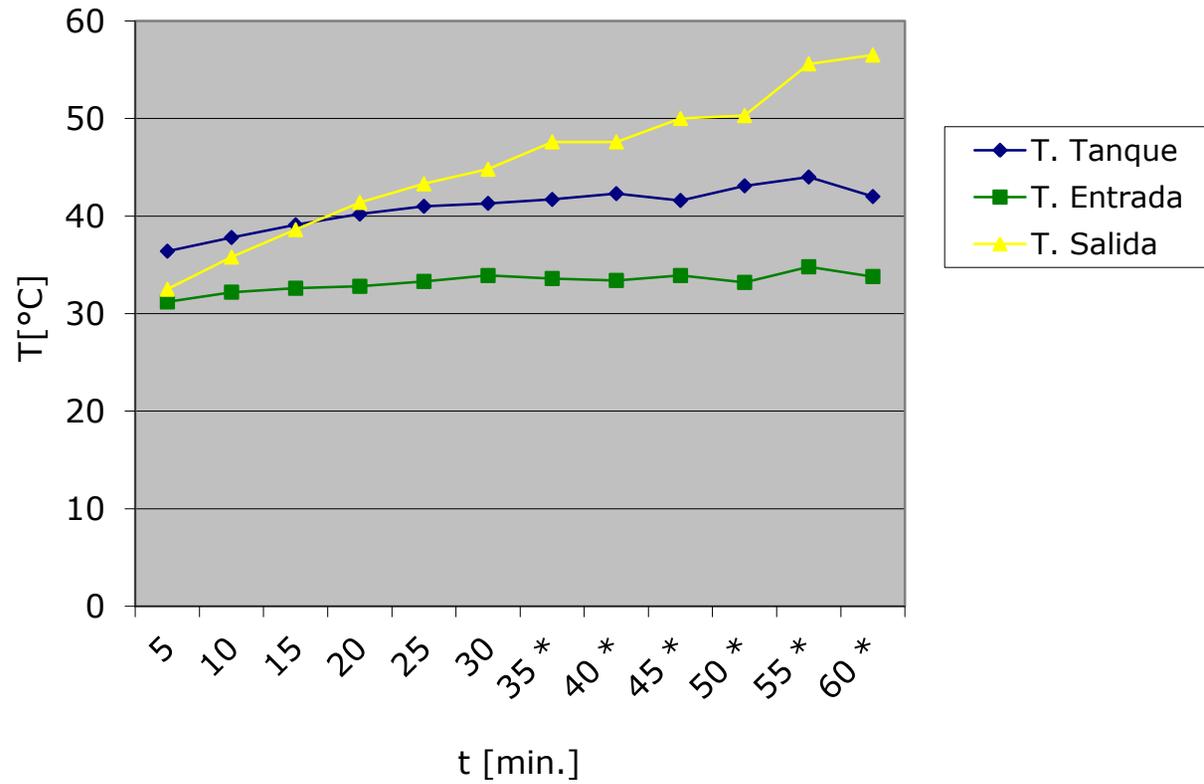


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO METCO 1.
MUÑÓN 1

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	32	26	27,3	75
5	33,6	27,7	28,4	75
10	32	30	31,4	75
15	32,3	31	36,3	70
20	32,6	32,5	42,2	75
25*	33,6	34,1	54	70
30	37	35,2	56,8	70
35*	39,4	36,2	62,2	70
40	42	36	64,3	70
45*	41	35,4	70	70
50	42,3	36,8	69,2	70
55	41	37,9	70,5	70
60	41,5	37,5	71,5	70

* El eje se detuvo en tres ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Arco Eléctrico Metco 1 Muñón 1.

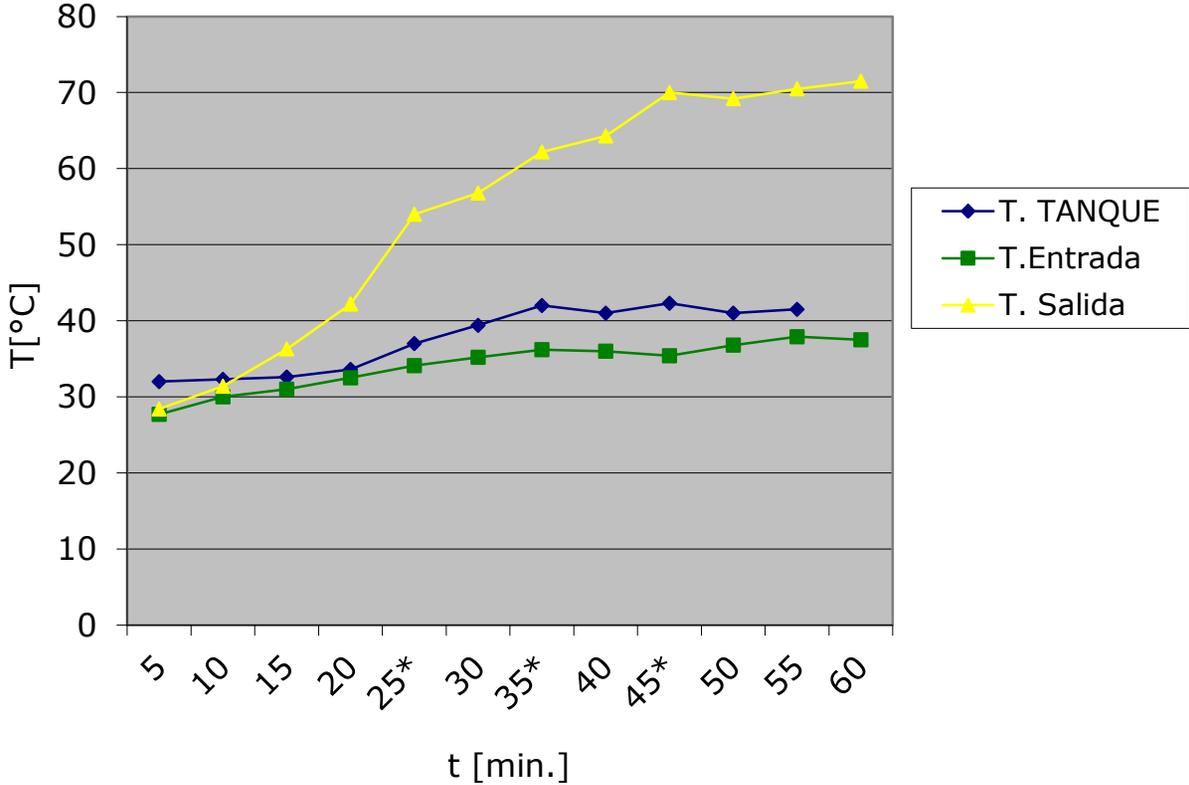


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO METCO 1.
MUÑÓN 2

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	30,6	25,3	27,8	75
5	31,7	26,4	28,3	75
10	39,5	27,2	29,7	70
15	30,3	27,8	31	70
20	29,5	28,7	33,7	70
25	29,3	29,3	38,2	70
30	35,8	29,8	38,3	75
35	31,7	30,8	42,4	75
40	39,2	31,4	40,5	75
45	38,7	32	42	75
50	35,5	33,2	45,5	75
55	34,4	33,6	47,5	75
60	35,1	34,2	48,2	75

Arco Eléctrico Metco 1 Muñón 2.

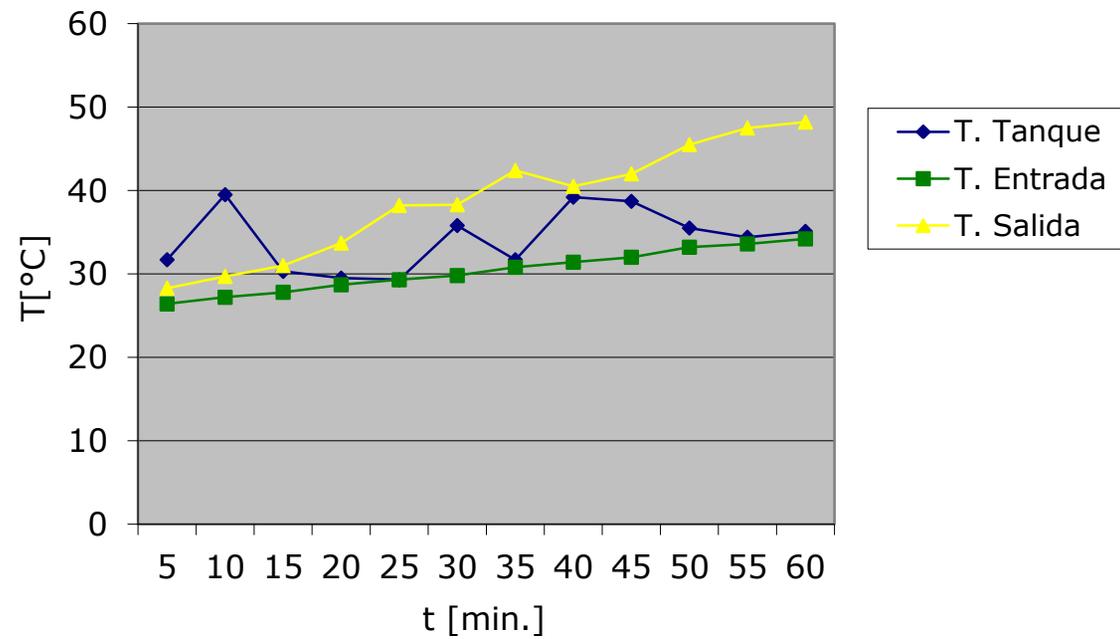


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
ARCO ELÉCTRICO METCO 1.
MUÑÓN 3

Piedra: Carburo de Silicio (Piedra Verde).

n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	24,2	21,3	25,7	90
5	25,4	22	26,7	90
10	26,9	22,6	26,3	80
15	28,7	23,2	26,8	75
20	31	23,8	27	75
25	31,3	24,1	27,9	70
30	33,4	24,5	28,7	75
35	33,5	24,6	29,5	75
40	31,6	24,6	30	75
45	32,7	24,8	30,4	75
50	32,3	25,1	30,6	72
55	36	25,4	30,7	72
60	34,8	25,5	30,9	72

Arco Eléctrico Metco 1 Muñón 3.

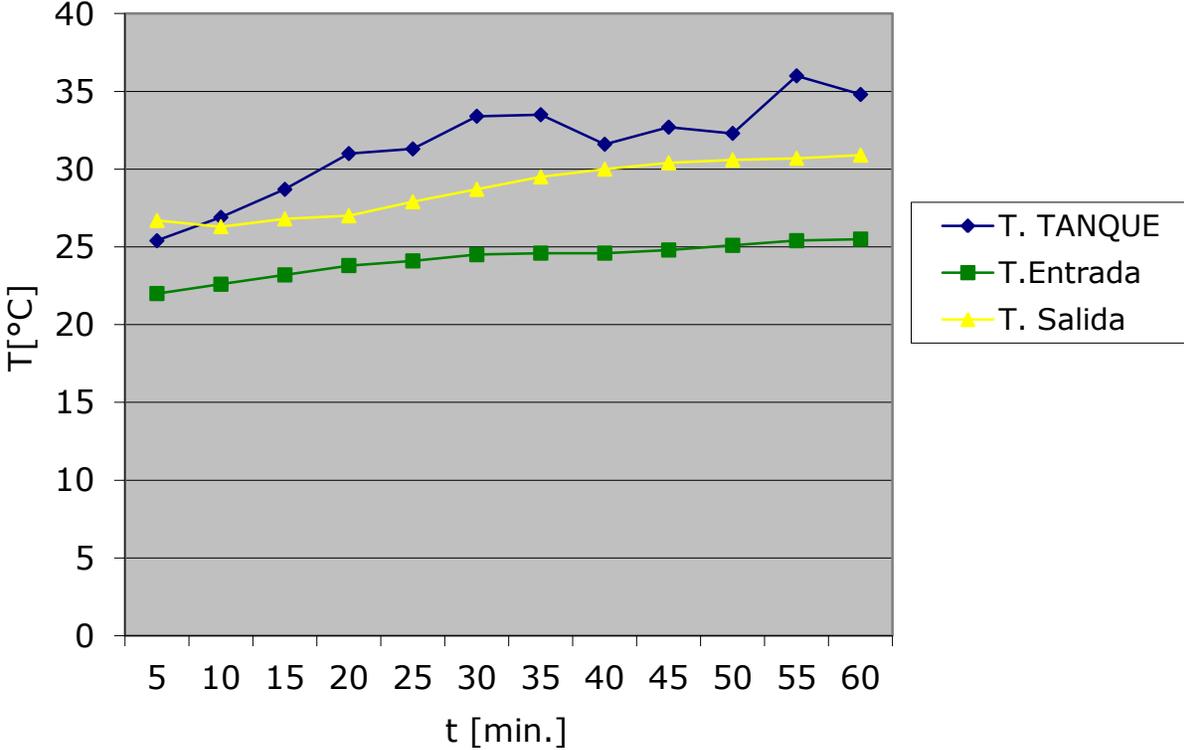


Fig. Reporte de Parámetros del Ensayo
LLAMA SUBSÓNICA R-10.
MUÑÓN 3

Piedra: Óxido de Aluminio (Piedra Gris).

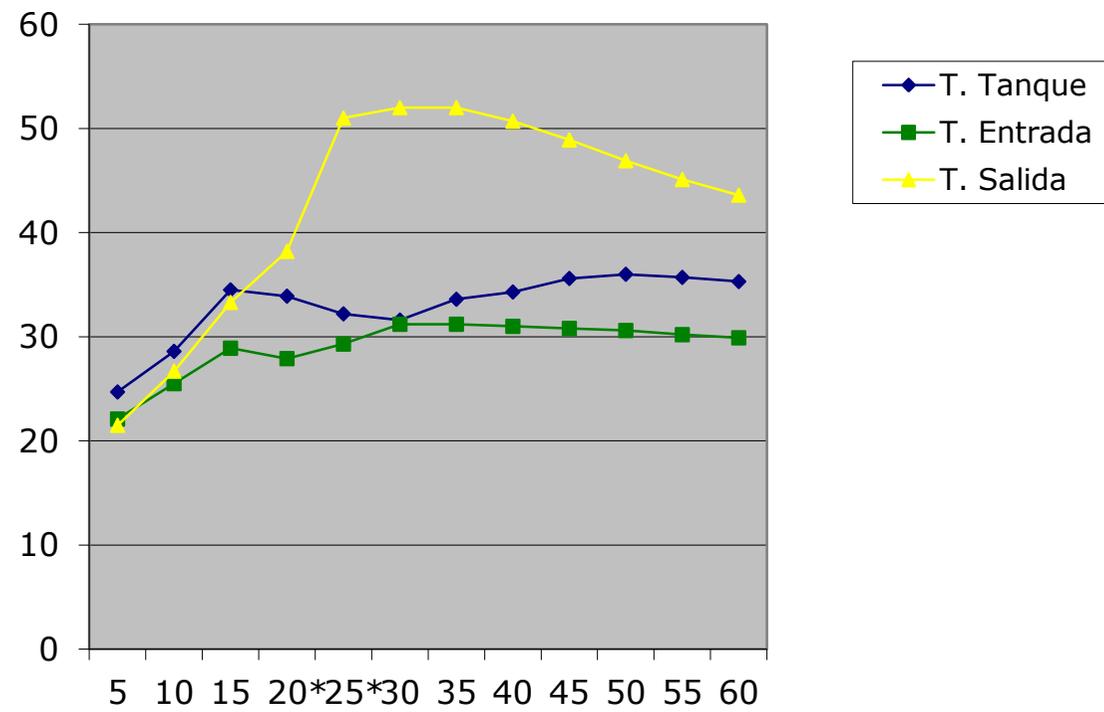
n: 100 r.p.m.

Presión sobre el cojinete: 1532.22 PSI.

t [min.]	T.tanq[°C]	T.entra[°C]	T.salida[°C]	P.Aceite[PSI]
0	27	28,3	31,6	80
5	28	29,5	43,2	75
10	32,5	29,7	51,9	70
15	30,6	29,9	54,8	70
20	40,7	30,1	55,4	70
25	45	31	50,7	70
30	45	31,5	59,6	70
35	44,7	31,7	61,3	70
40*	49,9	32	60	70
45	42	32,3	63,1	70
50	43,3	32,5	60	70
55	44,8	32,6	61,5	70
60*	39,3	32,1	60	70

* El eje se detuvo en dos ocasiones, teniendo que apagar el motor y disminuir la presión en el muñón para luego continuar con el ensayo aumentando rápidamente la presión del gato hasta 7000 PSI.

Arco Eléctrico 420 Muñón 1.



kV:25.0 Tilt:0.0 Take-off:35.0 Det Type:UTW Res:146 Tc:40
FS : 2049 Lsec : 45 12-Feb-1 15:28:22

**EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized**

Element	Wt %	At %
O K	9.42	24.29
AlK	12.44	19.01
MoL	3.20	1.37
FeK	74.94	55.33
Total	100.00	100.00

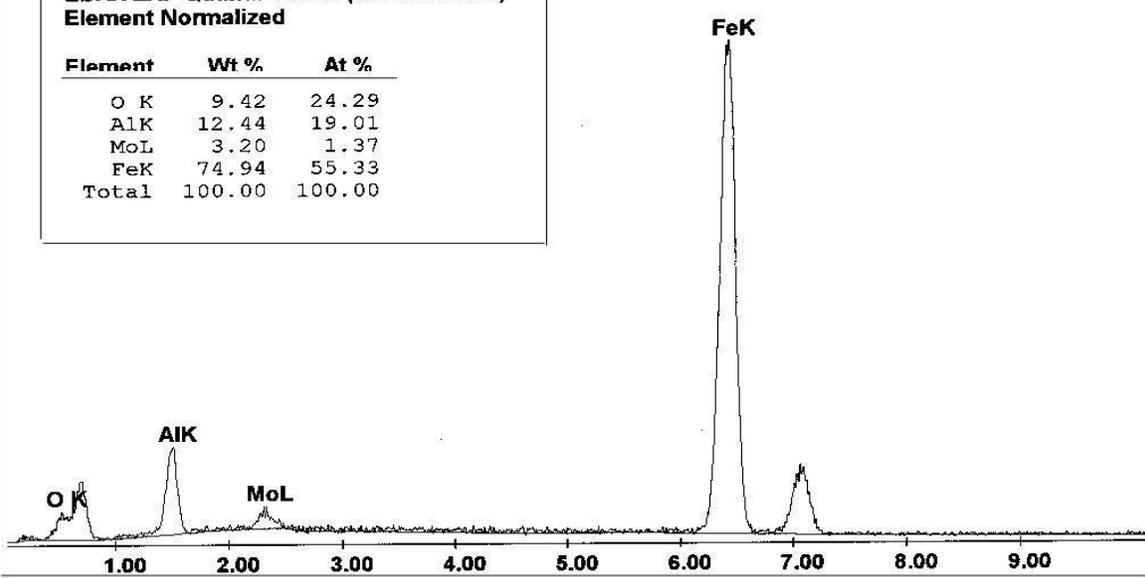


Fig. EDS METCO 449P.

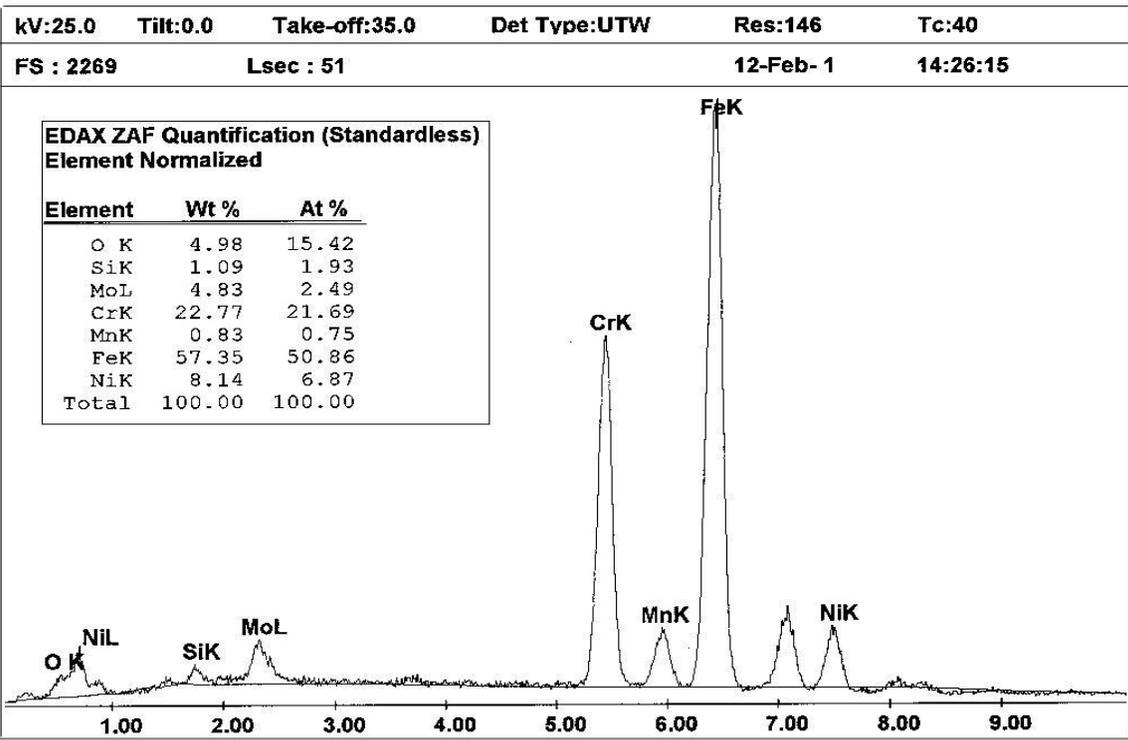


Fig. EDS METCO 1.

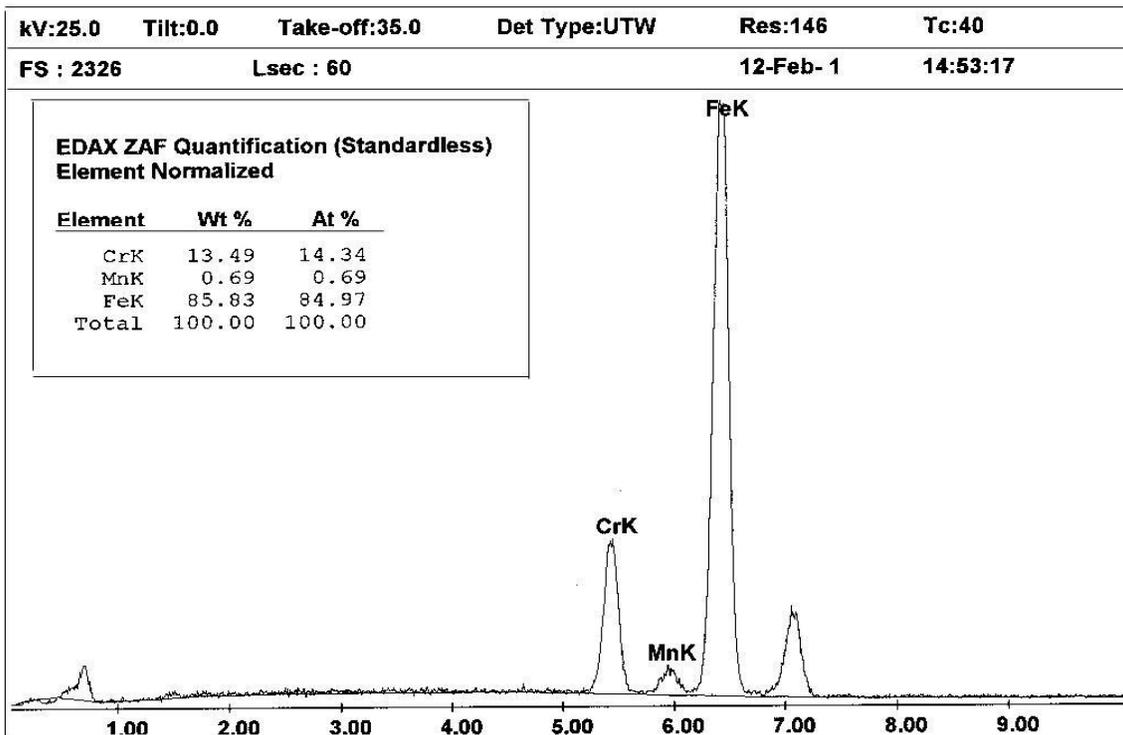
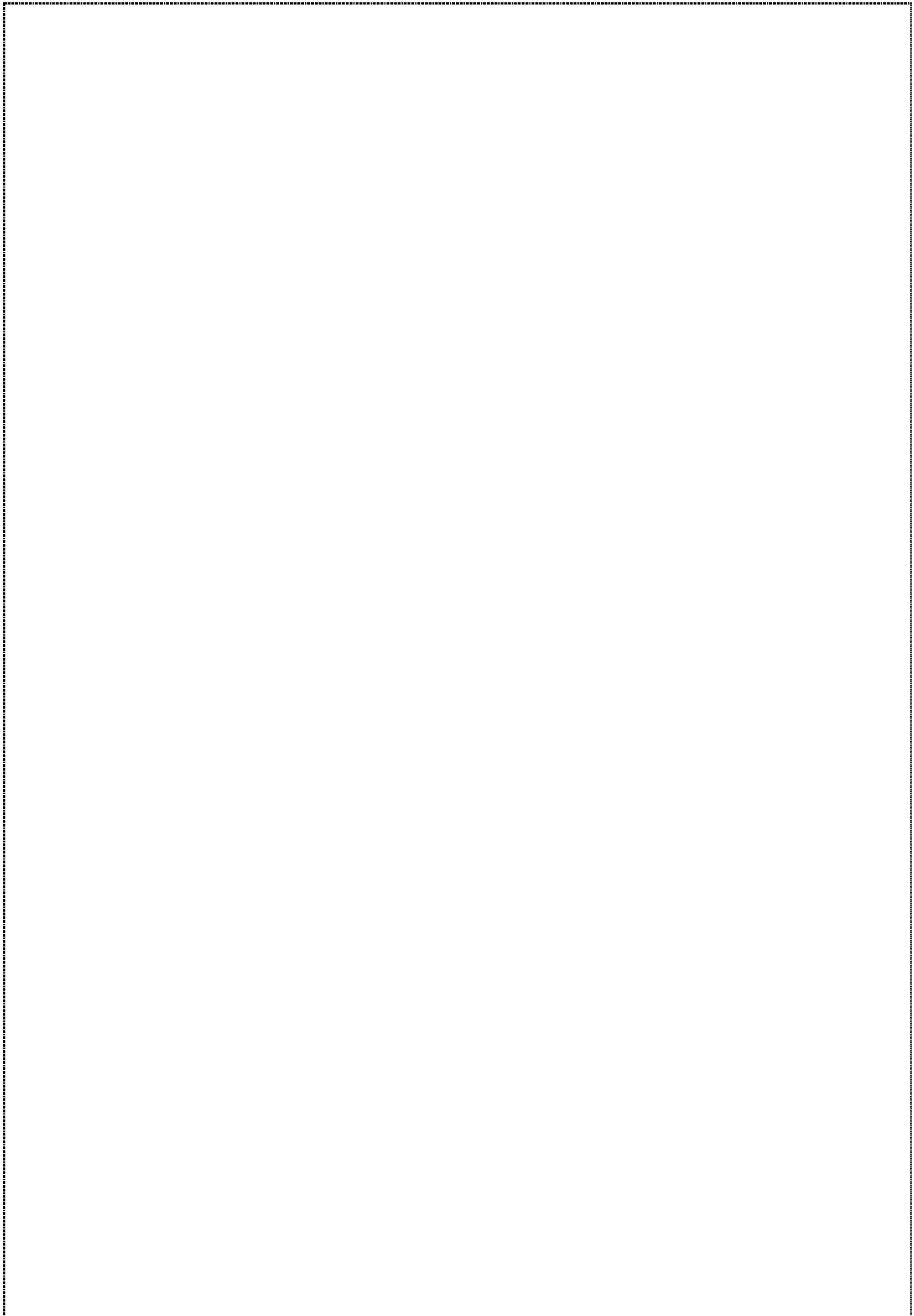


Fig. ACERO INOXIDABLE AISI 420.



Desgaste:

- ❑ Se insertan los muñones con rociado térmico en los ejes, cuadrándolos con los pasadores.
- ❑ Se colocan las conchas en la biela, luego se unta un poco de aceite a las mismas con la finalidad de facilitar el giro del eje con los muñones.
- ❑ Se ajusta el muñón con la biela de manera perpendicular a la cara de los muñones. Se torquea la biela en tres etapas 30 psi, 60 psi y 90 psi garantizando un torque equilibrado y real.
- ❑ Se gira un poco el muñón dentro de la biela para facilitar posteriormente su funcionamiento en el banco de ensayos.
- ❑ El cárter se coloca alrededor del sistema Biela-Ejes-Muñones, garantizando que el exceso de aceite que la bomba envíe a la biela no se derrame y éste retorne al tanque; dentro de este dispositivo se coloca una de las tres termocuplas encargadas de medir la temperatura de entrada.
- ❑ Por ambos lados se colocan los rodamientos que sostiene al eje en el banco de ensayos cuando éste esté girando. Estos rodamientos están paralelos al piso.
- ❑ En el banco de ensayos se encuentra apoyado el gato que posee una carga máxima de 10.000 psi, éste se acopla a la biela a través de unas bases de acero AISI 4140 que las poseen tanto el gato como la biela. La transmisión de la fuerza Biela-Gato se realiza a través de una canica de acero colocada en el medio de las bases garantizando una transmisión lineal de la fuerza allí existente.
- ❑ Se acopla el eje a la polea de 5", la cual a través de dos correas se une a otra polea de 10" que está unida a un motor de 2 HP.

- Se colocan las dos termocuplas restantes, una dentro del tanque de aceite y la otra a la salida del cárter.
- Se prende la bomba de aceite para lubricar el sistema Biela-Muñón. Ésta se mantendrá encendida durante todo el ensayo.
- De manera siguiente se enciende el motor, ajustando las revoluciones que permitan tener en el eje unas 100 rpm.
- La carga del gato se eleva paulatinamente hasta 7000 psi a fin de garantizar que se establezcan parámetros de lubricación límite.