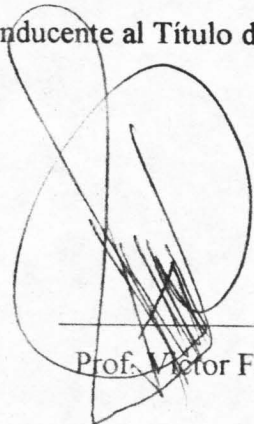


Caracas, 11 de Junio de 2.004

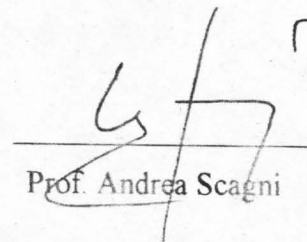
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de a Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres, Sergio Urdaneta C. y Antonio Valero D., titulado:

**“INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE ROCIADO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN RECUBRIMIENTO DEPOSITADO POR ROCIADO TERMICO DE BAJA VELOCIDAD”**

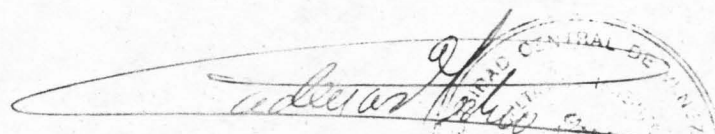
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.




Prof. Victor Falcon



Prof. Andrea Scagni



Prof. Pedro Cadenas



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VENEZUELA  
CENTRAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
TECNOLOGÍA DE PROCESOS

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE ROCIADO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN RECUBRIMIENTO DEPOSITADO POR ROCIADO TERMICO DE BAJA VELOCIDAD**

Trabajo Especial de Grado Presentado Ante la  
Ilustre Universidad Central de Venezuela

por los Brs:

Urdaneta Castro, Sergio

Valero Dugarte, Antonio

Para Optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE ROCIADO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN RECUBRIMIENTO DEPOSITADO POR ROCIADO TERMICO DE BAJA VELOCIDAD**

Tutor Académico: Prof. Ing. María de los Ángeles de Prato

Tutor Industrial: Prof. Ing. Andrea Scagni

Trabajo Especial de Grado Presentado Ante la  
Ilustre Universidad Central de Venezuela

por los Brs:

Urdaneta Castro, Sergio

Valero Dugarte, Antonio

Para Optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

## DEDICATORIA

A Dios y todos los Santos, que durante todo el camino recorrido estuvieron presentes conmigo.

A mis padres María y Antonio, quienes con su orientación, educación y confianza han hecho posible la culminación de esta meta, la cual es un regalo de mi parte.

A mis hermanas: Yexica y Johana; fieles participantes de esta lucha, y que siempre estuvieron seguras y deseosas de este triunfo.

A mis hijas: Erika Isabel y Adriana Isabel; quienes con su dulzura y amor, me dieron fuerzas para luchar y salir adelante.

A Sandra por su gran amistad y compañerismo en todos estos años y buenos consejos en momentos difíciles de mi vida.

A mi Angélica, muy especialmente a ti, por tu amor, por ser parte de mi, por tu confianza y aliento y por muchas cosas más. Este logro también es tuyo.

A mis compañeros de la U.C.V. y a todos mis amigos, con quienes he compartido muchos momentos felices y que sin ser hermanos míos, en ocasiones se han portado como tales.

Antonio.

## **DEDICATORIA**

A Dios que apretó pero que nunca olvidó y siempre nos ayudó.

A mi madre Olga V. Castro A. y a mi tía Ligia A. Castro A. (RIP), que juntas más que un apoyo fueron mi inspiración.

A mis amigos y mis compañeros de la universidad, por su constante chalequeo y por todas las birras y echaderas de broma sin las cuales no habría podido terminar este dichoso Trabajo Especial de Grado.

Sergio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos manifestar nuestro más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que nos ayudaron en la realización de este trabajo, y muy especialmente a:

Profesores, Ing. María Rodríguez de Prato e Ing. Andrea Scagni, tutora académica y tutor industrial respectivos del T.E.G.

Padre y Técnico Joseph Mochati de la Escuela Técnica Don Bosco, por su valiosa colaboración, en la pronta elaboración de las probetas con las cuales se realizaron todos los ensayos en este trabajo.

Ingeniero Yorly y al técnico Alejandro de la empresa Plasmatec Ingenieros C.A., por su valiosa colaboración en el Termorociado aplicado a las probetas de trabajo.

Profesor Ing. Crisantos Villalobos y José La Barbera de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, por su valiosa ayuda en la utilización de los equipos del CITALA.

Técnico Elio Castro, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, por su colaboración en la realización de los ensayos de macrodureza.

Profesor Ing. Juan Carlos Mestre, por su incalculable ayuda en la realización de los ensayos de microdureza.

Un agradecimiento muy especial al Profesor Ing. Pedro Cadenas, por su colaboración y valiosas recomendaciones en la utilización de la máquina FALEX, y por su interés y guía en la realización y defensa de este Trabajo Especial de Grado.

Profesor Freddy Arenas y al técnico Domingo Da Silva del I.U.T. “Federico Rivero Palacio” del departamento de Microscopia Electrónica, por la utilización del Microscopio Electrónico.

A nuestras madres, hermanas, amigos y amigas, novias y todas las lacras colegas de nosotros por su constante apoyo y chalequeo, y por su incondicional echadera de broma.

A todos ellos, mil gracias.

Urdaneta, Sergio y Valero, Antonio

**“Influencia de los Parámetros de Rociado sobre las Propiedades Mecánicas de un Recubrimiento Depositado por Rociado Térmico de Baja Velocidad”**

Tutor: Prof. Maria de los Ángeles de Prato, Trabajo Especial, U.C.V., Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas, 2004, Páginas 70.

Rociado Térmico – Desgaste – Dureza.

Con el presente Trabajo Especial de Grado se determinó la influencia de la distancia de rociado, relación oxígeno-combustible, gas protector y presión de alimentación de los polvos sobre la resistencia al desgaste deslizante con y sin lubricación de un recubrimiento de alto contenido de carbono depositado por un proceso de llama (LVOF), se determinó la influencia de los parámetros antes mencionados sobre la dureza y microdureza del recubrimiento y los parámetros óptimos del proceso, mediante un diseño factorial experimental. Los ensayos de desgaste, se realizaron en una máquina FALEX No 1, para ensayos de desgaste deslizante bloque-anillo (Block on Ring) según la norma ASTM D2714-68, con y sin lubricación. Los ensayos se realizaron bajo condiciones constantes de carga de 1066.67 N, velocidad de tangencial de deslizamiento de 0,1 m/s y distancia deslizante de 549,78 m. El desgaste observado en los bloques para todas las condiciones fue del tipo adhesivo. Los valores de la tasa de desgaste sin lubricación estuvieron entre 0,0209 mm<sup>3</sup>/m y 0,0479 mm<sup>3</sup>/m., mientras que con lubricación estuvieron entre 0,00005 mm<sup>3</sup>/m y 0,00086 mm<sup>3</sup>/m, dando como resultado que el valor más bajo de tasa de desgaste con y sin lubricación fue obtenido por el recubrimiento cuyos parámetros de rociado son: Distancia de Rociado 240 mm, Relación Oxígeno Combustible 30,6, Presión de Alimentación 20 psi y Gas Protector 14,4 psi (condición 10). Condición que mostró la mejor resistencia al desgaste, esto debido quizás a las gotas poco fundidas de pequeño tamaño distribuidas en el recubrimiento y la poca presencia de óxidos. Los coeficiente de fricción obtenidos estuvieron entre 0,6 y 0,661 sin lubricación y de 0,125 y 0,133 con lubricación. Se observó que el régimen de lubricación es límite, puesto que los valores de coeficiente fricción están dentro del rango que va de 0,058 a 0,15. Los rangos de la microdureza para el bloque estuvieron entre 379,0 HVN y 597,9 HVN y de la macrodureza para el bloque estuvieron entre 364,8 HVN y 438,0 HVN. Para la condición 10 que presentó la mejor resistencia al desgaste, la macrodureza y microdureza fue de 378,0 y 395,6 HVN respectivamente, observándose que no fueron las más altas pero si dentro del rango observado en este estudio. En el análisis de las micrografías podemos observar para todas las condiciones, la presencia de cuatro fases: Fase Clara (Molibdeno), Fase Oscura (Aluminio), Fase Gris Clara (Hierro) y Gris Oscura (Hierro) y que el factor fundamental es la cantidad y tamaño de las gotas sin fundir que se encuentran en las diferentes condiciones. Según el análisis de varianza (ANOVA), se verificó que ninguno de los parámetros seleccionados tienen influencia estadística significativa sobre el desgaste y dureza, por lo que no se pueden realizar superficies de respuesta para hallar rangos óptimos de trabajo para los parámetros de rociado; ni se puede indicar cómo influyen estos parámetros sobre la micro estructura, el desgaste o la dureza.

# INDICE DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	i
<b>Agradecimiento</b> .....	iii
<b>Resumen</b> .....	iv

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

1.1 Introducción .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Antecedentes .....	2

## **CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO**

2.1 Generalidades .....	8
2.2 Procesos de Lubricación .....	10
2.2.1 Lubricación Hidrodinámica .....	10
2.2.2 Lubricación Mixta .....	11
2.2.3 Lubricación Límite .....	11
2.2.4 Lubricación Hidrostática .....	11
2.3 Procesos de Recubrimiento por Rociado Térmico .....	12
2.3.1 Procesos de Rociado Térmico .....	15
2.3.2 Preparación de la Superficie para el Rociado Térmico .....	16
2.3.3 Diseño de Experimentos .....	17

## **CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

3.1 Materiales .....	20
3.1.1 Anillo .....	20
3.1.2 Bloque .....	20
3.2 Fabricación de los elementos para el ensayo .....	21
3.2.1 Anillo .....	21



3.2.2 Bloque .....	22
3.3 Procesos de Recubrimiento .....	22
3.4 Ensayo de Desgaste (arreglo bloque sobre anillo) .....	23
3.5 Procedimiento de Cálculo y Reportes .....	26
3.5.1 Volumen de Desgaste .....	26
3.5.2 Determinación de la densidad ( $\rho$ ) del recubrimiento .....	28
3.5.3 Tasa de Desgaste .....	28
3.5.4 Coeficiente de Fricción .....	28
3.6 Análisis de Muestras mediante Microscopía Electrónica .....	28
3.7 Ensayo de Microdureza Vickers .....	29
3.8 Ensayo de Macrodureza Rockwell .....	30

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES**

4.1 Ensayos de Desgaste .....	32
4.2 Análisis Estadístico del desgaste .....	41
4.3 Ensayos de Microscopía .....	42
4.4 Análisis de las micrografías seleccionadas de acuerdo al ensayo de desgaste .....	42
4.4.1 Condición 1 .....	42
4.4.2 Condición 10 .....	45
4.4.3 Condición 17 .....	47
4.5 Ensayos de Dureza .....	53
4.6 Análisis Estadístico para la dureza .....	54
4.7 Análisis de Temperatura, Fuerza de Roce y Coeficiente de Fricción .....	56

## **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Conclusiones .....	63
Recomendaciones .....	66

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>67</b>
---	-----------

<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>
---------------------	-----------

- A** Especificaciones Técnicas del recubrimiento METCO 449
- B** Planos: Anillo, Bloque y Arandela
- C** Cálculos Tipo de la Dureza Vickers. Depuración de la dureza Vickers. Cálculos Tipo de la depuración de Desgaste.
- D** Curvas de Caracterización del Recubrimiento.
- E** Gráficos de Fuerza de Roce, Coeficiente de Fricción y Temperatura vs. Distancia.
- F** Micrografías.
- G** Calibración de la máquina FALEX.
- H** Volumen de Desgaste
- I** Tablas ANOVA

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Fig. 1.1 Diagrama esquemático de los procesos de rociado térmico .....	3
Fig. 2.1 Esquema de un recubrimiento rociado térmicamente .....	12
Fig. 2.2 Diagrama esquemático de un proceso de rociado térmico de llama alimentado con polvo .....	13
Fig. 2.3 Esquema del proceso LVOF .....	16
Fig. 3.1 Máquina Falex Alfa LFW-1 .....	24
Fig. 3.2 Montaje bloque sobre anillo .....	24
Fig. 3.3 Disposición de las caras del recubrimiento para el cálculo de la densidad .....	27
Fig. 3.4 Microscopio de Barrido Electrónico Philips XL-30 .....	29
Fig. 3.5.a Equipo Buehler con platos giratorios .....	30
Fig. 3.5.b Detalle del equipo .....	30
Fig. 3.6 Microdurómetro Vickers marca Leitz Wetzlar modelo 7520 .....	30
Fig. 3.7 Disposición de las indentaciones en la cara transversal del recubrimiento .....	30
Fig. 3.8 Durómetro Wilson/Rockwell Hardness Tester B504-T .....	31
Fig. 3.9 Disposición de las indentaciones en la cara longitudinal del recubrimiento .....	31
Fig. 4.1 Tasa de desgaste de los bloques sin lubricación .....	36
Fig. 4.2 Tasa de desgaste de los bloques con lubricación .....	36
Fig. 4.3 Porcentaje de mejora de comportamiento sin lubricación .....	38
Fig. 4.4 Porcentaje de mejora de comportamiento con lubricación .....	38
Fig. 4.5 Tasa de desgaste bloque vs. anillo con lubricación .....	39
Fig. 4.6 Tasa de desgaste bloque vs. anillo sin lubricación .....	40
Fig. 4.7.a Micrografía (MEB) a 100X de un recubrimiento METCO 449 en electrones primarios para la condición 1.....	44
Fig. 4.7.b EDX de la fase clara .....	44
Fig. 4.7.c EDX de la fase oscura .....	44
Fig. 4.7.d EDX de la fase gris clara .....	44

Fig. 4.7.e EDX de la fase gris oscura .....	44
Fig. 4.8.a Micrografía (MEB) a 100X de un recubrimiento METCO 449 en electrones primarios para la condición 10.....	46
Fig. 4.8.b EDX de la fase clara .....	46
Fig. 4.8.c EDX de la fase oscura .....	46
Fig. 4.8.d EDX de la fase gris clara .....	46
Fig. 4.8.e EDX de la fase gris oscura .....	46
Fig. 4.9.a Micrografía (MEB) a 100X de un recubrimiento METCO 449 en electrones primarios para la condición 17 .....	48
Fig. 4.9.b EDX de la fase clara .....	48
Fig. 4.9.c EDX de la fase oscura .....	48
Fig. 4.9.d EDX de la fase gris clara .....	48
Fig. 4.9.e EDX de la fase gris oscura .....	48
Fig. 4.10 Micrografía de desgaste. a) Huella para la condición 1, b) Huella para la condición 10 y c) Huella para la condición 17 .....	50
Fig. 4.11 Detalle de gotas poco fundidas de micrografías tomadas a 180X a) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17 .....	52
Fig. 4.12 Dureza y microdureza .....	54
Fig. 4.13 Temperatura y fuerza de roce vs. distancia con lubricación. a) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17 .....	58
Fig. 4.14 Temperatura y fuerza de roce vs. distancia sin lubricación. a) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17 .....	59
Fig. 4.15 Coeficiente de roce vs. distancia con lubricación. a) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17 .....	61
Fig. 4.16 Coeficiente de roce vs. distancia sin lubricación. a) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17 .....	62

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 3.1 Composición del acero AISI D-2 .....	20
Tabla 3.2 Composición del acero 1020 .....	21
Tabla 3.3 Composición de la aleación METCO 449.....	21
Tabla 3.4 Valores de los parámetros de rociado .....	23
Tabla 3.5 Características del lubricante SAE 10W-30 .....	25
Tabla 3.6 Valores para el cálculo de la densidad del recubrimiento.....	27
Tabla 4.1 Valores de las masas de los bloques sin lubricación antes y después del ensayo.....	33
Tabla 4.2 Valores de las masas de los bloques con lubricación antes y después del ensayo.....	33
Tabla 4.3 Valores de las masas de los anillos sin lubricación antes y después del ensayo.....	34
Tabla 4.4 Valores de las masas de los anillos con lubricación antes y después del ensayo.....	34
Tabla 4.5 Resultados de desgaste con y sin lubricación .....	35
Tabla 4.6 Valores de los parámetros de rociado y tasa de desgaste .....	41
Tabla 4.7 Análisis de varianza para tasa de desgaste .....	41
Tabla 4.8 Valores seleccionados del ensayo de desgaste .....	42
Tabla 4.9 Porcentaje en peso de las fases para las condiciones seleccionadas ....	49
Tabla 4.10 Resultados de los ensayos de dureza .....	53
Tabla 4.11 Valores de los parámetros de rociado y microdureza .....	55
Tabla 4.12 Análisis de varianza para dureza .....	55
Tabla 4.13 Valores de Temperatura, fuerza de roce y coeficiente de fricción para las condiciones seleccionadas con lubricación .....	56
Tabla 4.14 Valores de Temperatura, fuerza de roce y coeficiente de fricción para las condiciones seleccionadas sin lubricación .....	57

**CAPITULO I:  
INTRODUCCION**

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Introducción:

En el parque industrial existen numerosas maquinarias en las cuales intervienen muchas piezas en contacto cuya interacción produce pérdidas de energía por rozamiento y el consecuente desgaste de los materiales que las componen. Esto se hace evidente en los cigüeñales, los cuales son diseñados de modo que el desgaste se produzca en la zona de contacto con el bloque del motor; siendo esta zona tratada con un carburizado para darle una mayor dureza superficial y aumentar su resistencia al desgaste. La vida útil de los cigüeñales concluye debido a que las zonas de contacto se desgastan considerablemente, por lo cual se procede a la sustitución de la pieza. Para evitar los costos relacionados con la sustitución las piezas, éstas se recuperan ya sea por rectificado o rociado térmico, constituyéndose el Metco 449 en un material de amplia utilización, ya que posee excelentes características antifricción y antidesgaste para recuperación de cigüeñales.

Aunque los elementos en contacto sean sometidos a una correcta práctica de lubricación con la finalidad de disminuir el desgaste que se produce, no es posible escapar al mismo, por lo cual, será necesario aplicar un método que permita la reposición del material desgastado que nos permita aumentar su vida útil y disminuir los costos de reposición.

Debido a que los procesos de rociado térmico ofrecen soluciones prácticas y económicas, a una gran cantidad de problemas en la industria, la gran variedad de aplicaciones que tiene y los bajos costos de aplicación; se desprende la necesidad de realizar este estudio, que pretende optimizar el proceso de rociado térmico por llama de baja velocidad oxígeno-combustible (LVOF).

La finalidad de este trabajo es optimizar los parámetros de rociado como lo son: la distancia de rociado, la relación oxígeno-combustible, el gas protector y presión de alimentación de los polvos sobre la resistencia al desgaste deslizante con y sin lubricación de un recubrimiento de alto contenido de carbono depositado por un proceso de llama (LVOF), aplicados sobre probetas, las cuales serán ensayadas en una máquina para ensayos de desgastes deslizante del tipo bloque sobre anillo, bajo condiciones de lubricación y sin lubricación.

Las razones para la utilización de un ensayo del tipo bloque – anillo, radica en la obtención de información rápida sobre el comportamiento de diferentes materiales, así como la utilización de una cantidad menor de material para la realización de los ensayos, lo cual incide en la economía de los mismos.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General:**

Determinar la influencia de la distancia de rociado, la relación oxígeno-combustible, gas protector y presión de alimentación de los polvos sobre las propiedades mecánicas de un recubrimiento rociado por un proceso de combustión de baja velocidad (LVOF).

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

- Determinar la influencia de la distancia de rociado, relación oxígeno-combustible, gas protector y presión de alimentación de los polvos sobre la resistencia al desgaste deslizante con y sin lubricación de un recubrimiento de alto contenido de carbono depositado por un proceso de llama (LVOF).
- Determinar la influencia de los parámetros antes mencionados sobre la dureza y microdureza del recubrimiento.
- Determinar los parámetros óptimos del proceso.

## **1.3 Antecedentes**

La tecnología de los procesos de fusión-rociado data de 1.900, cuando la atomización fundida fue introducida para la fabricación de polvos metálicos (Berndt, 1.992). Las primeras experiencias, utilizaban materiales con bajo punto de fusión como el plomo, posteriormente, comenzaron a fabricarse polvos metálicos con puntos de fusión más altos y fue entonces cuando fueron aceptados estos procesos.

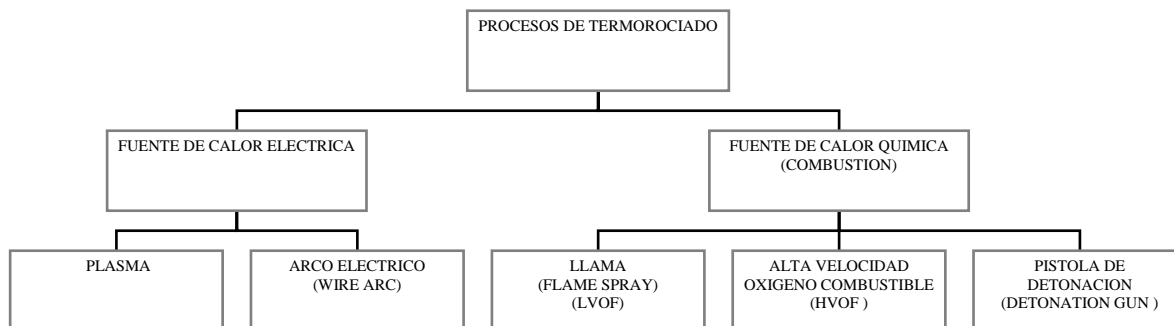
La invención del primer proceso de rociado térmico es atribuida a M.U. Schoop en 1.911, (Fauchais, 2.001), pero a pesar de los cien años de su desarrollo, es sólo en los



últimos años cuando se ha diversificado su uso y aplicaciones en la industria. El rociado térmico es un término genérico usado para definir un grupo de procesos en el cual metales, cerámicos, carburos, en forma de polvos o alambres y algunos polímeros son calentados hasta un rango plástico debido a la energía térmica suministrada por un proceso de combustión o un arco eléctrico. Las partículas semifundidas son aceleradas con la ayuda de gas comprimido y posteriormente proyectadas, como especie de gotas semifundidas, sobre una superficie previamente preparada. Las partículas impactadas en cada pasada se van aplastando para de esta manera construir el recubrimiento.

Los recubrimientos obtenidos por rociado térmico de metales, carburos, cerámicos o plásticos son ampliamente utilizados en distintas aplicaciones industriales en las áreas de mantenimiento y producción, llegando hasta implantes óseos y dentales.

La Figura 1, corresponde a un diagrama que clasifica los procesos de rociado térmico en función de la fuente de calor utilizada.



**Fig. 1.1. Diagrama esquemático de los procesos de rociado térmico.**

Los recubrimientos por rociado térmico son usados en una gran variedad de industrias, como por ejemplo: papel y pulpa de papel, química, petroquímica, textil, infraestructura, procesamiento de comida, automotriz, médica, generación de energía, conformadoras de metal (troqueladoras, etc.) y la industria aeroespacial. Estos recubrimientos se seleccionan para que cumplan una o más funciones, siendo las cinco funciones más comunes:

- Resistencia al desgaste.
- Resistencia al calor y/o oxidación.
- Resistencia a la corrosión.
- Conductividad o Resistencia eléctrica.

- Recuperación de piezas desgastadas.

Debido a que los procesos de rociado térmico ofrecen soluciones prácticas y económicas a una gran cantidad de problemas en la industria, la gran variedad de aplicaciones que tiene y la disminución en los costos de aplicación, se desprende la necesidad de estudiar los parámetros que optimizan las funciones antes mencionadas.

El rociado térmico es uno de los más rápidos y versátiles procedimientos para aplicar recubrimientos, y el número de aplicaciones de esta tecnología aumenta con el tiempo. Con una multitud de parámetros operacionales controlando la calidad del recubrimiento, con frecuencia se dificulta encontrar las condiciones óptimas de los parámetros antes mencionados. Uno de los métodos experimentales usados, es el diseño factorial de experimentos, en el cual los parámetros operacionales son variados de manera sistemática con el fin de optimizar los parámetros necesarios para el rociado térmico.

El diseño experimental factorial, es un método eficiente para determinar los efectos de diversos factores en las características medibles del recubrimiento; esta metodología estadística delinea el impacto de cada variable en las características del recubrimiento a lo largo de todas las combinaciones de los parámetros de rociado a optimizar en el rociado térmico (HVOF, LVOF, Plasma, etc.). Este diseño determina cuales factores tienen más influencias de las características medidas.

En 1.965, Ingham realizó un estudio en el cual observó que la velocidad de alimentación de los polvos afecta la deposición del recubrimiento y su microestructura. Además si el polvo es alimentado más rápido de lo que puede ser calentado, el recubrimiento contendrá una elevada cantidad de gotas pocas fundidas y la eficiencia de la deposición disminuirá más rápidamente, por otro lado, si la velocidad de alimentación de los polvos es muy baja la productividad del proceso se compromete.

En 1.991, T.J. Steeper, y colaboradores, realizaron un estudio con un diseño factorial  $2^4$  para un rociado térmico de plasma de un recubrimiento aluminio – titanio, en el cual se realizaron ensayos de dureza, ensayos de conductividad eléctrica, porosidad, metalografía óptica y Análisis por Dispersión de Rayos X (EDX), estos investigadores encontraron que la distancia de rociado y la corriente eran los atributos que más contribuían a la porosidad del recubrimiento y la dureza (micro y macro) estaba más influenciada por la velocidad de

alimentación de los polvos. En 1.993, T.J. Steeper y colaboradores realizaron un estudio con un diseño factorial  $2^3$  para un rociado térmico de plasma del mismo recubrimiento, en el cual se optimizaron los tres parámetros (distancia de rociado, corriente y velocidad de alimentación de los polvos) del estudio realizado en 1.991.

En 1.992, Takasaki A. y colaboradores, realizaron una investigación con aleaciones autofundentes Ni-Cr-B-Si, las cuales fueron rociadas térmicamente con diferentes velocidades de los polvos con HVOF. Observaron que la rugosidad superficial aumenta con la velocidad de alimentación de los polvos; en cambio la dureza no es afectada. Los resultados experimentales evidencian que la densidad del recubrimiento es gobernada por la velocidad de alimentación de los polvos.

En 1.995, G.K. Creffield y colaboradores, realizaron un estudio de los efectos de los parámetros del gas en un recubrimiento rociado por HVOF, en el cual encontraron: que el flujo de gas afectaba la dureza y la resistencia al desgaste, es decir, cuando el flujo de gas aumenta, la dureza y la resistencia al desgaste también aumentaban; si la presión de alimentación de los polvos aumenta la calidad del recubrimiento disminuye; y que a mayor relación oxígeno – combustible disminuye la dureza y resistencia al desgaste.

En 1.995, Yang Y. y colaboradores, modelaron el movimiento de las partículas y su comportamiento térmico durante el proceso de termorociado HVOF. Mientras más alta es la velocidad de la partícula al impactar, mejor será el recubrimiento obtenido, esto se debe a que a una mayor velocidad las partículas se compactan más densamente en el recubrimiento. Estas observaciones, fueron confirmadas por Sobolev (1.996), utilizando otros materiales como polvos de alimentación para un sistema HVOF.

En 1.999, Giovina M. y colaboradores, realizaron un estudio de la microestructura y comportamiento frente al desgaste deslizante de recubrimientos depositados con carburo comediante la técnica HVOF. El estudio de la microestructura de los recubrimientos y los polvos fue realizado utilizando un microscopio de barrido electrónico y difracción de rayos X. Los ensayos de desgaste fueron realizados usando una máquina de ensayos “Block on Ring”. Estos investigadores, basaron su estudio en la comparación de los polvos 88/12 WC/Co este recubrimiento mostró una microdureza de 1260 HV y una porosidad menor al 2% y alta resistencia al desgaste, el recubrimiento WC-10Co-4Cr mostró una microdureza de 1255 HV y una pobre resistencia al desgaste, respecto al recubrimiento anterior y por

último el recubrimiento  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$  mostró valores de microdureza bajos y la resistencia al desgaste fue mayor que en los otros dos recubrimientos en estudio.

En 1.999, Sobolev V. y colaboradores, observaron que los caudales de  $\text{O}_2$  y combustible y la relación existente entre ellos, son los factores que a la hora de la proyección térmica de alta velocidad (HVOF), con un tipo de pistola determinada y una distribución de tamaño, morfología prefijadas y distribución de fases pueden ser modificados con el objeto de alterar las variables de velocidad y temperatura de la partícula, que son las responsables directas de la calidad del recubrimiento obtenido.

En 1.999, Acosta A. y colaborador, establecieron el estudio comparativo de la resistencia al desgaste de la aleación Babbitt bajo lubricación límite, aplicada como recubrimiento de cojinetes mediante procesos de rociado térmico HVOF y soldadura TIG en una máquina Falex N°1, observando que los resultados obtenidos mediante soldadura TIG presentaron un nivel de desgaste mayor que las recubiertas por rociado térmico HVOF, sin embargo ambos procesos soportaron de manera satisfactoria las condiciones de trabajo establecidas en el ensayo, no presentándose en ningún caso falla en el material del recubrimiento.

En 2.001, Andrade A. y colaborador, realizaron la evaluación de muñones de motores diesel rociados térmicamente bajo régimen de lubricación límite con los recubrimientos METCO 1 y METCO 449P, mediante el procesos HVOF y el acero inoxidable AISI 420 mediante el proceso de arco eléctrico, encontrando que el recubrimiento METCO 449P presentó el menor el menor porcentaje de desgaste.

En 2.002, Gil L., realizó un estudio con un diseño experimental factorial  $3^3$ , para optimizar la calidad de recubrimientos base Ni, obtenidos por rociado térmico HVOF. Encontrando que la distancia de rociado, la relación oxígeno combustible y la velocidad de alimentación de los polvos no tienen efecto significativo sobre las fases presentes en el recubrimiento. Un aumento en la distancia de rociado produce un incremento de la porosidad, cantidad de partículas no fundidas y una disminución en la microdureza del recubrimiento. La velocidad de alimentación de los polvos y relación oxígeno combustible, no tuvieron un efecto estadísticamente significativo en la porosidad del recubrimiento. A través del uso de superficies de respuesta se empleó para identificar los parámetros que

tienen influencia significativa sobre las propiedades del recubrimiento, permitiendo su optimización.

**CAPITULO II:**  
**FUNDAMENTO TEORICO**

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades

TRIBOLOGÍA (del griego “Tribos”, que significa rozamiento) la cual involucra el estudio de los fenómenos de fricción, lubricación y desgaste es la ciencia que se ocupa del estudio de las propiedades de las superficies en condiciones de rozamiento, así como de la transmisión y pérdida de energía y de materiales en las mismas.

El desgaste se define como la pérdida progresiva de material en la superficie de trabajo de un cuerpo, como resultado del movimiento relativo de éste con respecto a otro. Este fenómeno generalmente se puede clasificar de acuerdo condiciones de las superficies como se indica a continuación (ASM, Handbook, Vol. XVII, 1.989):

- De superficies secas deslizantes.
- De superficies lubricadas deslizantes.
- De superficies secas rodantes.
- De superficies lubricantes rodantes.
- Por contacto vibracional.
- Por partículas sólidas en movimiento (erosión).
- Por líquido en movimiento (cavitación).

Sin embargo, de acuerdo al tipo de mecanismo de formación del desgaste, se puede clasificar de la siguiente manera (ASM, Handbook, Vol. XVII, 1.989):

- **Desgaste Adhesivo**

El cual se produce por la interacción de las asperezas de cuerpos en contacto entre los cuales comienzan a actuar fuerzas superficiales significativas de corta duración. Al ocurrir el desplazamiento resulta la destrucción superficial de uno o ambos materiales en contacto. Este tipo de desgaste tiene lugar bastante rápido, dando lugar a formas graves de deterioro en forma de adherencia o desgarramiento en las piezas de máquina.

Cuando las cargas normales que actúan sobre el par deslizante son muy elevadas, el desgaste adhesivo alcanza su forma más severa denominada arrastre. En este caso es apreciable la cantidad de material que se transfiere, de la superficie más caliente hacia la

superficie más fría. Esto se detecta frecuentemente por un repentino aumento del nivel de ruido, de la vibración y de la temperatura del lubricante.

- **Desgaste Abrasivo:**

Consiste en el desprendimiento de partículas que tiene lugar por el contacto físico directo de dos superficies, de las cuales una es mucho más dura que la otra, produciéndose un efecto de limado con o sin formación de virutas.

- **Desgaste Corrosivo – Mecánico:**

Este tiene lugar por la interacción entre las superficies en contacto y el medio. Si las dos superficies reaccionan activamente con el medio ambiente, la fricción en ambas conlleva a la formación y desprendimiento de los productos de la reacción, ocasionando pérdida de materiales. Existe un tipo de desgaste corrosivo por frotamiento (en inglés denominado “Fretting Corrosion”), que tiene lugar cuando los cuerpos en contacto experimentan movimientos relativos de oscilación, con una amplitud menor a 100  $\mu\text{m}$ , lo cual da como resultado pérdida de material.

- **Desgaste por Fatiga:**

El desgaste por fatiga superficial está relacionado con ciclos de tensiones repetitivas en el contacto por rodadura o por deslizamiento aún cuando las superficies estén bajo condiciones de lubricación con película gruesa. En los materiales expuestos a repetidos ciclos de carga y descarga se puede producir la creación y propagación de fisuras microscópicas, lo cual puede dar lugar a la falla repentina por rotura del material, sin la presentación de síntomas previos.

- **Desgaste por Delaminación:**

La teoría de desgaste por delaminación describe los mecanismos de desgaste causantes de la más destructiva falla de las superficies de deslizamiento. El fenómeno de desgaste por delaminación puede describirse por una secuencia de procesos indicados a continuación:



- a. En el período inicial o de rodaje las asperezas de la superficie más blanda se deforman y fracturan fácilmente. También son removidas las asperezas duras, pero más lentamente. Se genera inicialmente una superficie pulida.
- b. La tracción superficial ejercida sobre los puntos de contacto induce al incremento de la deformación plástica en cada ciclo de carga.
- c. Como la deformación de la sub-superficie continua, se forman grietas sobre la superficie.
- d. Una vez agrupadas las grietas, cargas y deformaciones adicionales causan la propagación de las mismas. Las fisuras tienden a propagarse en dirección paralela a la superficie y a una determinada profundidad que depende de las propiedades del material.
- e. Finalmente, cuando las grietas encuentran superficie libre, se desprende material en forma de láminas cuyo tamaño depende de la profundidad de iniciación de la grieta

## **2.2. Procesos de Lubricación.**

La lubricación consiste en la colocación de una sustancia, denominada lubricante, con la finalidad de separar las superficies en movimiento relativo mediante una película de material capaz de soportar esfuerzos cortantes, ofreciendo solo una pequeña resistencia y sin deterioro en las superficies (Acosta, 1.999).

Dependiendo del espesor de la capa de lubricante, de la altura de las irregularidades superficiales y de las presiones y tipo de cargas involucradas, se definen los siguientes regímenes de lubricación:

### **2.2.1 Lubricación Hidrodinámica:**

En este régimen las superficies sólidas están separadas por una película continua de lubricante cuyo espesor es mucho mayor que la altura de las irregularidades superficiales. La resistencia al movimiento es debida a la fricción interna del lubricante (viscosidad). Como en este régimen no existe contacto físico directo entre las superficies, no se produce desgaste abrasivo, adhesivo, ni corrosivo mecánico, siendo los coeficientes de fricción del orden de 0,001 y aún menores.

### **2.2.2 Lubricación Mixta:**

Se produce en los casos en que las condiciones de operación provocan la rotura parcial de la película fluida, por lo que en este régimen la carga se soporta parcialmente por la película de lubricante y por las irregularidades superficiales en contacto. Esto puede ocurrir a bajas velocidades de rotación, con movimiento oscilante o alternativo, bajo cargas indebidamente elevadas, cuando la viscosidad es excesivamente baja o cuando el suministro de aceite es insuficiente. En este caso el coeficiente de fricción puede oscilar entre 0,02 y 0,08.

### **2.2.3 Lubricación Límite:**

Ocurre en aquellos casos en que no se forma ninguna película fluida como consecuencia de condiciones de operación extremas que no permiten la formación de una película fluida de soporte. Las superficies están frotando sin beneficiarse de ninguna de las ventajas de la separación completa de crestas y valles que conforman las irregularidades superficiales. En el mejor de los casos puede existir una capa protectora de un espesor del orden de 1 a 2 moléculas que evita el desgaste grave, la abrasión y el frotamiento acusado. El coeficiente de fricción varía entre 0,058 y 0,15. Esta se caracteriza por las siguientes particularidades:

- Las superficies sólidas se encuentran colocadas tan cerca una de las otras que entre las irregularidades existe un contacto claramente perceptible.
- Los fenómenos hidrodinámicos y la influencia de las propiedades reológicas volumétricas del lubricante son muy pequeñas o no tienen lugar.
- El comportamiento tribológico se determina por las interacciones superficiales entre las capas finas de la lubricación límite (del orden de unas pocas moléculas) y las superficies sólidas.

### **2.2.4 Lubricación Hidrostática:**

Se caracteriza porque la separación de las superficies metálicas con tendencia a la fricción se realiza mediante la circulación forzada de un aceite lubricante, enviado a presión desde una fuente exterior, a través de dichas superficies. Esto tiene particular aplicación en

el arranque de máquinas rotativas pesadas, tales como generadores, turbinas y condensadores síncronos.

### 2.3. Procesos de Recubrimiento por Rociado Térmico.

El rociado térmico abarca un grupo de procedimientos en los cuales, materiales de revestimiento, metálicos y no metálicos, son depositados en condición fundida o semifundida mediante la aplicación de calor y velocidad sobre un sustrato preparado previamente, para formar un depósito rociado (Van Den Berge, 1.998).

El proceso de rociado térmico se ha venido convirtiendo en una técnica de deposición de material muy importante a escala industrial, tanto para la fabricación de piezas como para la recuperación de otras. En estos procesos el material a rociar puede ser alimentado en forma de polvo, alambre o varilla, en pistolas o antorchas en el cual material es calentado hasta temperaturas cercanas o relativamente superiores 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. Esto permite que sobre el sustrato las partículas impacten 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 del sustrato (ver Figura 2.1). El espesor total del revestimiento es conseguido normalmente a través de múltiples pasadas.

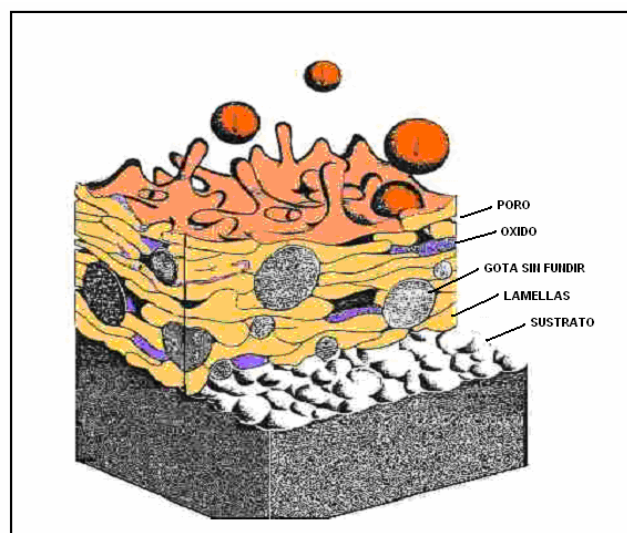


Fig. 2.1 Esquema de un recubrimiento rociado térmicamente.

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 depositado por esta técnica). Por otra parte esta técnica permite aplicar los revestimientos sin llegar a calentar significativamente la superficie; por lo general la temperatura de trabajo se encuentra por debajo de los 200 °C, eliminándose así los posibles cambios metalográficos y las posibles distorsiones en el material del sustrato. 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 cual se aplica.

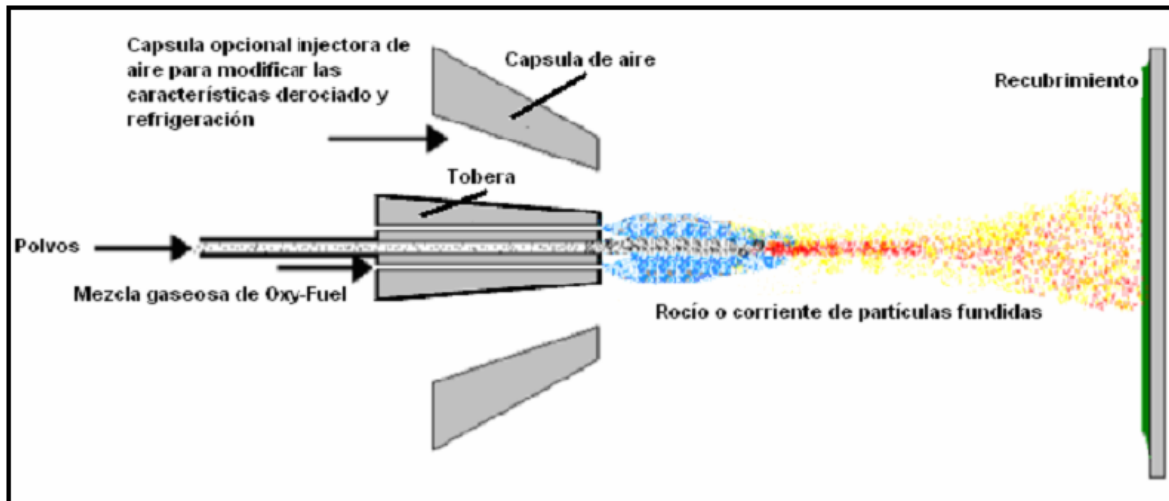


Fig. 2.2 Detalle esquemático de un proceso de rociado térmico de llama alimentado con polvo.

En la pistola de rociado se genera el calor necesario mediante la utilización de gases combustibles o un arco eléctrico (ver Figura 2.2). A medida que el material de aporte pasa a través de la pistola, se calienta hasta llegar al estado semifundido, siendo acelerado por un gas comprimido. La corriente de partículas formadas es dirigida al sustrato, golpeando la superficie del mismo, aplastándose y formándose delgadas capas que se acomodan y adhieren a la superficie preparada y entre si mismas, produciéndose un anclaje mecánico de las partículas que forman el revestimiento.

Uno de los aspectos más resaltantes de los revestimientos hechos por medio de las técnicas de rociado térmico es probablemente su diversidad de aplicaciones; debido 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 entre otras), pudiéndose agrupar estos en: metales puros, aleaciones metálicas, cermets, cerámicos, polímeros, materiales compuestos tales como polvos de Ni y Ni-Grafito. La segunda, referidas hacia las distintas propiedades que pueden ser controladas, además 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 evitadas (Andrade, 2.001).

Todas estas características permiten que los revestimientos logrados 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 rociados térmicamente 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. Los procesos rociado térmico están caracterizados por:

- La dilución del sustrato es nula debido a que la unión entre el revestimiento y el sustrato se produce como consecuencia de un anclaje mecánico.
- Posibilidad de aplicar recubrimientos delgados o gruesos.
- Alta rata de deposición comparada con los procesos de soldadura al arco.
- La baja temperatura de deposición, en comparación con la soldadura, no causa distorsión o degradación metalúrgica del sustrato.
- Los procesos de rociado térmico pueden ser realizados en todas las posiciones, sin necesidad de que la atmósfera sea controlada, ofreciendo de esta manera gran flexibilidad para un amplio rango de aplicaciones.

En adición a lo anterior, el rociado térmico se constituye en un método efectivo para minimizar el desgaste y la corrosión, lo cual le permite a los industriales prolongar la vida de las partes nuevas y reparar las partes desgastadas. Componentes enteros o áreas específicas pueden ser recubiertos para contrarrestar los efectos de la corrosión o el desgaste con un requerimiento mínimo de procesos de acabado.

El rociado térmico también permite el uso de materiales de sustrato menos costosos, como aceros de bajo carbono, con recubrimientos delgados de un material de mejor calidad, menor precio, como aleaciones de Níquel, para proveer un producto de costo efectivo con alta resistencia a la corrosión o el desgaste. Esto también agrega una nueva dimensión a la capacidad de producir pares recubrimiento/sustrato de materiales que son metalúrgicamente incompatibles desde la perspectiva de la soldadura por fusión.

### **2.3.1 Procesos de Rociado Térmico**

Los procesos de rociado térmico de mayor uso a escala industrial son: Arco Eléctrico, Plasma, HVOF (High Velocity Oxygen-Fuel), LVOF (Low Velocity Oxygen-Fuel) o Rociado térmico de baja velocidad (Van Den Berge, 1.998).

El proceso (LVOF) funde el material (polvo o alambre) a través de la liberación de la energía química que se libera en el proceso de combustión, el cual consiste en la quema de un combustible (líquido o gaseoso) en la presencia de oxígeno o aire comprimido, la mayoría de las veces el combustible gaseoso usado en este proceso es acetileno debido a su alta temperatura de combustión (3100°C) y su bajo costo (ver Figura 2.3). Otros gases combustibles son: propano, hidrogeno y gas natural.

El proceso de rociado térmico con llama es relativamente barato y portátil. El montaje básico requerido para este proceso es la pistola, el suministro de oxígeno y gas combustible, para incrementar la seguridad, el montaje debe incluir una cabina y un extractor. Sin embargo, debido a que la velocidad de las partículas es más baja que en otros procesos de rociado los recubrimientos son de menor calidad, tienen una alta porosidad, menor cohesión y adherencia.

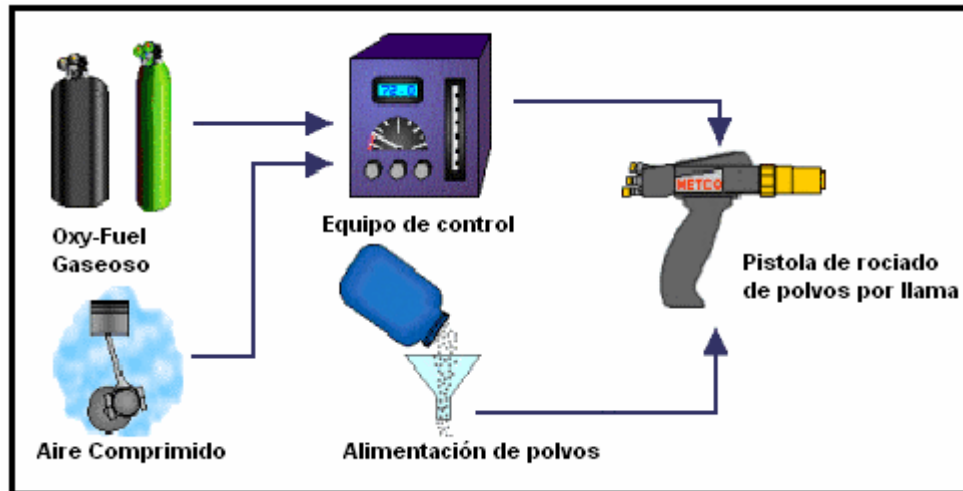


Fig. 2.3. Diagrama esquemático del proceso LVOF

Si la oxidación es un problema, se puede usar un gas protector, como un gas inerte comprimido (argón o nitrógeno) para atomizar las partículas fundidas o semifundidas. En caso de que la oxidación no sea problema se puede usar aire comprimido para acelerar las partículas.

Este proceso de rociado térmico es correctamente llamado “proceso frío”, ya que la temperatura del sustrato puede ser mantenida baja durante el proceso de recubrimiento por lo tanto se evitan daños, tales como cambios metalúrgicos y distorsión del material del sustrato.

La principal ventaja de este proceso alimentado con polvos respecto al alimentado con alambre, es que existe un rango mucho mayor de materiales que pueden ser procesados fácilmente en polvos. Este proceso está solamente limitado por las altas temperaturas que la llama pueda aportar o si el material se degrada por el calor.

### 2.3.2. Preparación de la superficie para el rociado térmico.

La preparación de la superficie del sustrato (limpieza y rugosidad), es necesaria para la aplicación exitosa del revestimiento, esto es, para que la adhesión del revestimiento al sustrato sea de la más alta calidad y se haga mínimo el riesgo de que se produzcan fallas (AWS, 1.985).

El material de revestimiento y el tipo de sustrato son los factores más importantes para determinar el tipo de preparación de superficie necesaria para lograr una adherencia adecuada.

Es necesario remover todos los contaminantes de la superficie como costras, aceites, grasas, pintura, mediante precalentado y limpieza con algún solvente (p.e.: Thinner) y mantenerla limpia hasta que se halla completado el proceso de rociado térmico. El sustrato debe protegerse de contaminantes como polvo, humedad y huellas de dedos, además debe ser manipulado con accesorios para mantenerlo limpio (Howes Jr. C.P., 1.994)

La preparación de la superficie consiste en producir en el sustrato una superficie “rugosa” para que el revestimiento se adhiera con más facilidad. Esta rugosidad permite brindar esfuerzos superficiales de compresión, entrecruzamiento de las capas de revestimiento, aumento del área de adherencia y descontaminación de la superficie, todo lo cual contribuye al fortalecimiento del revestimiento. Los métodos más empleados para el otorgar rugosidad a las superficies son:

- Soplado con arenilla abrasiva (Sand Blasting).
- Aplicación de revestimiento adhesivo.
- Combinación de los anteriores.

Una vez que la superficie a rociar ha sido sometida a un proceso de soplado con arenilla abrasiva, es necesario remover las partículas que hayan podido quedar incrustadas mediante el soplado con aire, cuya presión dependerá del tamaño de las partículas que fueron utilizadas para el asperezamiento.

### **2.3.3. Diseño de Experimentos.**

Los diseños experimentales factoriales (ASM, Handbook, Vol. XIV, 1.988) se aplican para estudiar los efectos producidos por dos o más factores y son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende aquel en que se investigan todas las posibles combinaciones, de los niveles de los factores, en cada ensayo completo o réplica del experimento.

Fisher (1.958), desarrolló y usó por primera vez el análisis de varianza como herramienta primaria para el análisis estadístico en el diseño experimental.

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea



posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida, (Montgomery, 1.991).

El diseño experimental es un medio de importancia crítica en la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. También se emplea extensamente en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar por resultado:

- Mejoras en el rendimiento del proceso.
- Menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objetivos.
- Menor tiempo de desarrollo.
- Menores costos globales.

El diseño estadístico de experimento es el proceso de planear un experimento con el cual se obtengan datos apropiados, que puedan ser analizados por métodos estadísticos. Se requiere un enfoque estadístico del diseño de experimento para obtener conclusiones significativas a partir de los datos. La metodología experimental es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucre datos sujetos a errores experimentales (Gil, 2.002).

Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son:

- *La obtención de réplicas:* La réplica se refiere a una repetición del experimento básico. Este concepto tiene dos propiedades importantes. En primer lugar permite al experimentador obtener una estimación del error experimental. Tal estimación se convierte en la unidad básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas. En segundo lugar, el uso de réplicas permite al experimentador calcular una estimación más precisa del efecto de un factor en el experimento si se usa la media de la muestra como una estimación de dicho efecto.
- *La aleatorización:* Se entiende por aleatorización el hecho de que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos se determinan aleatoriamente. Los métodos estadísticos requieren que las observaciones (por los errores) sean variables aleatorias independientes. La aleatorización confirma esta suposición. Además,

al aleatorizar adecuadamente el experimento se ayuda a “cancelar” los efectos de valores extraños que pudieran estar presentes.

- *Análisis por bloques*: Es una técnica que se usa para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una porción del material experimental que sea más homogéneo que el total del material. Al realizar un análisis por bloques se hace las comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque.

Para poder determinar el efecto de las variables de los procesos investigados así como los intervalos de trabajo de los mismos, que optimizan la calidad del recubrimiento se utilizan tres métodos diferentes de análisis estadísticos para interpretar los datos:

- i) Análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas en la respuesta de cada variable independiente y sus interacciones.
- ii) Efectos significativos sobre las respuestas a través de gráficos de Pareto.
- iii) Superficies de respuesta e isocuantas para definir intervalos adecuados de trabajo.

La metodología de superficie de respuesta (MSR o RSM, por sus siglas en inglés) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para analizar y modelar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, y cuyo objetivo es optimizar esta respuesta (Montgomery, 1.991).

Los diseños experimentales factoriales se aplican para estudiar los efectos producidos por dos o más factores y son los más eficientes para este tipo de experimento. Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investiga todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores, en cada ensayo completo o réplica del experimento.

En la presente investigación se utilizó un diseño experimental  $2^4$ , es decir, un diseño factorial  $2^k$ , que consta de “k” factores con dos niveles cada uno. Los factores e interacciones se representan mediante letras mayúsculas sin pérdida de generalidad y los dos niveles de los factores pueden referirse como nivel superior e inferior.

**CAPITULO III:**  
**PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para este Trabajo Especial de Grado se utilizó la norma ASTM D2714-68 que describe la geometría del bloque y del anillo para los ensayos de desgaste, además del arreglo “bloque sobre anillo” (Block on Ring), tal y como se enuncia a continuación:

#### 3.1 Materiales.

Los materiales utilizados en la fabricación de las muestras (anillos y bloques) se describen a continuación:

##### 3.1.1 Anillos.

En la fabricación de los anillos fue utilizado un acero para herramientas tipo AISI D-2, de elevada dureza y alta resistencia al desgaste. La composición química de este material es la que se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Composición del Acero AISI D-2**

COMPONENTES		PORCENTAJE (%)	DENSIDAD ( $\rho$ ) [kg/mm <sup>3</sup> ]	DUREZA (HVN)
Carbono	C	1,50	0,00000765	251
Manganeso	Mn	0,35		
Silicio	Si	0,90		
Cromo	Cr	12,00		
Molibdeno	Mo	0,90		
Vanadio	V	0,80		

##### 3.1.2 Bloques.

En la construcción de los bloques se utilizó para el sustrato o base del mismo, un acero de bajo contenido de Carbono AISI 1020, cuya composición química se encuentra contenida en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición del Acero 1020

COMPONENTES		PORCENTAJE (%)	DENSIDAD ( $\rho$ ) [kg/mm <sup>3</sup> ]	DUREZA (HVN)
Carbono	C	0,20	0,185	135
Manganeso	Mn	0,35		
Silicio	Si	0,90		

El material utilizado para recubrir las probetas fue una aleación base hierro comercialmente conocida como Metco 449 (ver Anexo A). La composición de esta aleación está contenida en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Composición de la Aleación Metco 449

COMPONENTES		% PESO	DENSIDAD ( $\rho$ ) [kg/mm <sup>3</sup> ]	DUREZA (HVN)
Hierro	Fe	Balance	0,00000553	345 - 392
Molibdeno	Mo	2 - 3		
Aluminio	Al	2 - 3		
Boro	B	0,1 - 0,3		
Carbono	C	2 - 3		

### 3.2 Fabricación de los elementos para el ensayo.

#### 3.2.1 Anillos.

Los anillos fueron fabricados a partir de un barra maciza de acero calibrado AISI D-2, de diámetro exterior 40,8 mm. y 2.200 mm de longitud. Dicho tubo fue cortado a un espesor de 15 mm. para cada anillo. Los mismos fueron llevados hasta sus dimensiones finales mediante torneado, siendo utilizada una rectificadora para dar el acabado final a la superficie de deslizamiento del anillo. Los planos que muestran las dimensiones de los mismos se encuentran en el Anexo B.

### 3.2.2 Bloques.

Los bloques fueron fabricados a partir de una pletina calibrada AISI 1020, de espesor 25 mm., altura 12,5 mm. y 100 mm. de longitud cada una. Los mismos fueron llevados hasta sus dimensiones finales mediante torneado y fresado, siendo utilizada una rectificadora para dar el acabado final a la superficie de deslizamiento del bloque. Las medidas finales del bloque se muestran en el Anexo B.

### 3.3 Proceso de recubrimiento

Los recubrimientos fueron depositados mediante el proceso de rociado térmico de combustión de baja velocidad (LVOF) con una pistola modelo Metco 5P, la cual utiliza aire comprimido como gas protector.

A fin de encontrar las variables óptimas del proceso se utilizó un diseño experimental factorial ( $2^4$ ), el cual permite realizar diferentes combinaciones de los parámetros a estudiar, que en nuestro diseño fueron los siguientes: presión de alimentación, distancia de rociado, relación oxígeno combustible (Rel O-F) y gas protector. Los resultados permitirán seleccionar la combinación de parámetros que arroje un recubrimiento con las mejores propiedades mecánicas.

En función de lo anterior, se diseñaron 16 condiciones, más una adicional, la número 17, en la cual se usaron los parámetros recomendados por el fabricante. Para las dieciséis (16) condiciones diseñadas según diseño experimental factorial, se hicieron combinaciones de  $\pm 25\%$  para la distancia de rociado,  $\pm 10\%$  para la relación Oxy-Fuel y  $\pm 20\%$  para presión de alimentación de los polvos y gas protector de los parámetros recomendados por el fabricante de la aleación seleccionada en este trabajo (ver Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Valores de los parámetros de rociado según diseño experimental.

Condición	Dist. Rociado (mm)	Rel O-F	Presión Alimentación (Psi)	Gas Protector (Psi)	Dist. Rociado (mm)	Rel O-F	Presión Alimentación (Psi)	Gas Protector (Psi)
1	+	+	+	+	240	37,4	30	21,6
2	-	+	+	+	140	37,4	30	21,6
3	+	-	+	+	240	30,6	30	21,6
4	+	+	-	+	240	37,4	20	21,6
5	+	+	+	-	240	37,4	30	14,4
6	+	+	-	-	240	37,4	20	14,4
7	-	-	+	+	140	30,6	30	21,6
8	+	-	-	+	240	30,6	20	21,6
9	-	+	+	-	140	37,4	30	14,4
10	+	-	-	-	240	30,6	20	14,4
11	-	+	-	-	140	37,4	20	14,4
12	-	-	+	-	140	30,6	30	14,4
13	-	+	-	+	140	37,4	20	21,6
14	+	-	+	-	240	30,6	30	14,4
15	-	-	-	-	140	30,6	20	14,4
16	-	-	-	+	140	30,6	20	21,6
17	F	F	F	F	190	34	25	18

**NOTA:** La Condición 17 corresponde a los parámetros de rociado suministrados por el fabricante del equipo, ver Anexo A. Para que sea un buen rango de valor máximo y mínimo se pensó en un 25% por encima y por debajo de los parámetros suministrados por el fabricante, pero por la sensibilidad de algunos aparatos para medir, tales como el manómetro y el medidor de la relación oxígeno-combustible (Rel O-F), se usaron los rangos indicados para cada uno de los parámetros de rociado.

### 3.4 Ensayos de Desgaste (arreglo bloque sobre anillo)

El ensayo se llevó a cabo en una máquina del tipo bloque - anillo (Block on Ring), para ensayos de desgaste rotativo deslizante, modelo FALEX N° 1, la cual se muestra en la Figura 3.1. El montaje utilizado en la máquina Falex se muestra en la Figura 3.2.



Fig. 3.1. Máquina Falex Alfa LFW-1

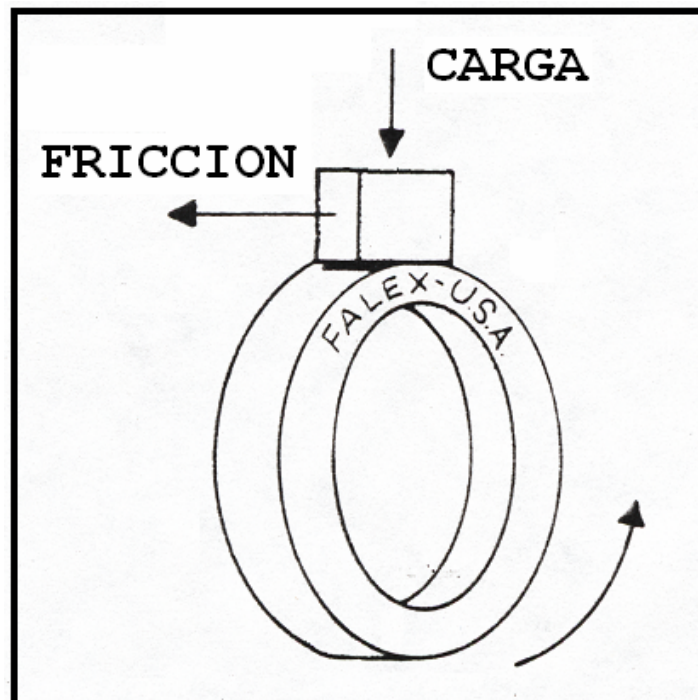


Fig. 3.2. Esquema del montaje bloque sobre anillo.



En este ensayo se realizan medidas de coeficiente de roce (máxima y mínima), así como de la temperatura del espécimen o probeta en función de la distancia deslizada (número de ciclos) a una velocidad constante 0,1 m/s (50 rpm). Las mediciones fueron hechas de la siguiente manera: primero cada 21,99 m (200 ciclos) hasta 131,95 m (1200 ciclos), y luego cada 54,98 m (500 ciclos), desde 164,93 m (1500 ciclos) hasta 549,78 m (5000 ciclos). Para un número de ensayos distribuidos de la siguiente forma:

$$\# \text{ Total de ensayos} = (n^K * R + F) * c$$

K: Número de parámetros de rociado (4)

n: Niveles (2)

$n^K$ : Niveles al número de parámetros ( $2^4$ )

R: # de réplicas (3)

F: Parámetros de rociado suministrados por el fabricante (1)

c: Con y Sin lubricación (2)

Lo que arroja un número total de 102 ensayos.

El lubricante utilizado en el ensayo fue el aceite mineral Havoline SJ 10W – 30, cuya formulación con bases parafínicas altamente refinadas y con aditivos, le confieren propiedades físico – químicas y de rendimiento que proporcionan mayor protección contra el desgaste debido a la formación de una película lubricante. Las características de este lubricante se encuentran contenidas en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Características del Lubricante SAE 10W-30**

Grado SAE	Viscosidad		Índice de Viscosidad	Punto de Fluidez ° C	Punto de Inflamación ° C	Densidad Relativa a 15,6° C
	CSt a 40 ° C	CSt a 100 ° C				
10W – 30	70	11	140	- 18	220	0,880

El proceso de limpieza previo a la determinación del peso de las muestras está especificado en la norma ASTM D 2714 –68 de calibración y preparación de la máquina para el estudio de fricción y desgaste, la cual recomienda lo siguiente: Para proteger del

óxido las piezas a ser ensayadas, luego del rectificado con las series de lijas, se procede a sumergirlas en un aceite ligero identificado como aceite marca Puro Lub 68, viscosidad a 40°C, 67,66 centistokes; para posteriormente dejarlas en remojo con acetona o desengrasante industrial (Thinner) por 24 horas de anticipación al momento de ser montadas en la máquina de ensayo. Esto último se hace con la finalidad de remover todo el aceite contenido en la superficie, y luego se pasan por alcohol absoluto al 90%, el tiempo suficiente para que tanto los bloques como los anillos estén exentos de cualquier sustancia contaminante.

Posteriormente se secan con un secador manual, para luego proceder al pesaje en una balanza electrónica digital (analítica) marca Ainsworth modelo AA-160 con una precisión de 0,0001 g.

Una vez finalizado el proceso anterior se procede a la limpieza de la cámara de ensayo, procediendo después a la calibración de la máquina para una carga determinada. El procedimiento de calibración de la máquina FALEX se encuentra en el Anexo G.

### 3.5 Procedimiento de Cálculo y Reportes.

#### 3.5.1 Volumen de Desgaste.

La obtención del volumen de desgaste, “VD”, se hace aplicando la Ecuación 1. La masa “m” del material desgastado se obtiene por diferencia, a partir de los datos recabados experimentalmente, antes y después de cada ensayo, tanto para el bloque como para el anillo, mediante pesaje con la balanza electrónica. La densidad o peso específico “ρ”, viene determinada según el material, en nuestro caso se utilizó para los bloques, Metco 449 y para los anillos el acero AISI D-2 (ver composición química en la Tabla 3.1 y 3.3).

$$VD = \frac{m}{\rho} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

Donde, “VD”, es el volumen de desgaste del bloque o anillo, en [mm<sup>3</sup>] “m”, es la masa del material desgastado del bloque o anillo, en [g]; “ρ”, es la densidad o peso específico en [g/mm<sup>3</sup>].

**3.5.2 Determinación de la densidad ( $\rho$ ) del recubrimiento.**

Puesto que la densidad de los polvos es distinta a la del recubrimiento se procedió su determinación experimental (ver Tabla 3.6), tomando cuatro muestras aleatorias de recubrimiento, esto debido a que el material del recubrimiento es el mismo para todas las condiciones, pero los parámetros de rociado son diferentes para cada condición.

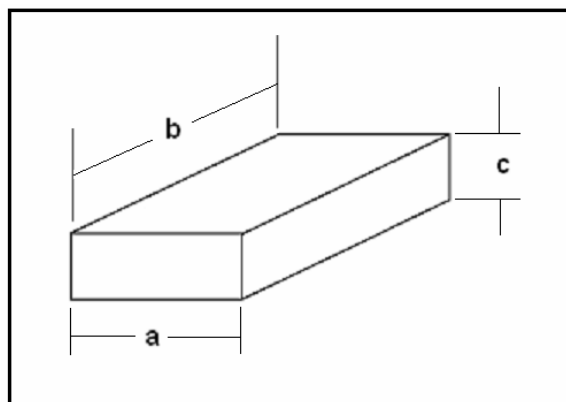
La densidad ( $\rho$ ), se define por la ecuación 2:

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots \text{Ec. 2}$$

Donde, “ $\rho$ ”, es la densidad en [g/mm<sup>3</sup>], “m”, es la masa del recubrimiento en [g] y “V”, es el volumen del recubrimiento en [mm<sup>3</sup>]. La densidad, “ $\rho$ ”, se calcula mediante la Ecuación 2.

**Tabla 3.6 Valores para el cálculo de la densidad del recubrimiento.**

Recubrimiento	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	m (g)	Densidad (g/mm <sup>3</sup> )	Densidad promedio (g/mm <sup>3</sup> )
I	6,2	15,3	1,1	104,35	0,5675	0,005527	0,00553
II	6,1	15,2	1,1	101,99	0,6039	0,005921	
III	6,3	15,3	1,2	115,67	0,622	0,005377	
IV	6,2	15,4	1,1	105,3	0,556	0,005293	



**Fig. 3.3 Disposición de las caras del recubrimiento para el cálculo de la densidad.**

### 3.5.3 Tasa de desgaste.

La tasa de desgaste, “TD”, se define como el volumen de desgaste, “VD”, por unidad de distancia deslizada, “d”, por la ecuación 3.

$$TD = \frac{VD}{d} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3}$$

Donde, “TD”, es la tasa de desgaste en [mm<sup>3</sup>/m], “VD”, es el volumen de desgaste en [mm<sup>3</sup>] y “d”, es la distancia deslizada en [m]. El volumen de desgaste, “VD”, se calcula mediante la Ecuación 1, ya sea para el bloque o para el anillo y la distancia deslizada “d”, es de 549,776 m (5000 ciclos).

### 3.5.4 Coeficiente de Fricción.

El coeficiente de fricción “f”, se define como el cociente de la fuerza de fricción “Fr”, entre la carga normal “Fn”, El cual se calcula mediante la Ecuación 4.

$$f = \frac{Fr}{Fn} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

Donde, “Fr”, se obtiene directamente por lectura de la máquina Falex y “Fn” es la carga aplicada, la cual fué de 1.066,67 N (240 lb-f), constante, tanto para los ensayos sin y con lubricación.

## 3.6 Análisis de muestras mediante Microscopía Electrónica.

A fin de analizar la superficie desgastada, se utilizó la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MBE) en modo de electrones secundarios, la cual se realizó en un Microscopio marca Philips, modelo XL 30, tal como se indica en la Figura 3.4. Para la observación de la microestructura se utilizó la misma técnica para las muestras pero en modo de electrones primarios.

Se procedió a la preparación metalográfica de las probetas siguiendo los pasos:

1. Se devastaron y se pulieron con papel de lija de carburo de silicio de 300, 400, 600, 800 y 1200, en un equipo Buehler, (ver Figura 3.5) con plato giratorio a 240 r.p.m.
2. Posteriormente se pulieron con paños, utilizando alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) como abrasivo con un tamaño de partícula inicialmente de 1 micrón, y finalizando con 0,3 micrones.

Las probetas fueron desbastadas (con superficie especular) y pulidas con la finalidad de apreciar con mayor nitidez tanto el tipo de estructura que presenta cada recubrimiento como la interfase entre el recubrimiento y el sustrato. A su vez, se realizó la determinación de la composición química (semicuantitativo) del recubrimiento en las zonas estudiadas, mediante la técnica de análisis químico por difracción de rayos X (EDX).



**Fig. 3.4. Microscopio de Barrido Electrónico Philips XL – 30.**

### **3.7 Ensayo de Microdureza Vickers.**

Para realizar los ensayos de Microdureza, previamente se procedió a la preparación superficial de los bloques, tal y como se describió anteriormente la sección 3.6.

Posteriormente se determinó la Microdureza Vickers en un equipo Marca Leitz Wetzlar, modelo Metallux 7520 como se muestra en la Figura 3.6 con un indentador de diamante, sobre la superficie transversal del sustrato. La Figura 3.7 muestra esquemáticamente las áreas donde se realizó el ensayo. Se realizaron 6 indentaciones aplicadas en el sustrato con una carga de 0,3 Kg.



Fig. 3.5. a) Equipo Buehler con platos giratorios. b) Detalle del equipo.

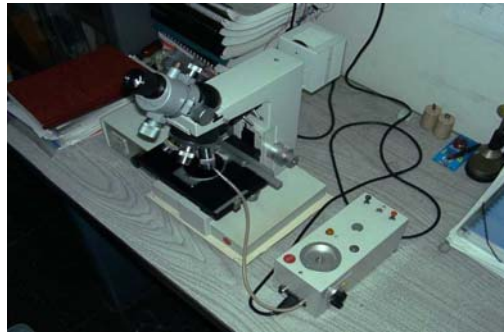


Fig. 3.6 Microdurómetro Vickers marca Leitz Wetzlar modelo 7520

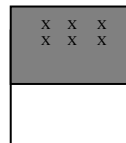


Fig. 3.7 Disposición de las identaciones en la cara transversal del Recubrimiento.

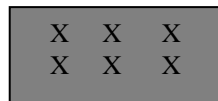
### 3.8 Ensayos de Macro dureza Rockwell.

Para realizar los ensayos de Macro dureza, previamente se procedió a remover impurezas que puedan existir sobre la superficie del sustrato, para lo cual se utilizaron lijas con diferentes granulometrías.

El equipo utilizado para la realización del ensayo fue un durómetro marca Wilson/Rockwell Hardness Tester serie 500, modelo B504 – T, como se muestra en la Figura 3.8, en la escala Rockwell A. Se realizaron 6 identaciones aplicadas en el sustrato con una carga de 60 Kg, a lo largo del todo el recubrimiento. La Figura 3.9 muestra esquemáticamente la zona del recubrimiento en la cual se realizaron las identaciones.



**Fig. 3.8 Durómetro Wilson/Rockwell Hardness Tester B504 – T.**



**Fig. 3.9 Disposición de las identaciones en la cara longitudinal del recubrimiento**

**CAPITULO IV:**  
**RESULTADO EXPERIMENTAL**



## 4. RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 4.1 Ensayos de Desgaste

Unos de los estudios realizados en este Trabajo Especial de Grado, consiste en el estudio experimental mediante ensayo al desgaste del sustrato METCO 449 con geometría tipo bloque sobre anillo deslizante, normalizado según la norma ASTM D2714 – 88 , con y sin lubricación con la máquina de ensayos de fricción tipo FALEX N° 1.

Los valores de la masa de los bloques antes y después del ensayo de desgaste sin lubricación se muestran en la Tabla 4.1.

Los valores de la masa de los bloques antes y después del ensayo de desgaste con lubricación se muestran la Tabla 4.2.

Los valores de la masa de los anillos antes y después del ensayo de desgaste sin lubricación se muestran en la Tabla 4.3.

Los valores de la masa de los anillos antes y después del ensayo de desgaste con lubricación se muestran en la Tabla 4.4.

Se procedió al pesaje de masas de los bloques y los anillos antes y después de la realización del ensayo de desgaste, posteriormente se determinó la diferencia de masa mediante la siguiente expresión:

$$\Delta m = m_i - m_f$$

donde:

$\Delta m$ : Diferencia de masa [g]

$m_i$ : Masa antes del ensayo [g]

$m_f$ : Masa después del ensayo [g]

Nota: Los valores de las masas antes y después del ensayo, la diferencia de masa y el promedio de las diferencias de las tablas 4.1, 4.2,4.3 y 4.4 están expresados en gramos (g).

Tabla 4.1. Valores de las masas de los bloques sin lubricación antes y después del ensayo.

Condición	Replica 1			Replica 2			Replica 3			Promedio Diferencia
	Bloque Antes	Bloque Despues	Diferencia de masa	Bloque Antes	Bloque Despues	Diferencia de masa	Bloque Antes	Bloque Despues	Diferencia de masa	
1	7,7786	7,6989	0,0797	7,7811	7,7248	0,0563	7,7728	7,6934	0,0794	0,0718
2	7,7721	7,6479	0,1242	7,7728	7,7026	0,0702	7,7766	7,6833	0,0933	0,0959
3	7,7352	7,7278	0,0074	7,4321	7,3598	0,0723	7,3673	7,3021	0,0652	0,0483
4	7,7993	7,6668	0,1325	7,7989	7,6947	0,1042	7,6253	7,5258	0,0995	0,1121
5	7,7672	7,6435	0,1237	7,7586	7,6693	0,0893	7,7816	7,7238	0,0578	0,0903
6	7,7712	7,7416	0,0296	7,7796	7,6664	0,1132	7,7714	7,6578	0,1136	0,0855
7	7,6351	7,4579	0,1772	7,6746	7,5385	0,1361	7,0635	6,9422	0,1213	0,1449
8	7,8034	7,7244	0,0790	7,8017	7,6556	0,1461	7,7873	7,6583	0,1290	0,1180
9	7,7520	7,6868	0,0652	7,2967	7,2350	0,0617	7,7382	7,6437	0,0945	0,0738
10	7,7869	7,7712	0,0157	7,7833	7,6783	0,1050	7,7894	7,7426	0,0468	0,0558
11	7,7498	7,7137	0,0361	7,7538	7,6227	0,1311	7,7651	7,6409	0,1242	0,0971
12	7,7983	7,7798	0,0185	7,7931	7,6915	0,1016	7,7131	7,5831	0,1300	0,0834
13	7,7930	7,6480	0,1450	7,5802	7,4338	0,1464	7,7905	7,6511	0,1394	0,1436
14	7,8233	7,7144	0,1089	7,7097	7,5570	0,1527	7,8029	7,6767	0,1262	0,1293
15	7,7990	7,6955	0,1035	7,7987	7,6600	0,1387	7,8064	7,6737	0,1327	0,1250
16	7,7786	7,7614	0,0172	7,7713	7,6432	0,1281	7,7667	7,6504	0,1163	0,0872
17	7,7759	7,6974	0,0785	7,7586	7,6648	0,0938	7,7720	7,6860	0,0860	0,0861

Tabla 4.2. Valores de las masas de los bloques con lubricación antes y después del ensayo.

Condición	Replica 1			Replica 2			Replica 3			Promedio Diferencia
	Bloque Antes	Bloque Despues	Diferencia de masa	Bloque Antes	Bloque Despues	Diferencia de masa	Bloque Antes	Bloque Despues	Diferencia de masa	
1	7,7519	7,7486	0,0033	7,3666	7,3662	0,0004	7,7651	7,7632	0,0019	0,0019
2	7,7725	7,7705	0,0020	7,3502	7,3489	0,0013	7,4358	7,4350	0,0008	0,0014
3	7,7232	7,7223	0,0009	7,6514	7,6502	0,0012	7,6427	7,6411	0,0016	0,0012
4	7,7796	7,7771	0,0025	7,7830	7,7828	0,0002	7,7935	7,7925	0,0010	0,0012
5	7,7784	7,7753	0,0031	7,5311	7,5304	0,0007	7,7789	7,7777	0,0012	0,0017
6	7,7860	7,7844	0,0016	7,7783	7,7779	0,0004	7,2492	7,2488	0,0004	0,0008
7	7,6715	7,6701	0,0014	7,6711	7,6709	0,0002	7,6727	7,6723	0,0004	0,0007
8	7,7970	7,7952	0,0018	7,6517	7,6510	0,0007	7,6415	7,6410	0,0005	0,0010
9	7,7469	7,7432	0,0037	7,6293	7,6289	0,0004	7,7401	7,7400	0,0001	0,0014
10	7,7792	7,7771	0,0021	7,5655	7,5654	0,0001	7,6778	7,6776	0,0002	0,0008
11	7,7508	7,7488	0,0020	7,7517	7,7506	0,0011	7,7610	7,7602	0,0008	0,0013
12	7,7951	7,7916	0,0035	7,6332	7,6321	0,0011	7,8063	7,7870	0,0193	0,0080
13	7,7822	7,7806	0,0016	7,7974	7,7967	0,0007	7,7998	7,7996	0,0002	0,0008
14	7,8155	7,8150	0,0005	7,8038	7,8027	0,0011	7,8009	7,7999	0,0010	0,0009
15	7,8083	7,8078	0,0005	7,7497	7,7494	0,0003	7,8047	7,7692	0,0355	0,0121
16	7,7771	7,7762	0,0009	7,7618	7,7616	0,0002	7,7699	7,7687	0,0012	0,0008
17	7,7659	7,7643	0,0016	7,7823	7,7798	0,0025	7,6681	7,6657	0,0024	0,0022

Tabla 4.3. Valores de las masas de los anillos sin lubricación antes y después del ensayo.

Condición	Replica 1			Replica 2			Replica 3			Promedio Diferencia
	Anillo Antes	Anillo Despues	Diferencia de masa	Anillo Antes	Anillo Despues	Diferencia de masa	Anillo Antes	Anillo Despues	Diferencia de masa	
1	21,6515	21,5854	0,0661	22,7363	22,6606	0,0757	21,5941	21,4932	0,1009	0,0809
2	23,4050	23,3038	0,1012	22,7337	22,6427	0,0910	22,5825	22,5002	0,0823	0,0915
3	21,7604	21,5797	0,1807	22,4902	22,3902	0,1000	22,7397	22,5994	0,1403	0,1403
4	22,9902	22,8841	0,1061	22,1579	21,9999	0,1580	21,6987	21,6220	0,0767	0,1136
5	22,9771	22,8238	0,1533	22,2263	22,0925	0,1338	22,1100	22,0433	0,0667	0,1179
6	21,8706	21,7051	0,1655	22,7850	22,6916	0,0934	22,3699	22,2612	0,1087	0,1225
7	22,6368	22,5005	0,1363	21,5947	21,4932	0,1015	21,6467	21,5320	0,1147	0,1175
8	22,0163	21,8458	0,1705	21,8196	21,7034	0,1162	21,7196	21,6129	0,1067	0,1311
9	22,0653	21,8698	0,1955	22,1512	22,0629	0,0883	21,6211	21,5530	0,0681	0,1173
10	22,4436	22,3942	0,0494	22,3270	22,2221	0,1049	21,6964	21,6455	0,0509	0,0684
11	22,3380	22,2715	0,0665	22,3247	22,2156	0,1091	22,1397	22,0469	0,0928	0,0895
12	22,9419	22,8743	0,0676	21,6239	21,4971	0,1268	22,4207	22,2837	0,1370	0,1105
13	22,7646	22,5528	0,2118	21,8591	21,7323	0,1268	21,9611	21,7696	0,1915	0,1767
14	22,1356	21,9728	0,1628	21,7285	21,5976	0,1309	22,3984	22,2589	0,1395	0,1444
15	23,3942	23,2454	0,1488	22,9033	22,7823	0,1210	22,1614	22,0318	0,1296	0,1331
16	23,5323	23,4792	0,0531	21,7955	21,6623	0,1332	22,2268	22,1083	0,1185	0,1016
17	21,4086	21,2389	0,1697	22,5240	22,4601	0,0639	22,0713	22,0089	0,0624	0,0987

Tabla 4.4. Valores de las masas de los anillos con lubricación antes y después del ensayo.

Condición	Replica 1			Replica 2			Replica 3			Promedio Diferencia
	Anillo Antes	Anillo Despues	Diferencia de masa	Anillo Antes	Anillo Despues	Diferencia de masa	Anillo Antes	Anillo Despues	Diferencia de masa	
1	19,4674	19,4159	0,0515	21,8850	21,8811	0,0039	22,1554	22,1489	0,0065	0,0206
2	21,4082	21,3970	0,0112	22,7666	22,7623	0,0043	22,4662	22,4572	0,0090	0,0082
3	19,9246	19,9191	0,0055	22,8372	22,8346	0,0026	21,8972	21,8891	0,0081	0,0054
4	20,5887	20,5818	0,0069	21,9918	21,9873	0,0045	21,8259	21,8199	0,0060	0,0058
5	22,1529	22,1452	0,0077	22,3753	22,3711	0,0042	22,6638	22,6599	0,0039	0,0053
6	20,8966	20,8740	0,0226	22,2784	22,2745	0,0039	22,3497	22,3440	0,0057	0,0107
7	22,7642	22,7584	0,0058	22,5684	22,5660	0,0024	22,3460	22,3430	0,0030	0,0037
8	22,6258	22,6210	0,0048	22,1580	22,1539	0,0041	21,8313	21,8207	0,0106	0,0065
9	21,5279	21,5119	0,0160	21,9150	21,9103	0,0047	22,5730	22,5693	0,0037	0,0081
10	21,2204	21,2112	0,0092	21,7722	21,7677	0,0045	22,2967	22,2930	0,0037	0,0058
11	22,9718	22,9665	0,0053	22,7551	22,7505	0,0046	21,9975	21,9922	0,0053	0,0051
12	22,6622	22,6563	0,0059	21,2252	26,2207	-4,9955	22,0388	22,0199	0,0189	-1,6569
13	22,8241	22,8188	0,0053	22,5950	22,5910	0,0040	23,2095	23,2063	0,0032	0,0042
14	22,8736	22,8694	0,0042	22,2542	22,2498	0,0044	21,9761	21,9699	0,0062	0,0049
15	22,0428	22,0300	0,0128	22,3880	22,3826	0,0054	22,1051	22,0995	0,0056	0,0079
16	23,3320	23,3232	0,0088	22,3023	22,2989	0,0034	22,1264	22,1012	0,0252	0,0125
17	21,8237	21,7867	0,0370	22,1030	22,1001	0,0029	21,8994	21,8953	0,0041	0,0147

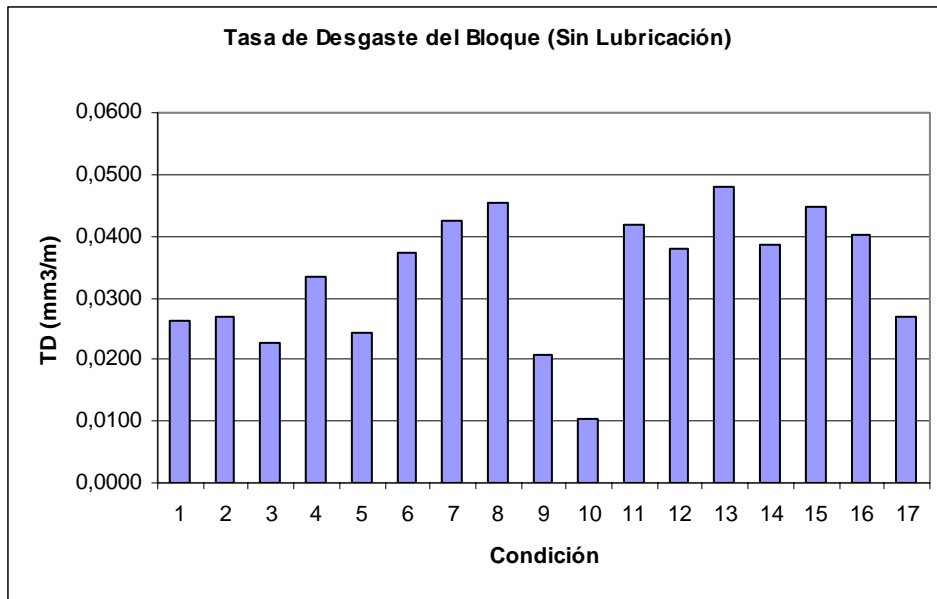
Con los datos obtenidos en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se calculó el volumen de desgaste, posteriormente se procedió a la depuración estadística tal y como se indica en el Anexo C, y con estos valores depurados se calculó la tasa de desgaste. Los valores que se obtuvieron para la tasa y el volumen de desgaste se muestran en la Tabla 4.5:

**Tabla 4.5. Resultados de desgaste con y sin lubricación.**

Condición	Sin Lubricación				Con Lubricación			
	Bloque		Anillo		Bloque		Anillo	
	Volumen Desgaste (mm <sup>3</sup> )	Tasa Desgaste (mm <sup>3</sup> /m)	Volumen Desgaste (mm <sup>3</sup> )	Tasa Desgaste (mm <sup>3</sup> /m)	Volumen Desgaste (mm <sup>3</sup> )	Tasa Desgaste (mm <sup>3</sup> /m)	Volumen Desgaste (mm <sup>3</sup> )	Tasa Desgaste (mm <sup>3</sup> /m)
1	14,391	0,0262	12,826	0,0233	0,471	0,0009	0,912	0,0017
2	14,789	0,0269	15,675	0,0285	0,190	0,0003	1,827	0,0033
3	12,437	0,0226	21,736	0,0395	0,190	0,0003	1,230	0,0022
4	18,425	0,0335	16,534	0,0301	0,108	0,0002	1,167	0,0021
5	13,306	0,0242	25,984	0,0473	0,172	0,0003	0,733	0,0013
6	20,514	0,0373	18,280	0,0332	0,072	0,0001	0,868	0,0016
7	23,282	0,0423	19,556	0,0356	0,054	0,0001	0,488	0,0009
8	24,884	0,0453	20,162	0,0367	0,108	0,0002	0,805	0,0015
9	11,478	0,0209	14,147	0,0257	0,045	0,0001	0,760	0,0014
10	5,653	0,0103	9,073	0,0165	0,027	0,0000	0,740	0,0013
11	23,068	0,0420	18,262	0,0332	0,172	0,0003	0,959	0,0017
12	20,949	0,0381	23,862	0,0434	0,416	0,0008	0,940	0,0017
13	26,358	0,0479	36,479	0,0664	0,082	0,0001	0,652	0,0012
14	21,265	0,0387	24,458	0,0445	0,190	0,0003	0,778	0,0014
15	24,548	0,0447	22,667	0,0412	0,072	0,0001	0,995	0,0018
16	22,106	0,0402	22,766	0,0414	0,139	0,0003	1,104	0,0020
17	14,880	0,0271	11,424	0,0208	0,443	0,0008	0,634	0,0012

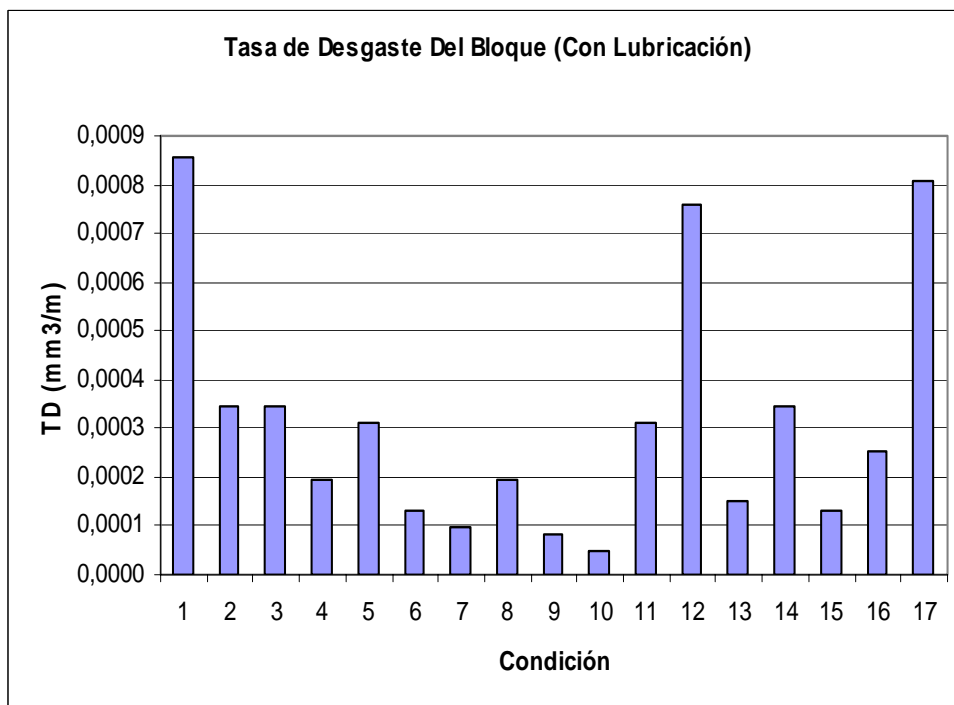
Para mantener una concordancia entre el ensayo sin y con lubricación, se mantuvieron constantes para ambos casos, los parámetros de carga o fuerza aplicada, velocidad de rotación y número de ciclos. Las figuras correspondientes al volumen de desgaste se encuentran en el Anexo I.

Comparando los valores de tasa de desgaste del bloque sin lubricación, podemos notar que las dos condiciones que menor desgaste mostraron fueron la 10 y la 9, mientras que la que mayor desgaste presentó fue la condición 13, tal como se muestra en la Figura 4.1.



**Fig. 4.1 Tasa de Desgaste de los bloques sin lubricación**

Comparando los valores de tasa de desgaste con lubricación, podemos notar que las dos condiciones que menor desgaste mostraron fueron la 10 y 9, entre tanto las de peor comportamiento fueron la 1, 12 y 17, como se muestra en la Figura 4.2.



**Fig. 4.2 Tasa de Desgaste de los bloques con lubricación**

Para poder cuantificar porcentualmente cuanto mejoraron su comportamiento frente al desgaste, se tomó como patrón de referencia la condición que más desgastó. Usándose la siguiente relación para la elaboración de las Figuras 4.3 y 4.4:

$$\%M = \frac{(P - C)}{P} * 100$$

Donde:

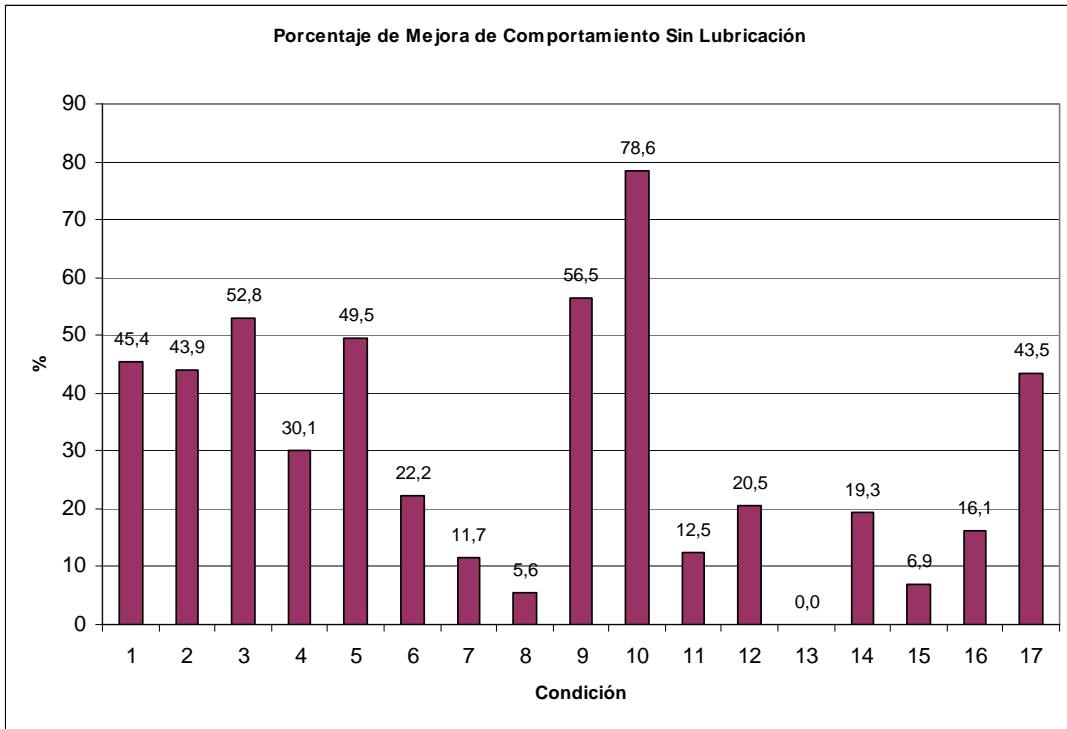
%M: Porcentaje de mejora de comportamiento.

P: Valor del desgaste para la condición que más desgastó.

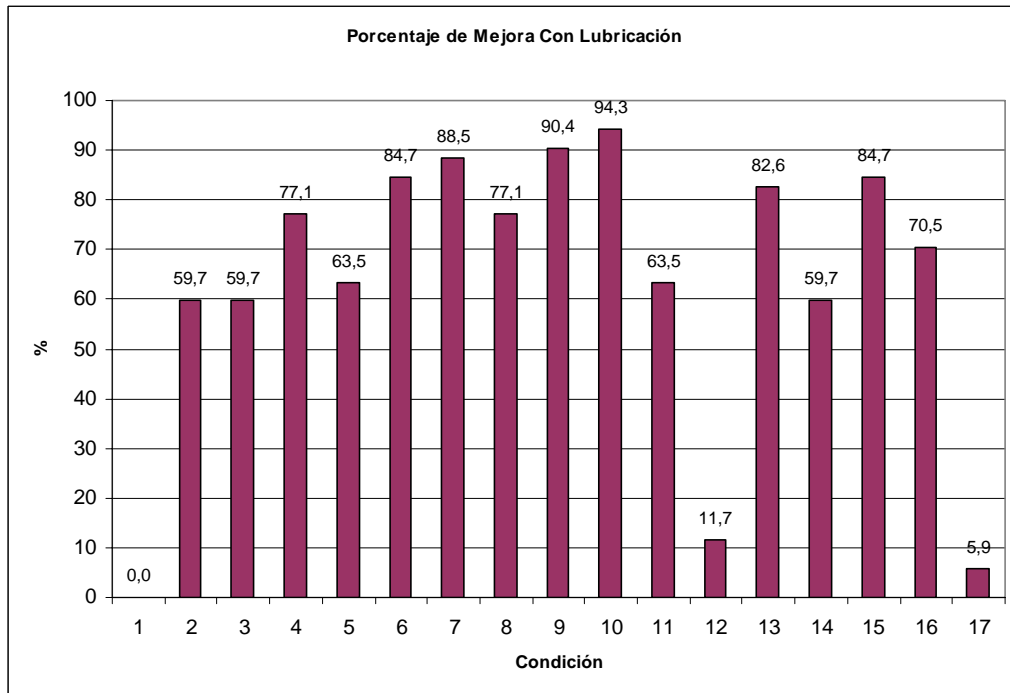
C: Valor del desgaste para cada condición.

La mejora de comportamiento sin lubricación se puede ver en la Figura 4.3 (que se basó en la corrida 13 como patrón de referencia para el peor comportamiento), se puede observar que las condición 9 y 10 mostraron una mejora sustancial respecto a todas las demás condiciones.

La mejora de comportamiento con lubricación se puede ver en la Figura 4.4 (que se basó en la condición 1 como patrón de referencia para la condición más desfavorable), se puede observar que las condiciones 9 y 10 mostraron una mejora sustancial respecto a todas las demás condiciones.



**Fig. 4.3. Porcentaje de mejora de comportamiento sin lubricación**



**Fig. 4.4 Porcentaje de mejora de comportamiento con lubricación**

Puesto que el anillo también sufre desgaste en la realización del ensayo, es necesario conocer su comportamiento, usando los mismos criterios que se usaron para los bloques, es decir, Volumen y Tasa de Desgaste, tal como se muestra en las Figuras 4.5 y 4.6.

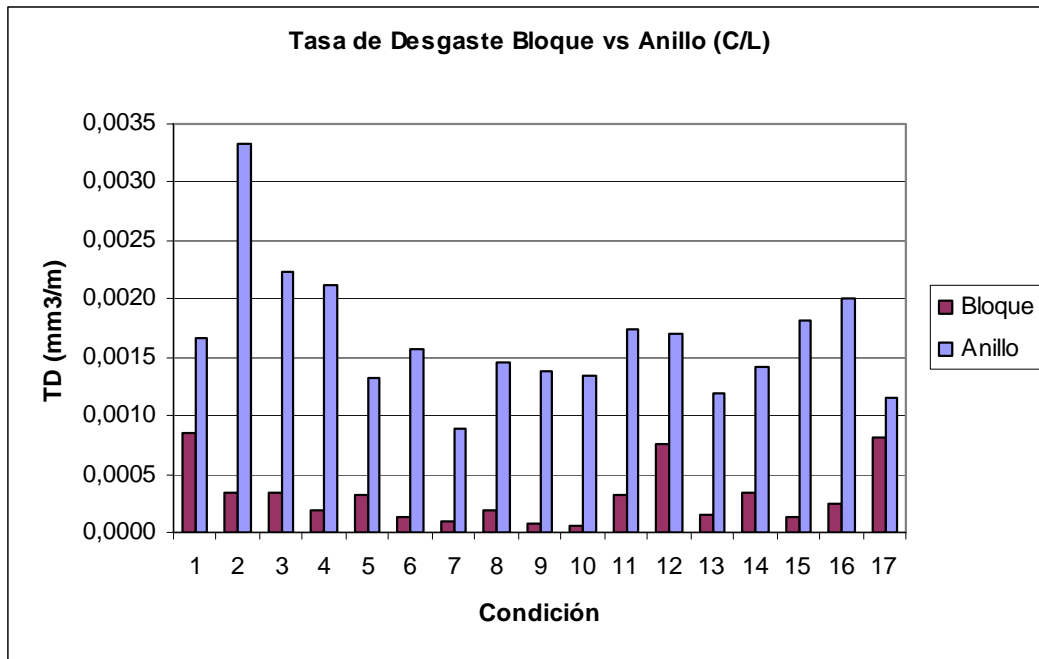


Fig. 4.5. Tasa de Desgaste Bloque vs. Anillo con lubricación

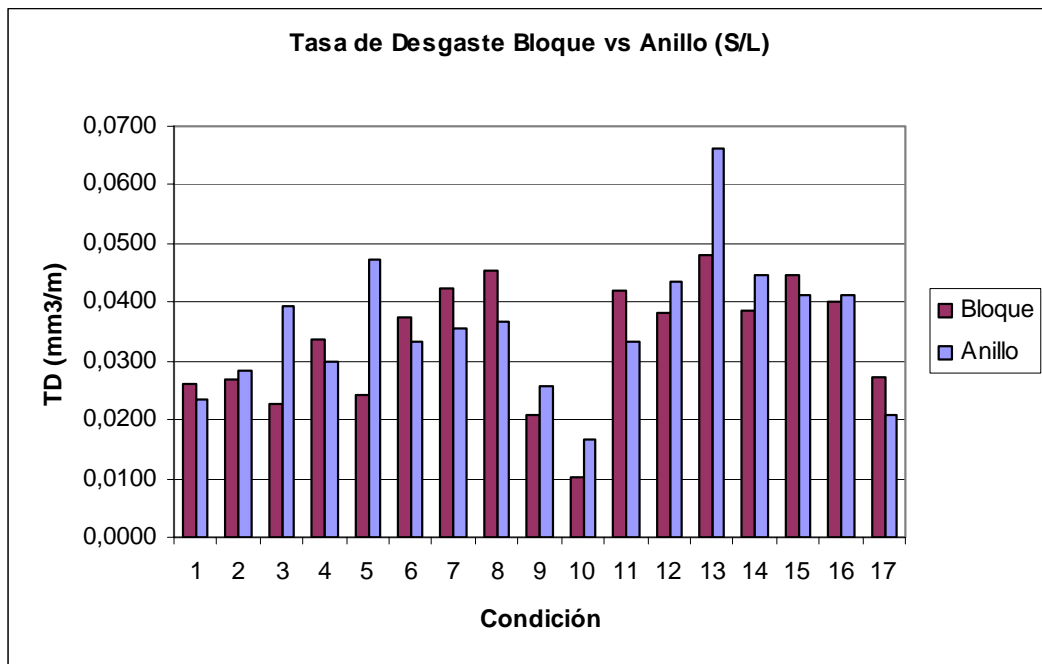
Según se observa en el Figura 4.5, los anillos desgastaron notablemente más que los bloques, excepto en la condición 17 cuyo desgaste fue similar. El desgaste del anillo en la condición 2 fue el más alto, esto quizás por la alta presencia de gotas poco fundidas desgastando el anillo y produciendo desgaste adhesivo en el bloque.

Se observa también que la condición que mejor comportamiento para el bloque mostró fue la condición 10 seguida de la 9, mientras que la condición 17, cuyos parámetros de rociado fueron suministrado por el fabricante, fue una de las condiciones que mostró peor comportamiento, conjuntamente con las condiciones 1 y 12.

Como se dijo en los fundamentos teóricos, los recubrimientos rociados térmicamente, se distinguen entre otras características por tener una alta resistencia al desgaste y este hecho, junto con la lubricación límite, explica porqué los valores de desgaste de los bloque son tan bajos, y el que los anillos son por consiguiente los que más altos valores de desgaste muestran, comparados con sus bloques respectivos, ver



Figura 4.5. Si se observa la figura antes mencionada, no se encontrará una correlación o tendencia aparente como la que se observa en los ensayos sin lubricación.



**Fig. 4.6. Tasa de Desgaste Bloque vs. Anillo sin lubricación**

Para los ensayos sin lubricación se puede observar la tendencia o correlación, que indica que si un bloque desgasta poco, el anillo desgasta poco, o también, si un bloque desgasta mucho, el anillo desgasta mucho; para demostrar esto podemos ver que la condición 10, fue la que menor desgaste mostró en el bloque y el anillo; la condición 17 el desgaste mostró un comportamiento intermedio; la condición 13 fue la que más desgastó en el bloque y el anillo. Si se observa la Figura 4.6 se podrá constatar la relación o tendencia antes descrita.

Puesto que del análisis estadístico no se obtuvo ninguna influencia significativa de los parámetros de rociado sobre la tasa de desgaste no se puede inferir cómo contribuyen los mencionados parámetros en el desgaste. Para poder descubrir de qué manera u otros factores que puedan contribuir al desgaste es necesaria la realización de los ensayos de microscopia y dureza como se verá a continuación.

## 4.2 Análisis Estadístico del desgaste

Para poder determinar la influencia de los parámetros de rociado sobre la tasa de desgaste es necesario realizar un estudio estadístico de varianza de los datos de la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Valores de los parámetros de rociado y tasa de desgaste.

Condicion	Distancia de Rociado (mm)	Relación Oxy-Fuel	Presión Alimentación (Psi)	Gas Protector (Psi)	Tasa de Desgaste (mm <sup>3</sup> /m)
1	240	37,4	30	21,6	0,00086
2	140	37,4	30	21,6	0,00035
3	240	30,6	30	21,6	0,00035
4	240	37,4	20	21,6	0,00020
5	240	37,4	30	14,4	0,00031
6	240	37,4	20	14,4	0,00013
7	140	30,6	30	21,6	0,00010
8	240	30,6	20	21,6	0,00020
9	140	37,4	30	14,4	0,00008
10	240	30,6	20	14,4	0,00005
11	140	37,4	20	14,4	0,00031
12	140	30,6	30	14,4	0,00076
13	140	37,4	20	21,6	0,00015
14	240	30,6	30	14,4	0,00035
15	140	30,6	20	14,4	0,00013
16	140	30,6	20	21,6	0,00025

Los resultados del análisis de varianza se muestran en la Tabla 4.7 (la cual se obtuvo con el programa STATGRAPHICS PLUS 5.1):

Tabla 4.7. Análisis de Varianza para Tasa de Desgaste

FUENTE	ESTATIGRAFO
<i>Efectos Principales</i>	
A: Distancia de Rociado (m)	0,7725
B: Relación Oxy-Fuel	0,8414
C: Presión de Alimentación (psi)	0,1457
D: Gas Protector (psi)	0,7621
<i>Interacciones</i>	
AB:	0,4054
AC:	0,434
AD:	0,2868
BC:	0,9174
BD:	0,3225
CD:	0,9835

La Tabla 4.7 (ANOVA) analiza la variabilidad de la Tasa de Desgaste en función de la influencia de varios factores. El estatígrafo mide la significancia estadística de

cada uno de los parámetros. Como ninguno de los estadígrafos son menores al 0,05, ninguno de los factores o de las interacciones tienen un efecto estadístico significativo sobre la Tasa de Desgaste al 95% de confiabilidad.

### 4.3 Ensayos de Microscopía:

En base a los resultados obtenidos de volumen de desgaste (VD) y la tasa de desgaste (TD), contenidos en la Tabla 4.6, se seleccionaron las condiciones que presentaron el mejor valor, el peor valor y la condición que se roció con los parámetros suministrados por el fabricante. En la Tabla 4.8, se presentan las condiciones seleccionadas y los parámetros utilizados para cada condición.

**Tabla 4.8. Valores seleccionados del ensayo de desgaste.**

Condición	Dist. Rociado (mm)	Rel O-F	Presión Alimentación (Psi)	Gas Protector (Psi)
1	240	37,4	30	21,6
10	240	30,6	20	14,4
17	190	34	25	18

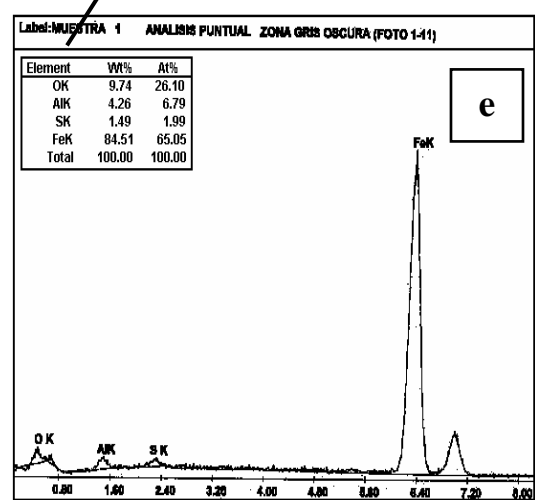
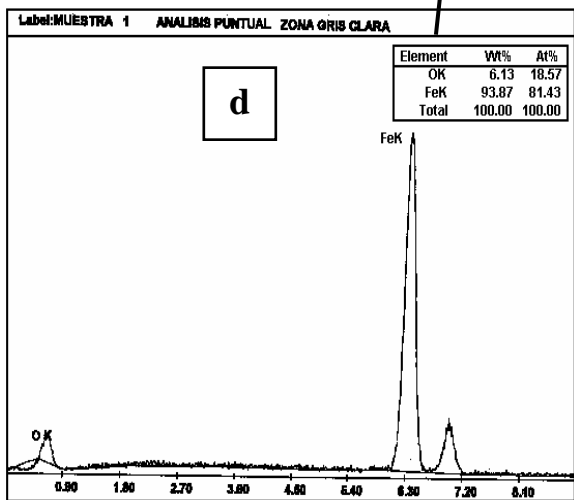
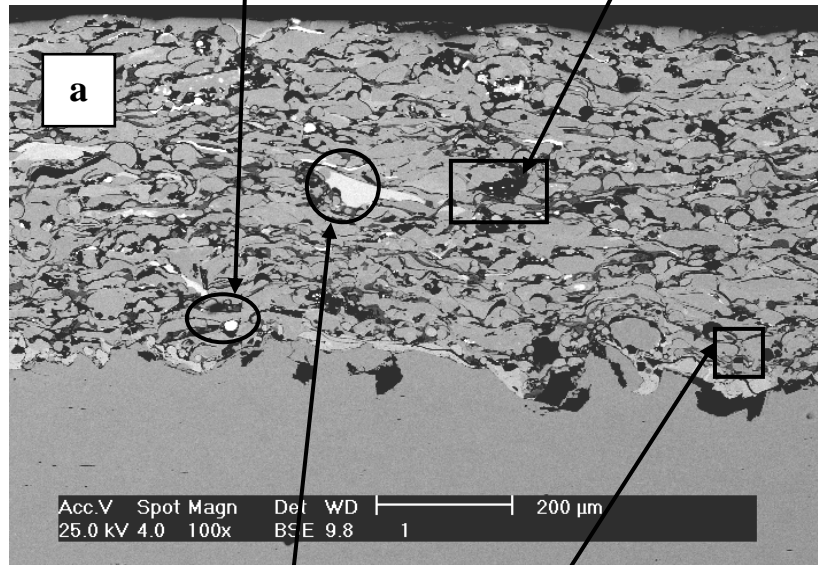
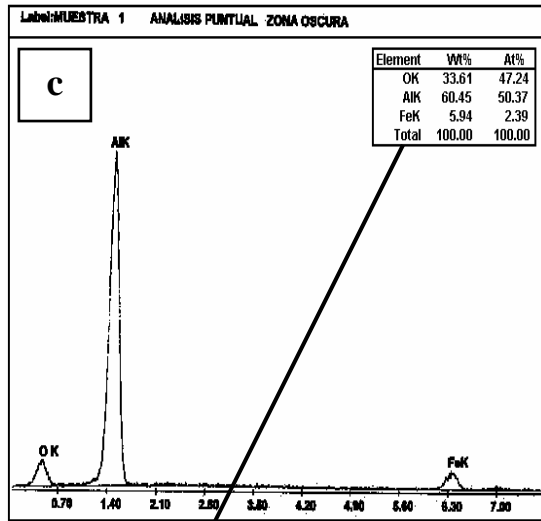
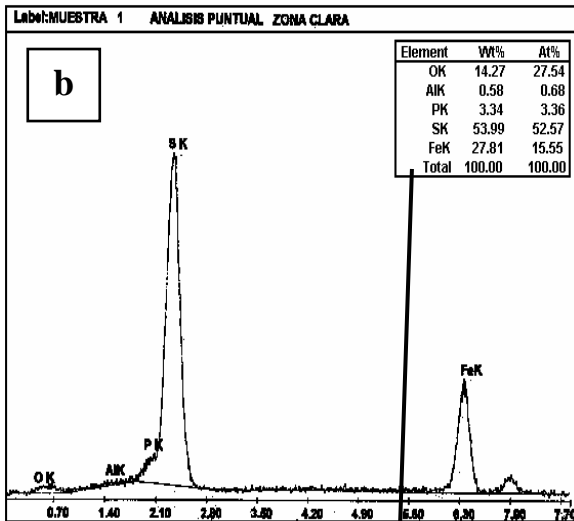
### 4.4 Análisis de las micrografías seleccionadas de acuerdo al ensayo de desgaste:

#### 4.4.1. Condición 1

Fue rociada térmicamente con los siguientes parámetros: distancia de rociado de 240 mm; Relación O-F de 37,4; La presión de alimentación de los polvos de 30 psi y el gas protector 21,6 psi.

La Figura 4.7.a, corresponde a una micrografía obtenida a través de Microscopía de Barrido Electrónica (MEB) del recubrimiento en estudio, muestra una microestructura típica de un recubrimiento logrado por rociado térmico en el cual se puede observar que las fases se han esparcido y formado una fina estructura en capas o lamellas, conocida normalmente como estructura lamellar. La fase clara, encerrada en un óvalo en la Figura 4.7.a, corresponde posiblemente a molibdeno como elemento mayoritario, aunque también se observa la presencia de hierro, oxígeno, fósforo y aluminio, este último en menores cantidades, tal como lo indica el análisis químico semicuantitativo por dispersión de rayos X (EDX), en la Figura 4.7.b. La fase oscura, encerrada en un

recuadro en la Figura 4.7.a, corresponde posiblemente a un óxido de aluminio, aunque se aprecia también la presencia de hierro y oxígeno, según el EDX, que indica la Figura 4.7.c La fase gris clara, encerrada en un círculo en la Figura 4.7.a, corresponde a hierro en su mayor parte y una cantidad menor de oxígeno, según el EDX, en la Figura 4.7.d. La fase gris oscura, encerrada en un rectángulo en la Figura 4.7.a, corresponde posiblemente un óxido de hierro en su mayor parte y una cantidad menor de molibdeno, aluminio y oxígeno, según el EDX, en la Figura 4.7.e.



**Fig. 4.7. a) Micrografía (MEB) a 100X de un recubrimiento Metco 449 en electrones primarios para la condición 1. b) EDX de la fase clara. c) EDX de la fase oscura d) EDX de la fase gris clara e) EDX de la fase gris oscura**

#### **4.4.2. Condición 10**

Fue rociada térmicamente con los siguientes parámetros: distancia de rociado de 240 mm; Relación O-F de 30,6; La presión de alimentación de los polvos de 20 psi y el gas protector 14,4 psi.

La Figura 4.8.a, corresponde a una micrografía obtenida a través de Microscopía de barrido electrónica (MEB) del recubrimiento en estudio, muestra una microestructura típica de un recubrimiento logrado por rociado térmico en el cual se puede observar que las fases se han esparcido y formado una fina estructura en capas o lamellas, conocida normalmente como estructura lamellar. Un análisis por dispersión de rayos X (EDX), en la Figura 4.8.b, detectó que la fase clara, encerrada en un óvalo en la Figura 4.8.a, está formada principalmente por molibdeno, así como también por oxígeno, aluminio, fósforo y hierro en menor cantidad. Un análisis similar realizado sobre la fase oscura, encerrada en un recuadro en la Figura 4.8.a, indicó la presencia de aluminio y oxígeno en su mayor parte, hierro en una cantidad mayor que en la fase clara, según el EDX, en la Figura 4.8.c. En la fase gris clara, encerrada en un círculo en la Figura 4.8.a, la cual está compuesta principalmente por hierro como elemento mayoritario, molibdeno, aluminio y oxígeno están presentes pero en menor escala que en la fase clara, tal como lo evidencia su respectivo EDX, en la Figura 4.8.d. La fase gris oscura, encerrada en un rectángulo en la Figura 4.8.a, esta formada posiblemente por óxidos, debido a la presencia tanto de hierro como de oxígeno como elementos mayoritarios, así como también molibdeno pero en menor proporción, según el EDX, en la Figura 4.8.e.

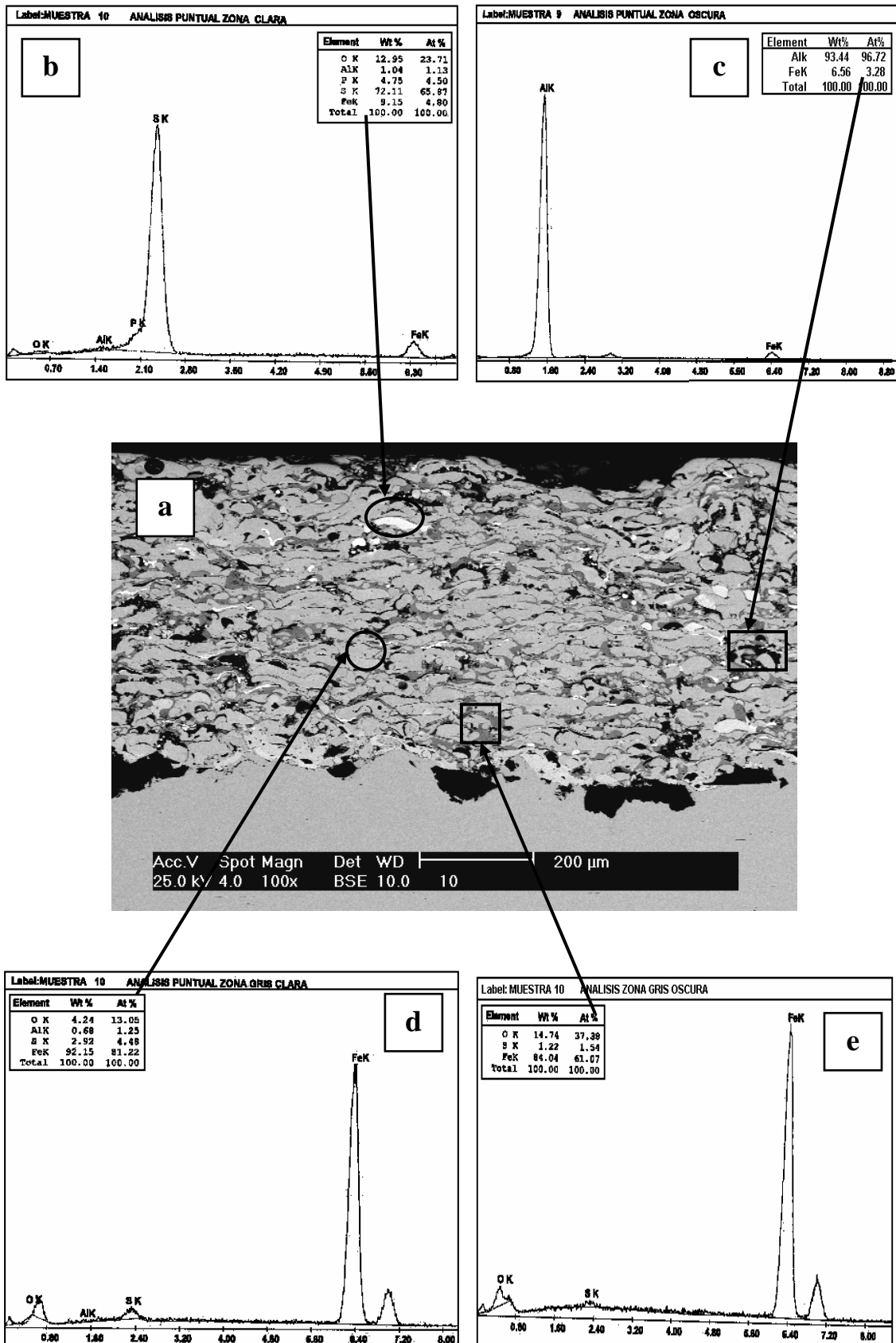


Fig. 4.8. a) Micrografía (MEB) a 100X de un recubrimiento Metco 449 en electrones primarios para la condición 10. b) EDX de la fase clara. c) EDX de la fase oscura d) EDX de la fase gris clara e) EDX de la fase gris oscura

#### 4.4.3 Condición 17

Fue rociada térmicamente con los siguientes parámetros: distancia de rociado de 190 mm; Relación O-F de 34; La presión de alimentación de los polvos de 25 psi y el gas protector 18 psi (como indica el fabricante).

La Figura 4.9.a, corresponde a una micrografía obtenida a través de microscopía electrónica de barrido (MBE) del recubrimiento en estudio, depositado mediante la técnica de LVOF (Low Velocity Oxy-Fuel). El recubrimiento es característico de aquellos depositados por rociado térmico, en el cual una estructura en forma de capas o lamellas es observada. La fase clara, encerrada en un óvalo en la Figura 4.9.a, corresponde posiblemente a oxígeno y molibdeno como elementos mayoritarios y la presencia de hierro en una proporción menor, tal como lo indica el análisis químico semicuantitativo por dispersión de rayos X (EDX) en la Figura 4.9.b. La fase oscura, encerrada en un recuadro en la Figura 4.9.a, corresponde posiblemente a aluminio y oxígeno como elementos mayoritarios, lo cual evidencia la posible presencia de óxido de aluminio, el hierro también está presente pero una cantidad menor, según el EDX que indica la Figura 4.9.c. La fase gris clara, encerrada en un círculo en la Figura 4.9.a, corresponde a hierro y oxígeno como elementos mayoritarios y la presencia de molibdeno en menor proporción que el mostrado en la fase clara, según el EDX que indica la Figura 4.9.d. La fase gris oscura, encerrada en un rectángulo en la Figura 4.9.a, corresponde posiblemente a óxidos, debido a la presencia de hierro y oxígeno como elementos mayoritarios, también indicó la presencia de aluminio y molibdeno, en una menor proporción, según el EDX que indica la Figura 4.9.e.



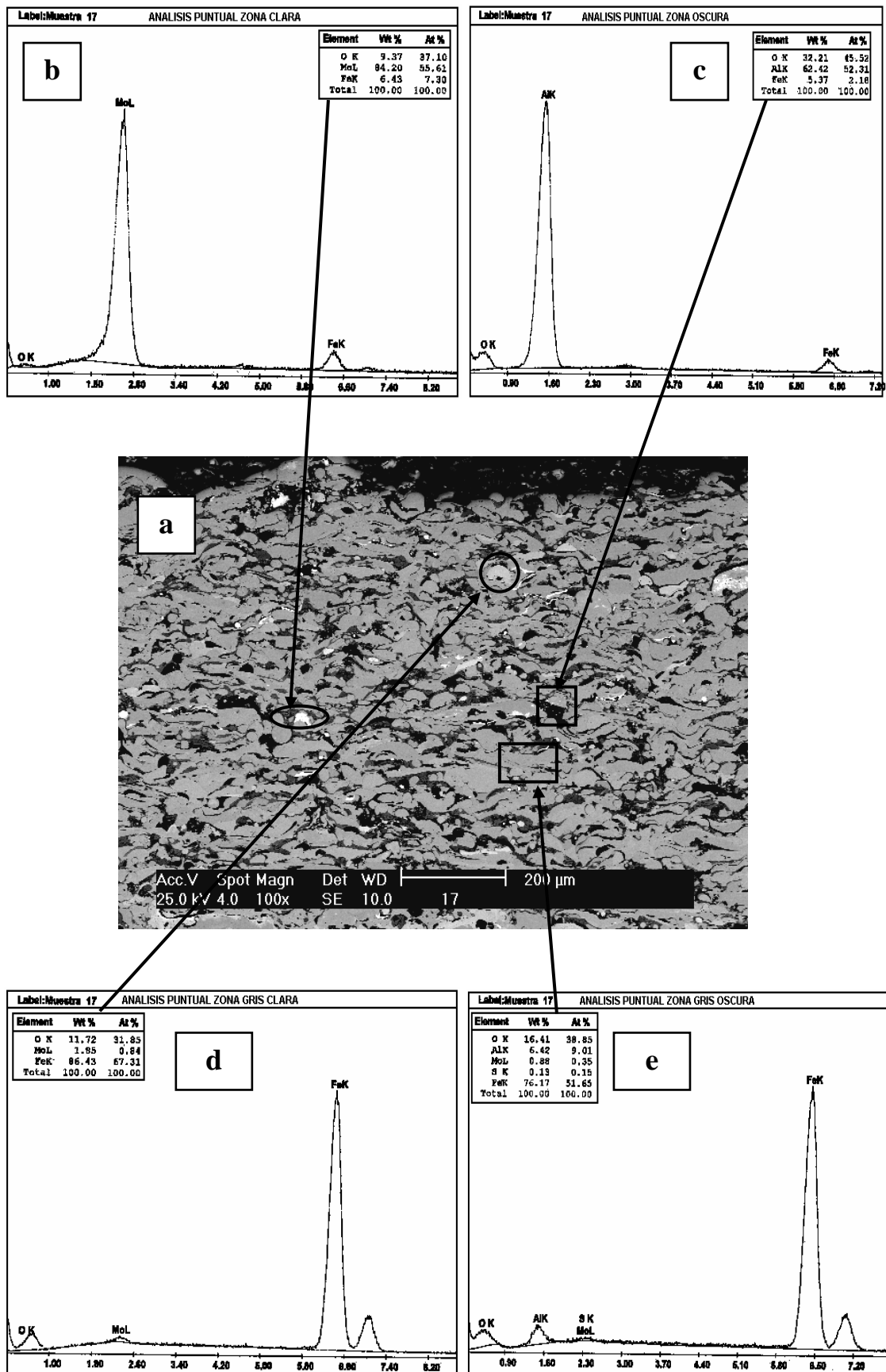


Fig. 4.9. a) Micrografía (MEB) a 100X de un recubrimiento Metco 449 en electrones primarios para la condición 17. b) EDX de la fase clara. c) EDX de la fase oscura d) EDX de la fase gris clara e) EDX de la fase gris oscura

En la tabla 4.9, se muestran los valores que fueron tomados de los análisis químicos por dispersión de rayos X (EDX) para las condiciones seleccionadas.

**Tabla 4.9. Porcentaje en peso de las fases para las condiciones seleccionadas**

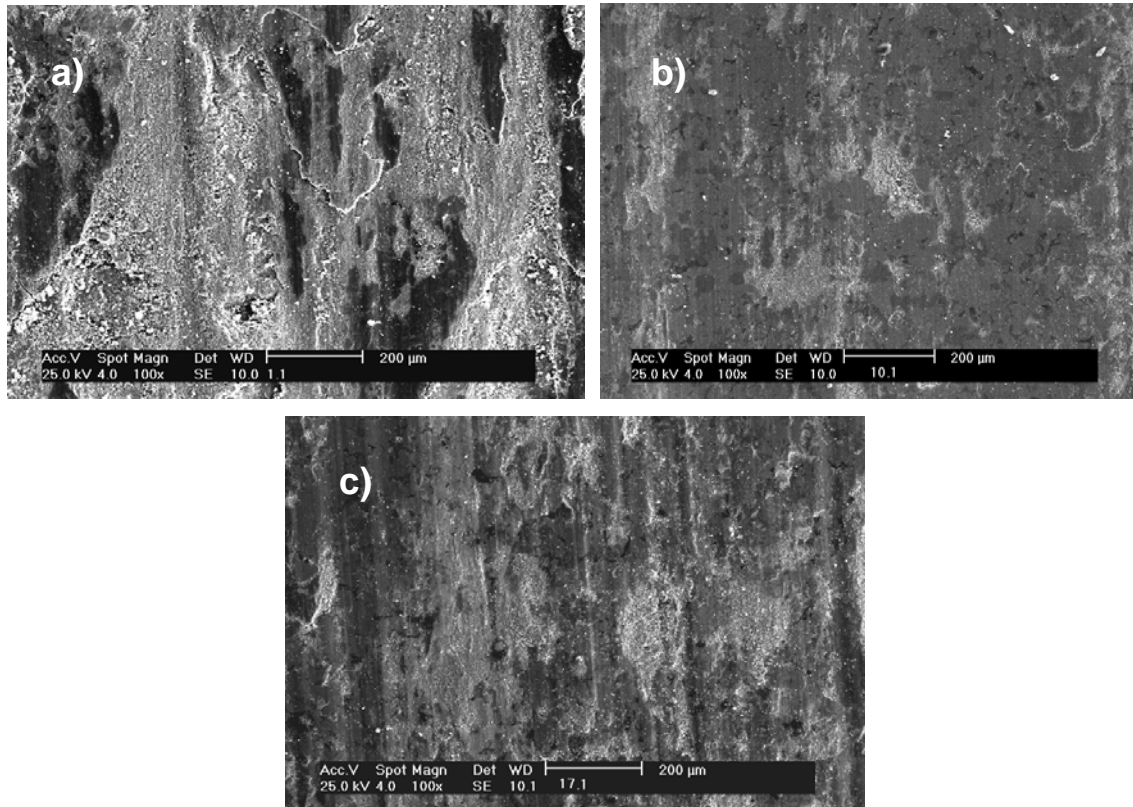
Fase/Condición	% en Peso		
	1	10	17
Clara (Molibdeno)	53,99	72,11	84,20
Oscura (Aluminio)	60,45	66,49	62,42
Gris Clara (Hierro)	35,93	92,15	86,43
Gris Oscura (Hierro)	84,51	84,04	76,17

Al realizar un análisis cualitativo y realizar una comparación entre las condiciones 1 y 17, (Tabla 4.9), se puede apreciar que el porcentaje de la fase oscura (aluminio) es muy aproximado para ambas condiciones, mientras que la variación tanto de la fase gris clara (hierro) es mayor en la condición 17 que en la 1, en tanto que la gris oscura (hierro) es mayor en la 1 que en la 17. En la fase clara (molibdeno) la condición 17 presenta mayor porcentaje de esta fase que la condición 1.

Al realizar un análisis cualitativo y realizar una comparación entre las condiciones 10 y 17, (Tabla 4.9), se puede apreciar que para esta última condición, disminuyó un poco el porcentaje de la fase oscura (aluminio), mientras que la variación tanto de la fase gris clara, como de la gris oscura es mayor en la condición 10. En la fase clara hubo una disminución en la cantidad de molibdeno respecto a la condición 17.

Un mayor porcentaje de la fase gris clara (hierro) contribuye a una mayor resistencia al desgaste, ver Tabla 4.9.

A continuación se muestran las micrografías de los bloques desgastados correspondientes a las condiciones 1, 10 y 17, para el resto de las condiciones el mecanismo de desgaste es el mismo, y sus micrografías se encuentran en el Anexo F.



**Fig. 4.10. Micrográfica de desgaste. a) Huella de desgaste para la condición 1. b) Huella de desgaste para la condición 10. c) Huella de desgaste para la condición 17.**

El desgaste observado para todas las condiciones fue del tipo adhesivo, tanto para el bloque como para el anillo (Figura 4.10). Este tipo de desgaste se produce por la interacción de las asperezas de cuerpos en contacto entre los cuales comienzan a actuar fuerzas superficiales significativas de corta duración. Al ocurrir el desplazamiento resulta la destrucción superficial de uno o ambos materiales en contacto. Este tipo de desgaste tiene lugar bastante rápido, dando lugar a formas graves de deterioro en forma de adherencia o desgarramiento en las piezas de máquinas. Cuando las cargas normales que actúan sobre el par deslizante son muy elevadas, el desgaste adhesivo alcanza su forma severa denominada arrastre abrasivo. Aquí es apreciable la cantidad de material que se transfiere de la superficie más caliente hacia la superficie más fría. Esto se detecta frecuentemente por un repentino aumento del nivel de ruido, de la vibración y de la temperatura del lubricante (ASM, Handbook, 1.989).

Las gotas poco fundidas son las que más contribuyen al desgaste adhesivo, que como se dijo anteriormente fue el que se observó en todos los ensayos de desgaste realizados en este estudio. Estas gotas poco fundidas son desprendidas cuando se realiza el ensayo, contribuyendo de esta manera al desgaste adhesivo, por lo que el tamaño y cantidad de las mismas es crucial para el comportamiento del recubrimiento en estos ensayos.

Lo anterior se verifica en las condiciones 1, 10 y 17 que fueron la peor, la mejor y una intermedia, respectivamente, esta última fue rociada térmicamente con los parámetros del fabricante. En las condiciones 1 y 17, se pueden observar gotas poco fundidas, pero en mayor cantidad y de mayor tamaño en la condición 1. En las condiciones 1 y 10 se pueden observar gotas poco fundidas, aparentemente en mayor cantidad en la condición 17, sin embargo el tamaño de las gotas es menor en la condición 10 (como se ve en la Figura 4.11).

De acuerdo con Takasaki (1.992) e Ingham (1.965), si los polvos son alimentados más rápido de lo que pueden ser adecuadamente calentados, la eficiencia del depósito caerá rápidamente y el recubrimiento contendrá una elevada concentración de partículas de polvo no fundidas.

Aunque nuestros parámetros de rociado no fueron estadísticamente significativos respecto al desgaste, según el análisis estadístico de varianza (ANOVA), lo que encontraron Takasaki e Ingham es una explicación a tomar en cuenta para explicar los resultados obtenidos en la presente investigación.

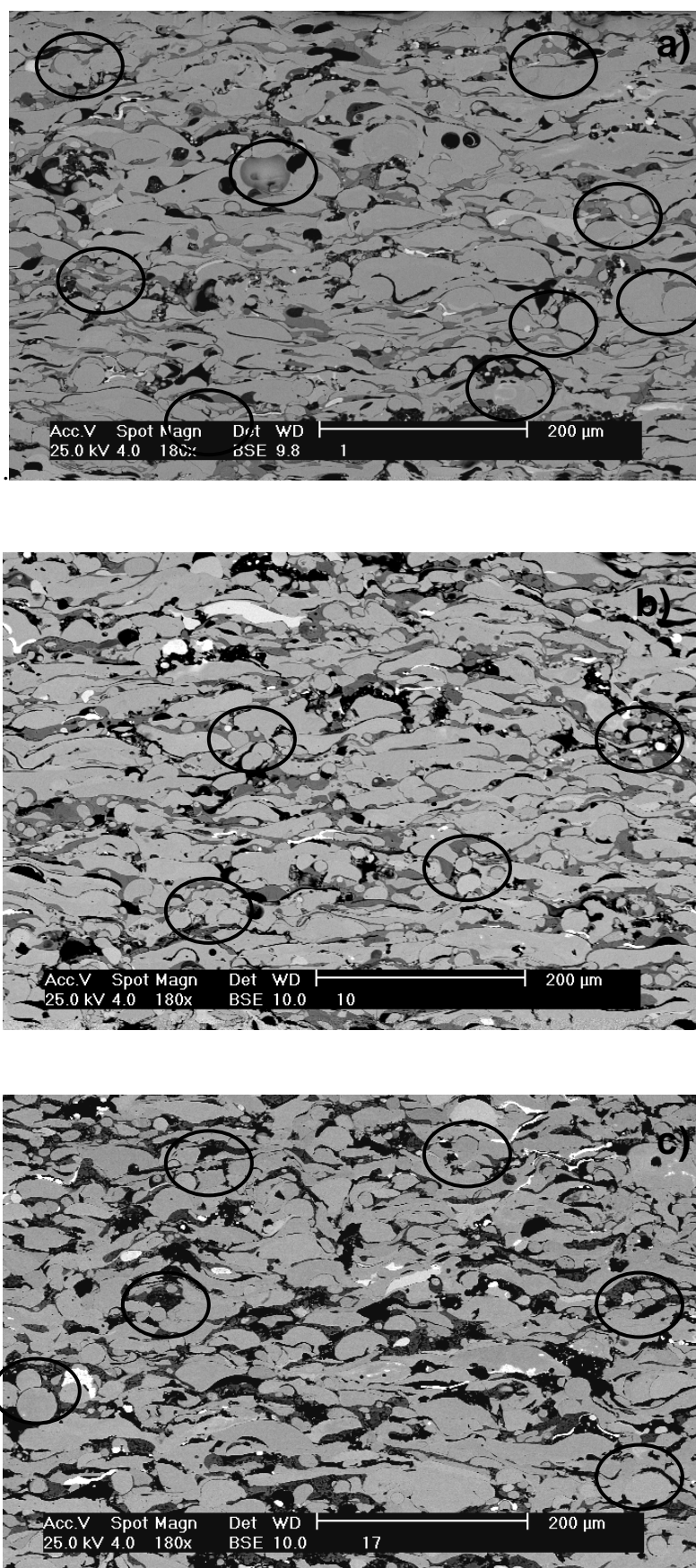


Fig. 4.11. Detalle de gotas poco fundidas de Micrografías tomadas a 180X. a) Condición 1.  
b) Condición 10. c) Condición 17.

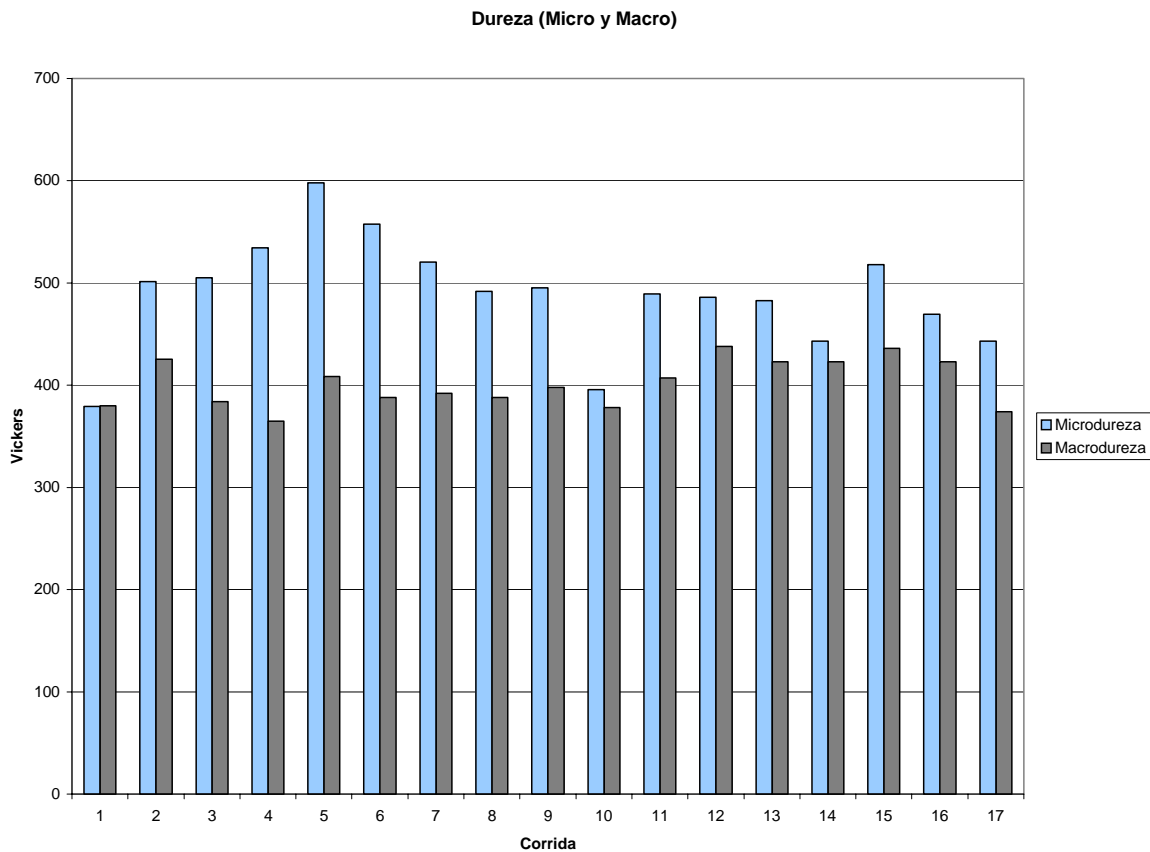
#### 4.5 Ensayos de Dureza.

En la Tabla 4.10 se muestran los resultados de los ensayos de dureza y microdureza.

Tabla 4.10. Resultados de los Ensayos de Dureza.

<i>Corrida</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>Microdureza Vickers</i>	<i>Dureza Rocwell A</i>	<i>Equivalente Vickers</i>
1	+	+	+	+	379,0	69,8	380,0
2	-	+	+	+	501,5	72,1	425,5
3	+	-	+	+	505,0	70,0	384,0
4	+	+	-	+	534,3	69,0	364,8
5	+	+	+	-	597,9	71,3	408,7
6	+	+	-	-	557,5	70,2	388,0
7	-	-	+	+	520,5	70,4	392,0
8	+	-	-	+	492,0	70,2	388,0
9	-	+	+	-	495,3	70,7	398,0
10	+	-	-	-	395,6	69,7	378,0
11	-	+	-	-	489,3	71,2	407,0
12	-	-	+	-	485,9	72,7	438,0
13	-	+	-	+	482,8	72,0	423,0
14	+	-	+	-	443,1	72,0	423,0
15	-	-	-	-	518,0	72,6	436,0
16	-	-	-	+	469,6	72,0	423,0
17	F	F	F	F	443,1	69,5	374,0

<b>A</b>	<b><i>Distancia de Rociado</i></b>
<b>B</b>	<b><i>Relación Oxy-Fuel</i></b>
<b>C</b>	<b><i>Presión de Alimentación</i></b>
<b>D</b>	<b><i>Gas Protector</i></b>



**Fig. 4.12. Dureza y Microdureza**

De la Figura 4.12 se observa que para una buena parte de las condiciones la diferencia entre los valores de microdureza y dureza es bastante grande, esto puede ser debido 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 relaciona directamente con el desgaste.

Esta diferencia también puede deberse a que la macrodureza es una especie de promedio, puesto que al ser la huella de la indentación más grande, engloba varias microestructuras de distintas durezas, lo cual resulta en una lectura que como se dijo anteriormente las promedia todas. En cambio la microdureza por tener una huella de indentación más pequeña, realiza una medición local de una microestructura en específico.

#### **4.6. Análisis estadístico para la dureza**

Para poder determinar la influencia de los parámetros de rociado sobre la Microdureza es necesario realizar un estudio estadístico de varianza de los datos de la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Valores de los parámetros de rociado y Microdureza.

Condicion	Distancia de Rociado (mm)	Relación Oxy-Fuel	Presión Alimentación (Psi)	Gas Protector (Psi)	Microdureza (HVN)
1	240	37,4	30	21,6	379,0
2	140	37,4	30	21,6	501,5
3	240	30,6	30	21,6	505,0
4	240	37,4	20	21,6	534,3
5	240	37,4	30	14,4	597,9
6	240	37,4	20	14,4	557,5
7	140	30,6	30	21,6	520,5
8	240	30,6	20	21,6	492,0
9	140	37,4	30	14,4	495,3
10	240	30,6	20	14,4	395,6
11	140	37,4	20	14,4	489,3
12	140	30,6	30	14,4	485,9
13	140	37,4	20	21,6	482,8
14	240	30,6	30	14,4	443,1
15	140	30,6	20	14,4	518,0
16	140	30,6	20	21,6	469,6

Los resultados del análisis de varianza se muestran en la Tabla 4.12 (la cual se obtuvo con el programa STATGRAPHICS PLUS 5.1):

Tabla 4.12. Análisis de Varianza para la Microdureza

FUENTE	ESTATIGRAFO
<i>Efectos Principales</i>	
A: Distancia de Rociado (m)	0,8387
B: Relación Oxy-Fuel	0,4805
C: Presión de Alimentación (psi)	0,9697
D: Gas Protector (psi)	0,7344
<i>Interacciones</i>	
AB:	0,3876
AC:	0,7344
AD:	0,8086
BC:	0,5617
BD:	0,2154
CD:	0,6429

La Tabla 4.12 (ANOVA) analiza la variabilidad de la Microdureza en función de la influencia de varios factores. El estatígrafo mide la significancia estadística de cada uno de los parámetros. Como ninguno de los estatígrafos son menores al 0,05, ninguno de los factores o de las interacciones tienen un efecto estadístico significativo sobre la Microdureza al 95% de confiabilidad.



#### 4.7. Análisis de temperatura, fuerza de roce y coeficiente de fricción

En los ensayos con lubricación (Figura 4.13), se observó que la temperatura comienza a estabilizarse a partir de los 109,96 m (20 minutos) posterior a esas distancias los valores de temperatura tienden a estabilizarse ya que el lubricante comienza a trabajar en mejores condiciones y este se distribuye de una manera más uniforme. Entre tanto la fuerza de roce tiene fluctuaciones muy pequeñas, como se ve en la Tabla 4.13.

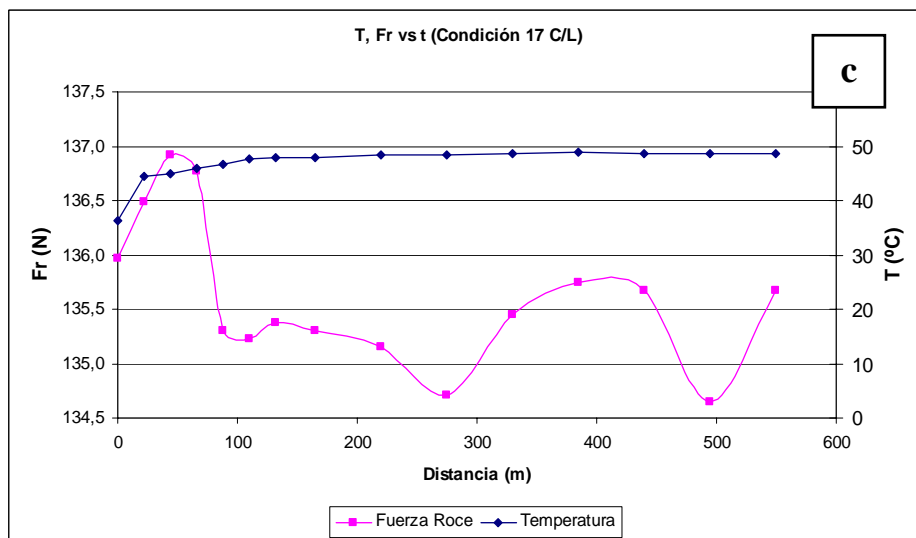
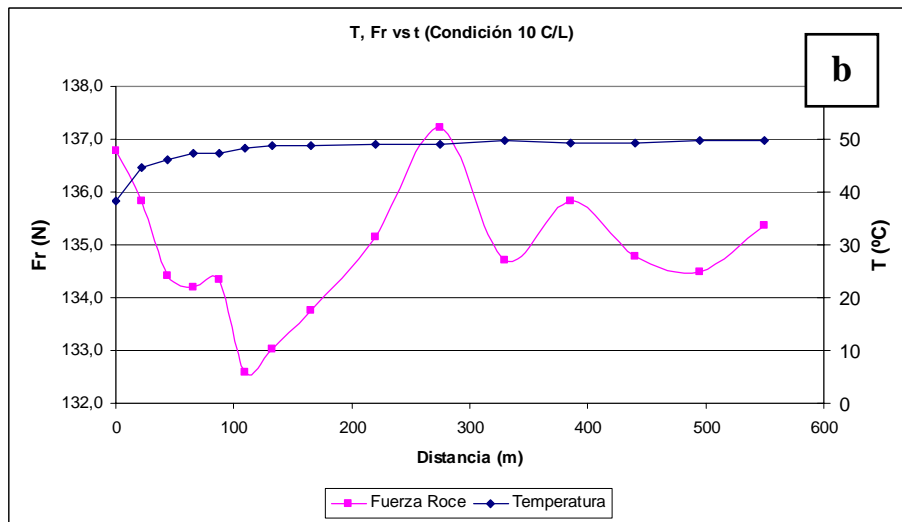
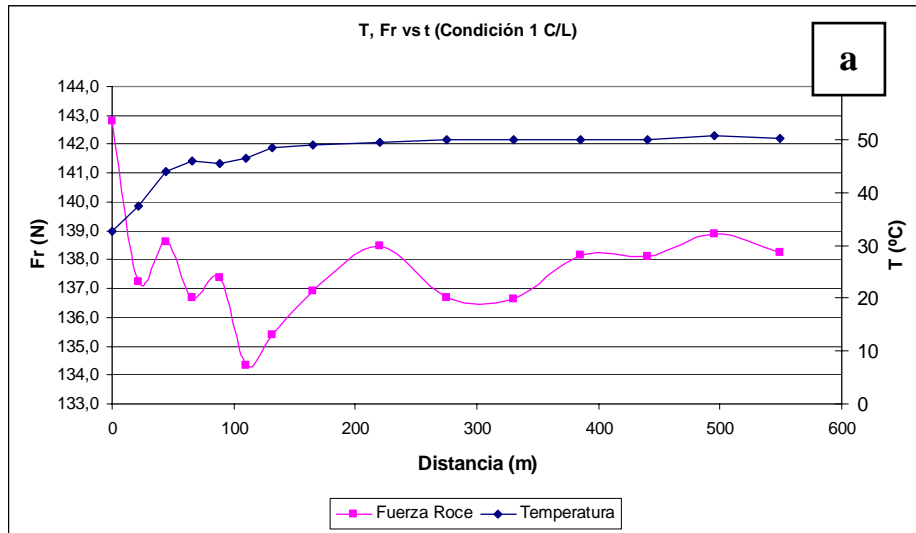
**Tabla 4.13. Valores de Temperatura, Fuerza de Roce y Coeficiente de Fricción para las condiciones seleccionadas con lubricación.**

Distancia	CONDICION 1			CONDICION 10			CONDICION 17		
	T (°C)	Fuerza Roce (N)	Coeficiente de Roce	T (°C)	Fuerza Roce (N)	Coeficiente de Roce	T (°C)	Fuerza Roce (N)	Coeficiente de Roce
0	33	142,8	0,134	38	136,8	0,128	36	136,0	0,127
21,99	37	137,2	0,129	45	135,8	0,127	44	136,5	0,128
43,98	44	138,6	0,130	46	134,4	0,126	45	136,9	0,128
65,97	46	136,7	0,128	47	134,2	0,126	46	136,8	0,128
87,96	45	137,4	0,129	47	134,3	0,126	47	135,3	0,127
109,96	46	134,3	0,126	48	132,6	0,124	48	135,2	0,127
131,95	48	135,4	0,127	49	133,0	0,125	48	135,4	0,127
164,93	49	136,9	0,128	49	133,8	0,125	48	135,3	0,127
219,92	49	138,5	0,130	49	135,2	0,127	48	135,2	0,127
274,9	50	136,7	0,128	49	137,2	0,129	48	134,7	0,126
329,88	50	136,6	0,128	50	134,7	0,126	49	135,5	0,127
384,86	50	138,2	0,130	49	135,8	0,127	49	135,7	0,127
439,84	50	138,1	0,129	49	134,8	0,126	49	135,7	0,127
494,82	51	138,9	0,130	50	134,5	0,126	49	134,6	0,126
549,77	50	138,2	0,130	50	135,4	0,127	49	135,7	0,127

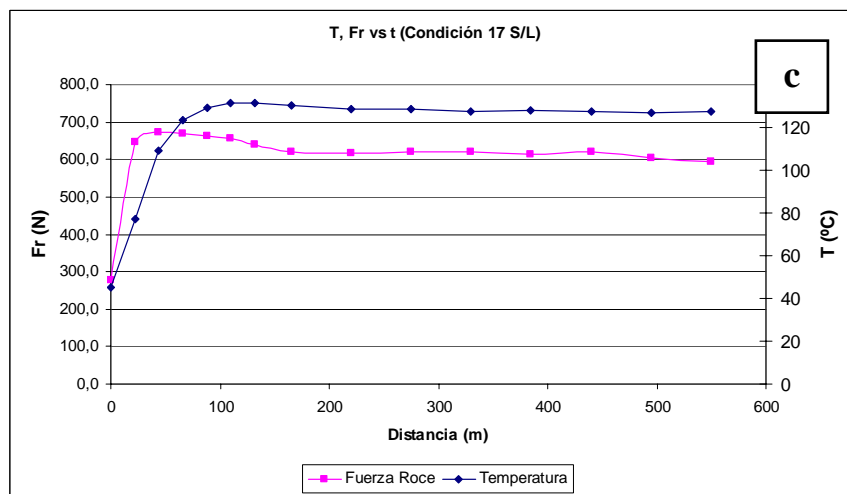
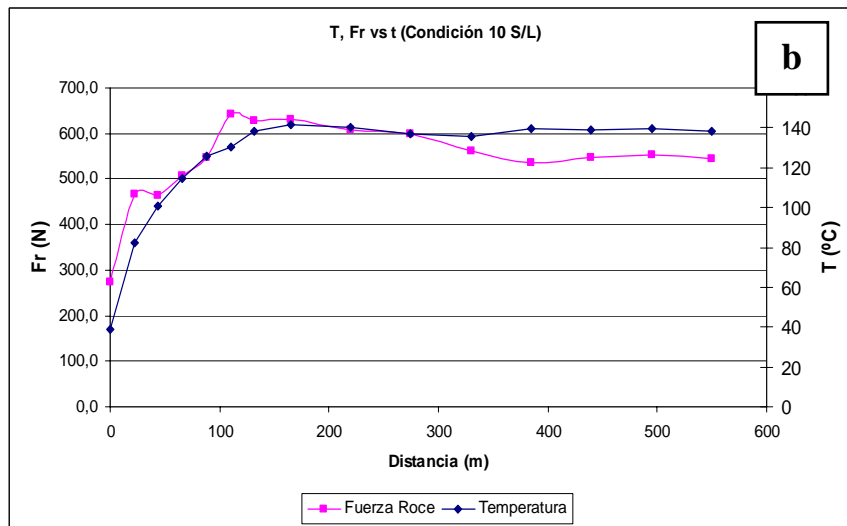
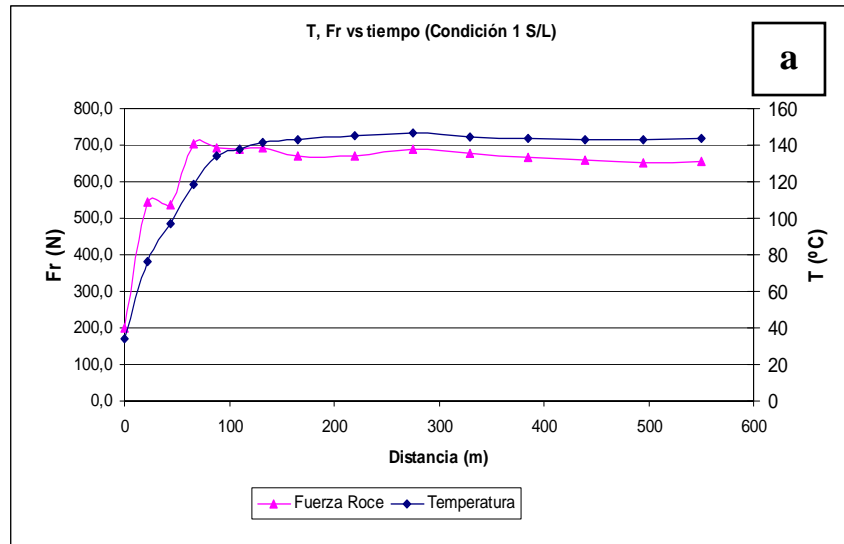
En todos los ensayos en seco (Figura 4.14), se observó que la temperatura se mantiene estable alrededor de los 109,96 m (20 minutos) al igual que con lubricante, mientras que la fuerza de roce se comienza a estabilizar entre los 43,98 m (8 min) y 54,98 m (10 minutos) aproximadamente, como se observa en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Valores de Temperatura, Fuerza de Roce y Coeficiente de Fricción para las condiciones seleccionadas sin lubricación.

Distancia (m)	CONDICION 1			CONDICION 10			CONDICION 17		
	T (°C)	Fuerza Roce (N)	Coeficiente de Roce	T (°C)	Fuerza Roce (N)	Coeficiente de Roce	T (°C)	Fuerza Roce (N)	Coeficiente de Roce
0	34	198,2	0,186	39	274,3	0,257	45	277,3	0,260
21,99	76	544,4	0,510	82	466,8	0,438	77	646,1	0,606
43,98	97	535,8	0,502	101	464,8	0,436	109	673,0	0,631
65,97	119	705,5	0,661	114	507,7	0,476	123	668,6	0,627
87,96	134	693,0	0,650	126	546,0	0,512	129	661,7	0,620
109,96	138	690,4	0,647	130	641,7	0,602	132	655,0	0,614
131,95	142	691,1	0,648	138	628,0	0,589	131	638,7	0,599
164,93	143	670,1	0,628	142	631,9	0,592	130	621,6	0,583
219,92	145	672,0	0,630	140	607,1	0,569	129	615,6	0,577
274,9	147	688,3	0,645	137	598,0	0,561	128	619,5	0,581
329,88	145	676,5	0,634	135	563,0	0,528	128	619,9	0,581
384,86	143	665,6	0,624	139	536,7	0,503	128	614,4	0,576
439,84	143	658,9	0,618	139	547,8	0,514	127	621,8	0,583
494,82	143	652,2	0,611	140	552,3	0,518	127	603,5	0,566
549,77	144	653,9	0,613	138	545,3	0,511	127	594,6	0,557

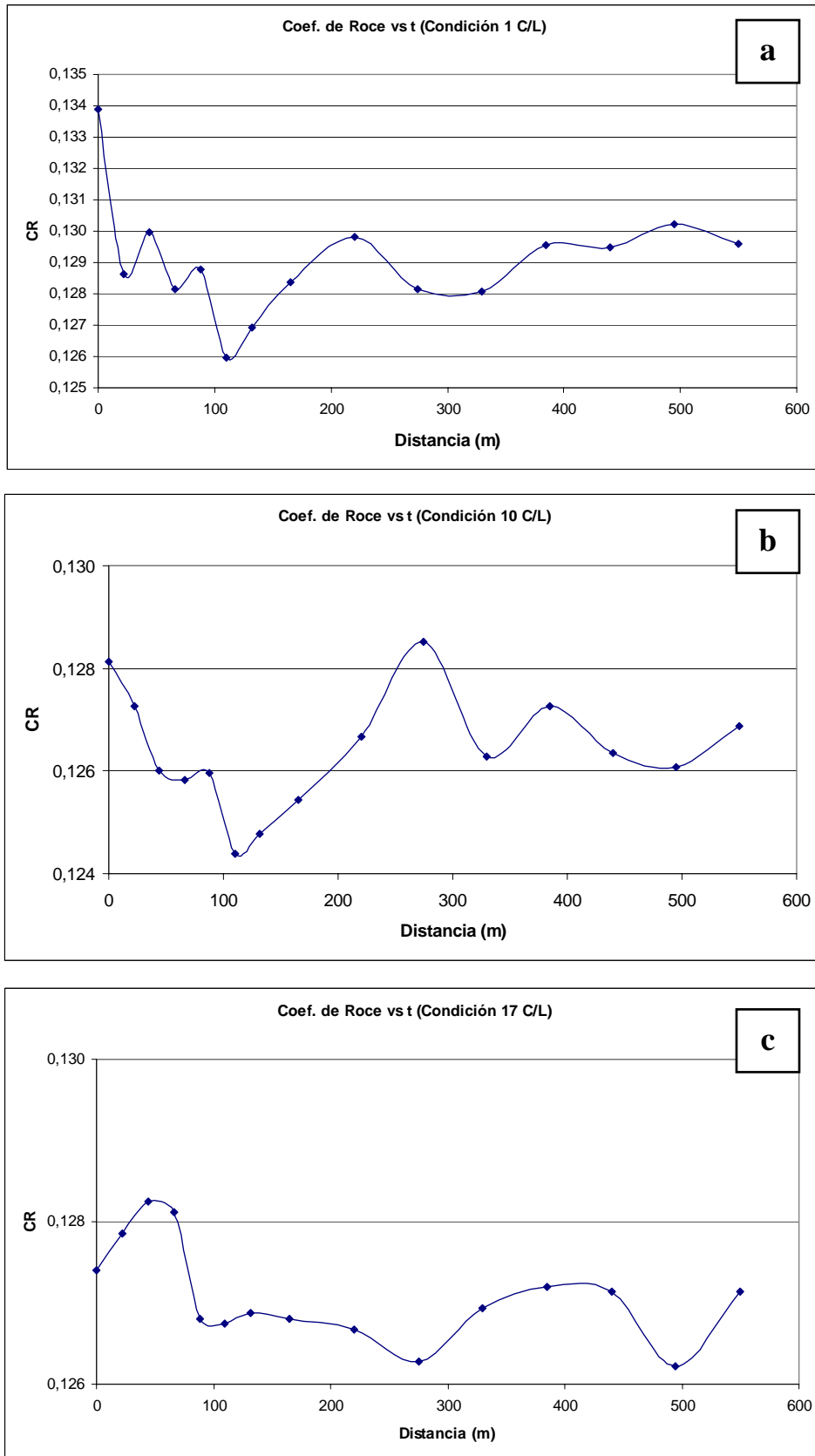


**Fig. 4.13. Temperatura y Fuerza de roce vs Distancia con lubricación. Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17**



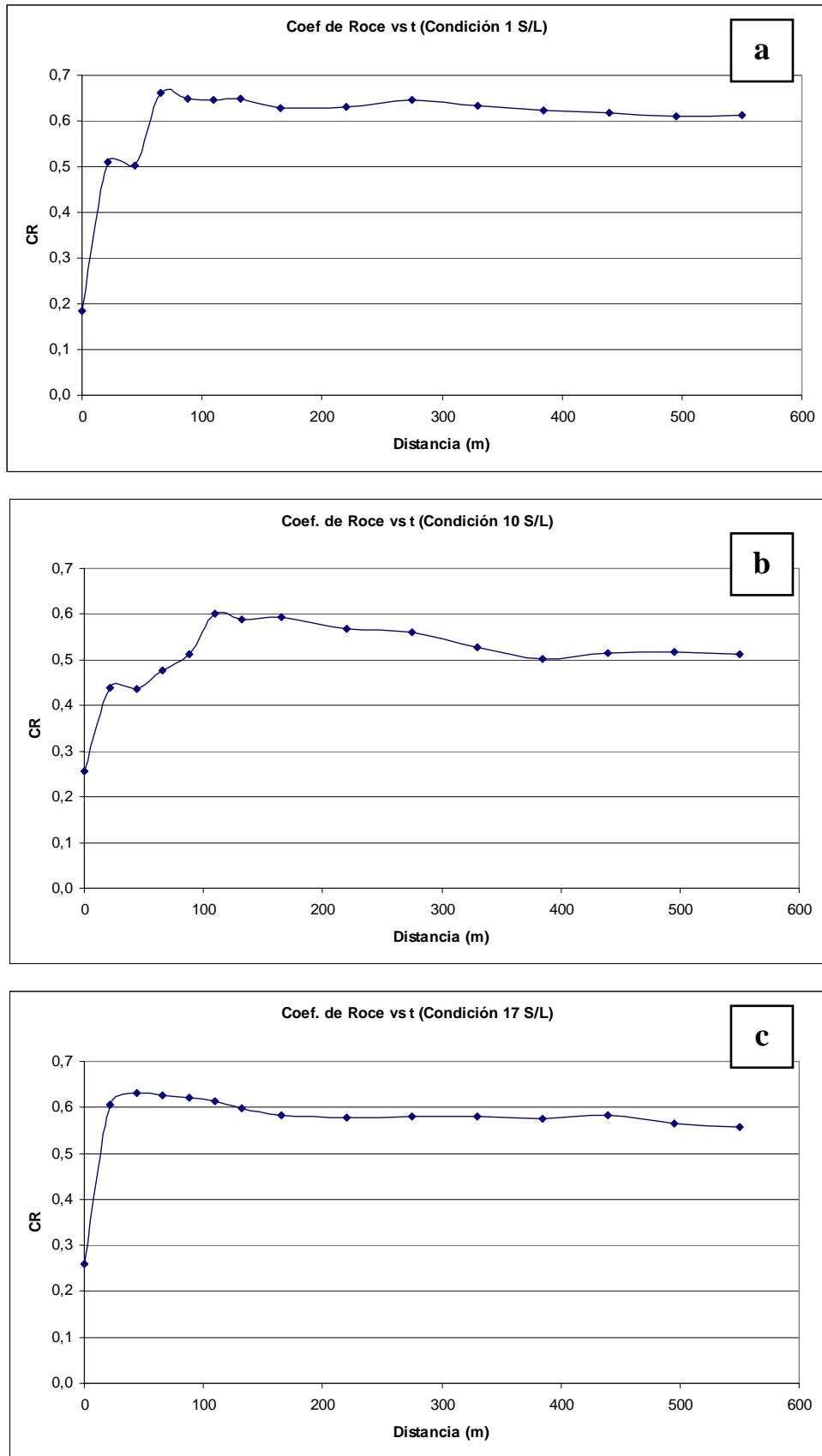
**Fig. 4.14. Temperatura y Fuerza de roce vs Distancia sin lubricación. Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición 17**

El coeficiente de roce se mantiene estable prácticamente desde el comienzo para los ensayos en seco y con lubricación, puesto que las variaciones son tan pequeñas (en el orden de  $10^{-3}$ ) que se pueden considerar como despreciables ver Figuras 4.14 y 4.15. Ver Anexo E, para las demás graficas correspondientes a las otras condiciones.



**Fig. 4.15. Coeficiente de roce vs Distancia con lubricación.**

**a) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición**



**Fig. 4.16. Coeficiente de roce vs Distancia sin lubricación.**

**b) Condición 1, b) Condición 10 y c) Condición**

**CAPITULO V:  
CONCLUSIONES  
Y  
RECOMENDACIONES**



## CONCLUSIONES

Para poder cumplir con los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, se realizaron ensayos de desgaste por deslizamiento, Dureza (macro y micro) y se realizaron análisis microestructurales cuyos resultados nos permiten concluir:

- El desgaste observado en los bloques para todas las condiciones fue del tipo adhesivo. Este tipo de desgaste tiene lugar bastante rápido, dando lugar a formas graves de deterioro en forma de adherencia o desgarramiento abrasivo en las piezas de máquina.
- Los valores de la tasa de desgaste sin lubricación para el bloque estuvieron entre un valor mínimo de  $0,0209 \text{ mm}^3/\text{m}$  y un máximo de  $0,0479 \text{ mm}^3/\text{m}$ .
- Los valores de la tasa de desgaste con lubricación para el bloque estuvieron entre un valor mínimo de  $0,00005 \text{ mm}^3/\text{m}$  y un máximo de  $0,00086 \text{ mm}^3/\text{m}$ .
- El valor más bajo de tasa de desgaste con y sin lubricación fue obtenido por el recubrimiento cuyos parámetros de rociado son: Distancia de Rociado 240 mm, Relación Oxígeno Combustible 30,6, Presión de Alimentación 20 psi y Gas Protector 14,4 psi (condición 10). La cual presentó poca presencia de óxidos y de gotas poco fundidas de pequeño tamaño, distribuidas en el recubrimiento.
- Para todas las condiciones rociadas térmicamente se verificó la existencia de cuatro fases: Fase Clara (Molibdeno), Fase Oscura (Aluminio), Fase Gris Clara (Hierro) y Gris Oscura (Hierro). Además de gotas poco fundidas en distintas cantidades y tamaños.
- Un mayor porcentaje de la fase gris clara (hierro) contribuye a una mayor resistencia al desgaste.
- La condición 10 mostró un mayor porcentaje de la fase gris clara que el resto de las condiciones.
- La condición 10 mostró una mejora de 93,4 % respecto a la condición 1, siendo esta última la que más desgastó con lubricación, con una gran cantidad de gotas poco fundidas y de gran tamaño, seguida de la condición 17 (rociada con los parámetros del fabricante) con una cantidad media de gotas poco fundidas de pequeño tamaño.
- La condición 10 mostró una mejora de 78,6 % respecto a la condición 13, siendo esta última la que más desgastó sin lubricación, con una gran cantidad de gotas poco

fundidas y de gran tamaño, y la condición 17 (rociada con los parámetros del fabricante) mostró una cantidad media de gotas poco fundidas de pequeño tamaño.

- Se determinó que una alta presencia de gotas poco fundidas, de tamaño mediano a grande, contribuyen para acelerar el desgaste de tipo adhesivo, que evidenciaron todos los ensayos de desgaste. Comportamiento que se verifica en las condiciones 1 y 13 con y sin lubricación respectivamente, condiciones estas que más desgastaron.
- Puesto que los valores de la dureza y la macrodureza son tan altos y estables garantizan que todas las condiciones tendrán una buena resistencia al desgaste.
- Los valores de la microdureza para el bloque estuvieron entre un valor mínimo de 379,0 HVN y un máximo de 597,9 HVN.
- Los valores de la macrodureza para el bloque estuvieron entre un valor mínimo de 364,8 HVN y un máximo de 438,0 HVN.
- La condición 10, fue la que menos desgastó y su valor de dureza (micro y macro) fue unos de los más bajos, debido a la poca presencia de óxidos.
- Los valores de temperatura en el centro del bloque obtenidos sin lubricación tuvieron un valor mínimo de 148 °C y máximo de 159°C.
- Los valores de temperatura en el centro del bloque obtenidos con lubricación tuvieron un valor mínimo de 48 °C y máximo de 51°C.
- Los valores de coeficiente de fricción obtenidos sin lubricación tuvieron un valor mínimo de 0,51 y máximo de 0,661.
- Los valores de coeficiente de fricción obtenidos con lubricación tuvieron un valor mínimo de 0,124 y máximo de 0,133.
- El régimen de lubricación es límite, puesto que los valores de coeficiente fricción están dentro del rango que va de 0,058 a 0,15.
- Los valores de fuerza de roce obtenidos sin lubricación tuvieron un valor mínimo de 650,9 N y máximo de 705,05 N.
- Los valores de fuerza de roce obtenidos con lubricación tuvieron un valor mínimo de 132,5N y máximo de 139,8 N.
- Aunque los parámetros de la condición 17 fueron suministrados por el fabricante, estos no tuvieron un buen desempeño comparativamente con las otras condiciones, a la hora de garantizar una resistencia al desgaste, puesto que estos produjeron una alta presencia

de gotas poco fundidas, las cuales son el principal contribuyente al desgaste adhesivo en este recubrimiento depositado por LVOF.

- Aunque los procesos LVOF no tiene una buena adherencia, el METCO 449 demostró una muy buena adherencia, puesto que no hubo desprendimiento del material rociado térmicamente durante la realización de los ensayos de desgaste (con o sin lubricación); ni durante el maquinado para obtener la probetas.
- La alta porosidad es característica de los recubrimientos depositados por LVOF, lo cual puede ayudar a retener una película de lubricante sobre el bloque en los ensayos de desgaste, contribuyendo de esta manera a mejorar la eficiencia de la lubricación, aunque ésta sea límite.
- Según el análisis de varianza (ANOVA), se verificó que ninguno de los parámetros seleccionados tienen influencia estadística significativa sobre el desgaste y dureza, por lo que no se pueden realizar superficies de respuesta para hallar rangos óptimos de trabajo para los parámetros de rociado; ni se puede indicar cómo influyen estos parámetros sobre la microestructura, el desgaste o la dureza.
- Debido a que no hay significancia estadística y que todos los recubrimientos tienen buena resistencia al desgaste en su mayoría, se puede concluir que la operación manual del operario puede ser confiable para estos rangos de operación del proceso.

## RECOMENDACIONES

- Al efectuar el procedimiento de limpieza que involucra la utilización de solventes tóxicos, como los utilizados en este trabajo, para la limpieza de los especímenes es recomendable usar envases como vasos plásticos no solventes rotulados tapados con “ENVOPLAST” con la finalidad de que los gases que emanan estas sustancias no afecten a las personas que están realizando estos ensayos. Lo más recomendado sería la adquisición de una campana de extracción de gases para el uso de sustancias tóxicas y volátiles.
- La compra de un equipo de limpieza por ultrasonido.
- Establecer el registro automatizado de las variables del proceso con el objeto de minimizar los errores que involucran las lecturas manuales.
- Por presentar fallas en el contador de ciclos en la máquina FALEX, calcular el tiempo de duración del ensayo y tomar las mediciones por tiempo y no por números de ciclos, además colocar el contador de ciclos muy por encima del número de ciclos previsto para el ensayo, de modo de detener el ensayo manualmente. Debido a que las revoluciones se mantienen constantes, pero el contador de ciclos falla desproporcionadamente haciendo parecer que las revoluciones aumentan.
- La norma ASTM D2714 – 68, indica que se debe usar el compuesto Metil – Etil – Cetona, pero debido a las restricciones que existen en el mercado en la venta de compuestos derivados de las cetonas, recomendamos utilizar Thinner.
- La sustitución de algunos medidores tales como manómetros o medidores de la relación oxígeno combustible del equipo de rociado térmico con otros que permitan una mayor exactitud y un mayor rango de variación.
- Realizar mantenimiento correctivo a la máquina Falex, para eliminar las fugas de aceite en el eje.
- Realizar planes de mantenimiento preventivo con el fin de prolongar la vida útil de la máquina Falex.

- Realizar este estudio con tres niveles para cada factor del diseño experimental con el fin de obtener una respuesta más precisa en la obtención de los parámetros que se están optimizando.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ACOSTA, ANTONIO Y CLEMENTE, ERASMO, **Estudio Comparativo de la Resistencia al Desgaste de Babbitts Termo Rociados y Soldados por el Proceso TIG bajo lubricación Límite** / Trabajo Especial de Grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 1999.
2. ANDRADE, ALDO Y PULE, CHRISTIAN, **Evaluación de Muñones de Motores Diesel Rociados Térmicamente Bajo Régimen de Lubricación Límite** / Trabajo Especial de Grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2001.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY, INC. **“Thermal Spraying. Practice, Theory and Application”**. Miami – Florida. 1985. Pag. 16-46.
4. ASM, Handbook, **“Statistical Methods”**, 1.988, Vol. XIV. Pag. 740-746.
5. ASM, Handbook, **“Wear, abrasive wear, polishing wear, solid particle erosion, fretting wear, rolling contact wear, etc”**, 1.989, Vol. XVIII. Pag. 184-289.
6. BERNDT C. AND K. GROSS. **“Characteristic of Hridroxilapatite Bio-Coating, in Thermal Spray”**. International Advances in Coating Technology, C.C. Berndt, ed., ASM International, Materials Park, OH, Año 1.992, Pag. 465-470.
7. BRANDT, O.C. **“Mechanical Properties of HVOF Coating”**, Journal of Thermal Spray Technology / EEUU, Junio 1995, vol. 4 (2), Pag. 147-151.
8. E.S. BYON, S.C. KWON, K.H. LEE, Y, S. SONG, M. K. AHN. **“Taguchi Analysis of High Velocity Oxy-Fuel Sprayed Tungsten Carbide Cobalt Coatings”**. Korea Institute of Machinery and Materials, Korea. Hanguk Aviation University, Koyang. 1.999. Pag. 411-791, Korea.

9. FAUCHAIS P., A. VARDELLE AND B. DUSSOUBS. **“Quo Vadis Thermal Spraying”**. Journal of Thermal Spray Technology, Año 2.001. Pag. 44-66.
10. FRANK M.J. VAN DER BERGE, **“An overview of Thermal Spray”**, Stork Ceramic, Inc., Milwaukee, Wisconsin. Año 1.998.
11. GIL DE FUENTES, LINDA. **“Optimización de la Calidad de Recubrimientos Base Níquel Obtenidos por Termorociado HVOF”**. Año 2.002. Pag. 31-52 y 81-116.
12. HERNANDEZ, LERIS Y OLIVEIRA, FRANCISCO, **Evaluación de Propiedades de Fatiga del Acero AISI 4340 Recubierto por Termorociado / Trabajo Especial de Grado**, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 1999.
13. HOWES JR. C.P., **“Therma. I Spraying: Processes, Preparation, Coating and Applications. Welding Journal”**. 1.994, Vol 78. Pag. 47-51.
14. IRVING, B.; KNIGHT, R & SMITH, R. **“Thermal Spray: New Technology is its Lifeblood”**. Welding Journal. 1.998. Pag. 38-45.
15. KUSHNER, BURTON AND NOVINSKI, EDWARD R. **“Thermal Spray Coating ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology”**. ASM International. 6ª Edición. 1.992. Volumen XVIII. 8P.
16. MONTGOMERY D. **“Diseño y Análisis de Experimentos”**. Grupo Editorial Iberoamericana. Año 1.991. Pag. 467-501.
17. SOBOLEV V. AND GUILMANY. **“Fluttering of Droplets and Formation of Splats in Thermal Spraying”**. Journal of Thermal Spray Technology, Año 1.999. Pag. 87-101.
18. SOBOLEV V., J. GUILMANY , J. MIGUEL AND J. CALERO. **“Influence of in-flight Dissolution Process on Composite Powder Particle (WC-Ni) Behavior**



**During High Velocity Oxy-Fuel Spraying**". Surfaces and Coatings Technology, Año 1.996. Pag. 136-145.

19. SHIGGLEY, JOSEPH Y MISHKE, CHARLES, **“Diseño en Ingeniería Mecánica”**, “Lubricación de Cojinetes de Contacto Deslizante”, Año 1.990. Pag. 542-544, Editorial Mc Graw Hill, 5ª edición, México.
20. T.J. STEEPER, A.J. ROTOLICO, W.L.RIGGS II, D.J. VACARALLE Jr. AND G.C. WILSON. **“A Taguchi Design Study of Plasma Sprayed Alumina-Titania Coatings”**. Proceedings of the Fourth National Spray Conference, Pittsburg, PA, USA, 4-10 May 1.991.
21. TAKASAKI A. AND TOMIGUCHI, OHMORI. **“Fusing of Sprayed Ni-Based Coatings by Introduction Heating in Thermal Spray”**. International Advances in Coating Technology, ASM International, Año 1.992. Pag. 273-278.

<http://www.monografias.com/>

**Análisis de Varianza.**

<http://www.cincinnati thermalspray.com/>

**Cincinnati Thermal Spray: Thermal Spray Coating.**

**Extraction System:** <http://www.eutectic-usa.com/>

**Cincinnati Thermal Spray: Thermal Spray Coating.**

<http://www.elsevier.com/>

**Publicaciones Técnicas.**

<http://www.sandia.gov/tsp/>

**Sandia National Laboratories: Thermal Spray Processing.**

<http://www.sulzermetco.com/>

**Sulzer Metco: Thermal Spray Coating.**

<http://www.tafa.com/>

**Tafa: Thermal Spray Coating.**

## ANEXO A

Especificaciones técnicas del  
recubrimiento Metco-449.



Flame Spray  
Equipment and  
Supplies

## TECHNICAL BULLETIN

SUPPLIES  
POWDER

METCO INC. 1101 Prospect Avenue, Westbury, LI., N.Y. 11590

ISSUED: 1 Nov 80

SUPERSEDES: 18 April 71

FILE: Section 1b

### METCO 449 SELF-BONDING HIGH CARBON "STEEL" COMPOSITE POWDER

*Summary:*

METCO 449 is a High Carbon Iron, Molybdenum, Aluminum composite powder. It was especially developed to produce hard "Steel" coatings with excellent resistance to wear for hard bearing and wear resistance applications. This material offers two major advantages: "One-Step" spraying and High-Integrity coatings.

"One-Step" coatings offer these benefits:

Eliminate need for a separate bond coat.

Less undercutting required. The allowance for bond coat thickness is eliminated.

Less technique dependence. Reducing the number of steps required to produce the coating, also reduces the chance of error.

More convenience. One-step coatings eliminate having to change materials and spraying parameters.

METCO 449 was designed to produce hard, low-shrink, high-strength coatings which are recommended for applications requiring resistance to abrasive wear and fretting, and for the salvage and buildup of Grindable Carbon Steels. This bulletin revises the ThermoSpray Parameters for use with the Type 2GF Flow-meter and revises arc voltages for the Type 7MB Plasma Gun.

FEATURES:

METCO 449 can be sprayed with minimum dependence on technique or need for temperature control. This allows for continuous spraying, and reduces chances of lamination occurring due to interruptions.

Thick coatings can be applied without cracking. Thin coatings can also be applied with minimum surface preparation requirements.

The properties of the coatings produced with METCO 449 provide a number of additional benefits:

High Bond Strength - Typical coating tensile bond strengths are 5,000 psi (3450 N/cm<sup>2</sup>) with ThermoSpray on machined or blasted substrates, and 3,500 psi (2415 N/cm<sup>2</sup>) with Plasma Spray on ground substrates.

Good Wear Resistance - Resistance to abrasive wear is equal to coatings of METCO 442, METCO 451 and METCOLOY 2, and better than coatings of METCO 447 and SPRASTEEL 80.

FEATURES (Continued):

Low Shrink - Thick coatings can be applied without cracking, due to low shrink and low coefficient of expansion, which makes METCO 449 ideally suitable for machine element applications.

High Interparticle Cohesion - Coatings exhibit excellent internal strength which provides high tensile strength over 25,000 psi (17,230 N/cm<sup>2</sup>), and good edge retention after grinding.

Hard Coatings -- Typical coating macrohardness is R<sub>c</sub>35 with ThermoSpray, and R<sub>c</sub>40 with Plasma Spray.

Good Finishing Capability - Coatings can be ground to a very fine finish. Ground finishes are equivalent to ground finishes of SPRASTEEL 80.

Good Bond Coat Material - In addition to its capabilities as a single coat material, METCO 449 is suitable for use as a bond 'coat material.

METCO 449 can be sprayed with either the METCO Type 5P or 6P ThermoSpray Guns, or METCO Plasma Flame Spray Equipment.

APPLICATIONS:

Coatings of METCO 449 are recommended for the following applications:

<u>Coating No.</u>	<u>Coating Function</u>	<u>Typical Applications</u>
T449-10 P449-10	Hard Bearing Surfaces	Bearing Journals, End Bells, P449-10 Needle Bearing Fits
T449-10 P449-10	Resist Abrasive Grains (Low Temperature)	Cylinder Liners, Pistons, Crankshafts Bearings, Machine Elements
T449-10 P449-10	Resist Hard Surfaces (Low Temperature)	Mechanical Seals, Pump Seals
T449-10 P449-10	Resist Fretting (Intended Motion)	Machine Bedways, Wear Rings
T449-10 P449-10	Resist Fretting (No Intended Motion-Low Temperature)	Press Fit, Bearing Fits
T449-10 P449-10	Salvage & Buildup on Grindable Carbon Steel	Mis-Machined Parts, Worn Parts

COATING SELECTION:

Coating T449-10 can be obtained with either the Type 5P or 6P Gun. Coating P449-10 can be produced with either the Type 3M or 7M Plasma System.

P449-10 coatings are slightly more dense than T449-10 coatings, and will exhibit wear resistance and corrosion resistance properties equal or better than T449-10 coatings.

POWDER CHARACTERISTICS:

Typical Composition:	Aluminum 3%
	Molybdenum 3%
	Carbon 3%
	Iron Balance
Typical Size Range:	-120 mesh +325 mesh
	-125 +45 microns
Melting Point (Approximate):	1215°F (660°C)
	(Aluminum Constituent)

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES OF THE COATINGS:

	<u>Coating T449-10</u>	<u>Coating P449-10</u>
Texture, as-sprayed, microinches aa (microns):	700-900 (18-23)	700-900 (18-23)
Finish, microinches aa (microns), ground (60 grit SiC):	15-30 (0.4-0.8)	10-15 (0.2-0.4)
lapped (1 micron diamond):	4-10 (0.1-0.3)	---
Macrohardness: (Note 1)	R <sub>c</sub> 35	R <sub>c</sub> 40
Cross Sectional Hardness (DPH <sub>300</sub> ):	600	600
Density (g/cc):	7.2	7.2
Porosity (Volume %):	2%	Less than 2%
Oxide Content (Volume %):	10%	2%
Coating Weight (lb/ft <sup>2</sup> /0,001"):	0.037	0.037
(kg/m <sup>2</sup> /0,1 mm):	0.72	0.72
Tensile Strength (perpendicular to the direction of spraying), psi:	25,000	---
N/cm <sup>2</sup> :	17,230	---
Bond Strength - Low Carbon Steel Substrate, Ground, psi:	3,000	3,500
N/cm <sup>2</sup> :	2,070	2,415
Machined or METCOLITE C Blast, psi:	5,000	---
N/cm <sup>2</sup> :	3,450	---

NOTE I: The macrohardness of METCO 449 coatings will vary with the temperature of application, in addition to the flame spray processes used to spray the coating. For ThermoSpray coatings, increasing the application temperature results in an increase in hardness. The increase in hardness is a function of a slight increase in finely dispersed oxides within the coating, both at the grain boundaries and within the particles. The increase in hardness shows itself as an increase in the hardness of the high carbon iron particles. Plasma coatings are not as readily affected by the temperature of application.

BOND STRENGTH:

METCO 449 is similar to METCO 450 in that the self-bonding property is a direct result of an exothermic reaction. The resultant heat from the exothermic reaction provides high bond strengths, and also causes better interparticle bonding which results in greater coating integrity. On ground substrates of low carbon steel, bond tests conducted in accordance with ASTM C 633 indicate that self-bonding tensile strengths in excess of 3,000 psi (2070 N/cm<sup>2</sup>) are typical for coatings applied with ThermoSpray, and 3,500 psi (2415 N/cm<sup>2</sup>) with Plasma applied coatings. In METCO 449 coatings, bond failure occurs at the interface of the coating and the ground substrate. This is an indication of the internal cohesive strength of the coating.

BOND STRENGTH (Continued):

METCO 449 is equivalent to METCO 450 as a bond coat material.

METCO 449 is not self-bonding to materials where METCO 405 or METCO 450 are not self-bonding, such as pure copper substrates.

INTERNAL COATING STRENGTH:

Coatings of METCO 449 exhibit excellent internal strength as a result of high interparticle cohesion.

THICKNESS LIMITATION:

There is no apparent thickness limitation. Heavy buildup of METCO 449 coatings can be applied without cracking, with minimum dependence on technique, and minimal temperature control.

ThermoSprayed coatings in excess of .250" (6.3mm) in thickness have been sprayed on 2" diameter (50mm) machined low carbon steel shafts, and coatings in excess of .100" (2.5mm) thick have been deposited on machined flat low carbon steel substrates. Plasma coatings over .200" (5.1mm) have been applied to diameters, and .075" (1.9mm) thick on machined flat surfaces. For flat, ground substrates, reduce ThermoSpray and Plasma coatings by 20%.

MAXIMUM SERVICE TEMPERATURE:

METCO 449 coatings are not recommended for exposure to temperature above 700 °F(370°C), either during spraying or in service. At temperatures in excess of 700°F, METCO 449 coatings exhibit excessive internal oxidation.

WEAR RESISTANCE

Standard water-aluminum oxide slurry wear tests show T449-10 coatings to have a wear resistance superior to T447-11 and M80-10, and comparable to coatings of T442-10, T451-10 and M2-10. The P449-10 coating will perform equal to or better than the T449-10 coating.

OXIDATION AND CORROSION RESISTANCE:

While METCO 449 is not recommended for use in corrosive atmospheres or at elevated temperatures, METCO 449 can be expected to exhibit good corrosion resistance for a carbon steel. The high carbon, plus the presence of aluminum, are factors favoring good corrosion resistance. Ground coatings of METCO 449, subjected to high humidity conditions for six months, showed no signs of oxidizing. Plasma coatings will perform equal to or better than ThermoSpray coatings.

Continued

SURFACE PREPARATION:

Coatings of METCO 449 are self-bonding. When they are used for the presently recommended coating functions, thorough cleaning of the substrate is the only preparation necessary. Surface oxidation must be removed, and preheating to prevent the formation of condensate is required.

METCO 449 coatings have been successfully ground to a feather-edge. However, for such applications, it is recommended that the substrate be roughened by at least grit blasting.

SPRAYING:

To produce METCO 449 coatings with their outstanding characteristics, the recommended spraying parameters must be followed. Excessive spray rates, or spray distances shorter than recommended, will inhibit the exothermic reaction needed to produce the excellent bond and internal strength.

Preheat: Normal - 200<sup>o</sup>-250<sup>o</sup>F (90<sup>o</sup>-120<sup>o</sup>C)

Typical Application Rate: 0.004" (0.1mm) per pass

Maximum Temperature: 700<sup>o</sup>F((370<sup>o</sup>C)

It is recommended that the maximum uniform temperature of METCO 449 coatings attained during spraying be approximately 700° F (370 °C). Excessive heat can bring about the formation of various iron-carbon phases. The characteristics attending the formation of these different phases, especially if brought about by non-uniform heating, can result in internal volume change that could produce lifting of the coating from the substrate.

FINISHING

METCO 449 coatings are best finished by grinding. Excellent finishes can be obtained with both aluminum oxide and silicon carbide wheels.

The grinding recommendations for metal coatings, found in Volumes I, II and II of the Flame Spray Handbook, should be followed. Wet grinding is preferred because overheating and smearing is minimized.

SAFETY MEASURES:

Flame spraying is a completely safe process when performed in accordance with "METCO's Safety Measures". Familiarize yourself with local safety regulations before starting spraying operations. DO NOT operate your spraying equipment or use. The spray material supplied before you have thoroughly read the METCO Instruction Manual.

DISREGARDING THESE INSTRUCTIONS MAY BE DANGEROUS TO YOUR HEALTH.

Continued




SYSTEM PARAMETERS  
ThermoSpray

	SET #1	SET #2
<u>SPRAY GUN</u>		
Type: (Note 1)	5P	6P
Nozzle:	P7G	P7A-D
Siphon Plug:	Standard	6P 205
Air Plug:	Standard	6P 4
Metering Valve:	15	N/A
Vibrator:	5PV	N/A
<hr/>		
<u>GAS</u>		
Pressure - Oxygen, psi: (Note 2)	30	40
bars: (Note 2)	2.07	2.76
Acetylene, psi: (Note 2)	15	15
bars: (Note 2)	1.03	1.03
Flow - Oxygen:	34	45
Acetylene:	34	55
<hr/>		
<u>POWDER FEED</u>		
Flow Control Valve - Cliks Open: (Note 3)	6-10	N/A
Unit:	N/A	3MP or 3MP-DUAL
Meter Wheel:	N/A	S
RPM: (Note 3)	N/A	12
Nitrogen Carrier Gas - Pressure, psi:	N/A	55
Bars:	N/A	3.79
Flow:	N/A	37
<hr/>		
<u>SPRAYING (Note 4)</u>		
Spray Distance, inches:	8	9
mm:	205	230
Spray Rate, lb/hr:	5	5
kg/hr:	2.3	2.3
Gas Consumption - Oxygen, ft <sup>3</sup> /hr:	60	95
m <sup>3</sup> /hr:	1.7	2.7
Acetylene, ft <sup>3</sup> /hr:	33	59
m <sup>3</sup> /hr:	0.93	1.7
Nitrogene, ft <sup>3</sup> /hr:	N/A	10
m <sup>3</sup> /hr:	N/A	2.83
Coverage, ft <sup>2</sup> /hr/0.001":	110	110
m <sup>2</sup> /hr/0.1mm:	2.6	2.6
Powder Required, lb/ft <sup>2</sup> /0.001":	0.045	0.045
kg/m <sup>2</sup> /0.01mm:	0.86	0.86
Deposit Efficiency, %: (Note 5)	85	85

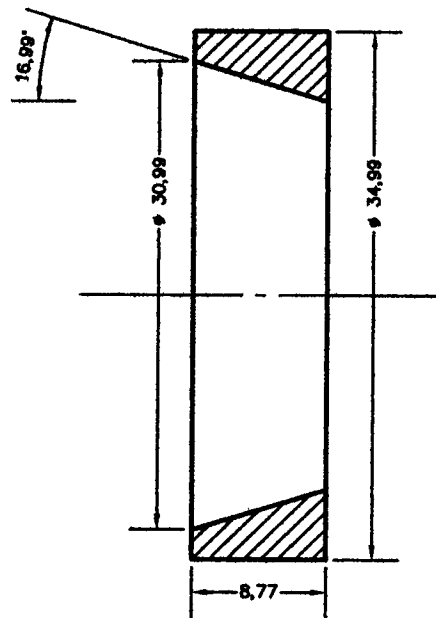
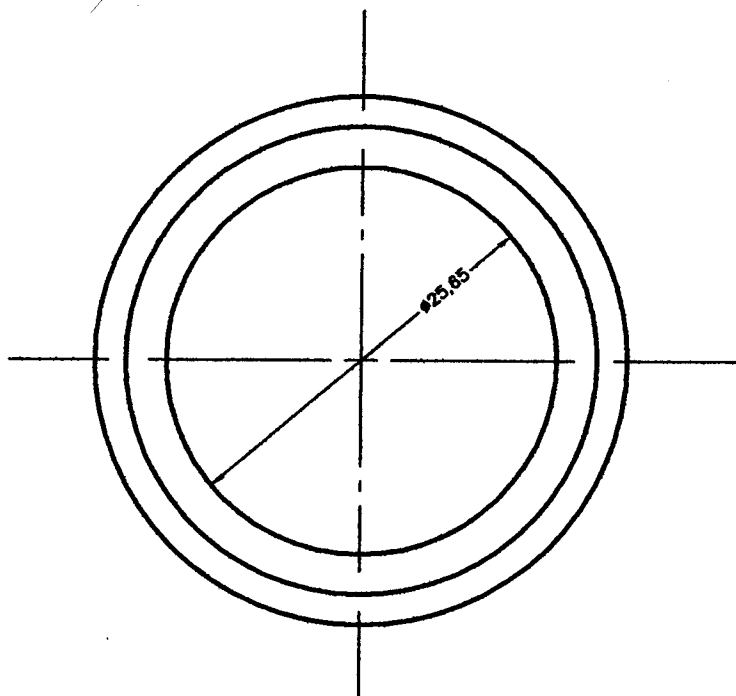
NOTES:

1. Some deposit may form on the face of the nozzle when spraying for extended periods. The nozzle face should be wiped at regular intervals. Do not file or scrape.
2. Type 2GF Flowmeter. When using Type GF Flowmeter, reduce pressure for oxygen 10 psi (0.69 bars) and also reduce pressure for acetylene 2-4 psi (0.14-0.28 bars) to obtain flowmeter readings shown.
3. As a starting point. Powder flow rate is critical. Adjust as necessary to obtain spray rate shown. With 6P Gun, use "P" meter wheel at 30 RPM if required.
4. Spray rates and deposit efficiencies shown were obtained by skilled operators with all equipment in first-class condition. Rounded off for easy calculation.

 <b>PLASMATEC Ingenieros c.a.</b>	<b>MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	SECCIÓN:
		EDIC.: 1      REVISIÓN: 0 FECHA: 02-03-00      PÁG.: 1
<b>CONTENIDO: PARÁMETROS DE LOS EQUIPOS DE TERMORROCIADO</b>		<b>EQUIPO: 5P</b>
<p><b>MATERIAL:</b> R-10</p> <p><b>DESCRIPCIÓN:</b> ACERO CARBONO</p> <p><b>BOQUILLA:</b> P7-G</p> <p><b>VÁLVULA MEDIDORA:</b> 15</p> <p><b>VIBRADOR:</b> SI</p> <p><b>JET DE AIRE:</b> SI. PARALELO</p> <p><b>CLICK:</b> 11-12</p> <p><b>PRESIÓN DE OXIGENO:</b> 25 PSI      <b>PRESIÓN ACETILENO:</b> 15 PSI</p> <p><b>FLUJO OXIGENO:</b> 34      <b>FLUJO ACETILENO:</b> 34</p> <p><b>PRESIÓN AIRE DE ENFRIAMIENTO:</b> NO</p> <p><b>PRESIÓN AIRE DIVERGENTE:</b> SI. 15 - 20 PSI</p> <p><b>PRESIÓN AIRE JET:</b> NO</p> <p><b>POSICIÓN JET:</b> NO</p> <p><b>DEBITO:</b> 40 - 42 gr/seg      <b>DISTANCIA DE ROCIADO:</b> 180mm - 200mm</p> <p><b>TEMPERATURA MÁXIMA DURANTE EL ROCIADO:</b> 200 °C</p> <p><b>TEMPERATURA MINIMA DURANTE EL ROCIADO:</b> 100 °C</p> <p><b>VELOCIDAD DE APLICACIÓN ROTACIONAL:</b> RÁPIDO</p> <p><b>VELOCIDAD DE APLICACIÓN LONGITUDINAL:</b> RÁPIDO</p> <p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) PRECALENTAR A 100 °C. USAR ADHERENCIA TIPO R5, R7 ó ARCO BRONCE/ALUMINIO - ARCO Ni - Al, ARCO Ni - Cr.</li> <li>2) NO ROCIAR MUY FRIO, DEBE SIEMPRE ESTAR LA PIEZA ENTRE 100 Y 200 °C</li> <li>3) TOMAR DEBITO PARA ASEGURAR LA RATA DE DEPOSICIÓN</li> </ol>		
ELABORADO POR: ING. YORLI MORA FECHA: 04-10-00	FIRMA:	CÓDIGO DEL USUARIO:
APROBADO POR: ING. ANDREA SCAGNI FECHA: 0410-00	FIRMA:	COPIA CONTROLADA: SI X      NO

## ANEXO B

Planos: Anillo, Bloque y Arandela



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

BACHILLERES:

URDANETA, SERGIO  
 VALERO, ANTONIO

ANILLO PARA ENSAYO  
 MAQUINA FALEX N° 1

NORMAS: **DIN**

FECHA:  
 09/10/03

TOTAL:

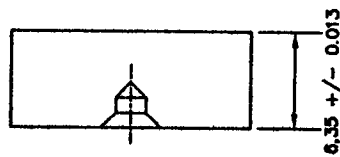
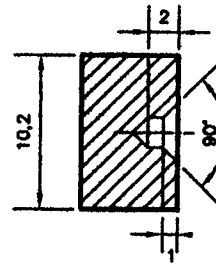
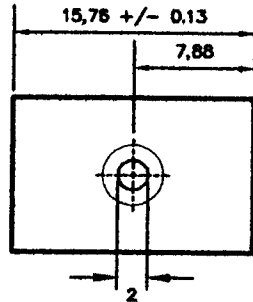
N°:

REVISADO POR:

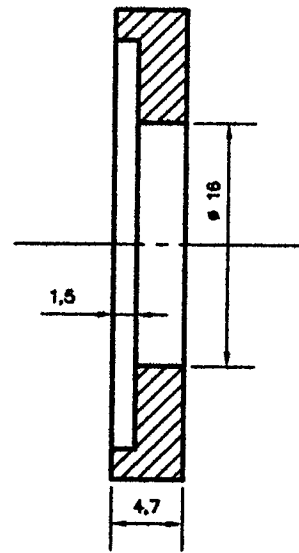
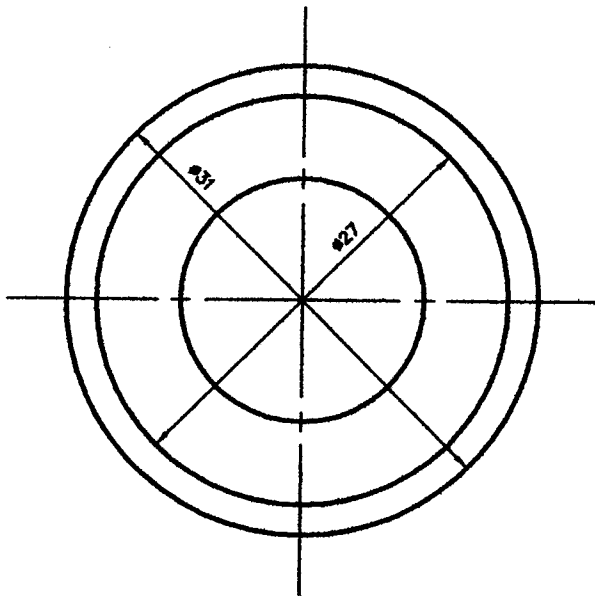
ESCALA:  
 2 : 1

1

1



<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			
<b>BACHILLERES:</b> URDANETA, SERGIO VALERO, ANTONIO		<b>BLOQUE DE MATERIAL</b> <b>AISI 1020</b>	
<b>NORMAS:</b> <b>DIN</b>	<b>FECHA:</b> <b>09/10/03</b>	<b>TOTAL:</b> <b>1</b>	<b>Nº:</b> <b>1</b>
<b>REVISADO POR:</b>	<b>ESCALA:</b> <b>2 : 1</b>		



<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			
<b>BACHILLERES:</b> URDANETA, SERGIO VALERO, ANTONIO		<b>ARANDELA</b> <b>MAQUINA FALEX N° 1</b>	
<b>NORMAS:</b> DIN	<b>FECHA:</b> 09/10/03	<b>TOTAL:</b> 1	<b>N°:</b> 1
<b>REVISADO POR:</b>	<b>ESCALA:</b> 2 : 1	1	1

## ANEXO C

Cálculos tipo de la dureza Vickers.

Depuración de la dureza Vickers.

Calculo Tipo de la depuración de  
Desgaste.

## DUREZA VICKERS. DEPURACIÓN DE LA DUREZA VICKERS.

### Cálculo Tipo.

Mediante la relación  $HVN = \frac{1,854 * P}{L^2}$  [ $\frac{kg}{mm^2}$ ]; siendo **P** la carga aplicada cuyo valor es de 0,3 (kg) y **L** el promedio de  $L_1$  y  $L_2$  en (mm), obteniendo así el valor de la dureza Vickers.

De la Microdureza Vickers, se toma los datos de la tabla para la corrida 1, para realizar la depuración de la dureza.

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
1	40,0	37,5	38,8	0,039	370,4	389,4
	36,5	34,5	35,5	0,036	441,3	
	40,0	38,0	39,0	0,039	365,7	
	36,0	37,0	36,5	0,037	417,5	
	40,0	39,0	39,5	0,040	356,5	
	37,5	38,5	38,0	0,038	385,2	

A continuación, realizamos otra tabla donde se refleja la diferencia en valor absoluto de la dureza promedio menos el valor de la dureza para cada identificación, eliminándose el valor más alto y manteniéndose el valor del resto de las durezas, sacando luego el nuevo valor promedio de microdureza Vickers, como se muestra a continuación:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers	Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
1	389,4	370,4	19,0	370,4	379,0
	389,4	441,3	51,9	Se elimina	
	389,4	365,7	23,7	365,7	
	389,4	417,5	28,1	417,5	
	389,4	356,5	32,9	356,5	
	389,4	385,2	4,2	385,2	



Con el valor de microdureza eliminado y el nuevo valor de microdureza promedio, se realiza la diferencia y obtenemos un valor a comparar

Valor a comparar = Valor eliminado – Nuevo promedio, es decir:

Valor a comparar =  $441,3 - 379,0$  de donde el **Valor a comparar = 62,3**

Como el valor a comparar es mayor que el valor promedio de la diferencia ( $62,3 > 21,6$ ), entonces, no hay que introducir el valor eliminado, por lo tanto el promedio final de la dureza es 379,0.

Para obtener el error por encima y por debajo, tomamos el valor promedio nuevo de microdureza y realizamos la diferencia en valor absoluto entre el valor más alto y más bajo respectivamente y obtenemos:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
379,0	38,49	22,52

Siguiendo los pasos anteriores se depuraron las durezas Vickers para las diferentes corridas realizadas, como se muestra a continuación:

**Corrida 2:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
2	30,0	35,0	32,5	0,033	526,6	485,7
	32,0	35,0	33,5	0,034	495,6	
	36,0	38,0	37,0	0,037	406,3	
	32,5	32,0	32,3	0,032	534,8	
	33,0	33,5	33,3	0,033	503,1	
	35,0	35,5	35,3	0,035	447,6	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers	Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
2	485,7	526,6	40,9	526,6	501,5
	485,7	495,6	9,9	495,6	
	485,7	406,3	79,4	Se elimina	
	485,7	534,8	49,1	534,8	
	485,7	503,1	17,4	503,1	
	485,7	447,6	38,1	447,6	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
501,5	33,28	53,88

**Corrida 3:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
3	33,0	32,5	32,8	0,033	518,6	476,0
	36,0	37,0	36,5	0,037	417,5	
	34,5	31,0	32,8	0,033	518,6	
	32,0	33,5	32,8	0,033	518,6	
	31,5	32,0	31,8	0,032	551,8	
	42,0	40,0	41,0	0,041	330,9	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
3	476,0	518,6	42,6	52,4	518,6	505,0
	476,0	417,5	58,5		417,5	
	476,0	518,6	42,6		518,6	
	476,0	518,6	42,6		518,6	
	476,0	551,8	75,8		551,8	
	476,0	330,9	145,1		Se elimina	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
505,0	46,75	87,51

**Corrida 4:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVN <sub>p</sub>
4	32,0	31,0	31,5	0,032	560,5	524,3
	32,5	32,0	32,3	0,032	534,8	
	34,5	34,0	34,3	0,034	474,1	
	34,0	34,0	34,0	0,034	481,1	
	31,5	32,0	31,8	0,032	551,8	
	33,0	31,0	32,0	0,032	543,2	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVN <sub>p</sub>
4	524,3	560,5	36,2	27,2	560,5	534,3
	524,3	534,8	10,5		534,8	
	524,3	474,1	50,2		Se elimina	
	524,3	481,1	43,2		481,1	
	524,3	551,8	27,5		551,8	
	524,3	543,2	18,9		543,2	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
534,3	26,24	53,16

**Corrida 5:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVN <sub>p</sub>
5	35,0	38,0	36,5	0,037	417,5	567,8
	31,0	32,5	31,8	0,032	551,8	
	30,5	27,0	28,8	0,029	672,9	
	29,5	32,5	31,0	0,031	578,8	
	31,0	30,0	30,5	0,031	597,9	
	32,0	29,5	30,8	0,031	588,2	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVN <sub>p</sub>
5	567,8	417,5	150,3	36,5	Se elimina	597,9
	567,8	551,8	16,0		551,8	
	567,8	672,9	105,1		672,9	
	567,8	578,8	11,0		578,8	
	567,8	597,9	30,1		597,9	
	567,8	588,2	20,4		588,2	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
597,9	75,01	46,15

**Corrida 6:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
6	35,0	31,5	33,3	0,033	503,1	540,2
	34,5	31,0	32,8	0,033	518,6	
	31,5	30,0	30,8	0,031	588,2	
	37,0	33,0	35,0	0,035	454,0	
	33,0	29,5	31,3	0,031	569,5	
	30,0	30,5	30,3	0,030	607,8	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers	Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
6	540,2	503,1	37,1	503,1	557,5
	540,2	518,6	21,6	518,6	
	540,2	588,2	48,0	588,2	
	540,2	454,0	86,2	Se elimina	
	540,2	569,5	29,3	569,5	
	540,2	607,8	67,6	607,8	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
557,5	50,33	54,41

**Corrida 7:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
7	32,0	31,0	31,5	0,032	560,5	498,8
	33,0	32,0	32,5	0,033	526,6	
	34,5	33,0	33,8	0,034	488,3	
	37,5	38,0	37,8	0,038	390,3	
	29,0	32,0	30,5	0,031	597,9	
	37,0	35,0	36,0	0,036	429,2	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
7	498,8	560,5	61,7	53,8	560,5	520,5
	498,8	526,6	27,8		526,6	
	498,8	488,3	10,5		488,3	
	498,8	390,3	108,5		Se elimina	
	498,8	597,9	99,1		597,9	
	498,8	429,2	69,6		429,2	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
520,5	77,40	91,33

**Corrida 8:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
8	40,0	37,0	38,5	0,039	375,2	472,5
	31,0	32,0	31,5	0,032	560,5	
	36,0	37,0	36,5	0,037	417,5	
	37,0	32,0	34,5	0,035	467,3	
	36,0	34,0	35,0	0,035	454,0	
	32,0	31,0	31,5	0,032	560,5	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
8	472,5	375,2	97,3	51,0	Se elimina	492,0
	472,5	560,5	88,0		560,5	
	472,5	417,5	55,0		417,5	
	472,5	467,3	5,2		467,3	
	472,5	454,0	18,5		454,0	
	472,5	560,5	88,0		560,5	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
492,0	68,54	74,51



**Corrida 9:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
9	36,5	38,5	37,5	0,038	395,5	478,7
	33,0	35,0	34,0	0,034	481,1	
	32,5	31,0	31,8	0,032	551,8	
	34,0	33,5	33,8	0,034	488,3	
	35,0	33,5	34,3	0,034	474,1	
	35,0	33,0	34,0	0,034	481,1	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
9	478,7	395,5	83,2	18,4	Se elimina	495,3
	478,7	481,1	2,4		481,1	
	478,7	551,8	73,1		551,8	
	478,7	488,3	9,6		488,3	
	478,7	474,1	4,6		474,1	
	478,7	481,1	2,4		481,1	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
495,3	56,45	21,16

**Corrida 10:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
10	34,0	37,0	35,5	0,036	441,3	409,9
	37,0	38,0	37,5	0,038	395,5	
	35,0	33,0	34,0	0,034	481,1	
	39,0	36,0	37,5	0,038	395,5	
	40,0	36,5	38,3	0,038	380,2	
	38,0	40,0	39,0	0,039	365,7	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
10	409,9	441,3	31,4	26,8	441,3	395,6
	409,9	395,5	14,4		395,5	
	409,9	481,1	71,2		Se elimina	
	409,9	395,5	14,4		395,5	
	409,9	380,2	29,7		380,2	
	409,9	365,7	44,2		365,7	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
395,6	45,74	29,92

**Corrida 11:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
11	34,0	32,0	33,0	0,033	510,7	476,4
	36,5	37,0	36,8	0,037	411,8	
	33,5	31,5	32,5	0,033	526,6	
	34,0	35,0	34,5	0,035	467,3	
	38,5	34,0	36,3	0,036	423,3	
	33,5	32,0	32,8	0,033	518,6	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
11	476,4	510,7	34,3	37,8	510,7	489,3
	476,4	411,8	64,6		Se elimina	
	476,4	526,6	50,2		526,6	
	476,4	467,3	9,1		467,3	
	476,4	423,3	53,1		423,3	
	476,4	518,6	42,2		518,6	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
489,3	37,28	66,03

**Corrida 12:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
12	34,0	30,0	32,0	0,032	543,2	462,9
	33,0	32,0	32,5	0,033	526,6	
	36,0	35,0	35,5	0,036	441,3	
	30,0	34,0	32,0	0,032	543,2	
	40,0	40,0	40,0	0,040	347,6	
	37,0	40,0	38,5	0,039	375,2	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
12	462,3	543,2	80,9	66,8	543,2	485,9
	462,3	526,6	64,3		526,6	
	462,3	441,3	21,0		441,3	
	462,3	543,2	80,9		543,2	
	462,3	347,6	114,7		Se elimina	
	462,3	375,2	87,1		375,2	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
485,9	57,26	110,66

**Corrida 13:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVN <sub>p</sub>
13	35,0	31,0	33,0	0,033	510,7	463,3
	36,0	38,0	37,0	0,037	406,3	
	40,0	38,0	39,0	0,039	365,7	
	31,5	33,5	32,5	0,033	526,6	
	35,0	31,5	33,3	0,033	503,1	
	36,5	32,5	34,5	0,035	467,3	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVN <sub>p</sub>
13	463,3	510,7	47,4	42,3	510,7	482,8
	463,3	406,3	57,0		406,3	
	463,3	365,7	97,6		Se elimina	
	463,3	526,6	63,3		526,6	
	463,3	503,1	39,8		503,1	
	463,3	467,3	4,0		467,3	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
482,8	43,78	76,52

**Corrida 14:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
14	35,0	32,0	33,5	0,034	495,6	491,9
	37,0	36,5	36,8	0,037	411,8	
	36,5	37,0	36,8	0,037	411,8	
	28,0	27,0	27,5	0,028	735,5	
	37,0	35,0	36,0	0,036	429,2	
	36,0	33,0	34,5	0,035	467,3	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers	Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
14	491,9	495,6	3,7	495,6	443,1
	491,9	411,8	80,1	411,8	
	491,9	411,8	80,1	411,8	
	491,9	735,5	243,6	Se elimina	
	491,9	429,2	62,7	429,2	
	491,9	467,3	24,6	467,3	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
443,1	52,51	31,27

**Corrida 15:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
15	34,5	30,0	32,3	0,032	534,8	493,4
	37,5	40,0	38,8	0,039	370,4	
	31,5	30,0	30,8	0,031	588,2	
	32,5	30,5	31,5	0,032	560,5	
	37,0	38,0	37,5	0,038	395,5	
	34,0	32,0	33,0	0,033	510,7	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
15	493,4	534,8	41,4	63,7	534,8	518,0
	493,4	370,4	123,0		Se elimina	
	493,4	588,2	94,8		588,2	
	493,4	560,5	67,1		560,5	
	493,4	395,5	97,9		395,5	
	493,4	510,7	17,3		510,7	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
518,0	70,22	122,48

**Corrida 16:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVN <sub>p</sub>
16	29,0	32,0	30,5	0,031	597,9	491,0
	32,0	32,5	32,3	0,032	534,8	
	33,0	30,5	31,8	0,032	551,8	
	39,0	37,0	38,0	0,038	385,2	
	37,0	34,0	35,5	0,036	441,3	
	35,0	36,5	35,8	0,036	435,2	

Depuración:

Corrida	Diferencia Dureza Vickers		Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVN <sub>p</sub>
16	491,0	597,9	106,9	63,2	Se elimina	469,6
	491,0	534,8	43,8		534,8	
	491,0	551,8	60,8		551,8	
	491,0	385,2	105,8		385,2	
	491,0	441,3	49,7		441,3	
	491,0	435,2	55,8		435,2	

Error:

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
469,6	82,15	84,42



**Corrida 17:**

Corrida	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>p</sub>	L	HVN	HVNp
17	38,5	40,0	39,3	0,039	361,0	454,3
	35,0	33,0	34,0	0,034	481,1	
	32,0	35,5	33,8	0,034	488,3	
	35,0	34,0	34,5	0,035	467,3	
	39,5	33,5	36,5	0,037	417,5	
	35,0	31,0	33,0	0,033	510,7	

**Depuración:**

Corrida	Diferencia Dureza Vickers	Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	Dureza Vickers	HVNp
147	454,3	361,0	93,3	361,0	443,1
	454,3	481,1	26,8	481,1	
	454,3	488,3	34,0	488,3	
	454,3	467,3	13,0	467,3	
	454,3	417,5	36,8	417,5	
	454,3	510,7	56,4	Se elimina	

**Error:**

Promedio Dureza Vickers	Error	
	Arriba	Abajo
443,1	45,20	82,06

### Cálculo Tipo de la Depuración de Desgaste.

VD <sub>1</sub>	VD <sub>p</sub>	Valor de Diferencia	Promedio Diferencia	VD <sub>2</sub>	VD <sub>n</sub>	VD <sub>n</sub> -Eliminado	Error
0,597	0,338	0,259	0,177	0,597	<b>0,471</b>	0,399	0,072
0,072		0,266		Eliminado			
0,344		0,006		0,344			

Como  $VD_n = 0,471 > 0,177 \Rightarrow$  El valor de  $VD_2$  realmente queda eliminado.

Por lo que el valor del Volumen de Desgaste depurado es:  **$VD_n = 0,471 \text{ g/mm}^3$** .

El cálculo anterior es el mismo para todas las condiciones con y sin lubricación, y también se repite para la Tasa de Desgaste en su metodología. Ver Dureza Vickers.

Donde:

VD<sub>1</sub>: Volumen de desgaste de cada replica.

VD<sub>p</sub>: Volumen de desgaste promedio.

VD<sub>2</sub>: Volumen de desgaste donde se elimina el valor mas elevado de VD<sub>1</sub>.

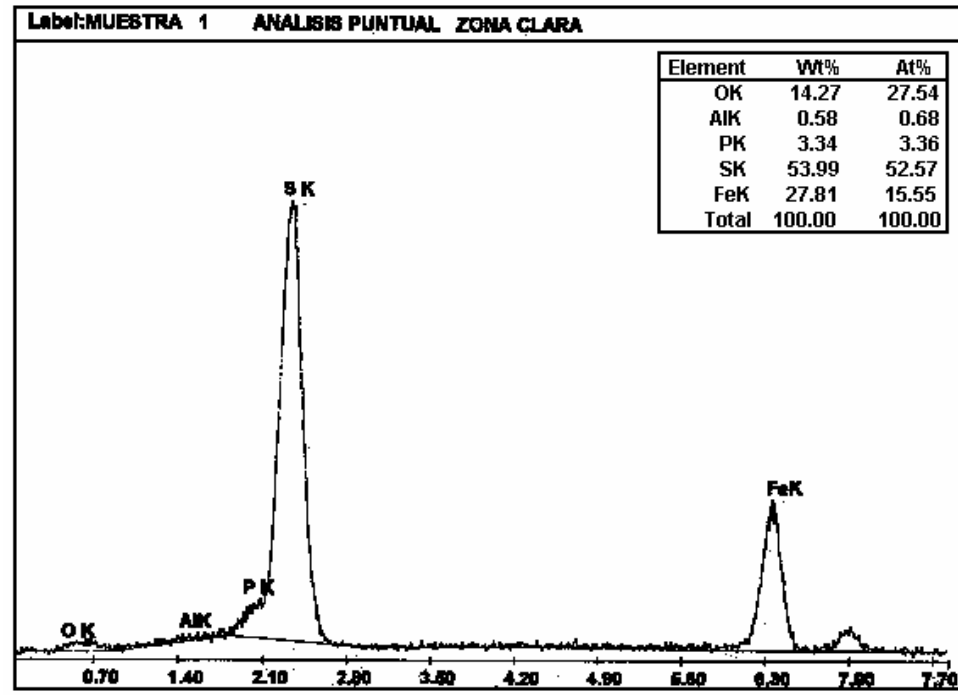
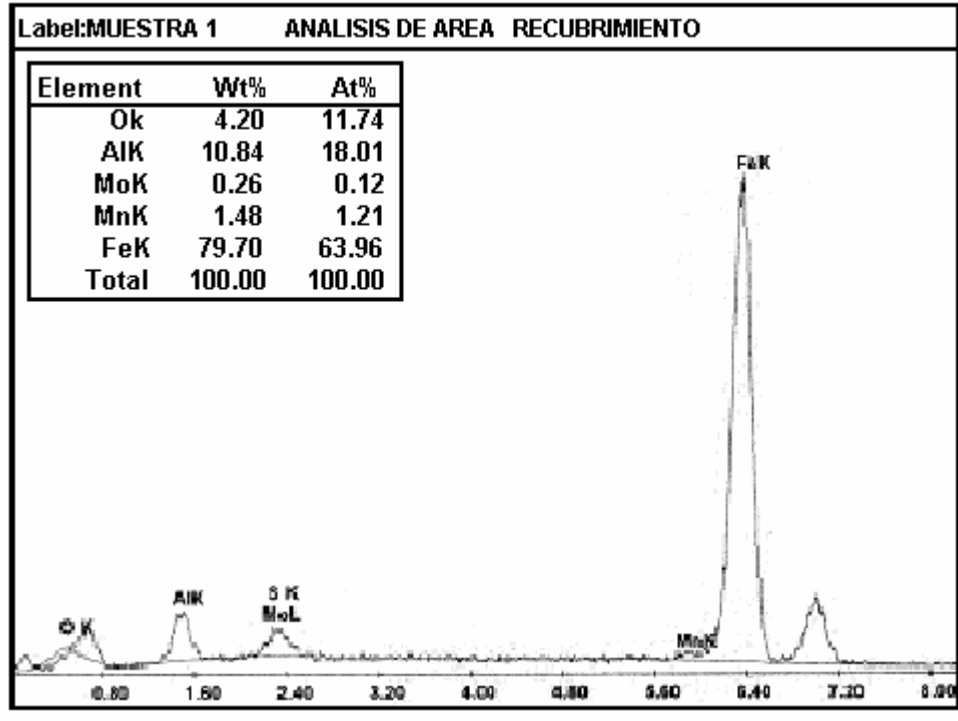
VD<sub>n</sub>: Volumen de desgaste nuevo (promedio de VD<sub>2</sub>).

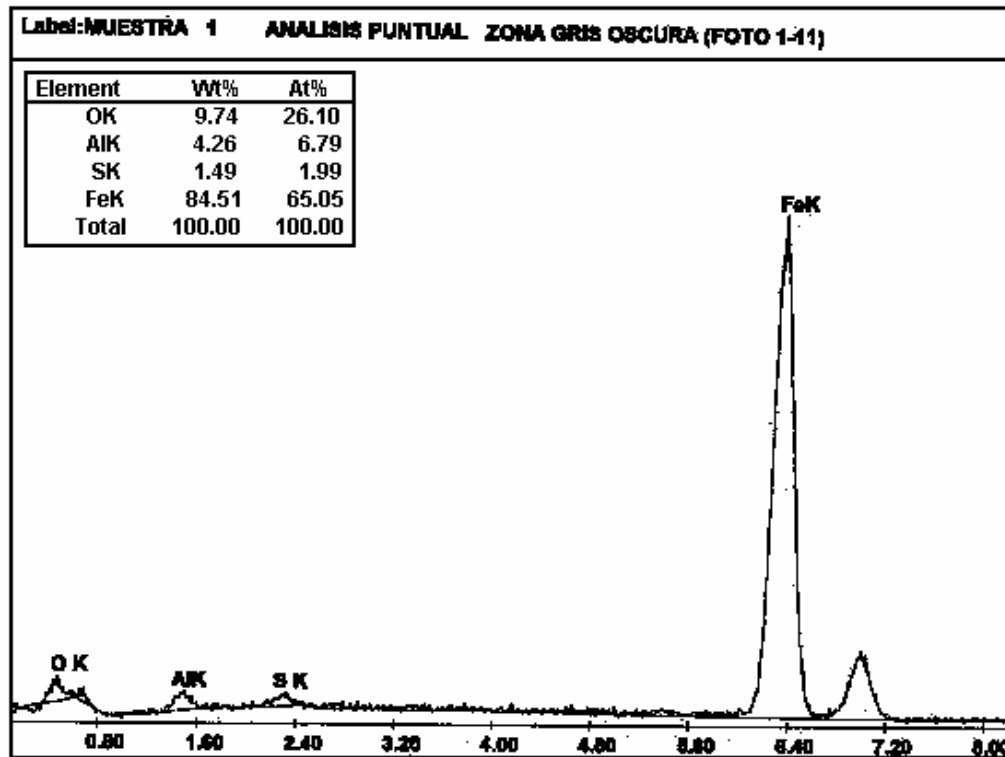
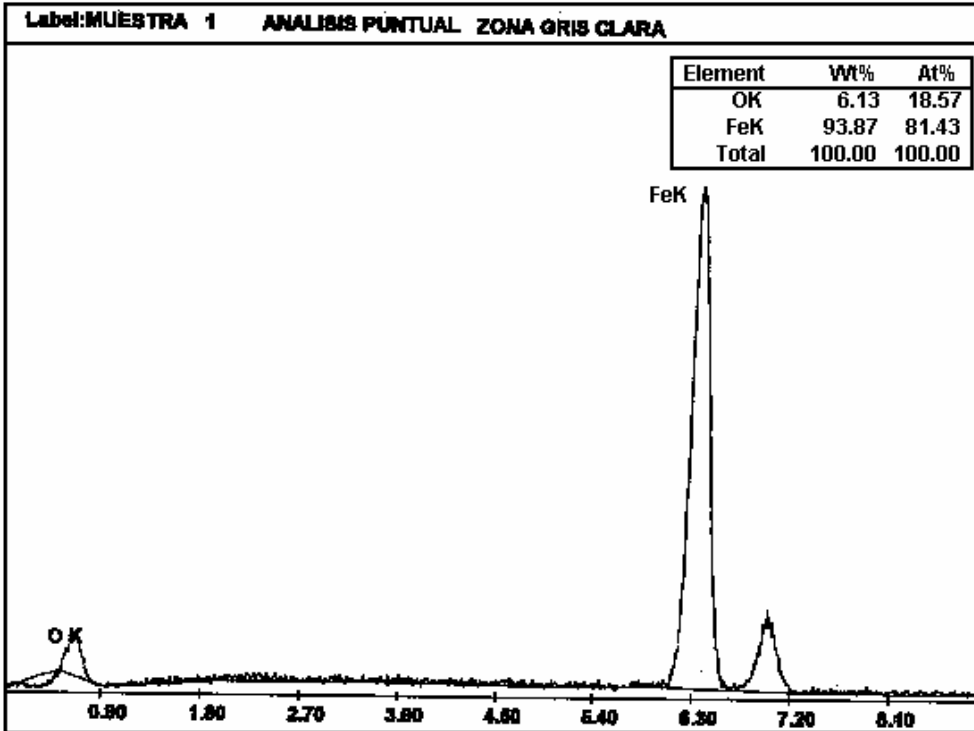
## ANEXO D

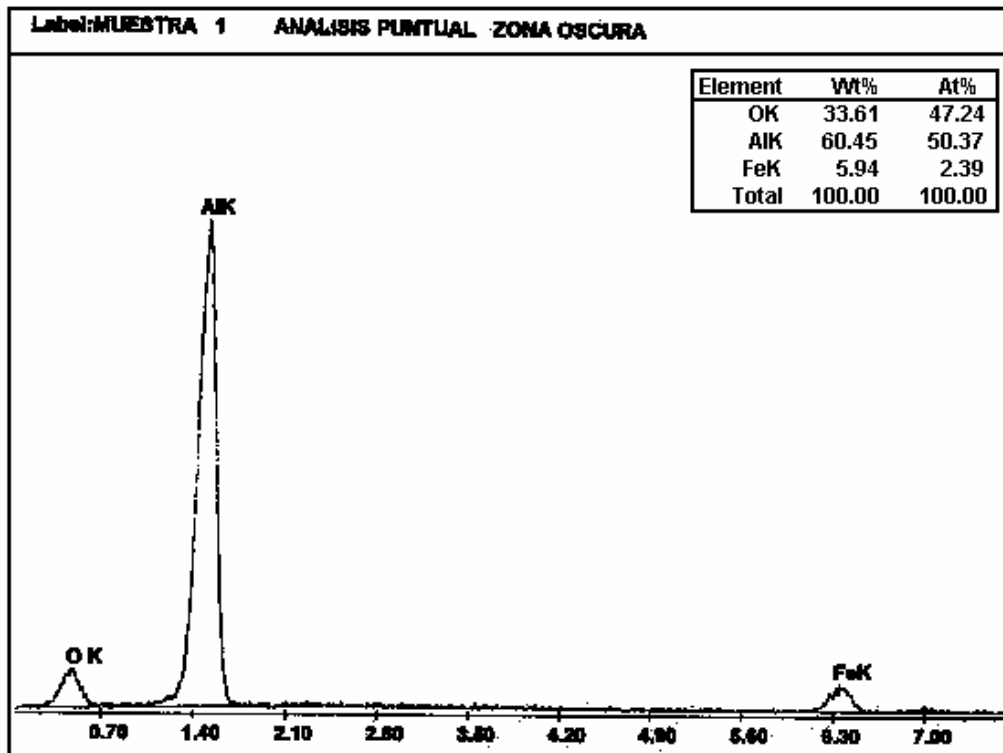
Curvas de caracterización del recubrimiento.

## ANALISIS POR DISPERSION DE RAYOS X (EDX) PARA CADA CONDICIÓN:

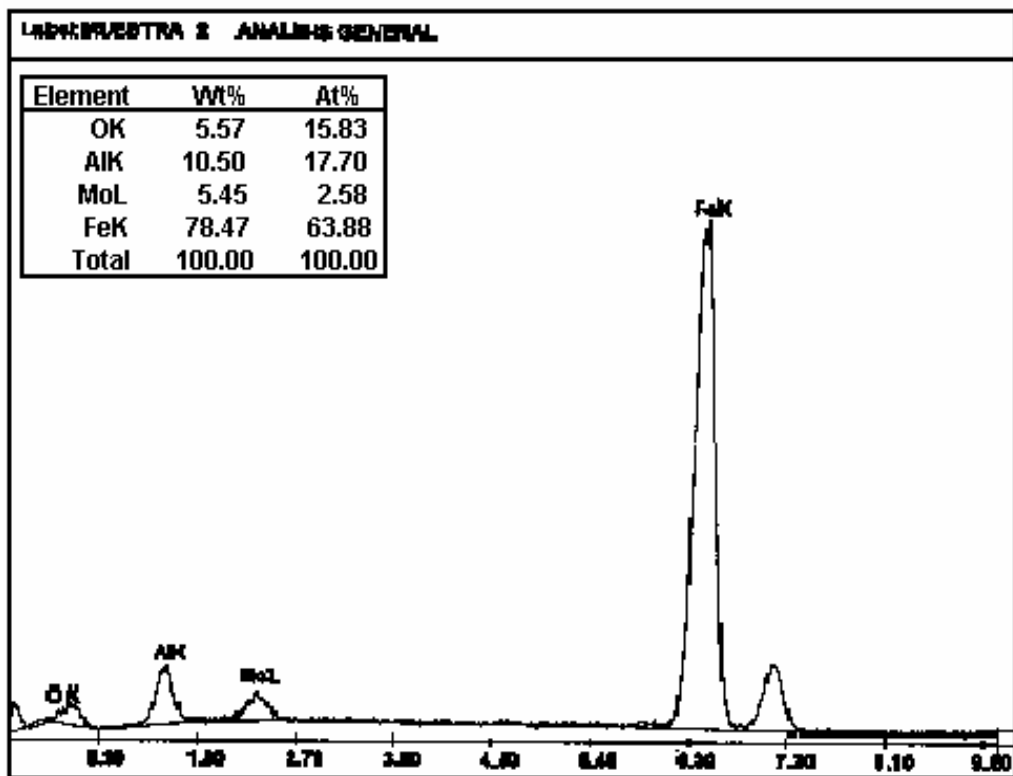
- Condición 1:





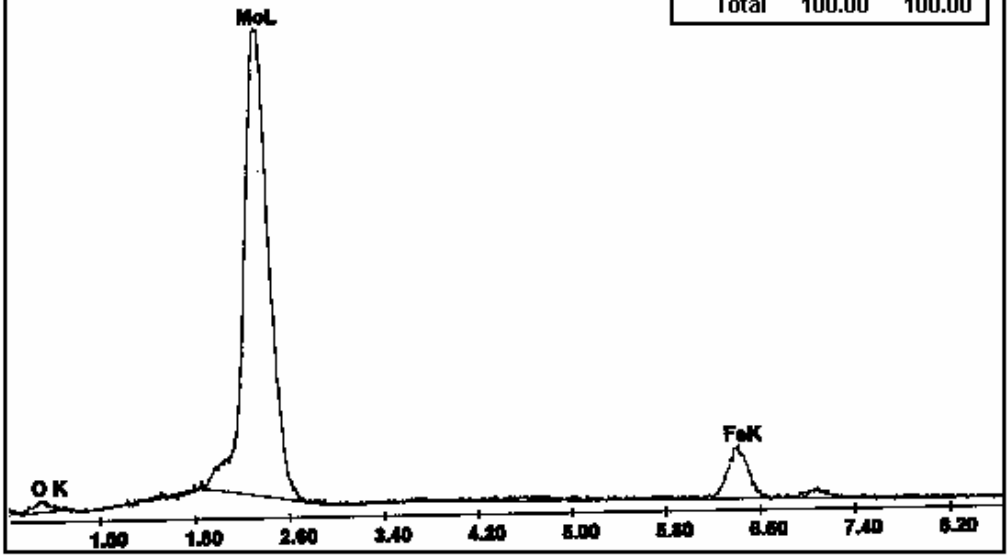


- Condición 2:



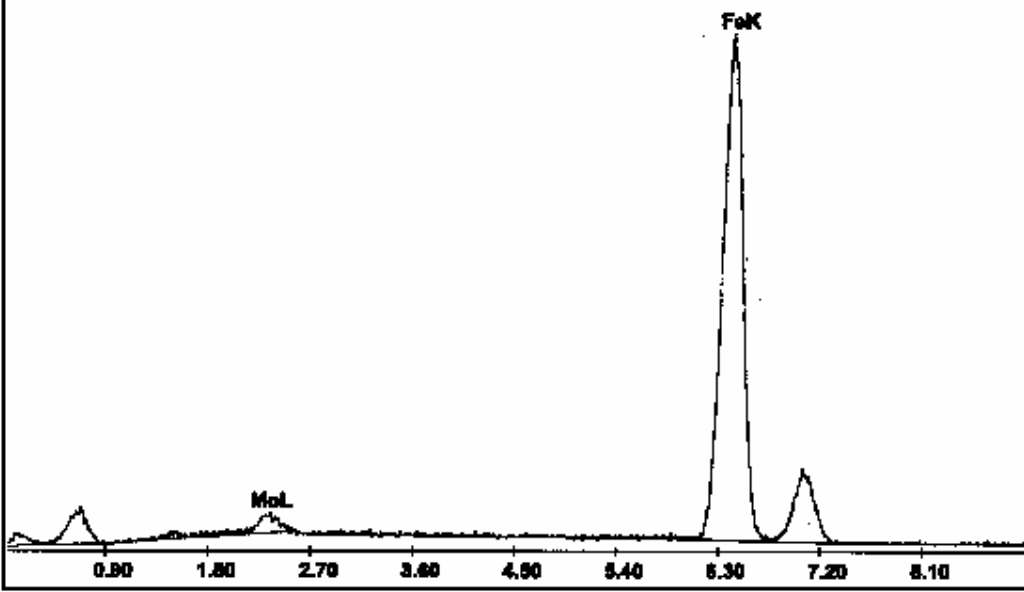
Label: MUESTRA 2 ANALISIS PUNTUAL ZONA CLARA

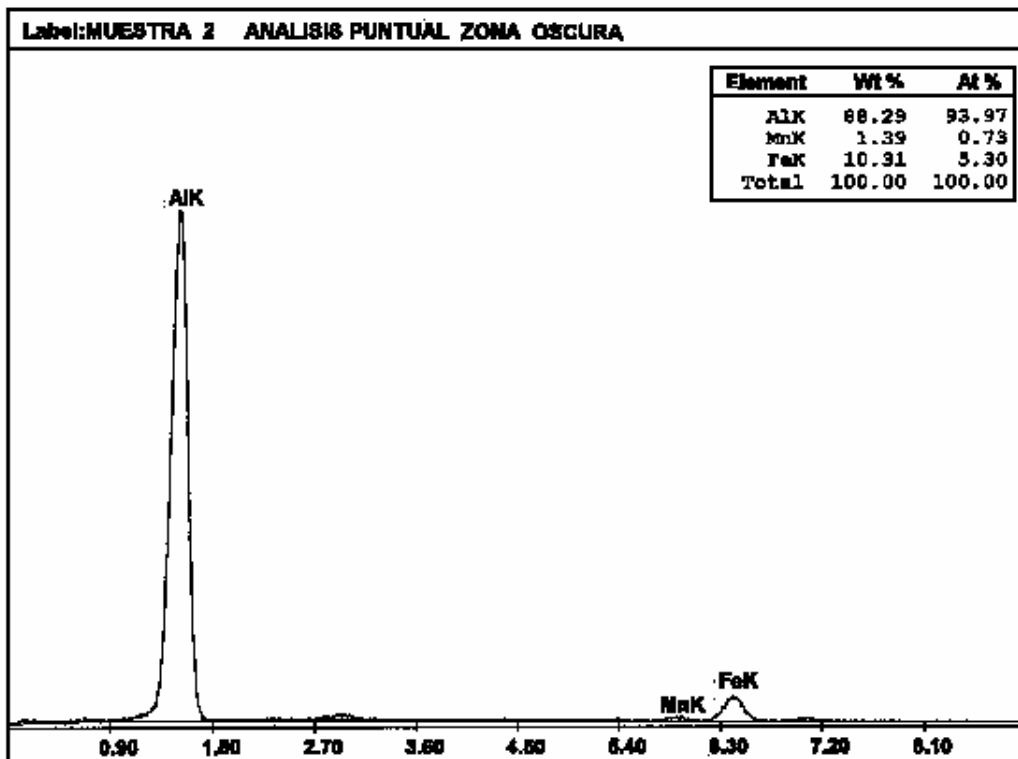
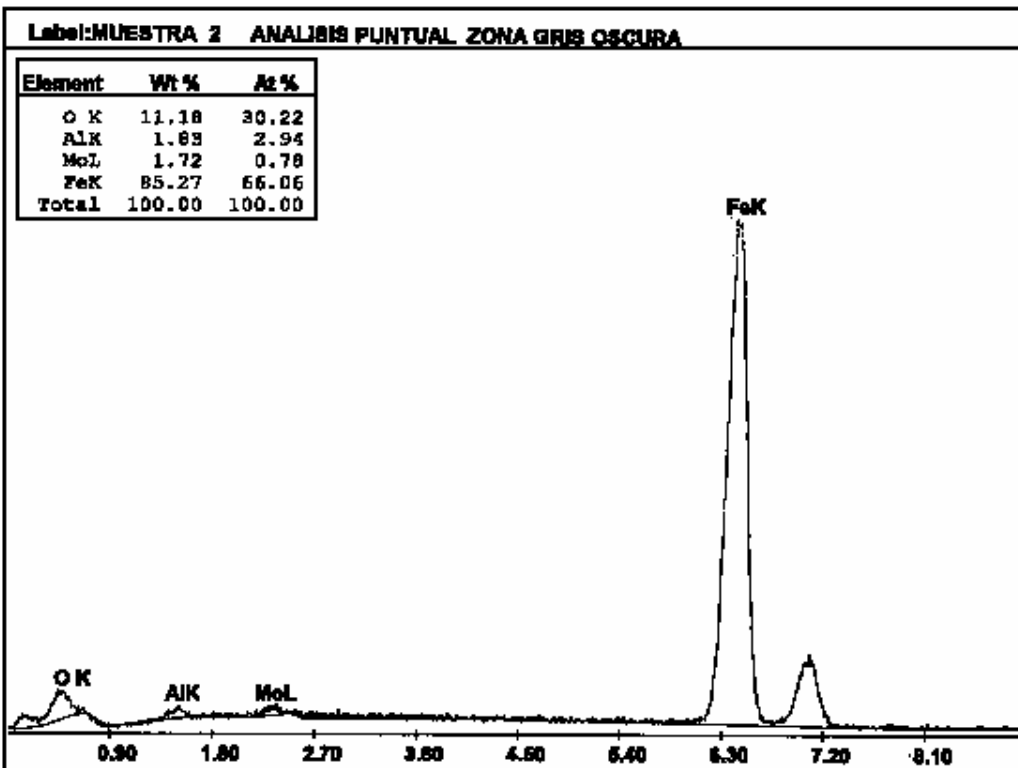
Element	Wt%	At%
Ok	15.76	51.03
MoL	75.26	40.64
FeK	8.98	8.93
Total	100.00	100.00



Label: MUESTRA 2 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

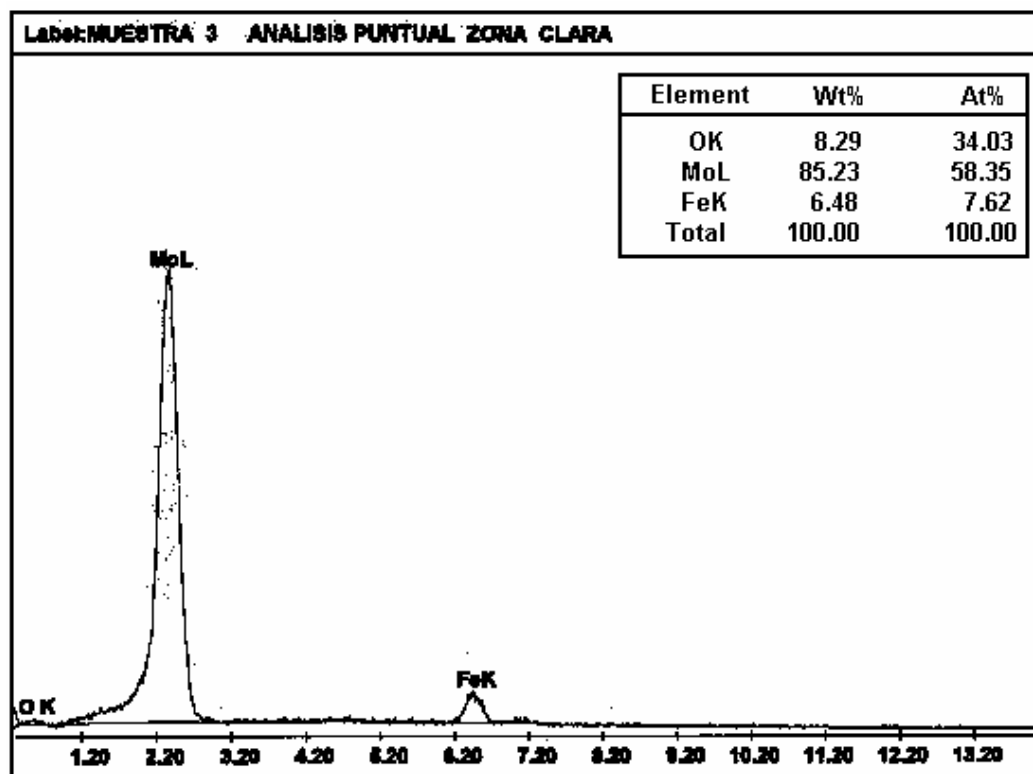
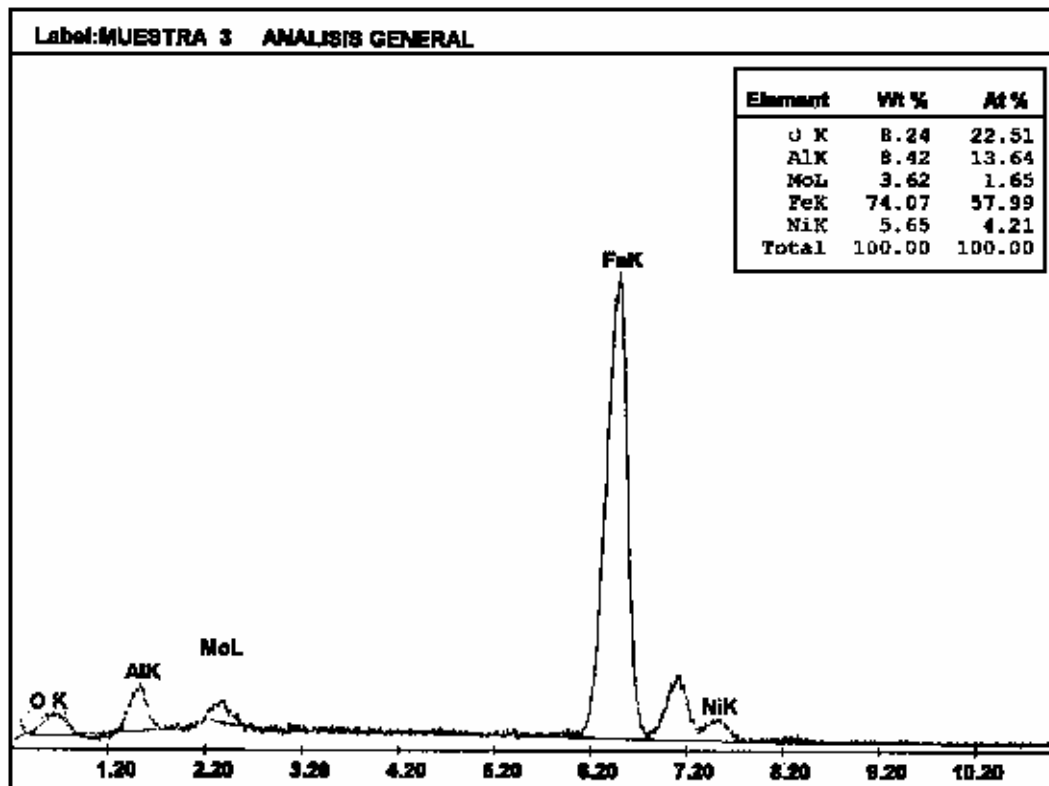
Element	Wt %	At %
MoL	4.14	2.45
FeK	95.86	97.55
Total	100.00	100.00





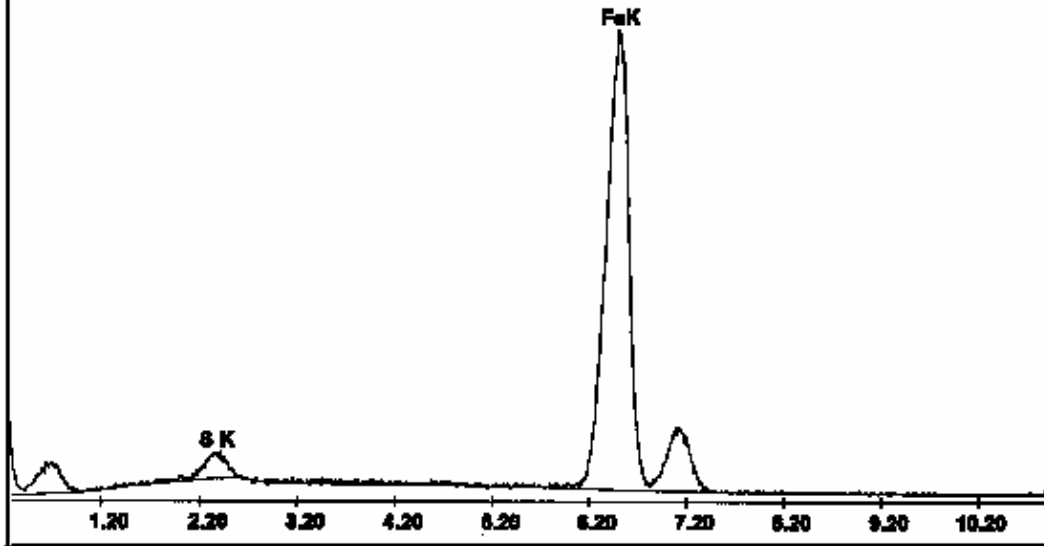


- Condición 3:



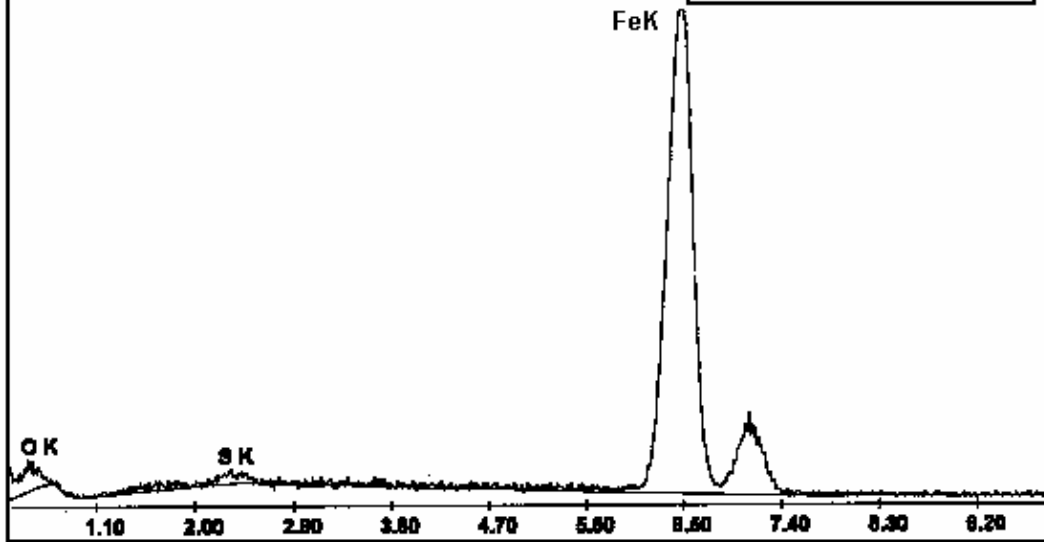
Label:MUESTRA 3 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

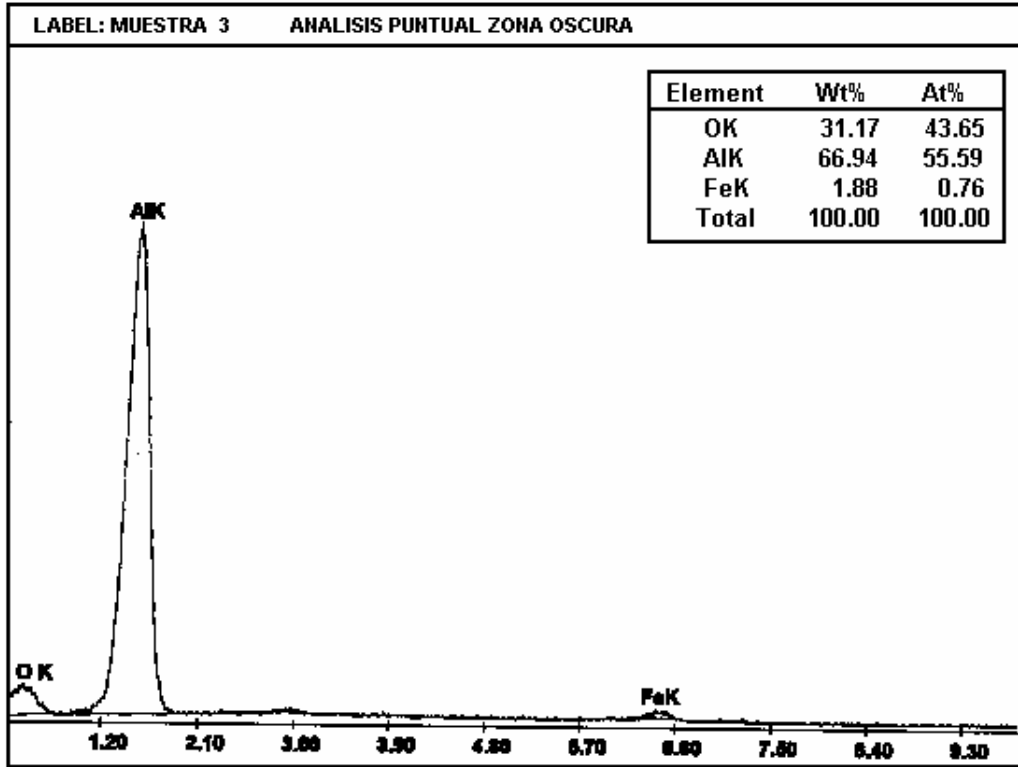
Element	Wt%	At%
S K	3.59	6.10
FeK	96.41	93.90
Total	100.00	100.00



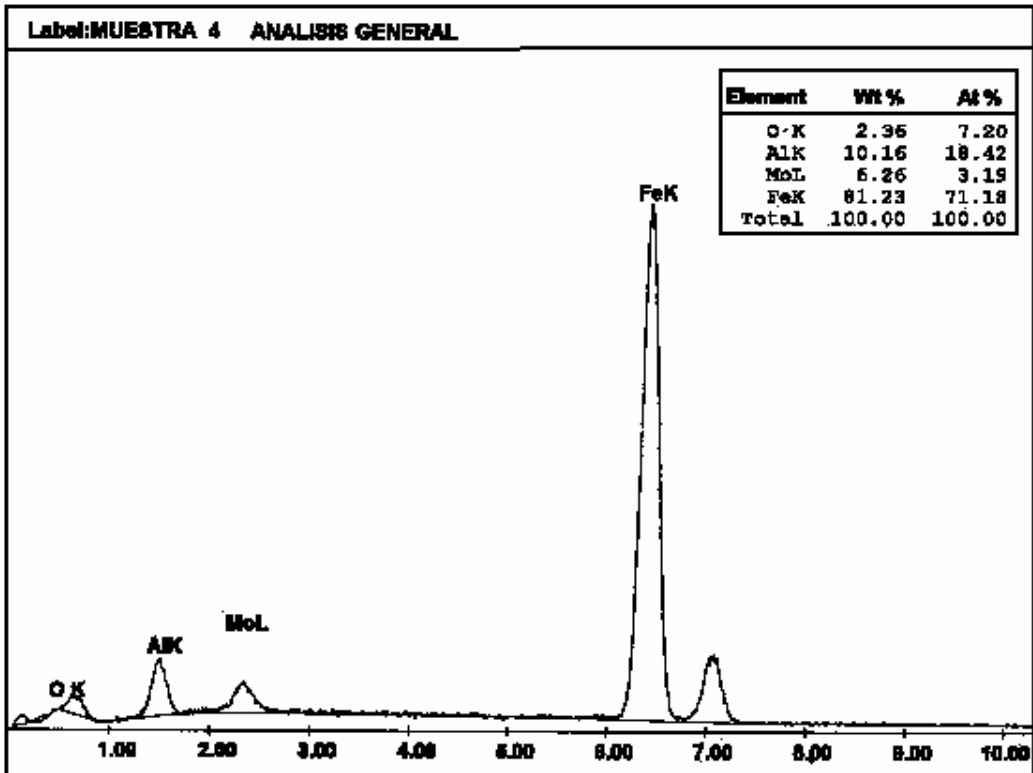
Label:MUESTRA 3 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt%	At%
O K	11.62	31.24
S K	1.27	1.70
FeK	87.11	67.06
Total	100.00	100.00



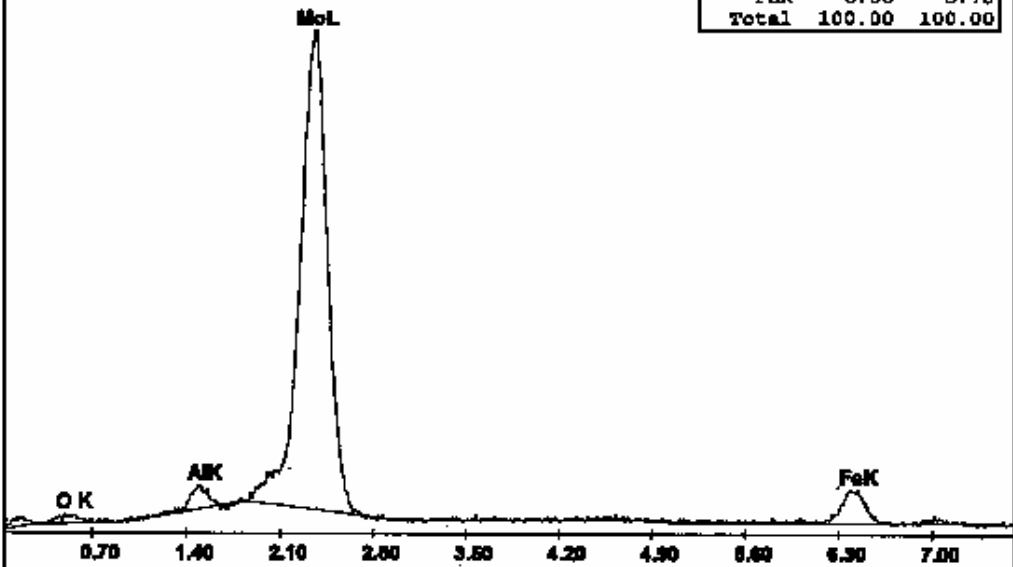


- Condición 4:



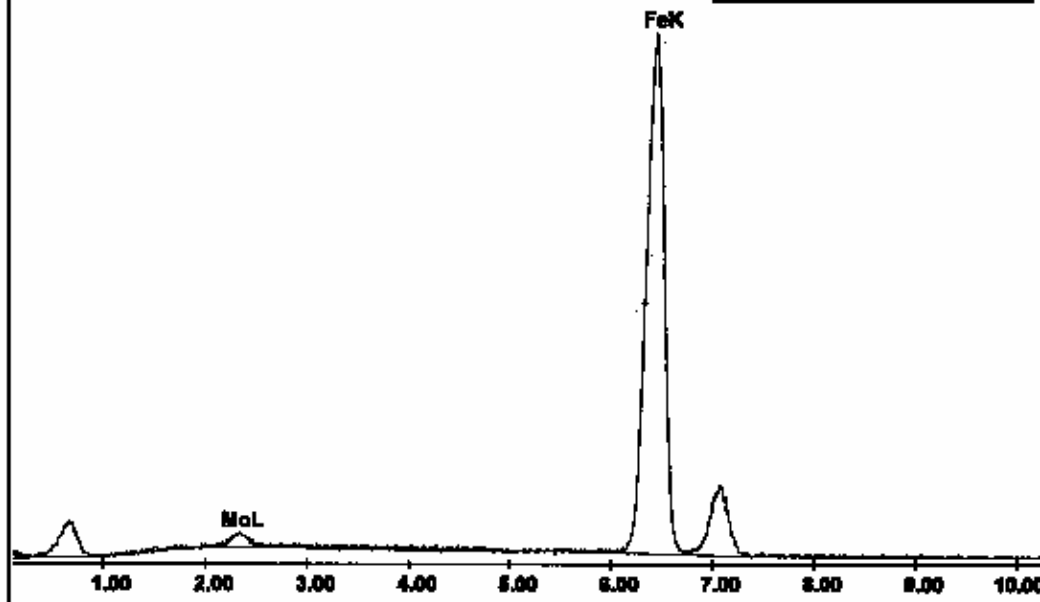
Label:MUESTRA 4 ANALISIS PUNTUAL ZONA CLARA

Element	WT %	At %
O K	13.58	45.64
AlK	2.45	4.88
MoL	77.97	43.70
FeK	6.00	5.78
Total	100.00	100.00



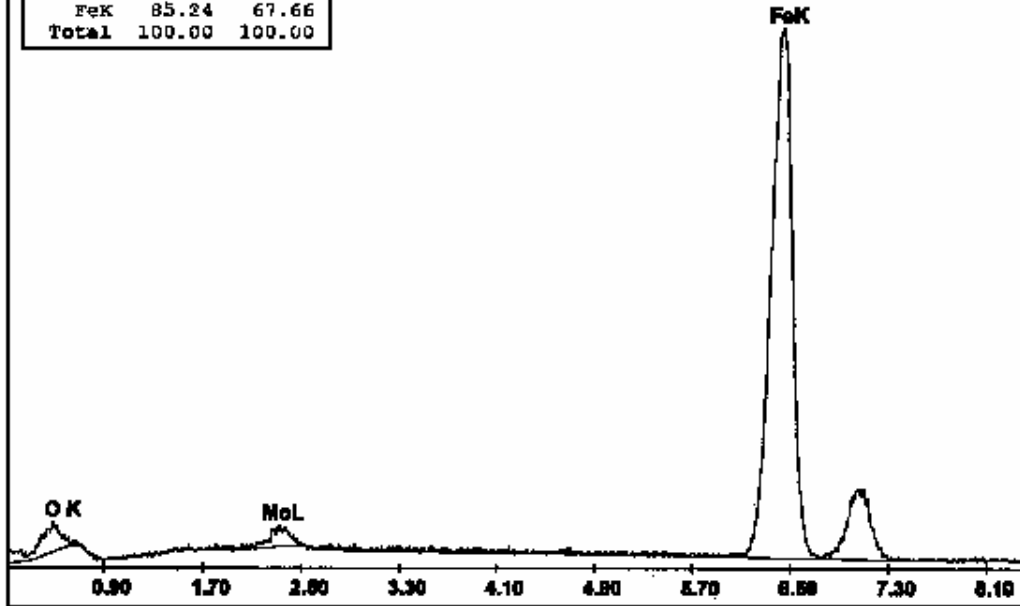
Label:MUESTRA 4 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

Element	WT %	At %
MoL	3.54	2.09
FeK	96.46	97.91
Total	100.00	100.00



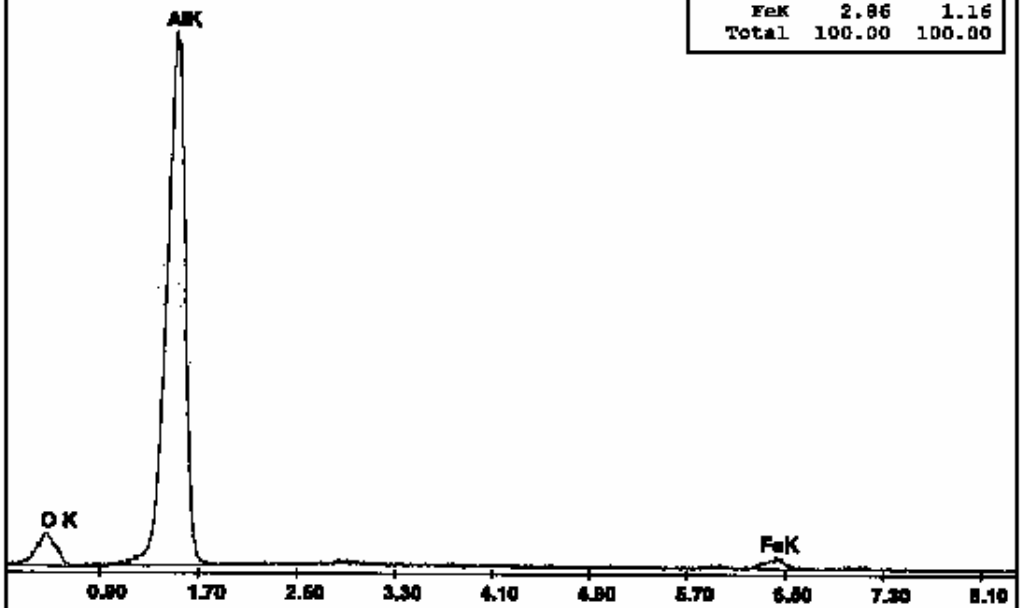
Label:MUESTRA 4 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	11.05	30.62
MoL	3.71	1.71
FeK	85.24	67.66
Total	100.00	100.00

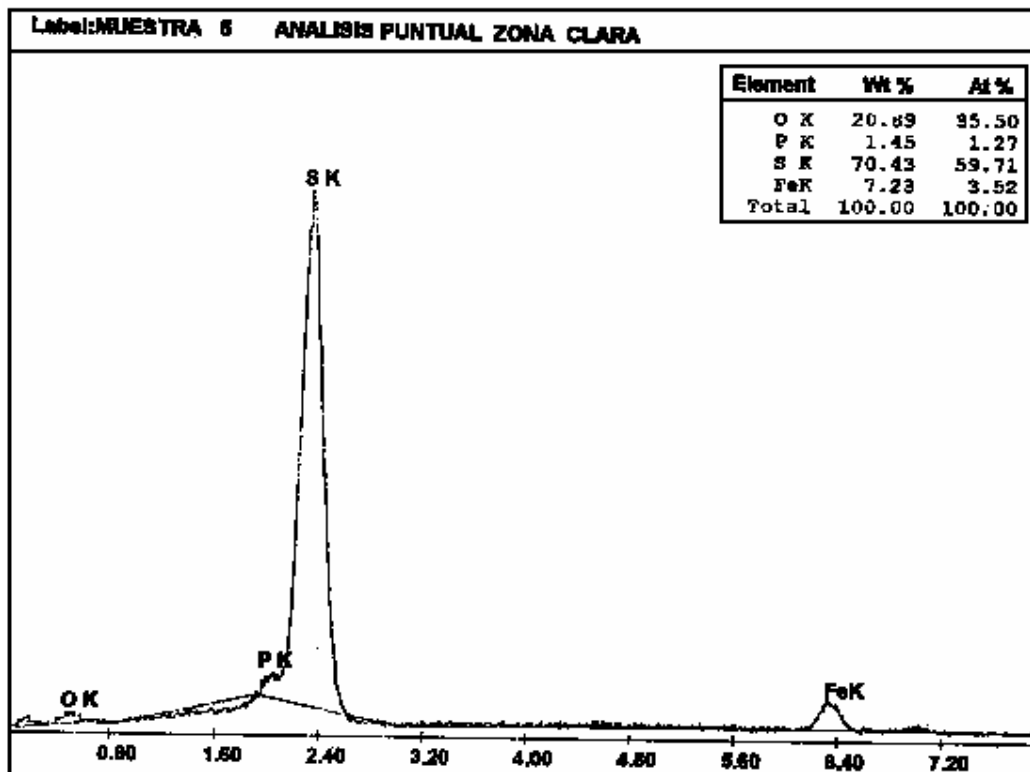
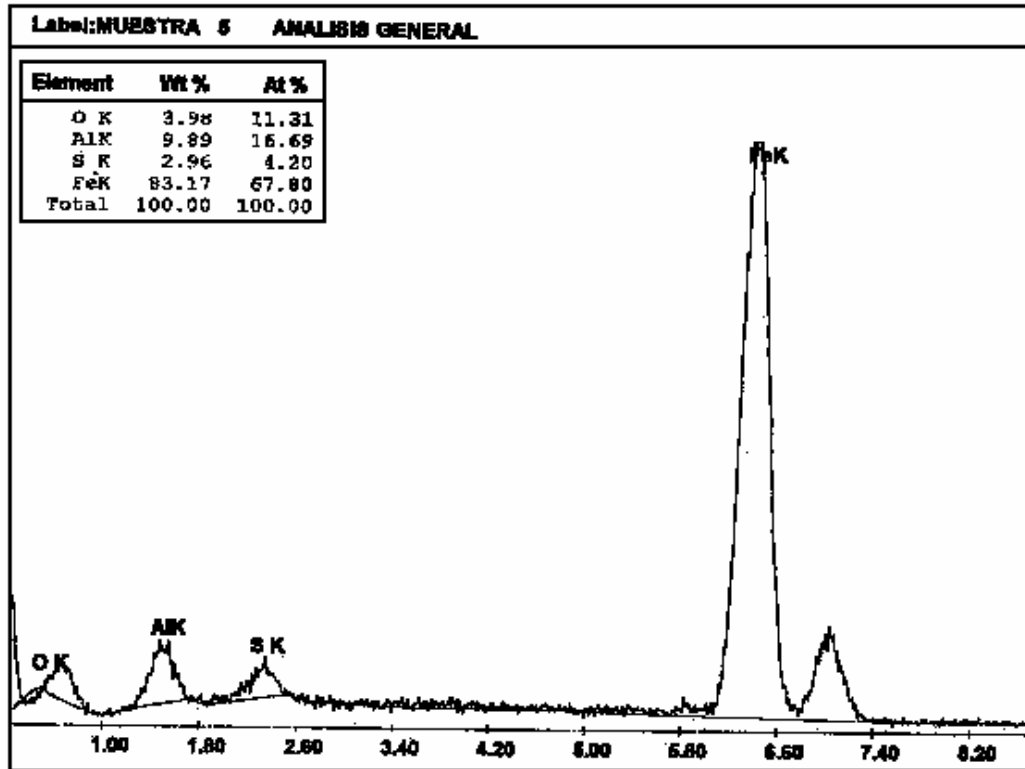


Label:MUESTRA 4 ANALISIS PUNTUAL ZONA OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	29.82	42.26
AlK	67.33	56.58
FeK	2.86	1.16
Total	100.00	100.00

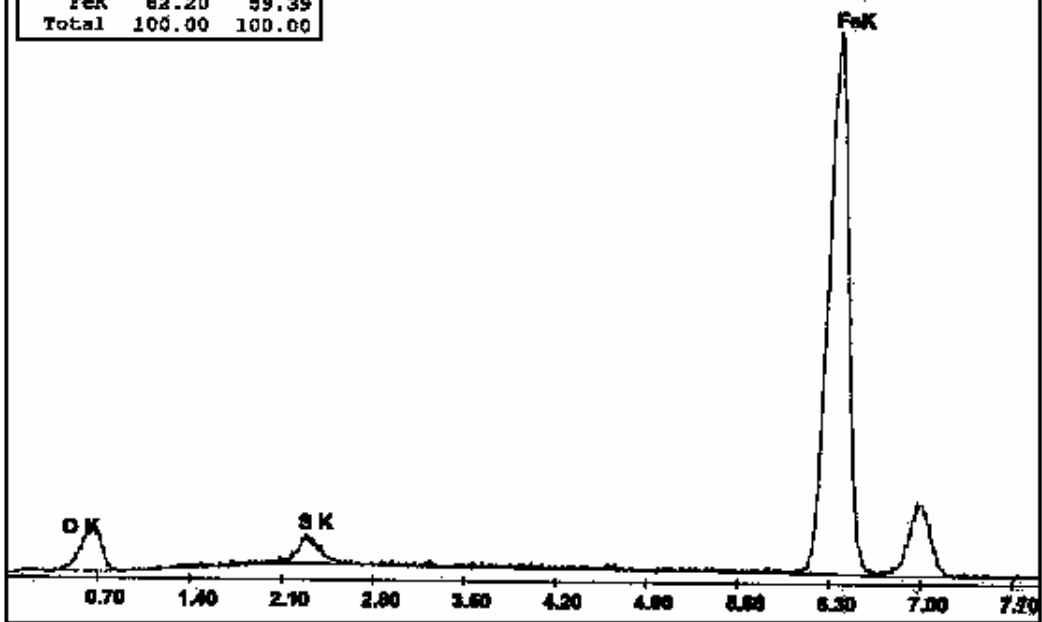


- Condición 5:



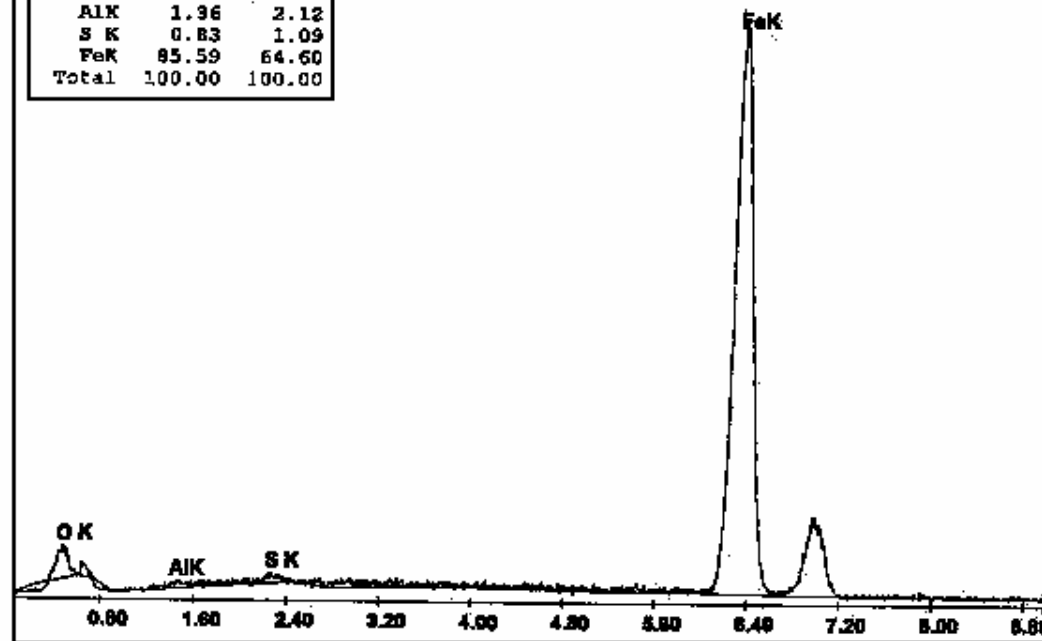
Label:MUESTRA 5 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

Element	Wt %	At %
O K	14.41	36.34
S K	3.39	4.27
FeK	82.20	59.39
Total	100.00	100.00



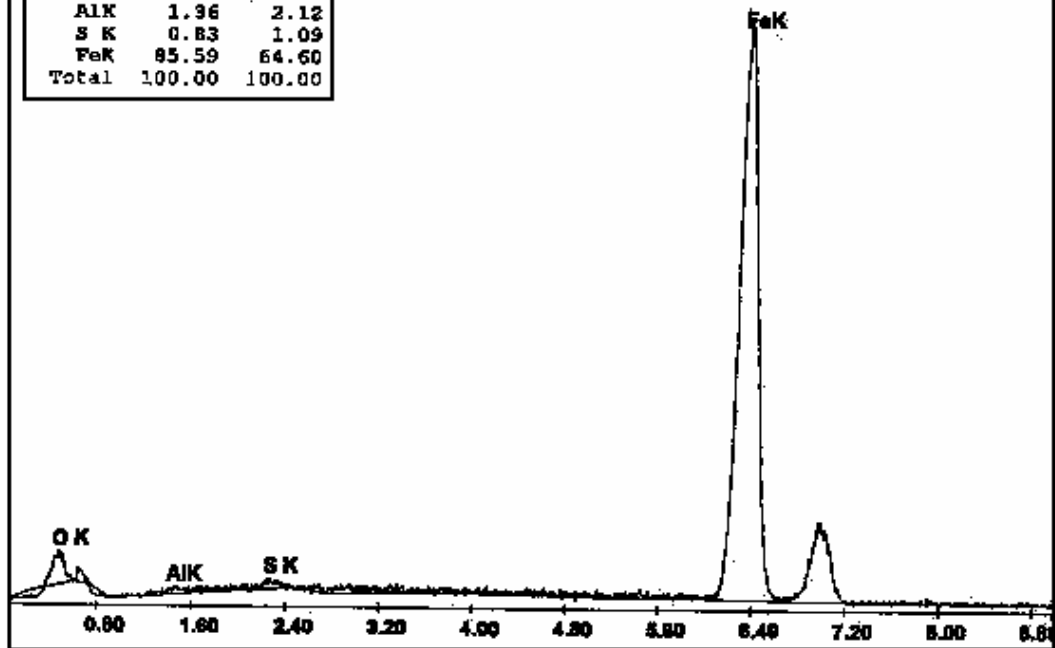
Label:MUESTRA 5 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	12.22	32.19
AlK	1.96	2.12
S K	0.83	1.09
FeK	85.59	64.60
Total	100.00	100.00



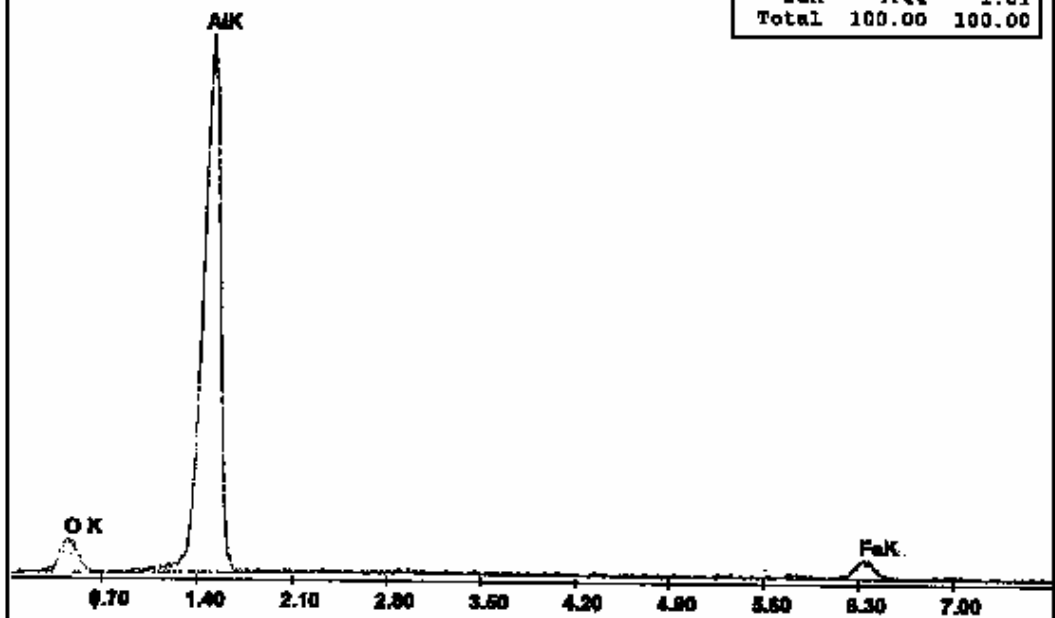
Label: MUESTRA 5 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	12.22	32.19
AlK	1.96	2.12
S K	0.83	1.09
FeK	85.59	64.60
Total	100.00	100.00



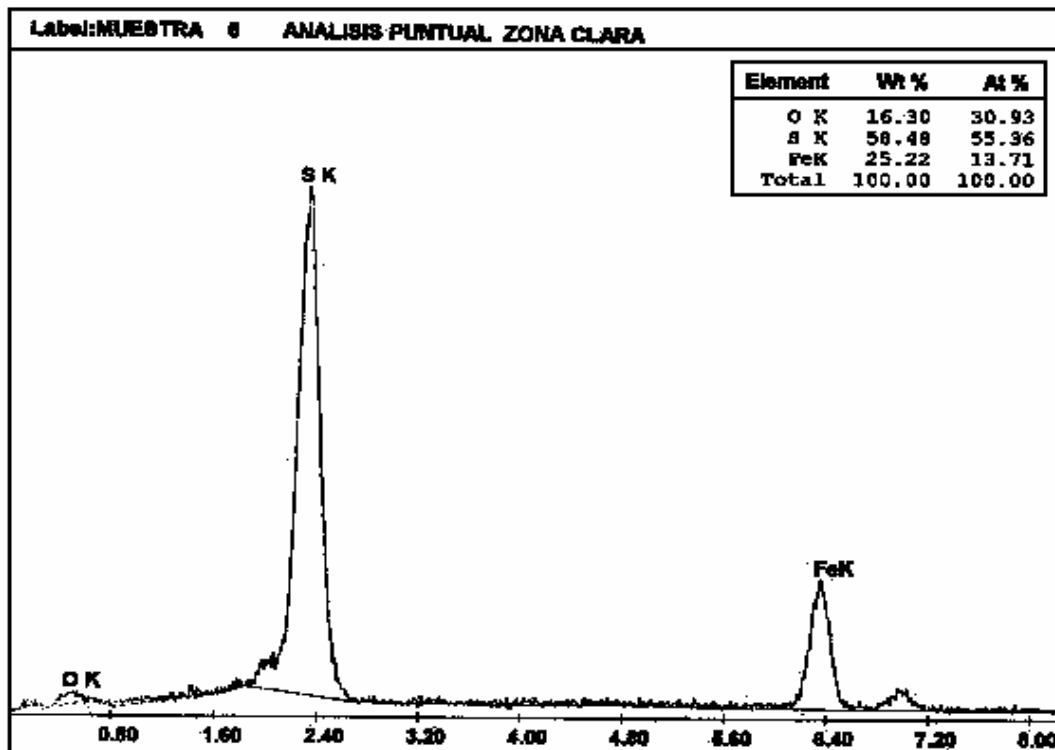
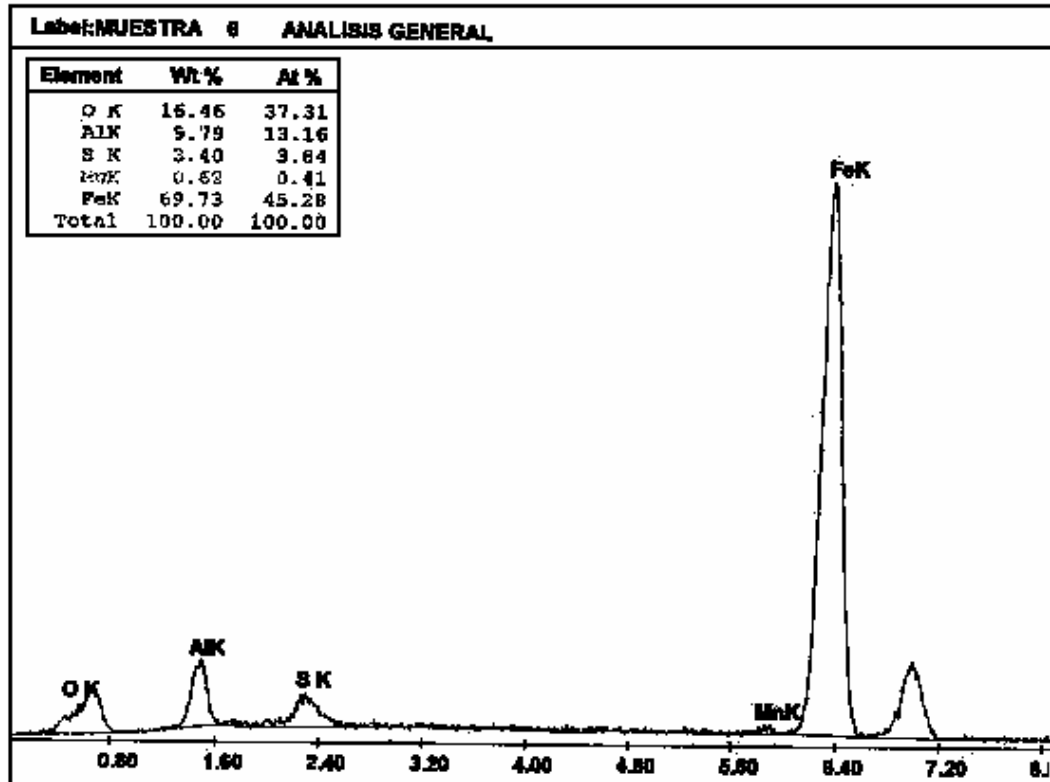
Label: MUESTRA 5 ANALISIS PUNTUAL ZONA OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	30.78	43.69
AlK	64.78	54.51
FeK	4.44	1.81
Total	100.00	100.00



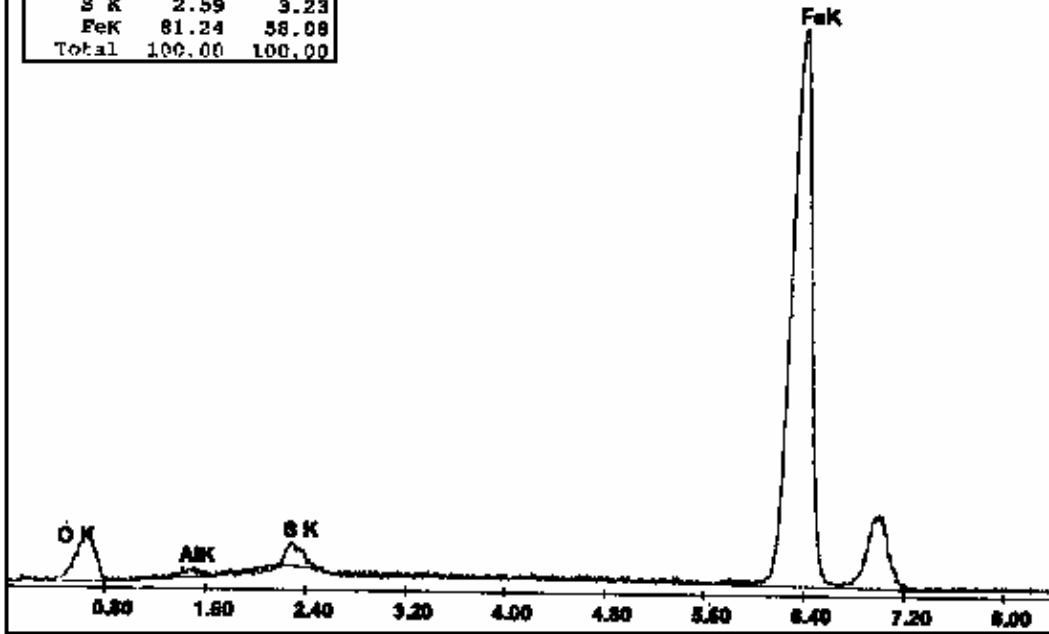


- Condición 6:



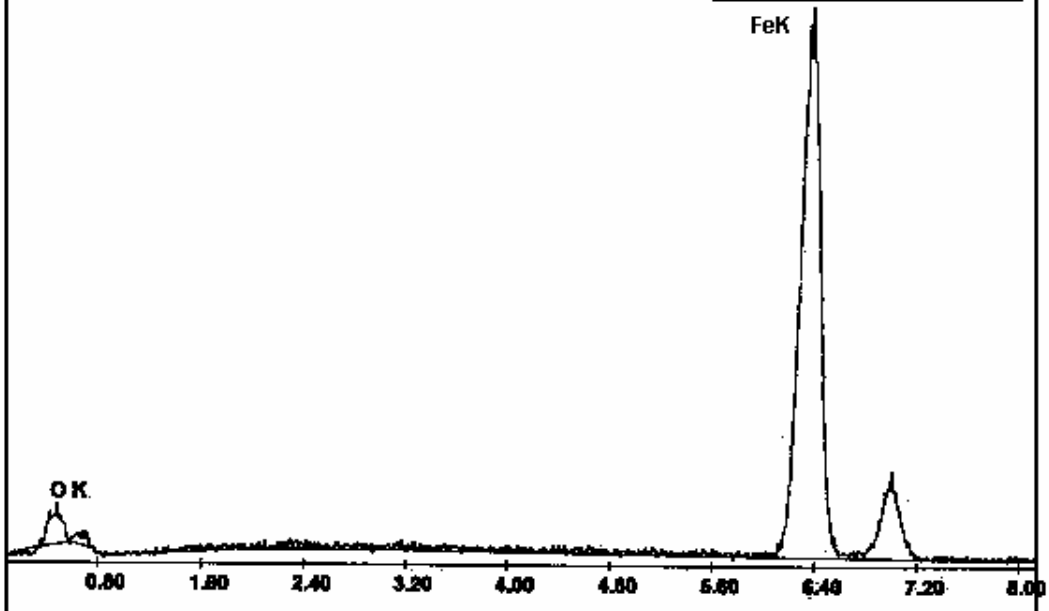
Label: MUESTRA 6 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

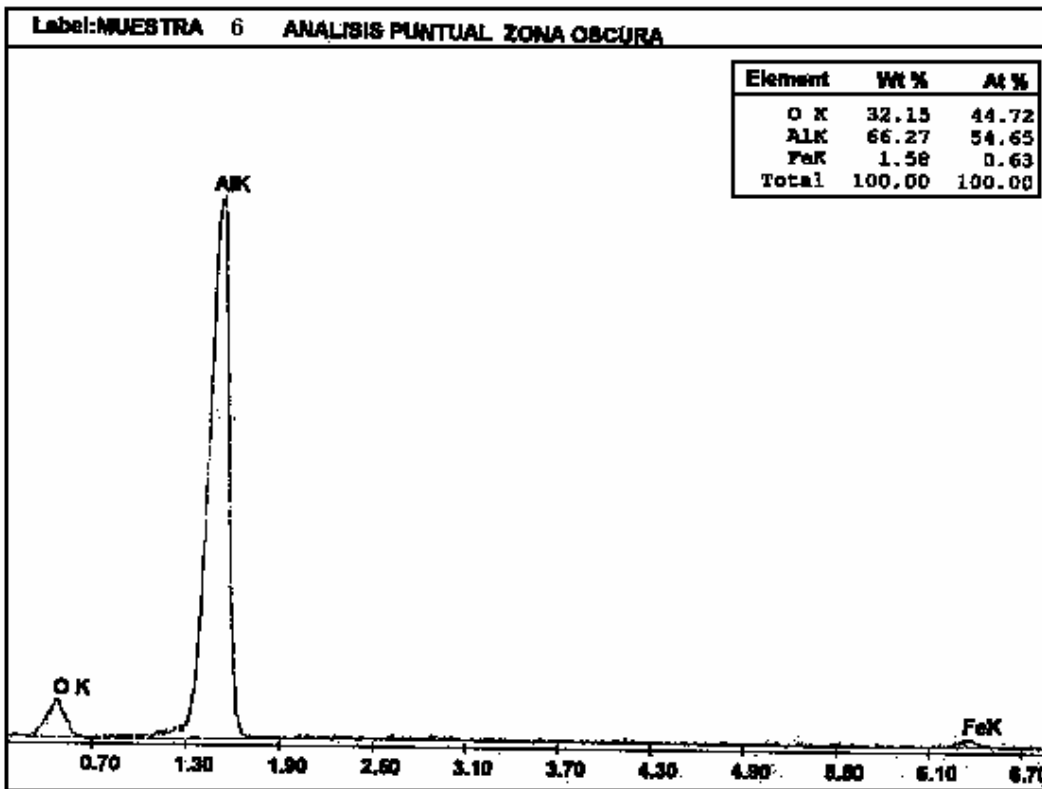
Element	WT %	At %
O K	14.53	36.27
AlK	1.64	2.43
S K	2.59	9.23
FeK	81.24	58.08
Total	100.00	100.00



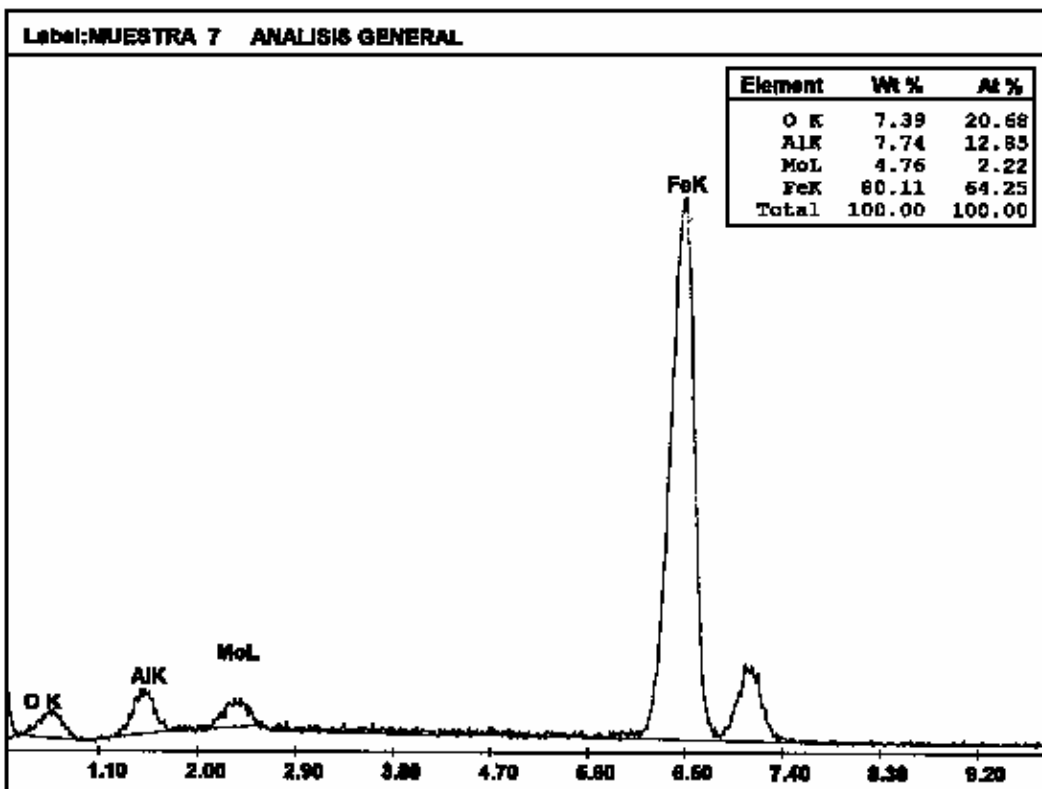
Label: MUESTRA 6 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	WT %	At %
O K	14.58	37.34
FeK	85.42	62.66
Total	100.00	100.00



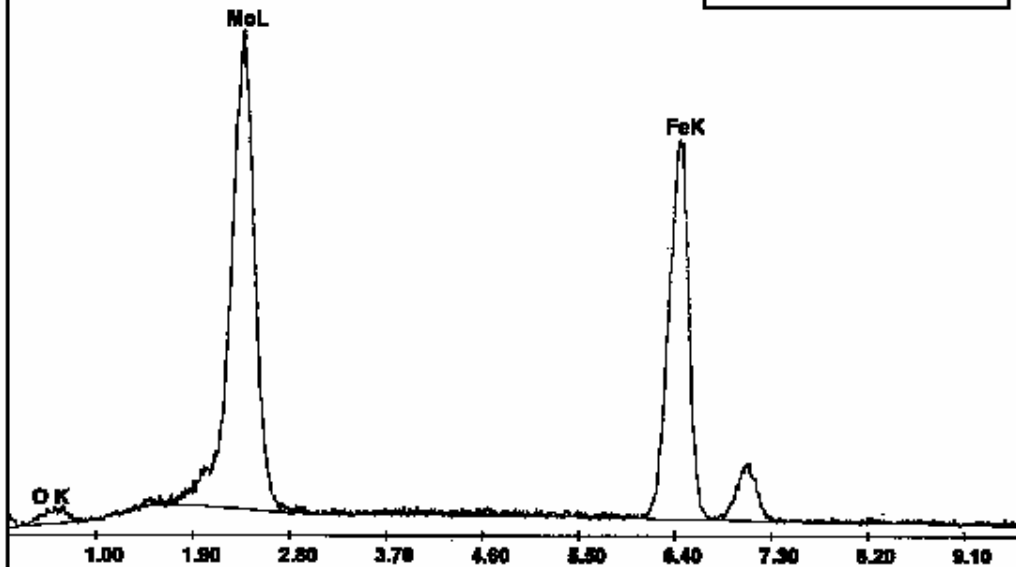


- Condición 7:



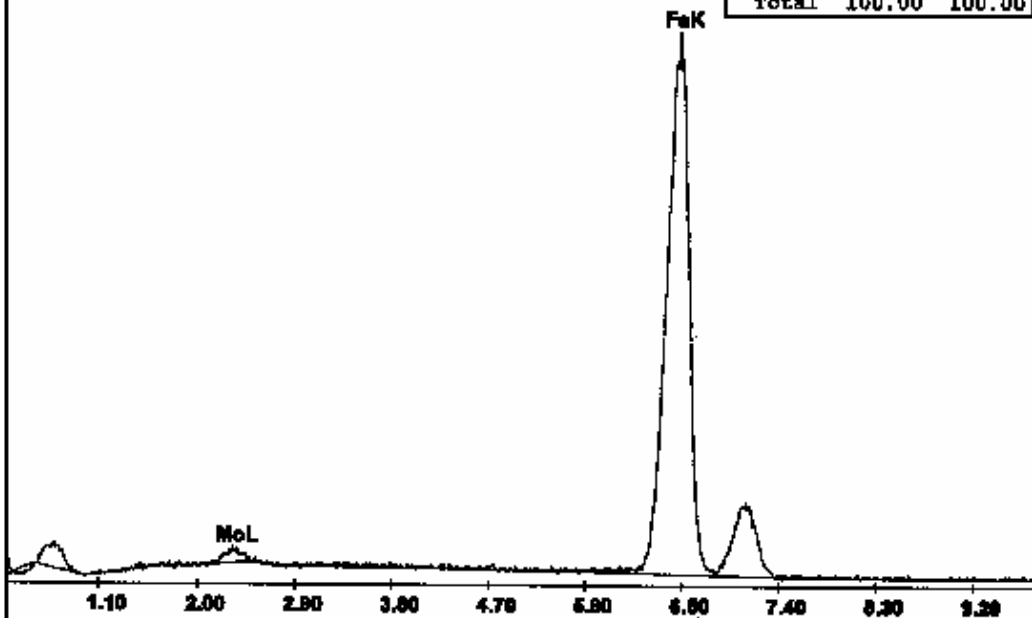
Label: MUESTRA 7 ANALISIS PUNTUAL EN ZONA CLARA

Element	WT %	At %
O K	8.89	30.75
MoL	50.70	29.29
FeK	40.40	40.02
Total	100.00	100.00



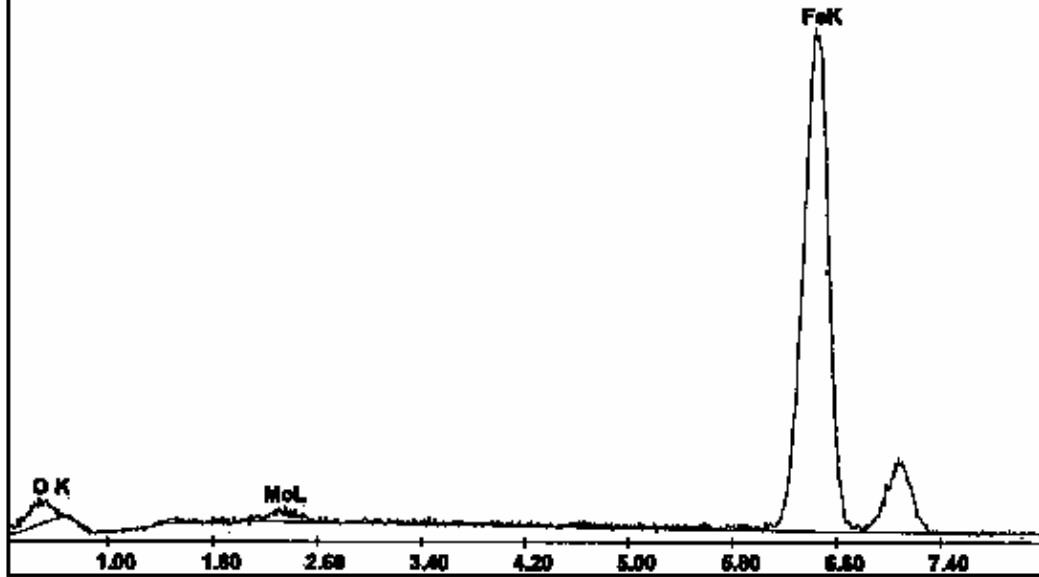
Label: MUESTRA 7 ANALISIS PUNTUAL EN ZONA GRIS CLARA

Element	WT %	At %
MoL	3.05	1.80
FeK	96.95	98.20
Total	100.00	100.00



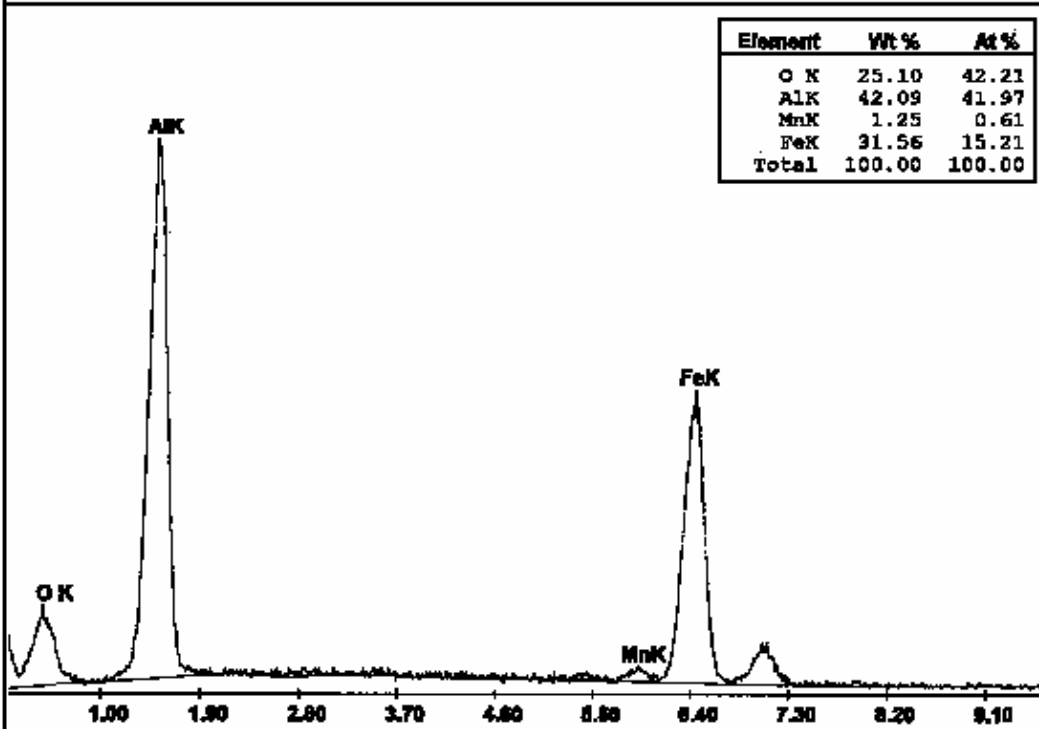
Label: MUESTRA 7 ANALISIS PUNTUAL EN ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	10.69	29.70
MoL	2.43	1.12
FeK	86.89	69.18
Total	100.00	100.00

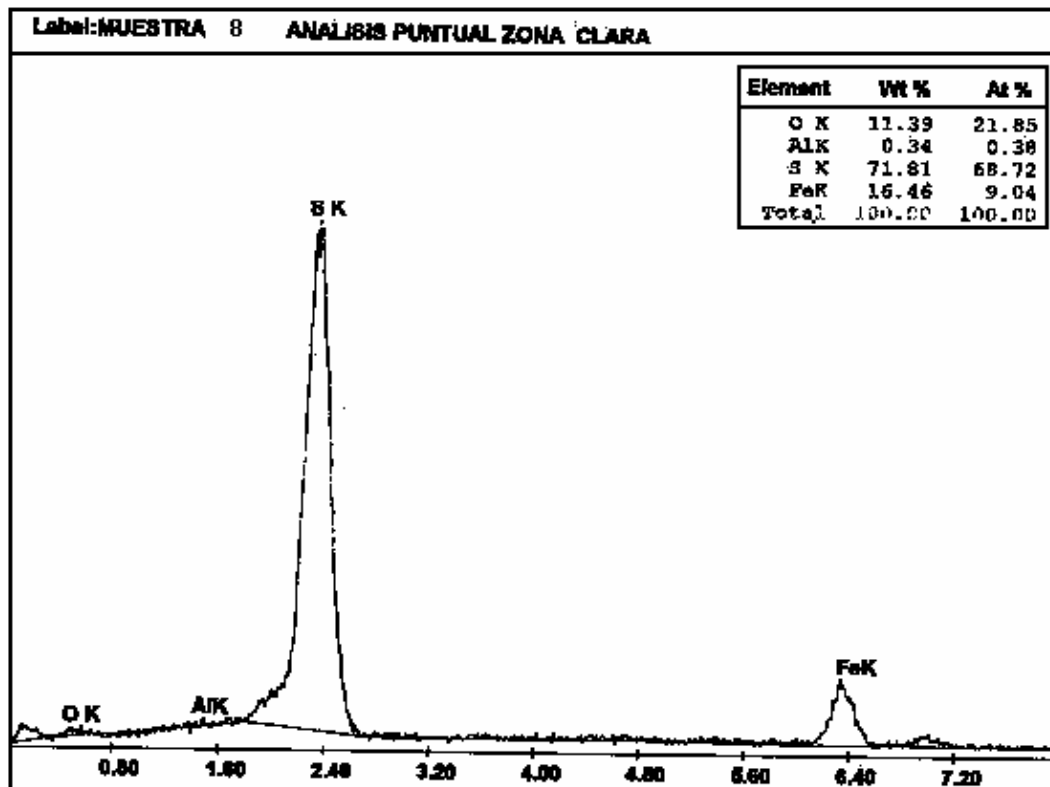
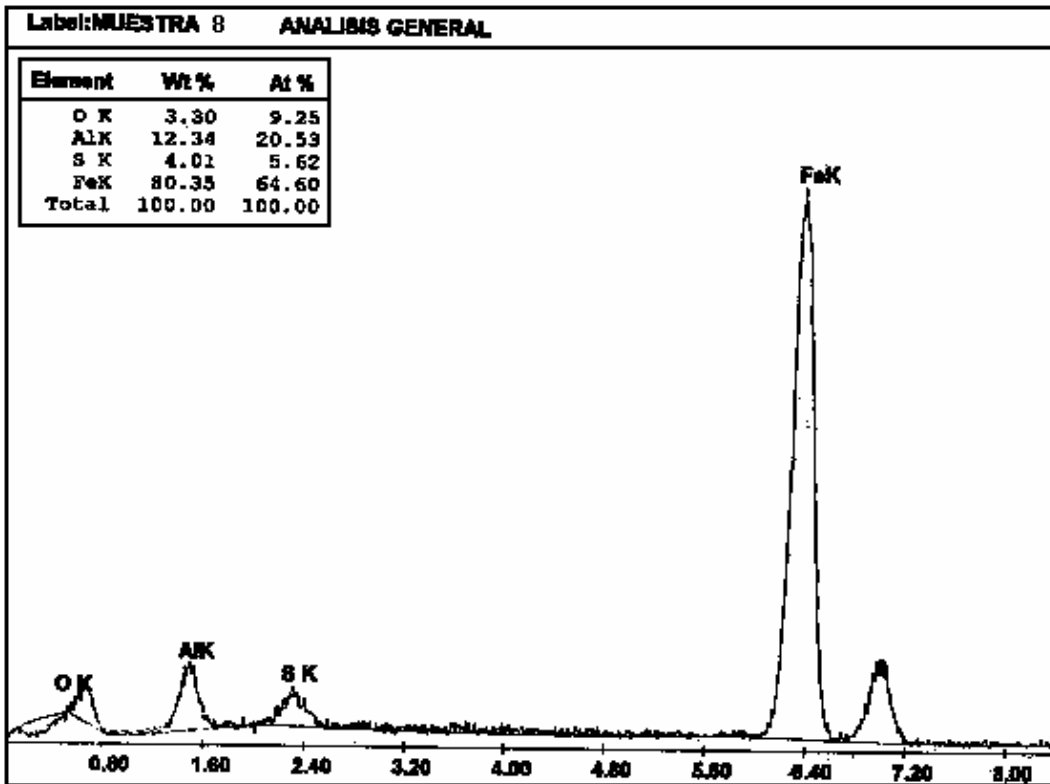


Label: MUESTRA 7 ANALISIS PUNTUAL EN ZONA OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	25.10	42.21
AlK	42.09	41.97
MnK	1.25	0.61
FeK	31.56	15.21
Total	100.00	100.00

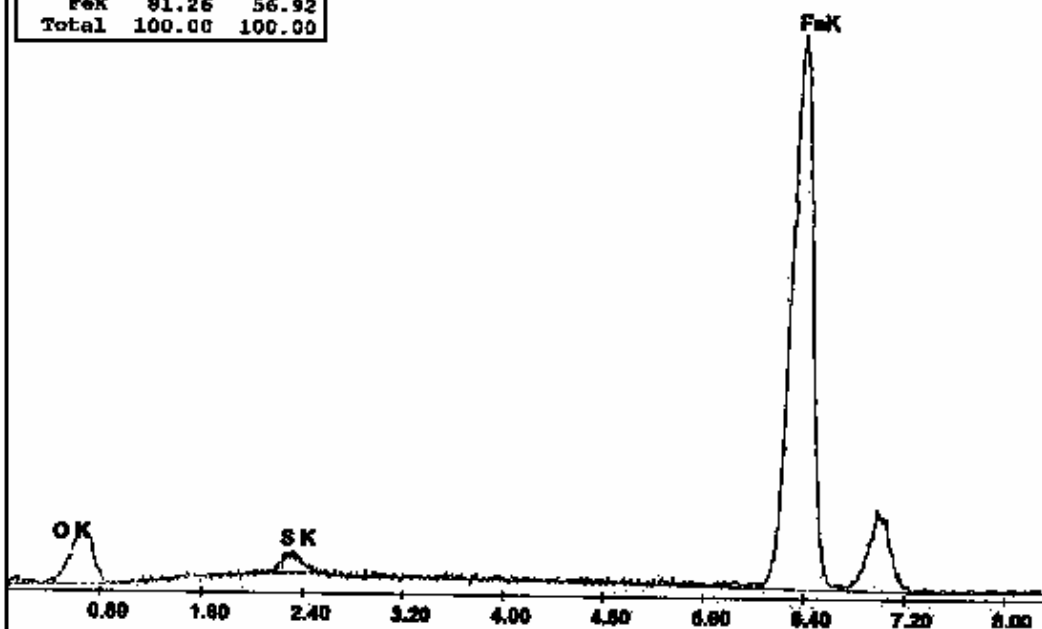


- Condición 8:



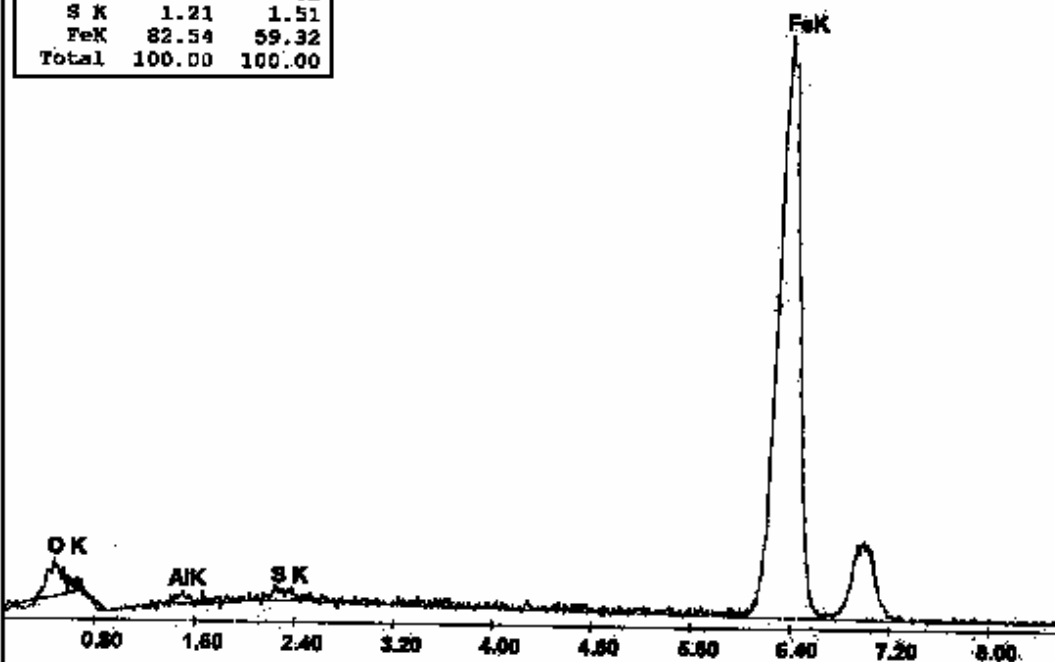
Label: MUESTRA 8 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

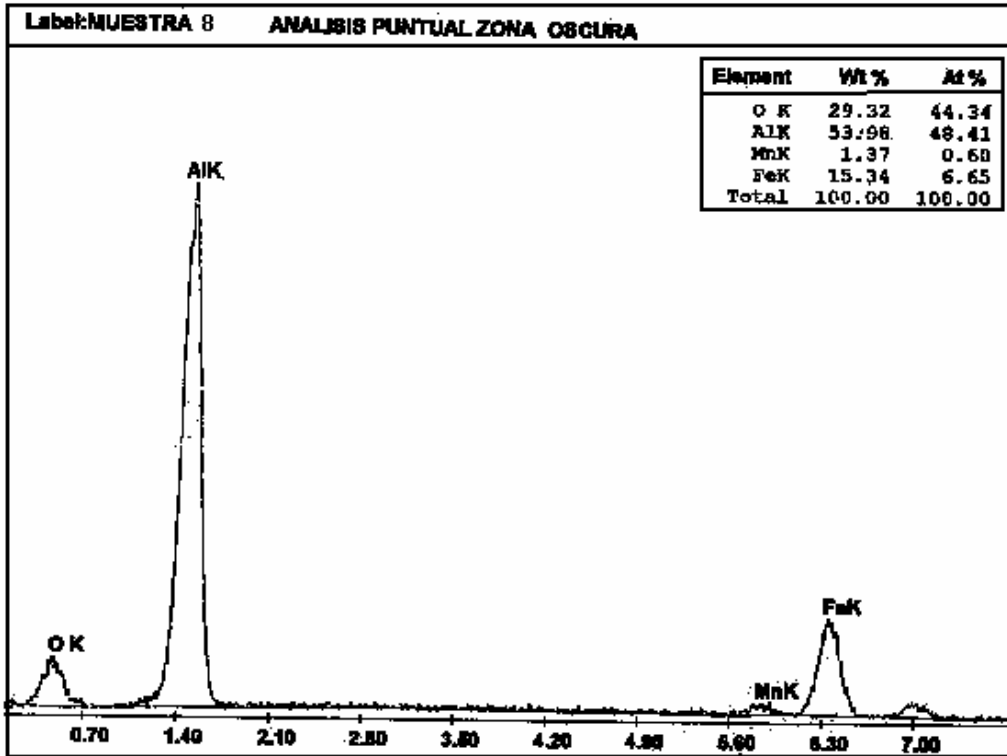
Element	WT %	At %
O K	16.49	40.33
S K	2.25	2.75
FeK	81.26	56.92
Total	100.00	100.00



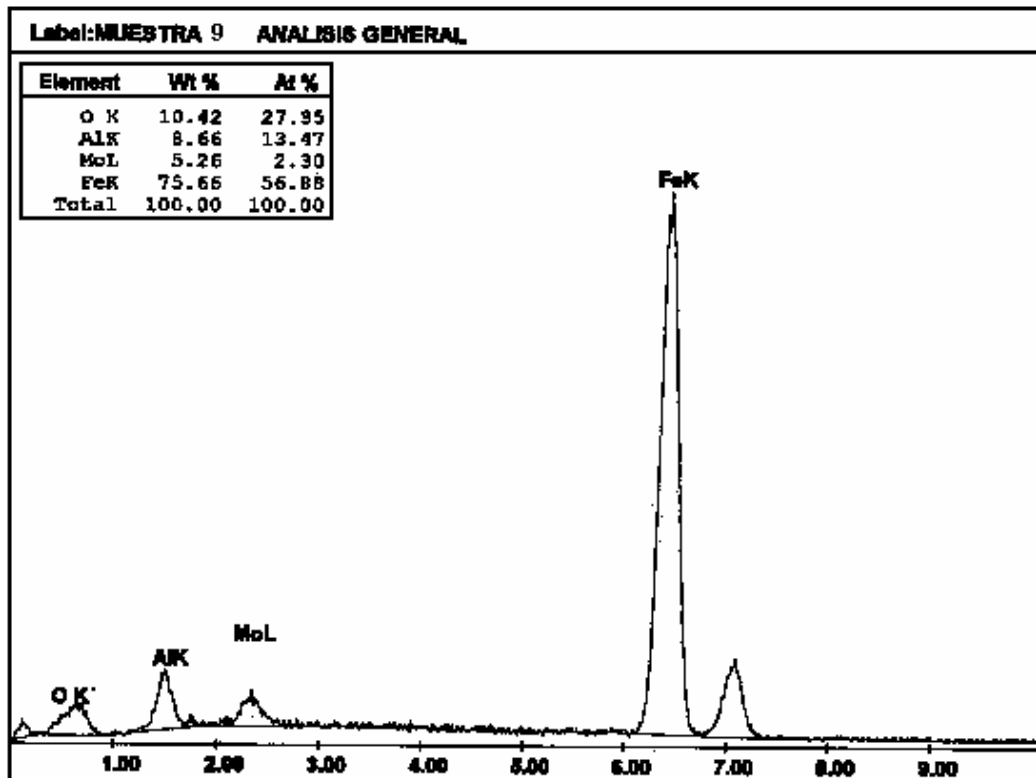
Label: MUESTRA 8 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	WT %	At %
O K	14.69	36.84
AlK	1.56	2.32
S K	1.21	1.51
FeK	82.54	59.32
Total	100.00	100.00





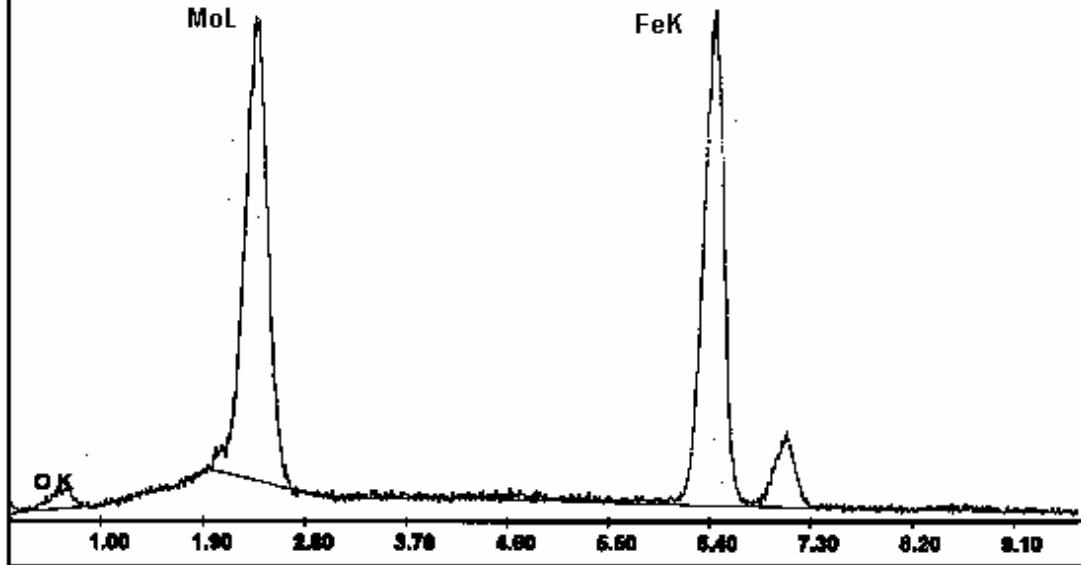
- Condición 9:





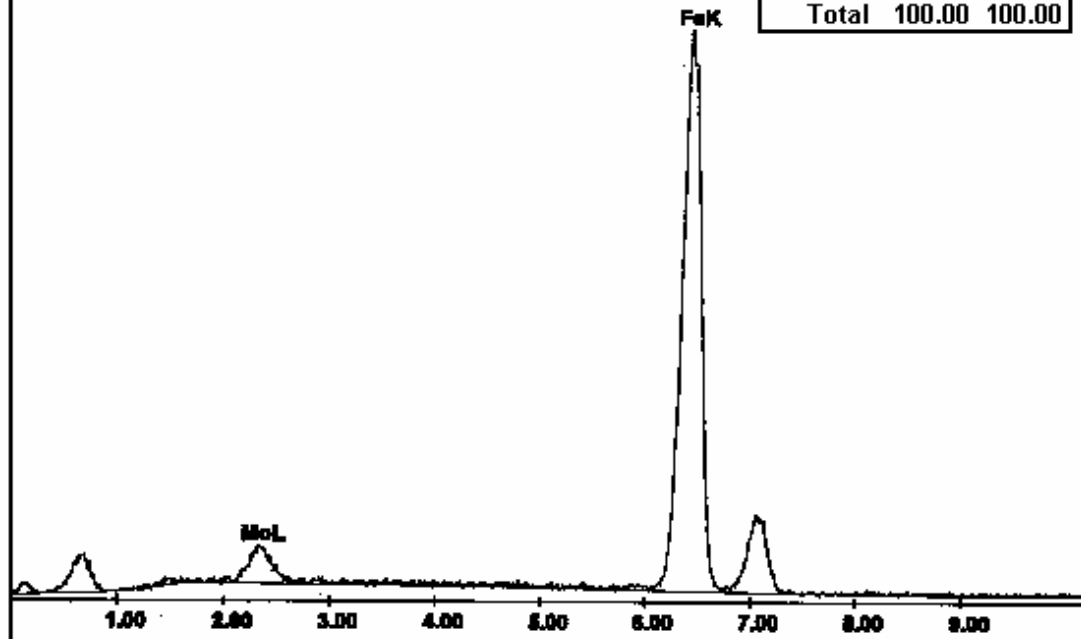
Label: MUESTRA 9 ANALISIS PUNTUAL ZONA CLARA

Element	Wt%	At%
OK	6.98	24.85
MoL	46.30	27.49
FeK	46.73	47.66
Total	100.00	100.00



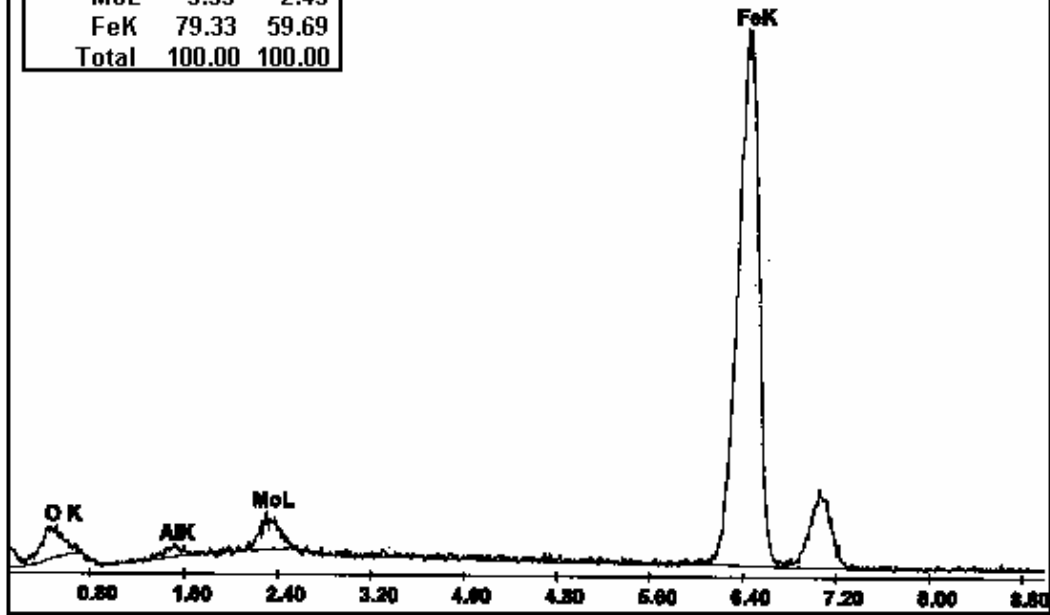
Label: MUESTRA 9 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

Element	Wt%	At%
MoL	7.89	4.71
FeK	92.17	95.29
Total	100.00	100.00



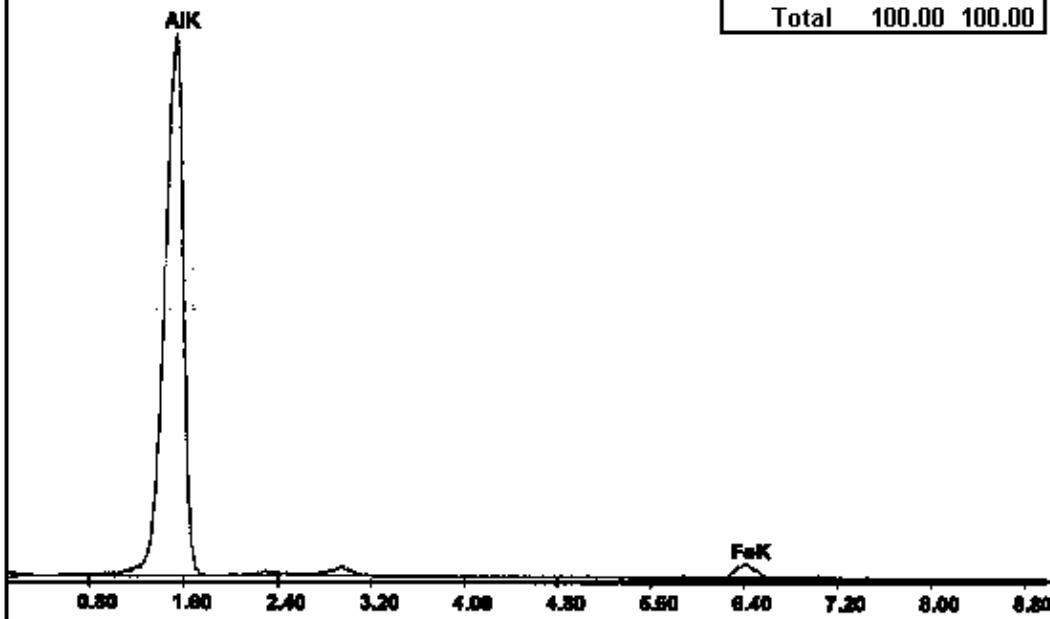
Label:MUESTRA 9 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt%	At%
OK	13.40	35.20
AlK	1.72	2.68
MoL	5.55	2.43
FeK	79.33	59.69
Total	100.00	100.00

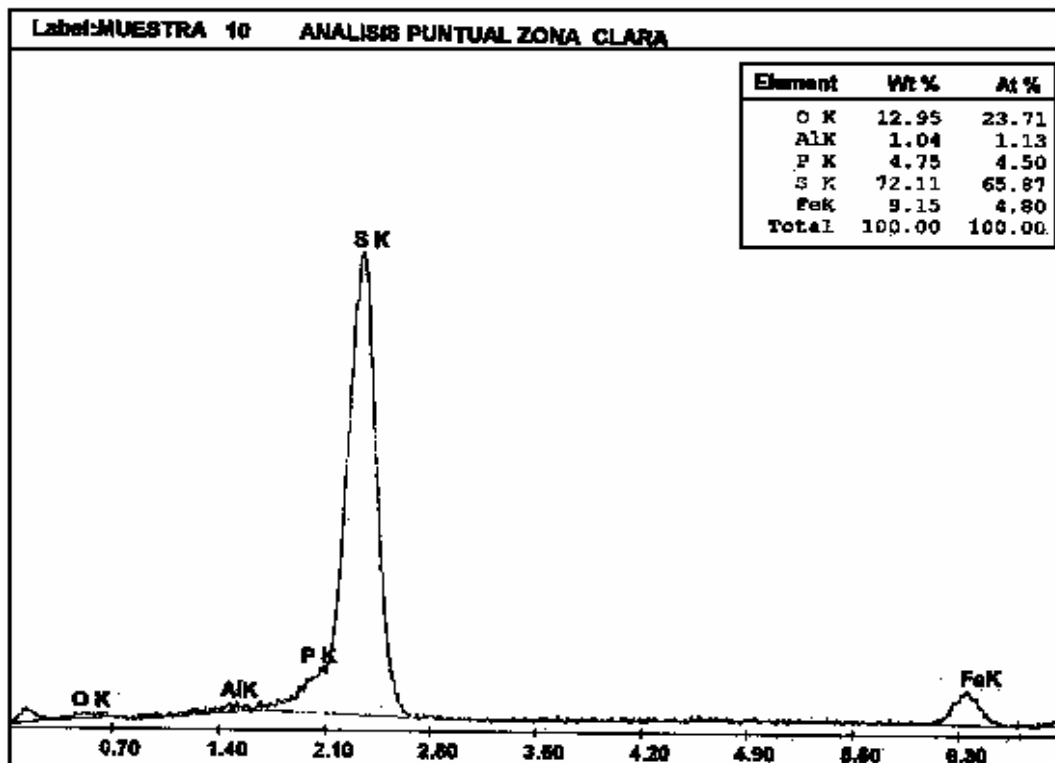
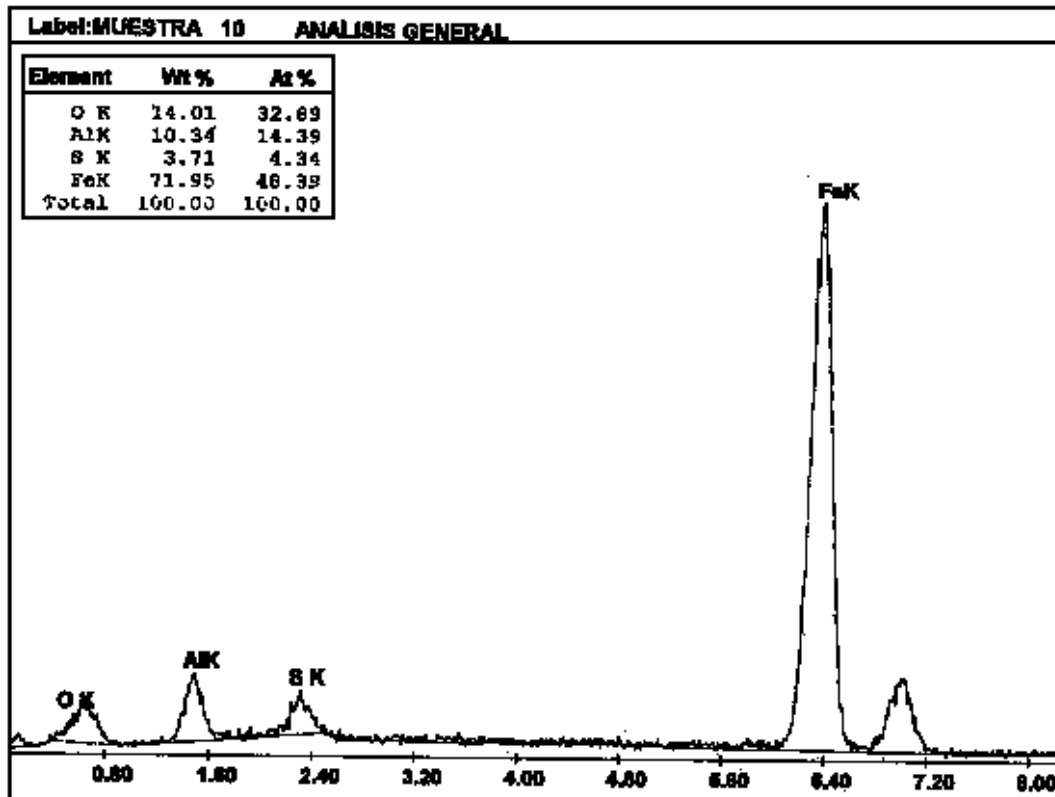


Label:MUESTRA 9 ANALISIS PUNTUAL ZONA OSCURA

Element	Wt%	At%
Alk	93.44	96.72
FeK	6.56	3.28
Total	100.00	100.00

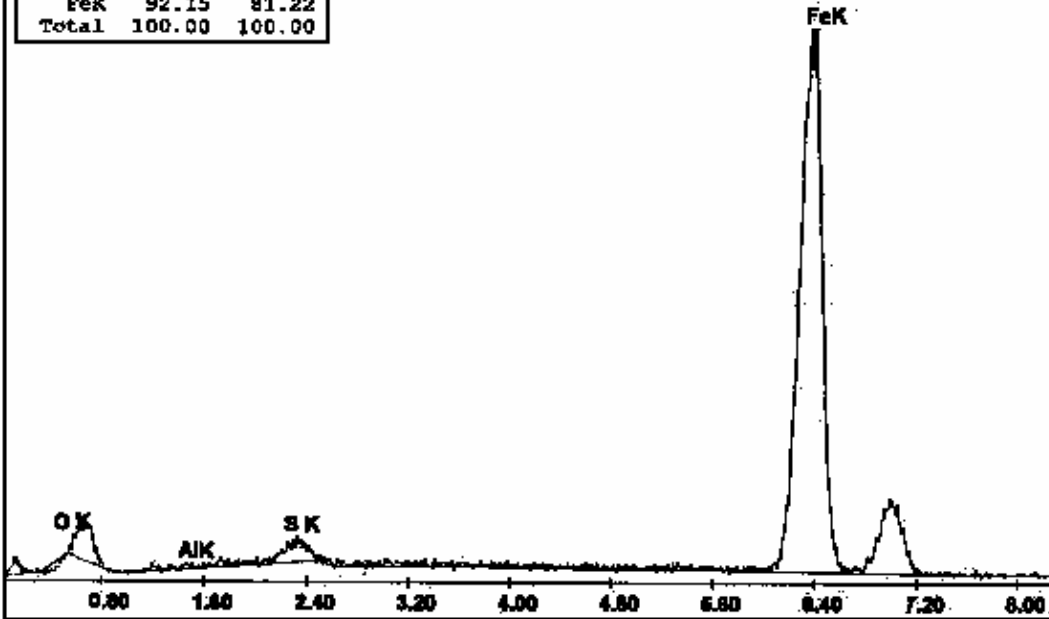


- Condición 10:



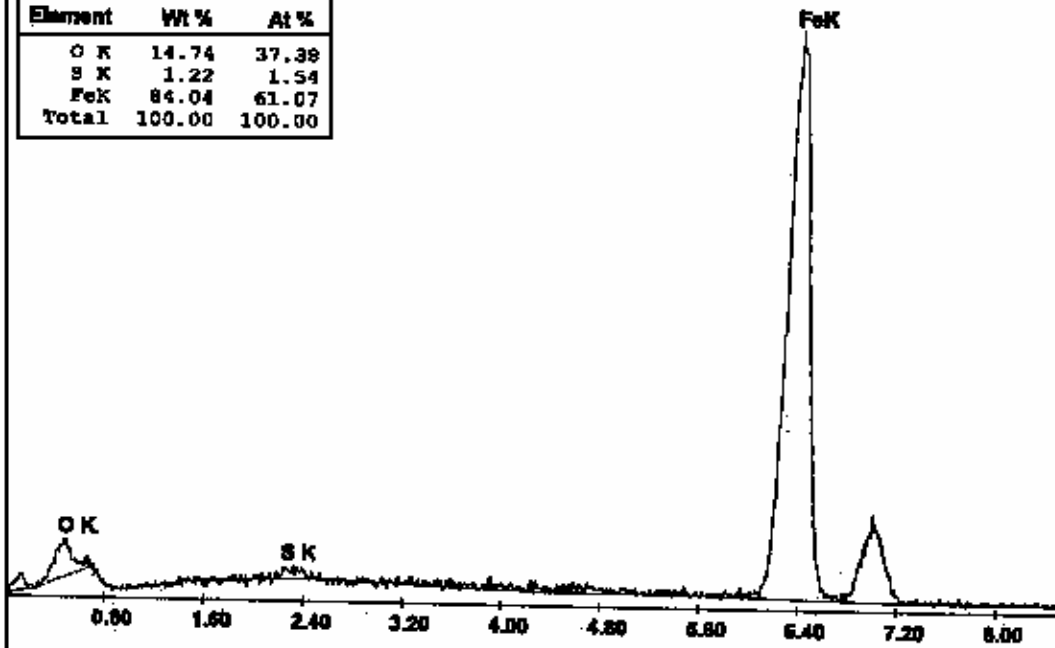
Label: MUESTRA 10 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

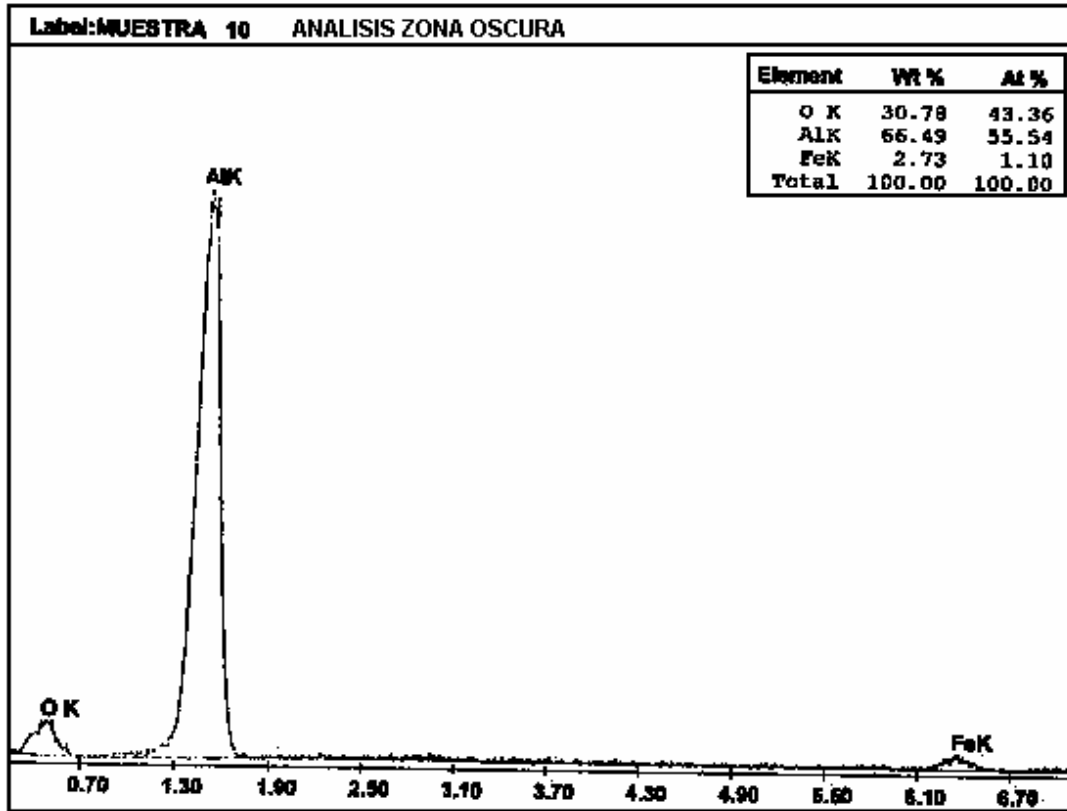
Element	Wt %	At %
O K	4.24	13.05
AlK	0.68	1.25
S K	2.92	4.48
FeK	92.15	81.22
Total	100.00	100.00



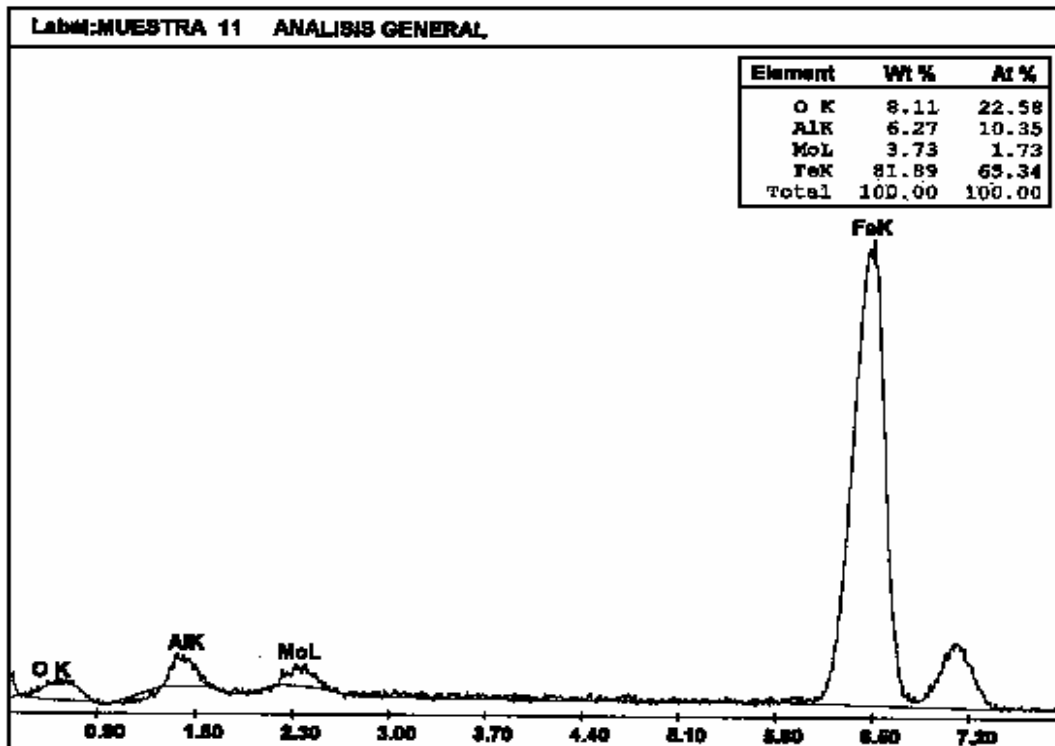
Label: MUESTRA 10 ANALISIS ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	14.74	37.38
S K	1.22	1.54
FeK	84.04	61.07
Total	100.00	100.00



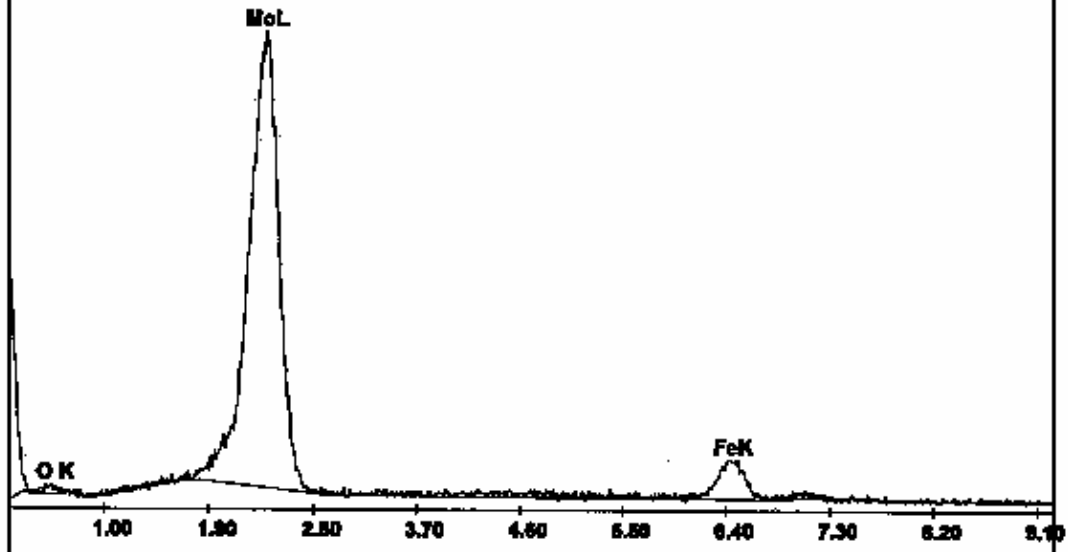


- Condición 11:



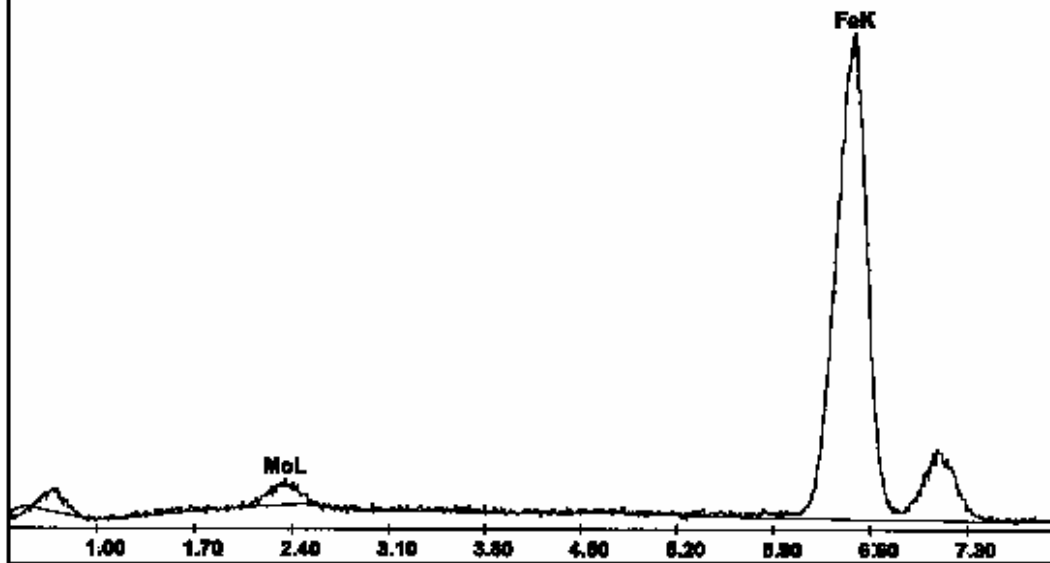
Label:MUESTRA 11 ANALISIS PUNTUAL ZONA CLARA

Element	Wt %	At %
O K	12.82	45.27
MoL	79.15	46.61
FeK	8.02	8.12
Total	100.00	100.00



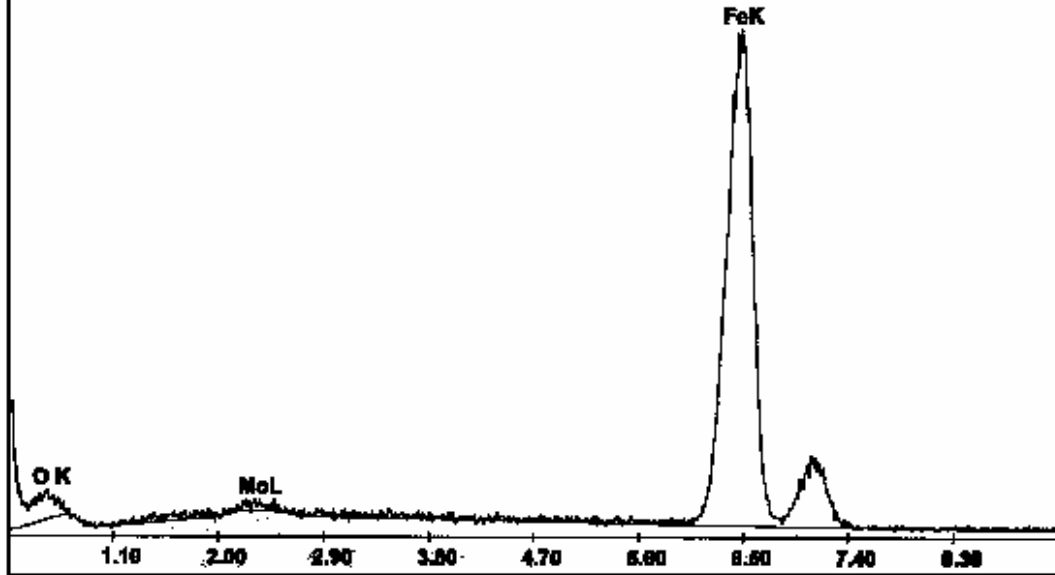
Label:MUESTRA 11 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

Element	Wt %	At %
MoL	5.39	3.21
FeK	94.61	96.79
Total	100.00	100.00



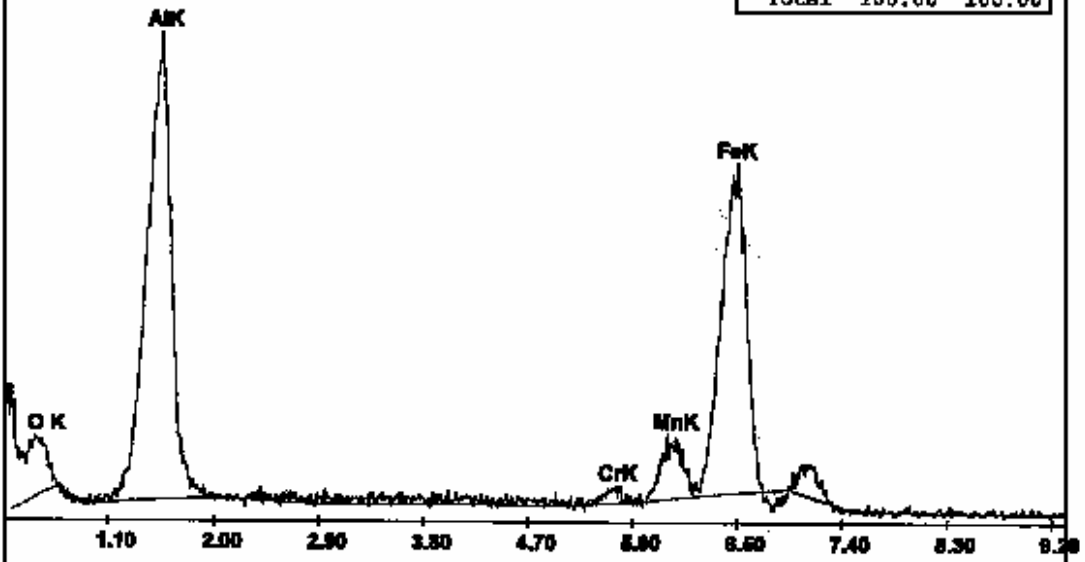
Label: MUESTRA 11 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	13.03	34.50
MoL	1.52	0.67
FeK	85.45	64.83
Total	100.00	100.00

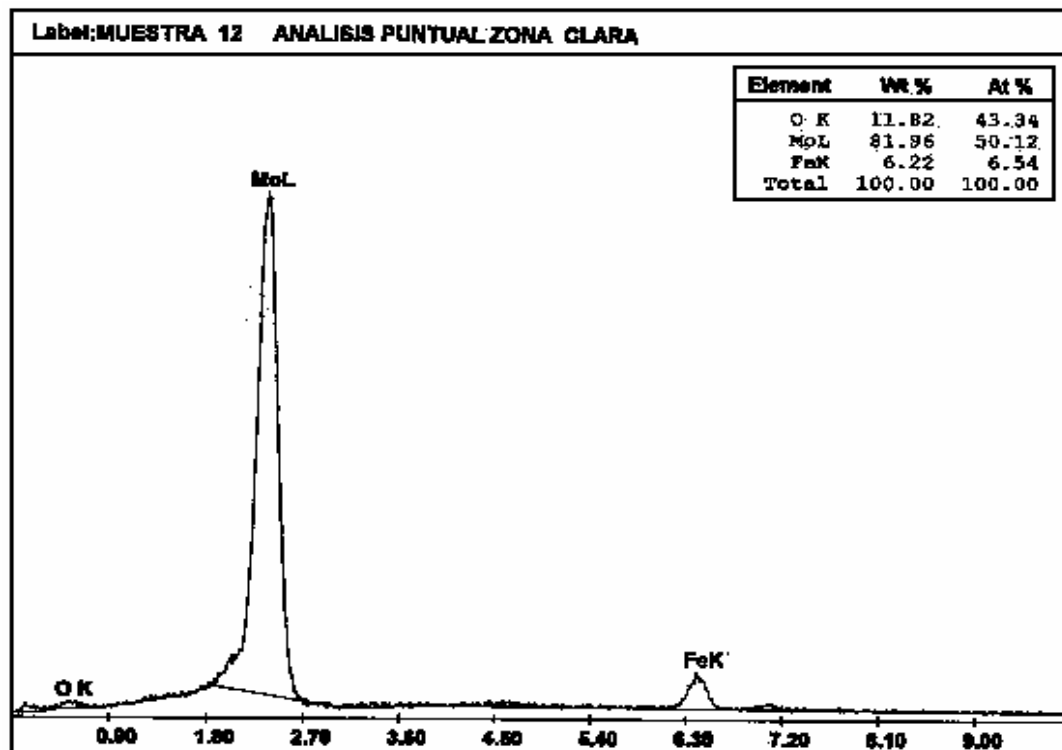
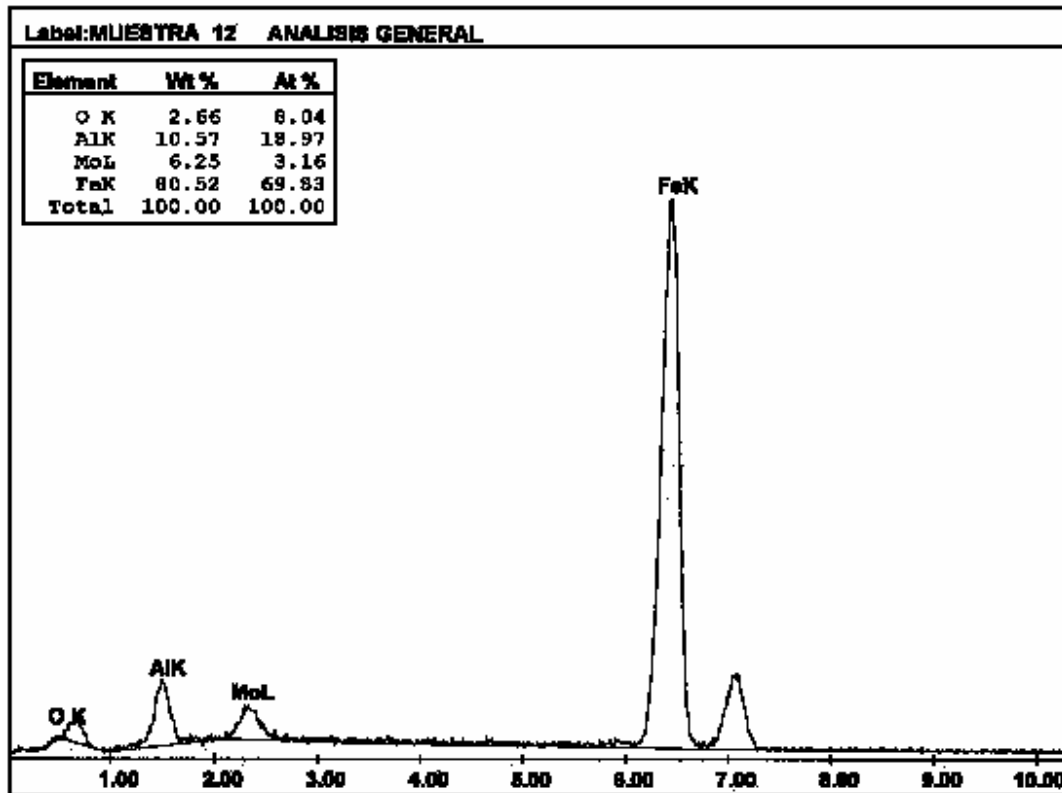


Label: MUESTRA 11 ANALISIS PUNTUAL ZONA OSCURA

Element	Wt %	At %
O K	20.30	36.94
AlK	38.46	41.48
CrK	1.00	0.56
MnK	5.64	2.99
FeK	34.60	18.03
Total	100.00	100.00

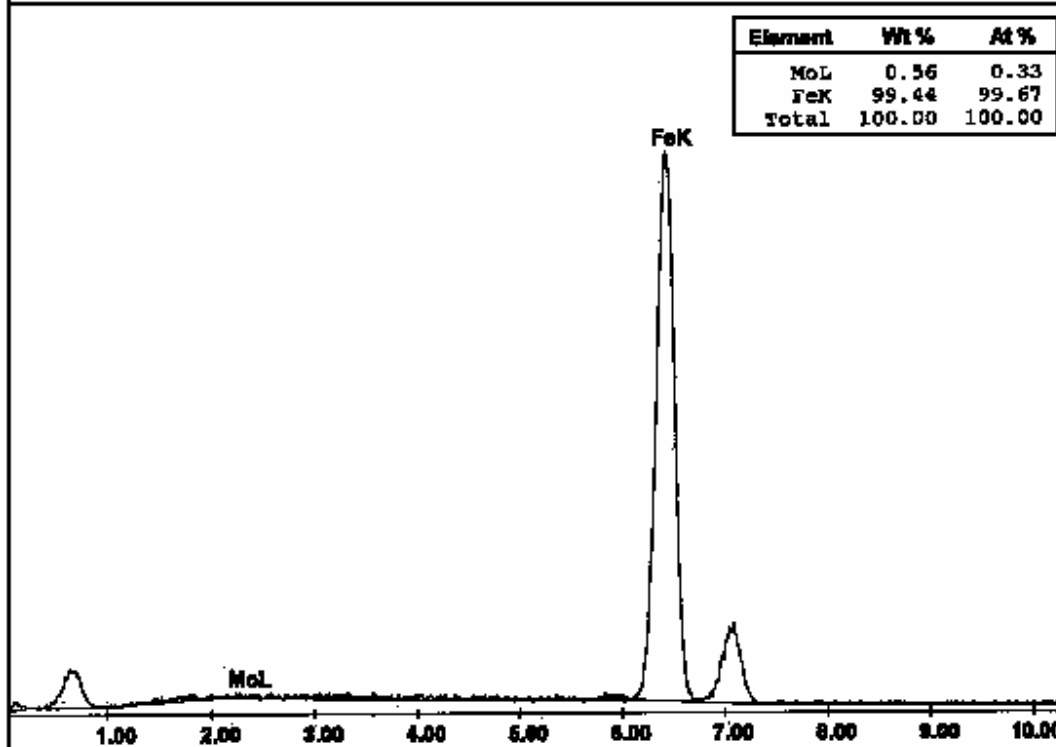


- Condición 12:

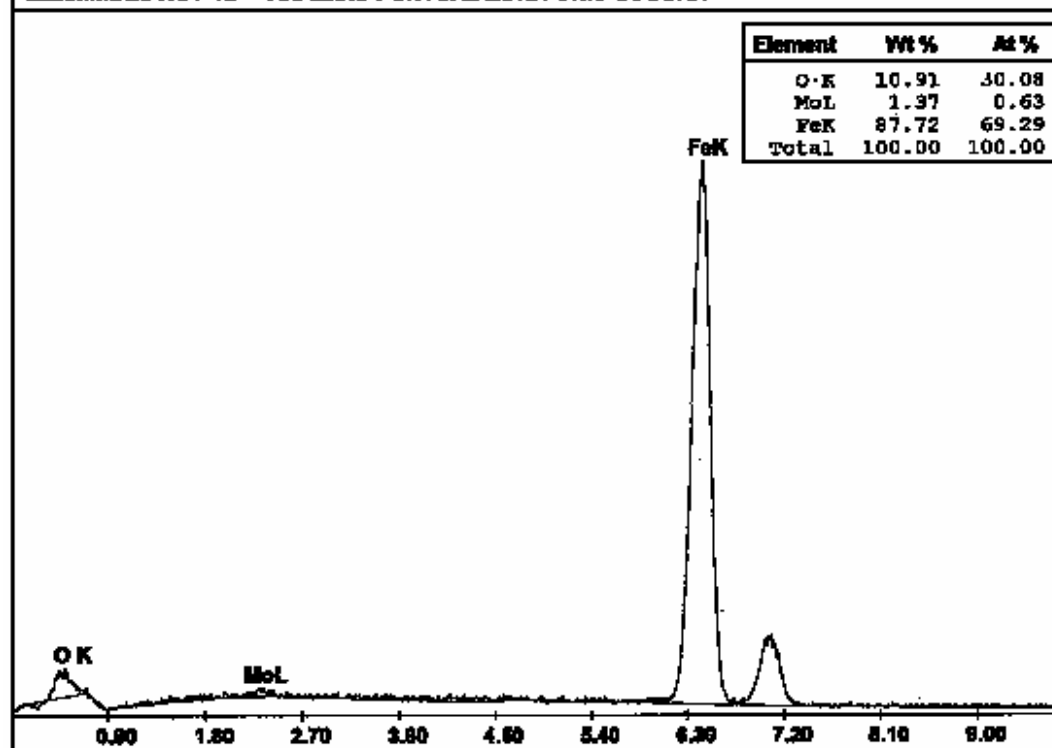


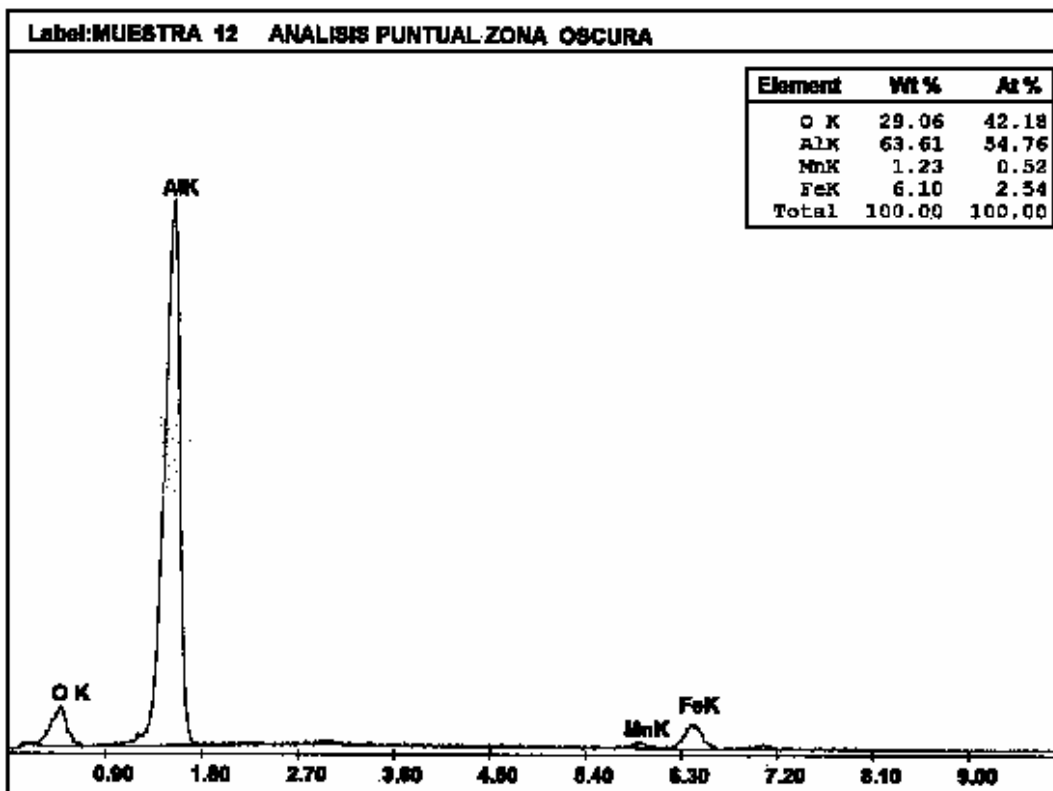


Label:MUESTRA 12 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

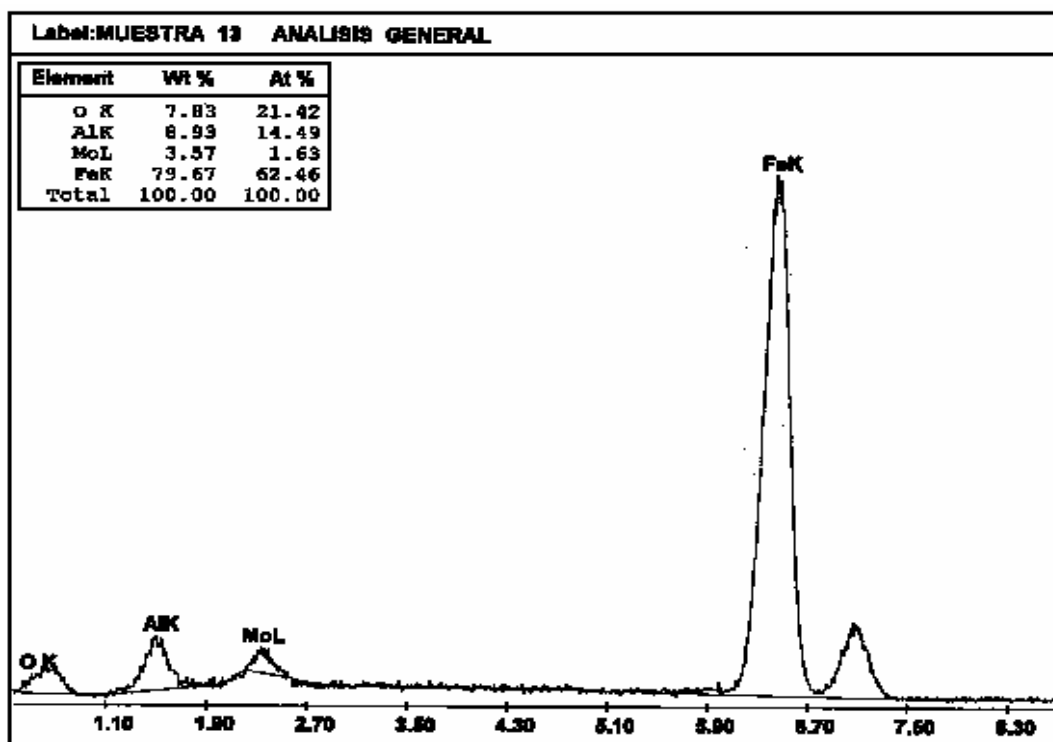


Label:MUESTRA 12 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA



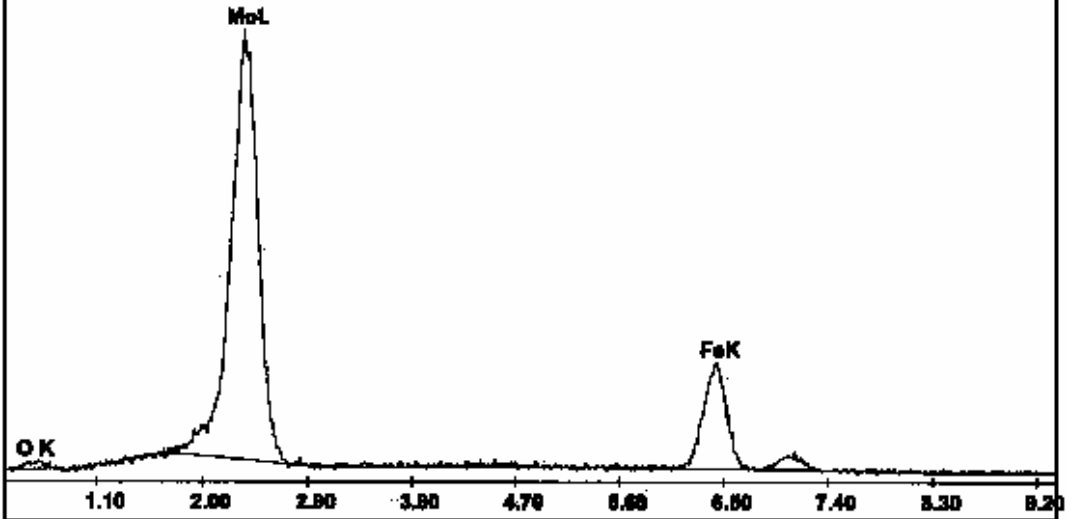


- Condición 13:



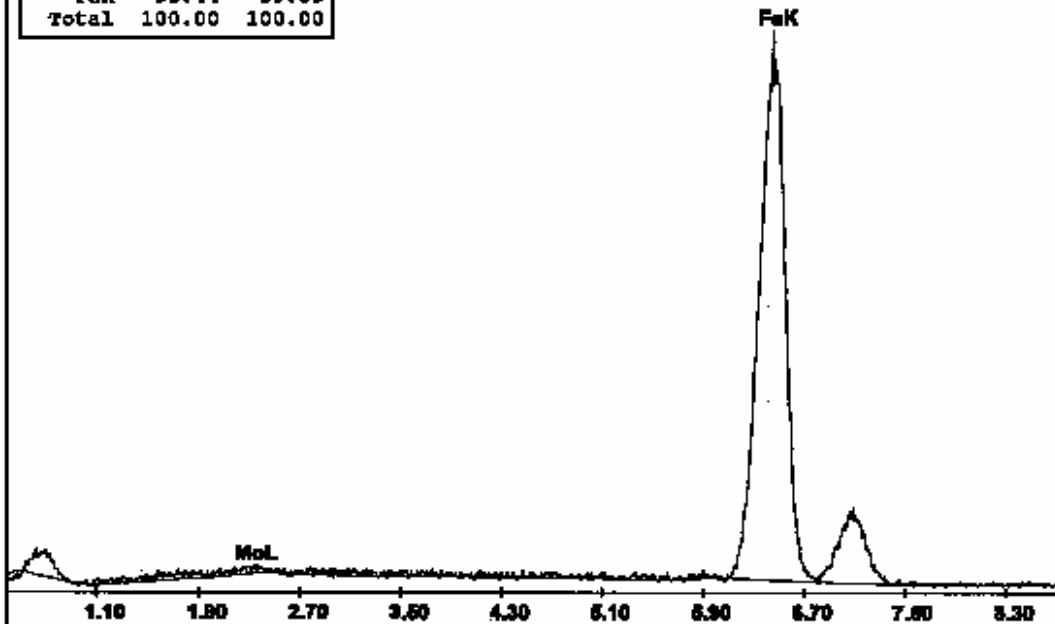
Label: MUESTRA 13 ANALISIS PUNTUAL ZONA CLARA

Element	WT%	At%
O K	10.08	36.83
MoL	70.69	43.06
FeK	19.22	20.11
Total	100.00	100.00



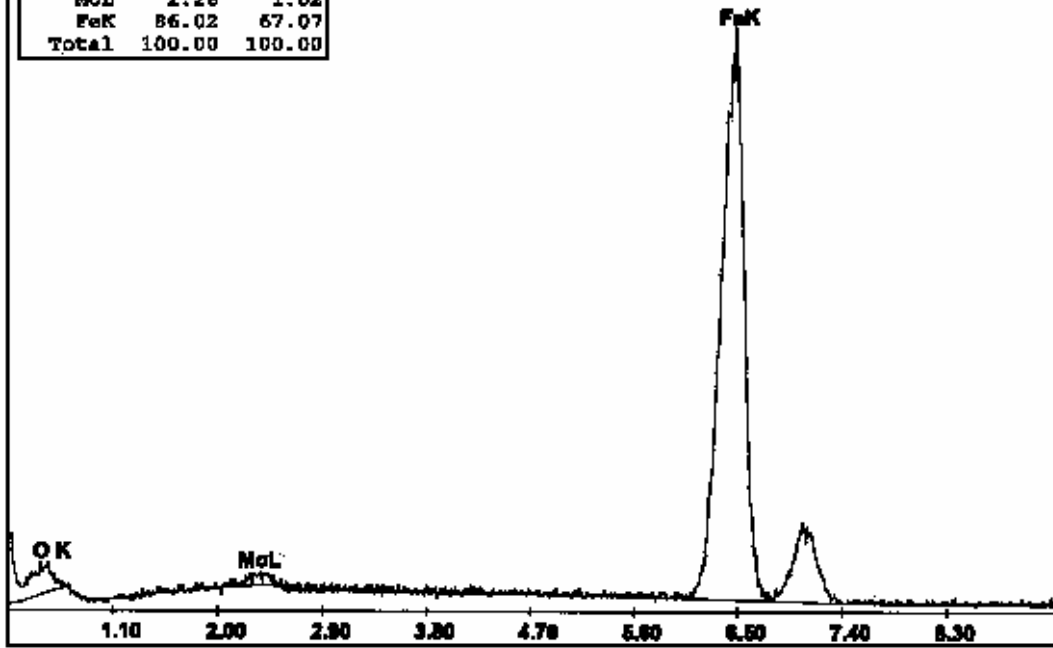
Label: MUESTRA 13 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

Element	WT%	At%
MoL	1.56	0.91
FeK	98.44	99.09
Total	100.00	100.00



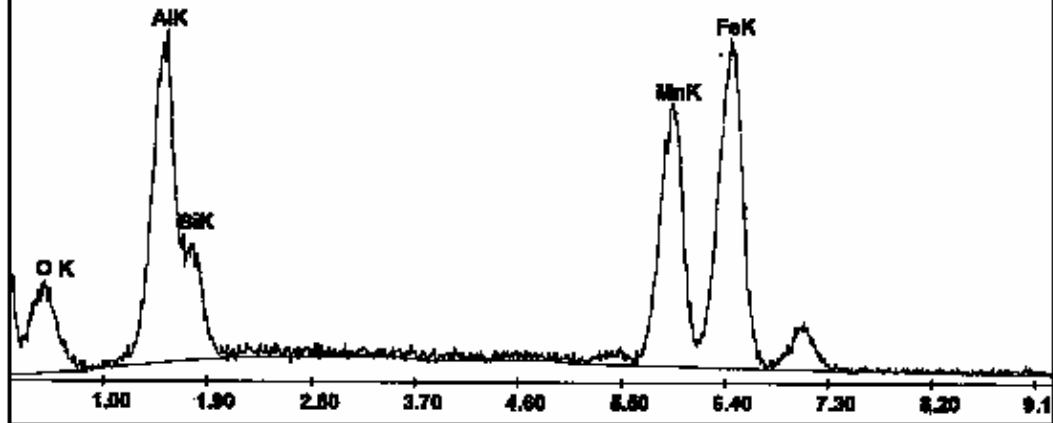
Label: MUESTRA 13 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

Element	WT %	At %
O K	11.72	31.90
MoL	2.26	1.02
FeK	86.02	67.07
Total	100.00	100.00

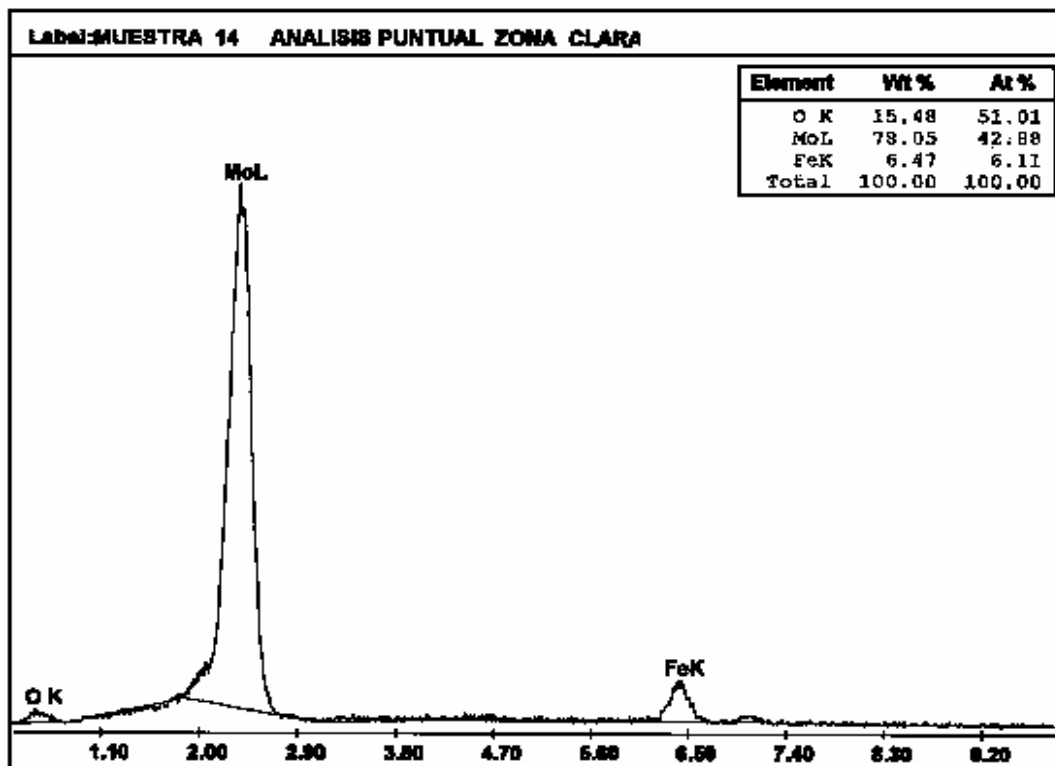
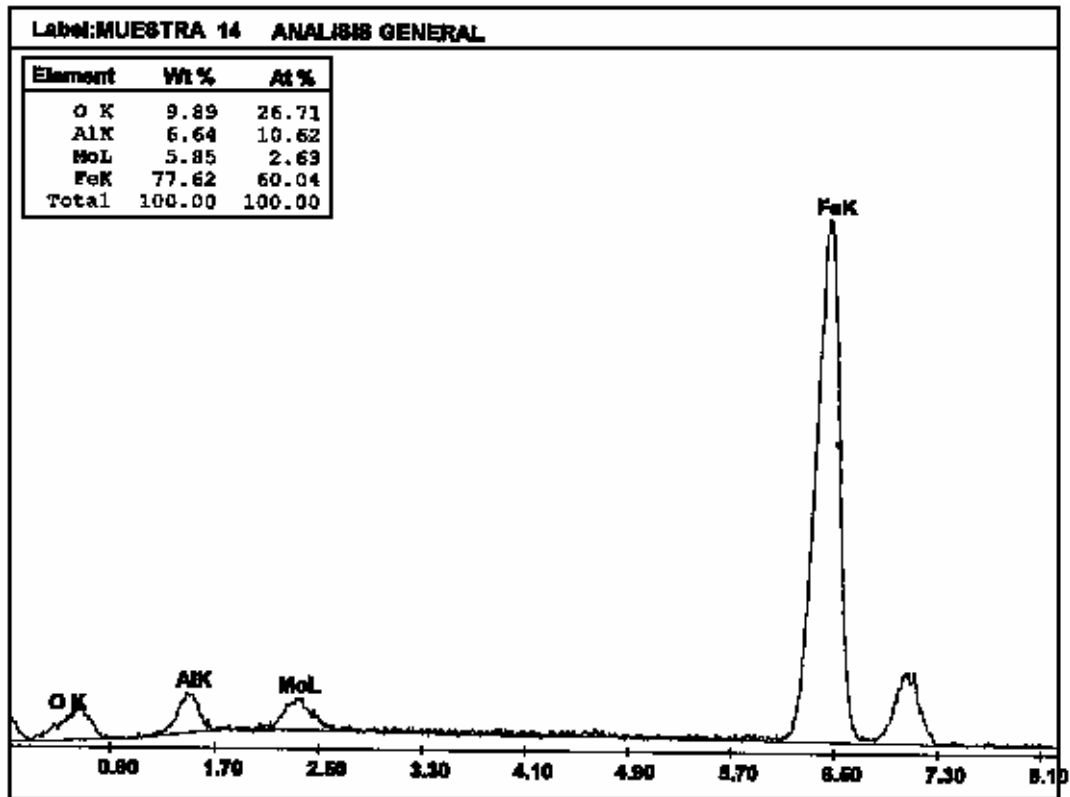


Label: MUESTRA 13 ANALISIS PUNTUAL ZONA OSCURA

Element	WT %	At %
O K	22.59	41.64
AlK	22.86	24.98
SiK	8.44	8.86
MnK	20.48	10.99
FeK	25.62	13.53
Total	100.00	100.00

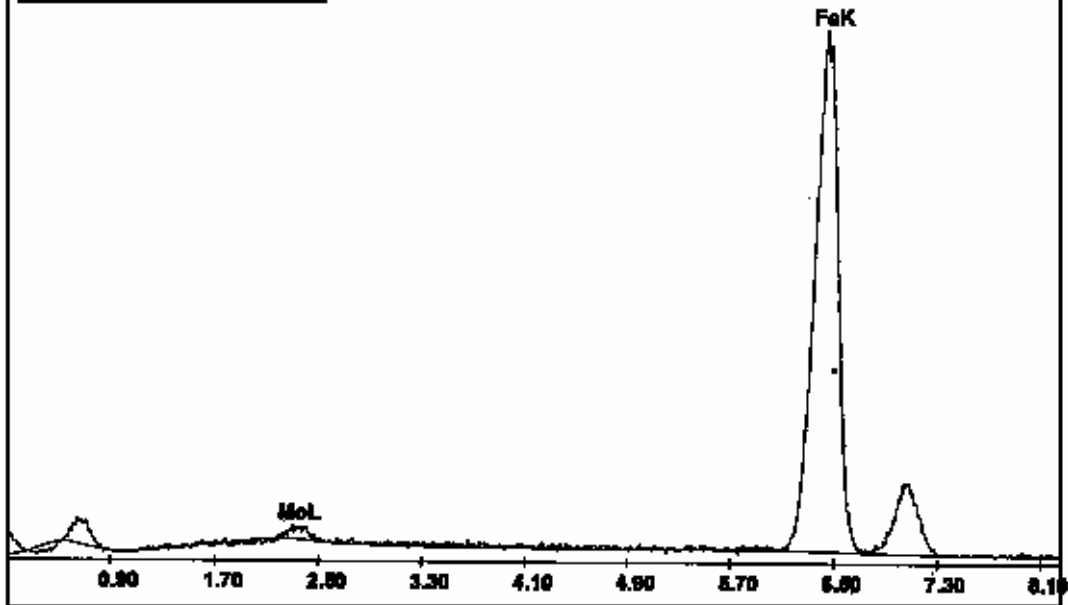


- Condición 14:



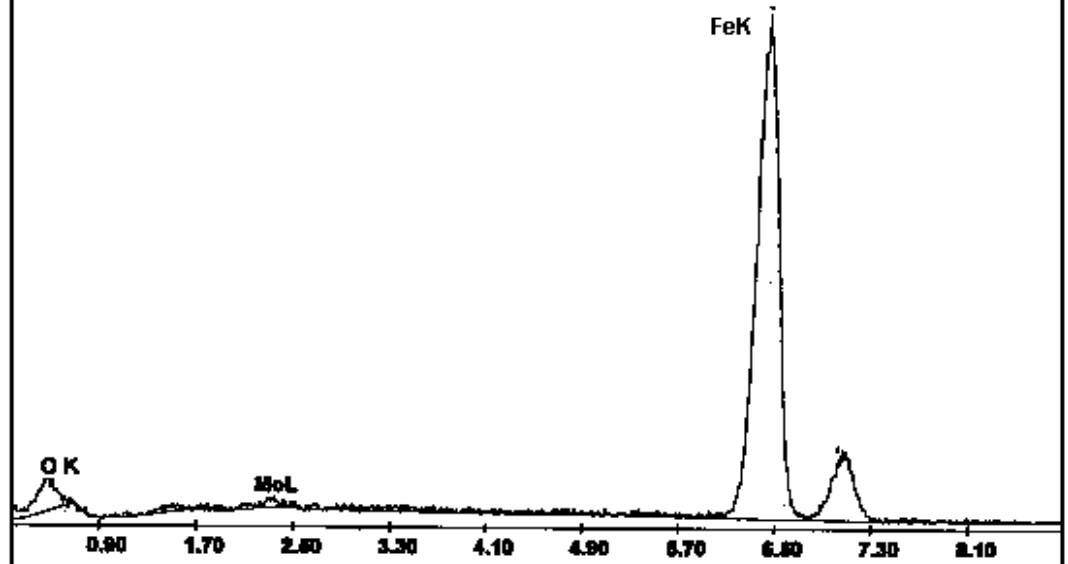
Label: MUESTRA 14 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS CLARA

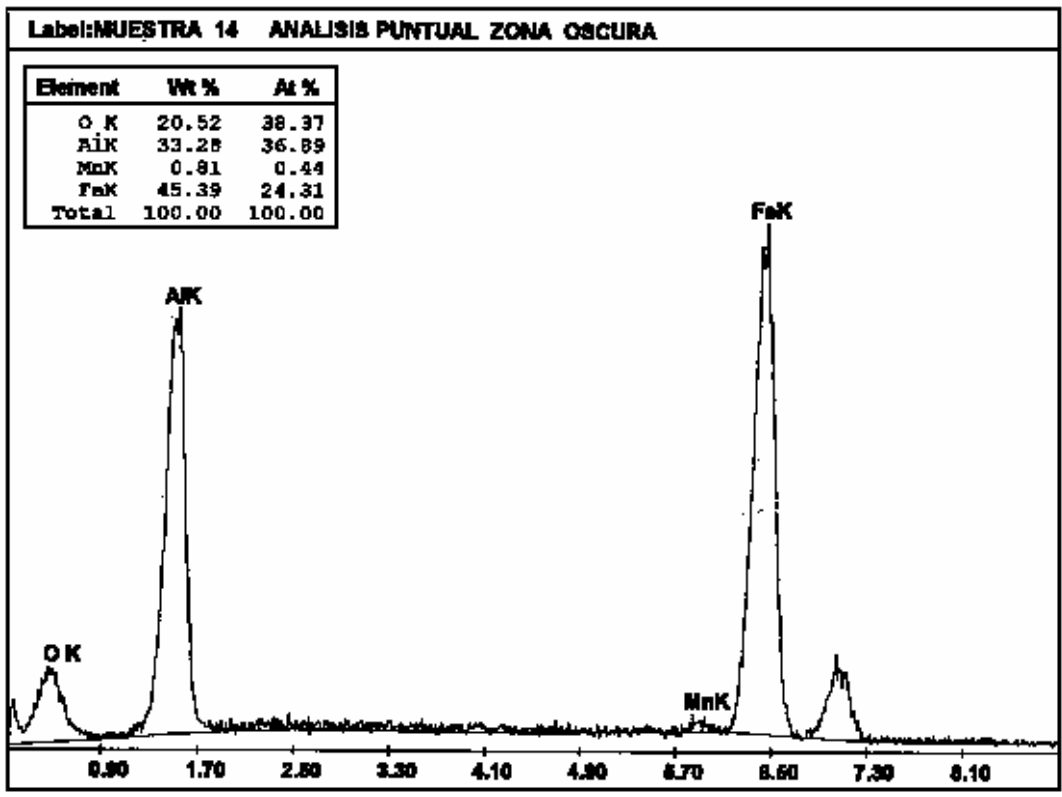
Element	Wt %	At %
MoL	2.51	1.48
FeK	97.49	98.52
Total	100.00	100.00



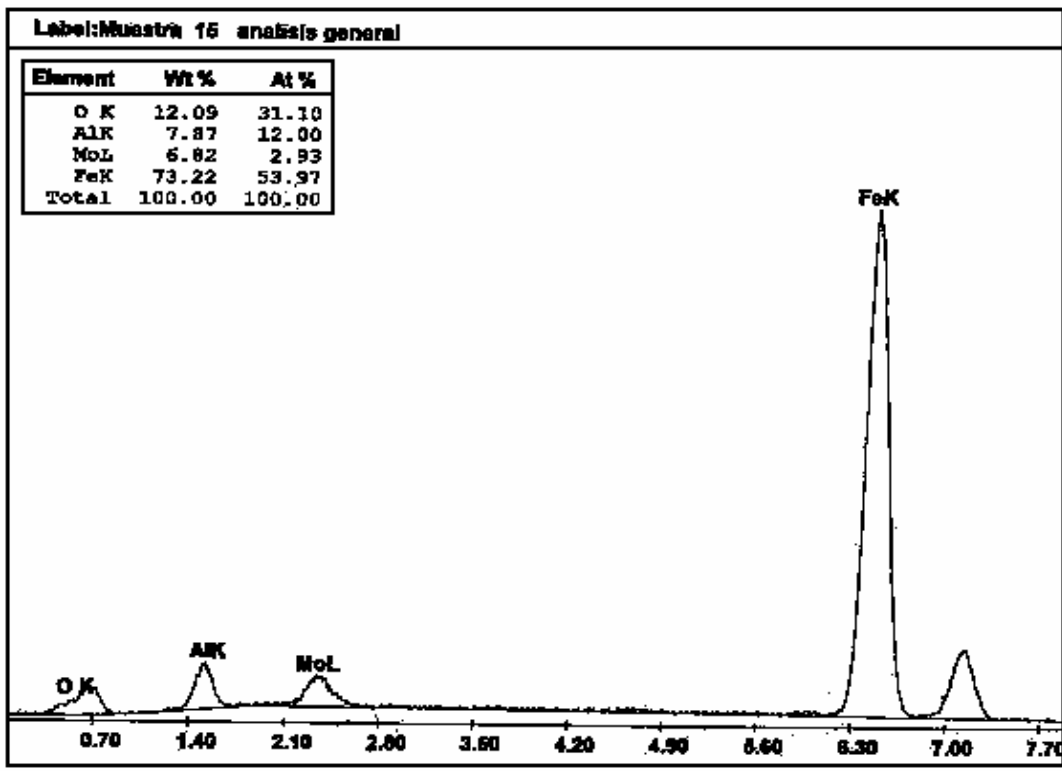
Label: MUESTRA 14 ANALISIS PUNTUAL ZONA GRIS OSCURA

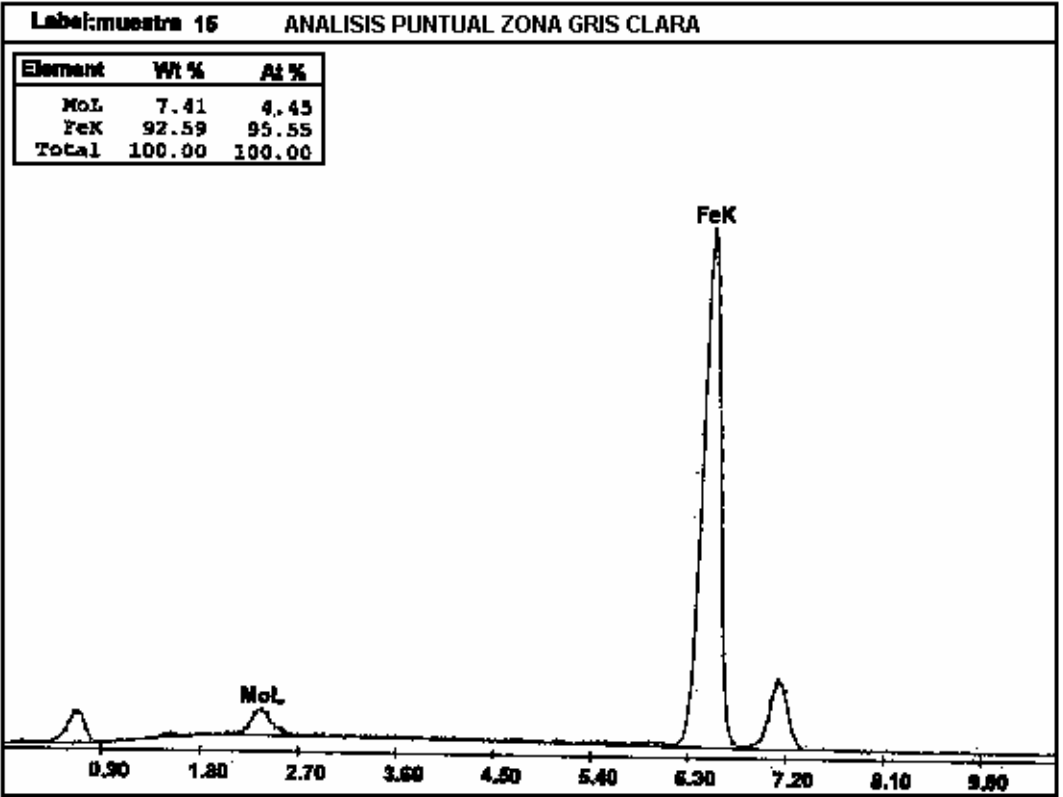
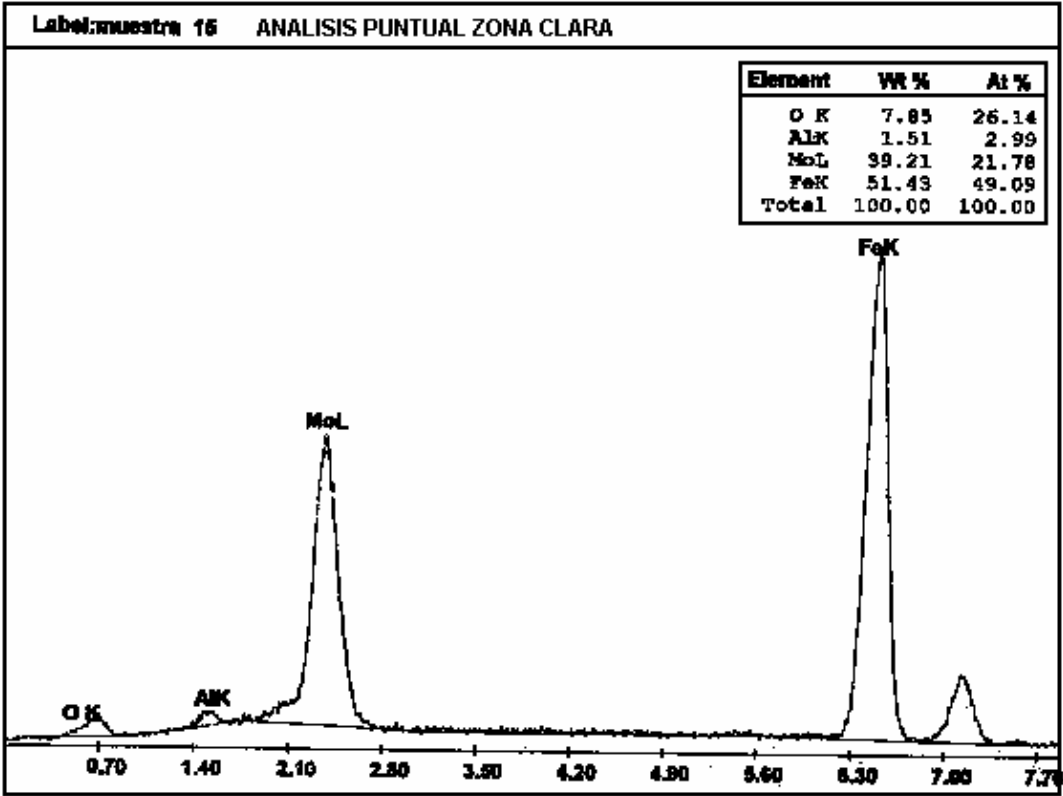
Element	Wt %	At %
O K	12.91	34.26
MoL	1.51	0.67
FeK	85.58	65.07
Total	100.00	100.00



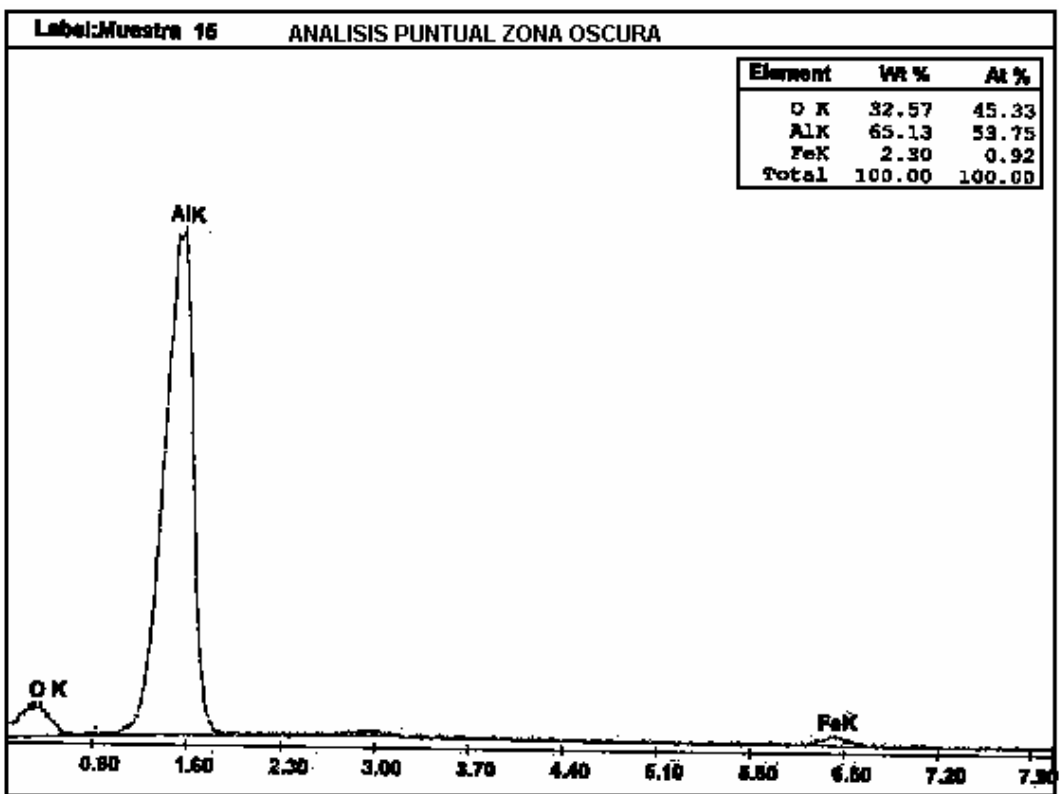
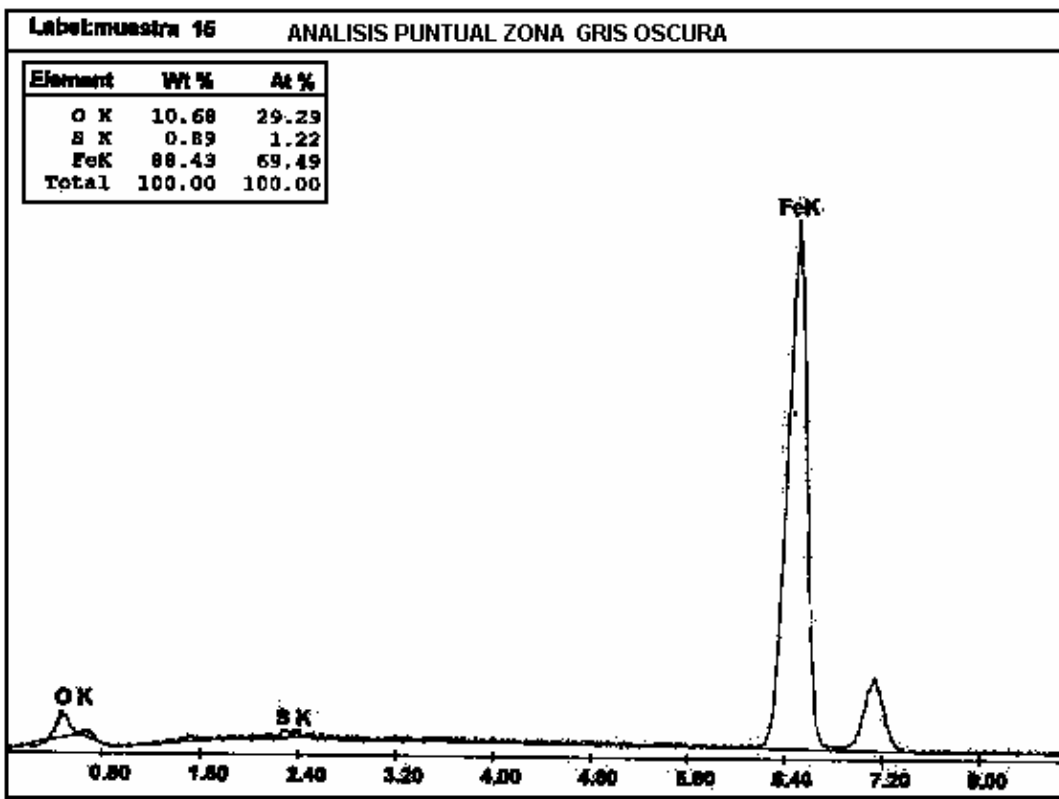


- Condición 15:

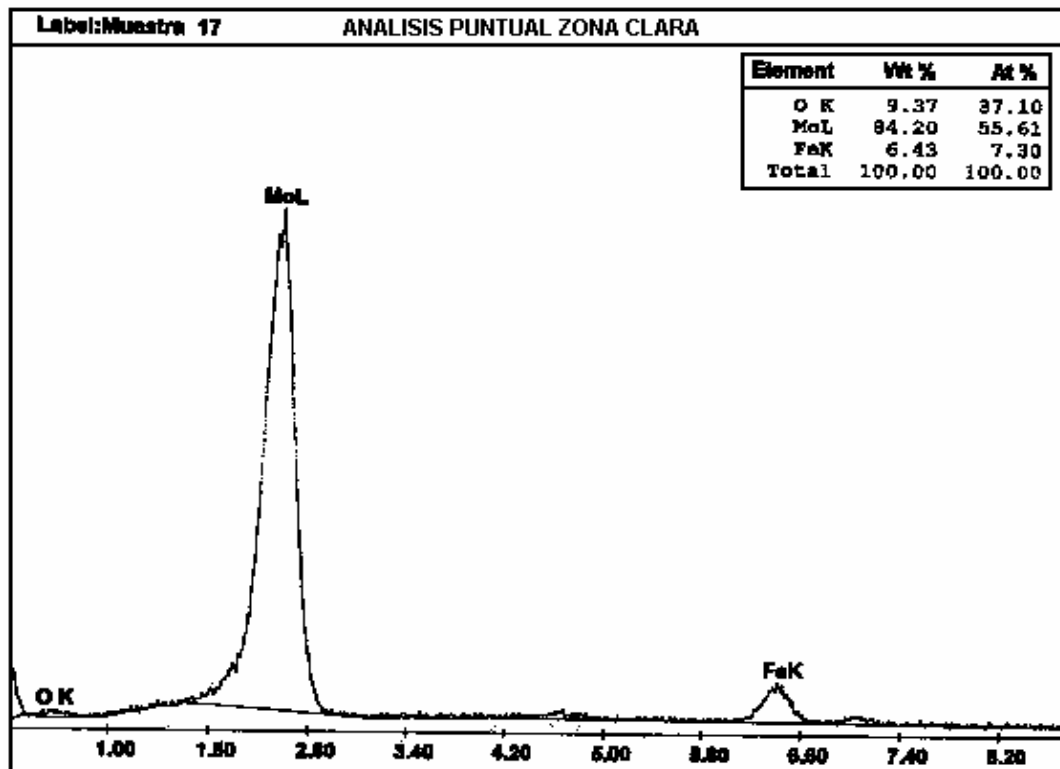
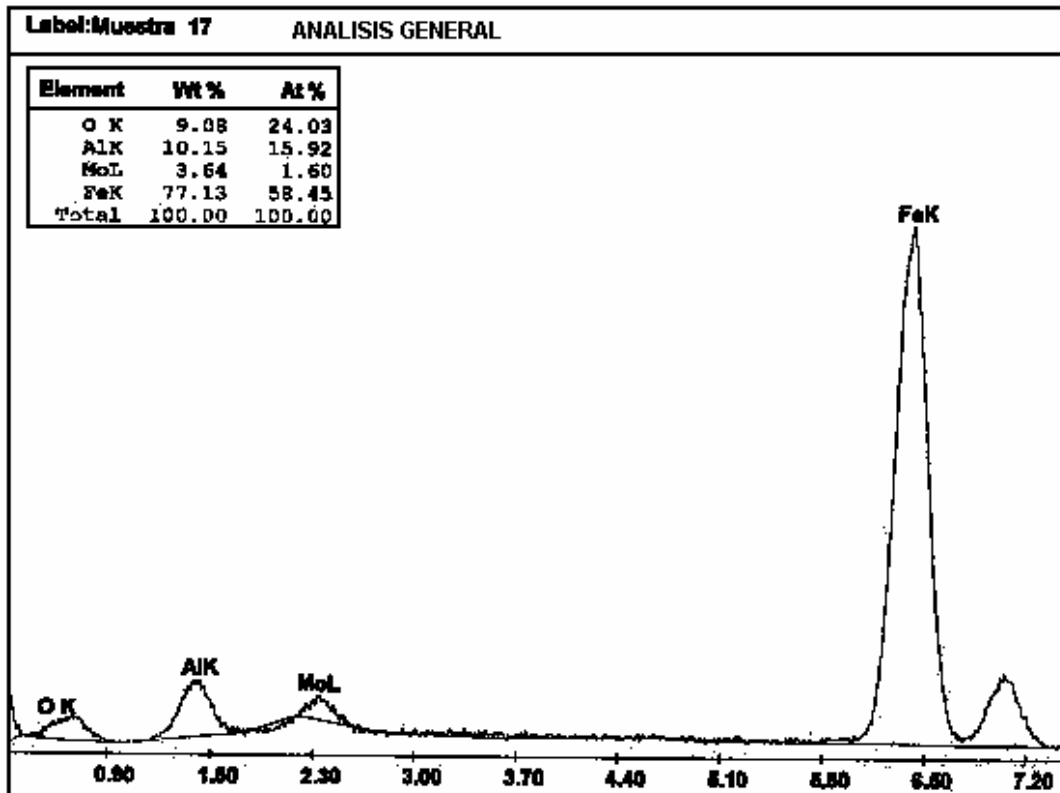


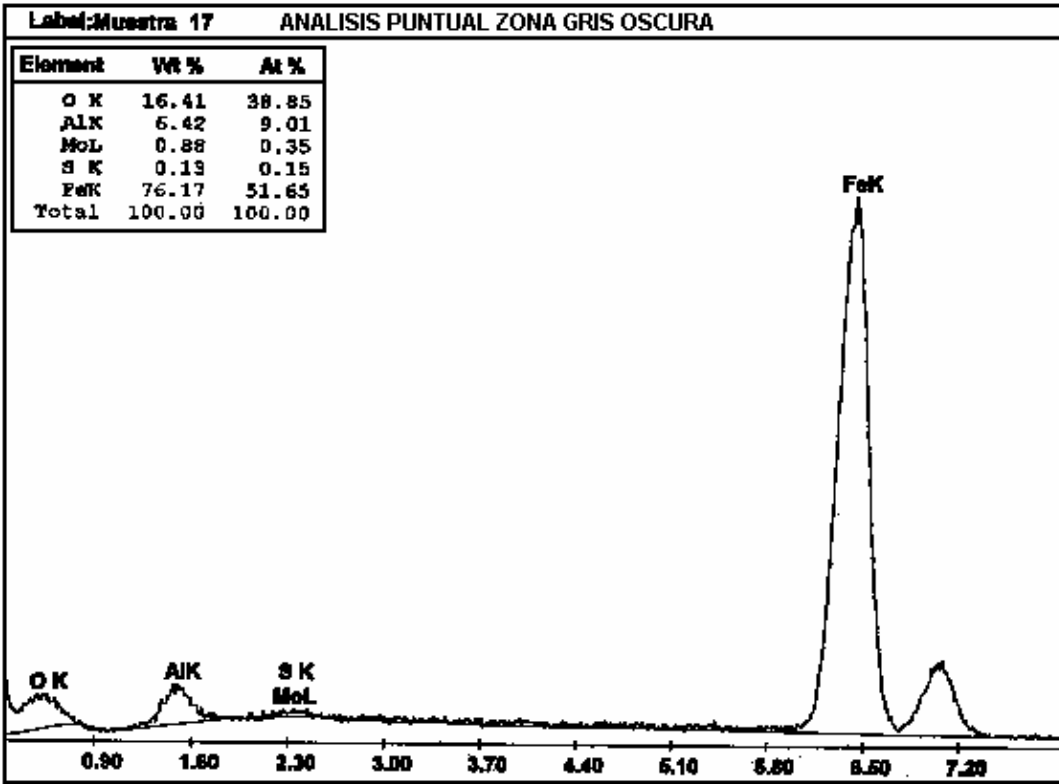
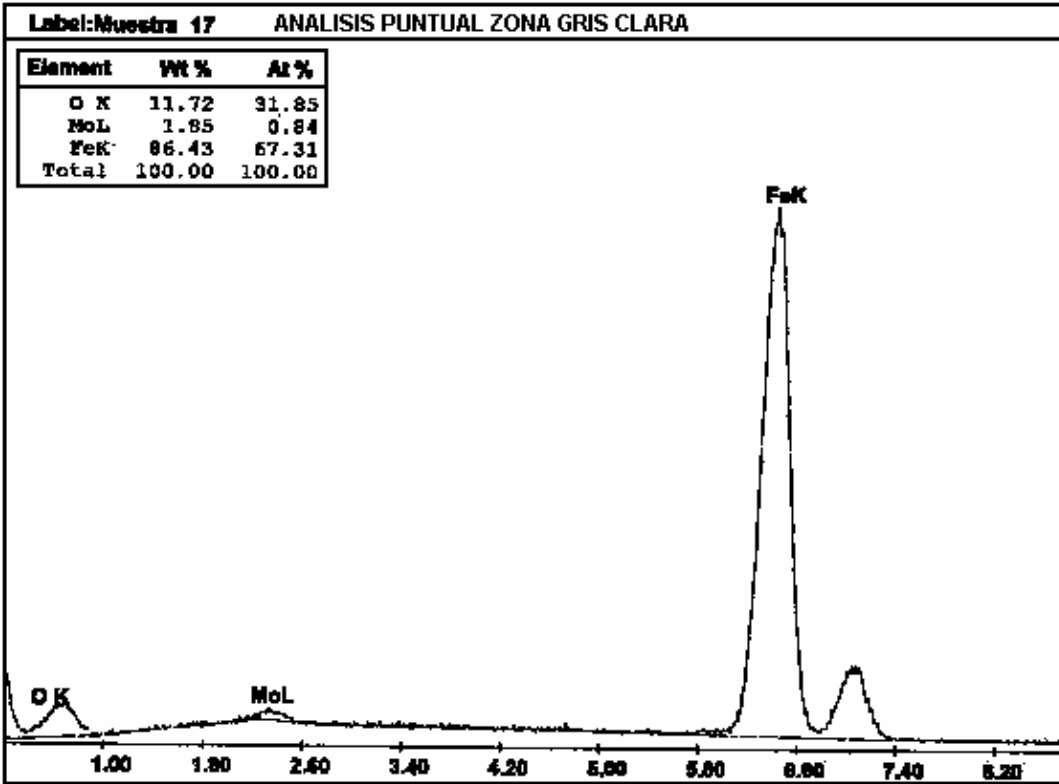






- Condición 17:

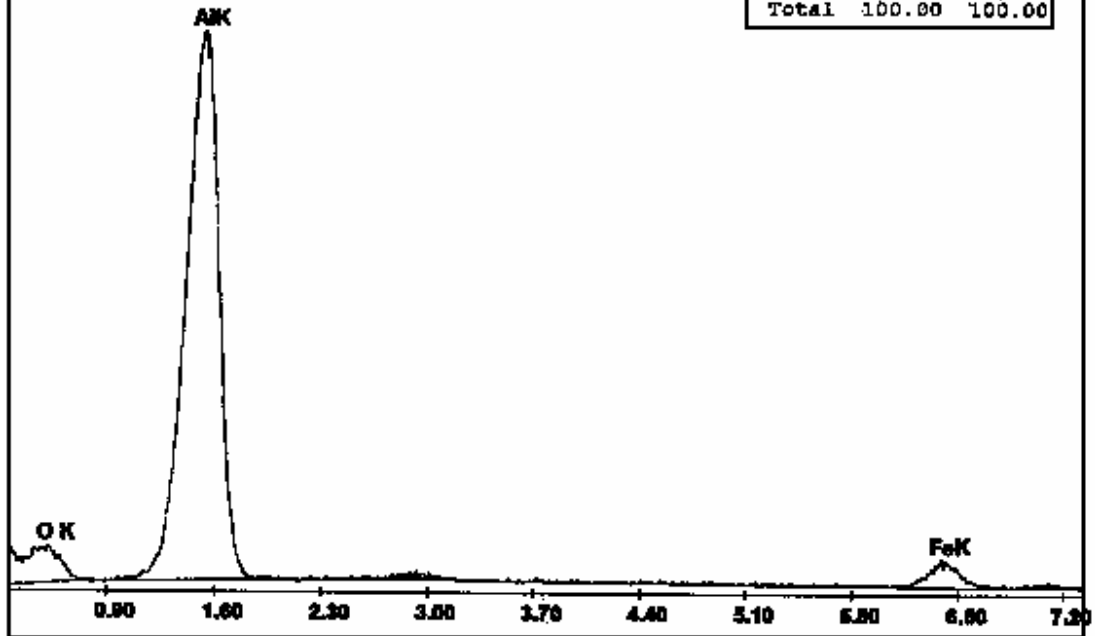




Label: Muestra 17

ANALISIS PUNTUAL ZONA OSCURA

Element	WT %	At %
O K	32.21	45.52
AlK	62.42	52.31
FeK	5.37	2.18
Total	100.00	100.00



## ANEXO E

Gráficos de fuerza de roce, coeficiente de fricción y temperatura vs. distancia.

## a) SIN LUBRICACIÓN:

### a.1) Condición 1

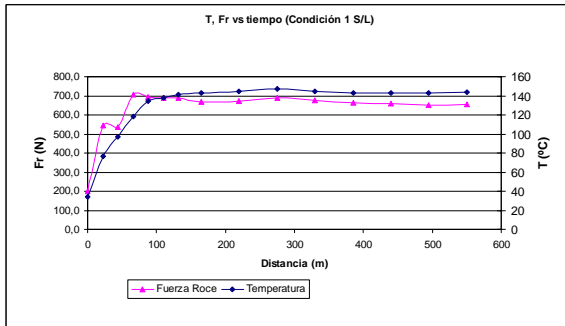


Gráfico E1. T, Fr vs Distancia.

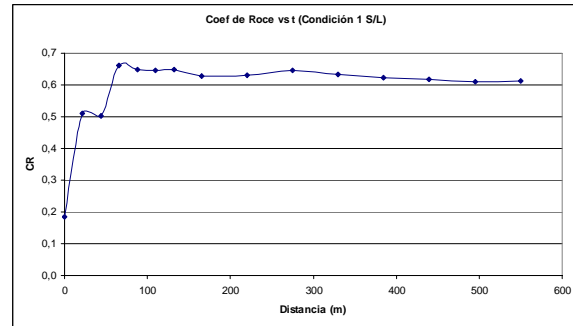


Gráfico E2. Coef. de Roce vs Distancia.

### a.2) Condición 2

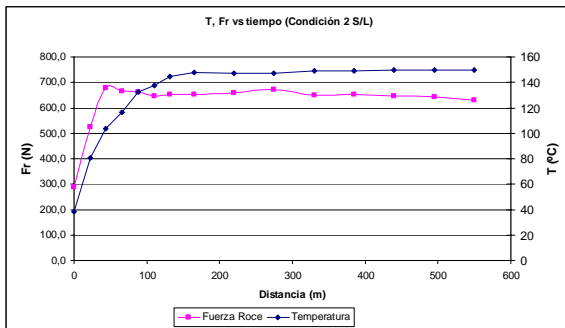


Gráfico E3. T, Fr vs Distancia.

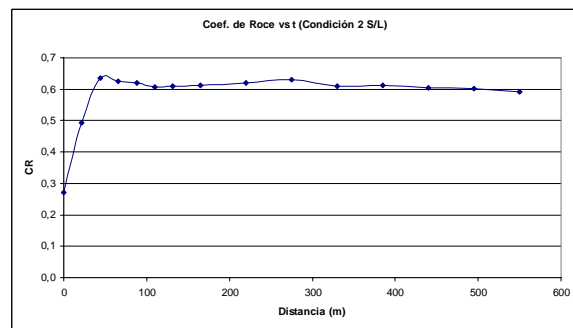


Gráfico E4. Coef. de Roce vs Distancia

### a.3) Condición 3

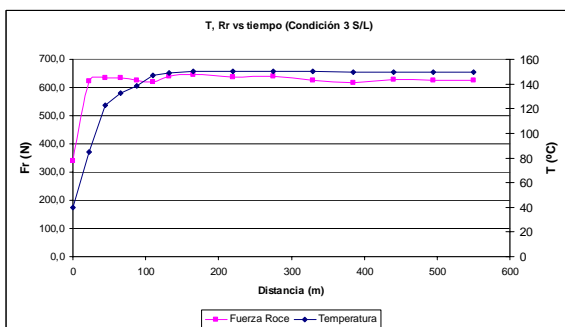


Gráfico E5. T, Fr vs Distancia.

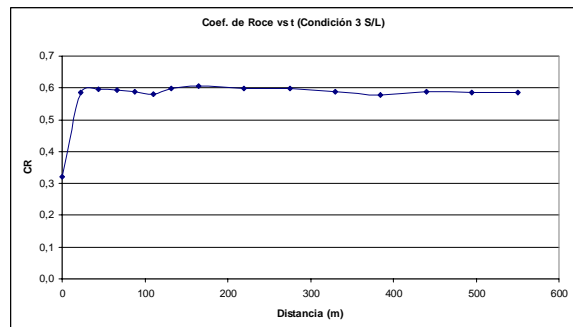


Gráfico E6. Coef. de Roce vs Distancia

### a.4) Condición 4

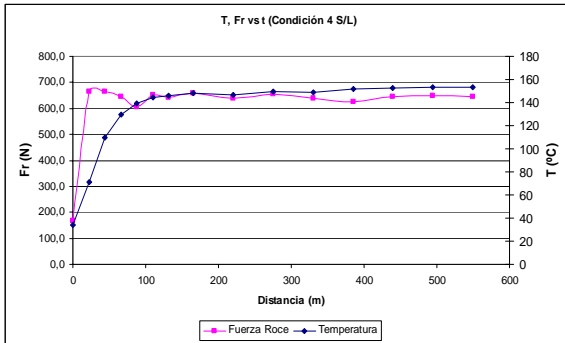


Gráfico E7. T, Fr vs Distancia.

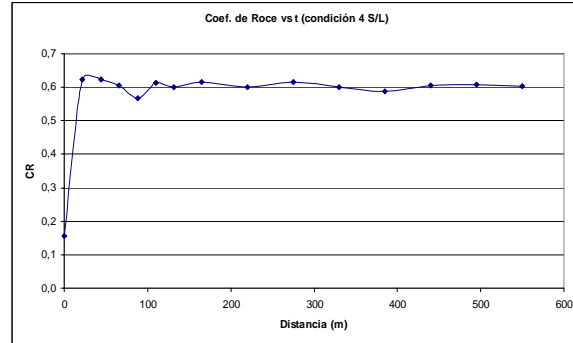


Gráfico E8. Coef. de Roce vs Distancia

### a.5) Condición 5

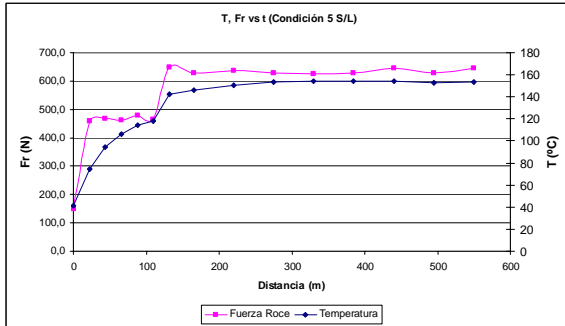


Gráfico E9. T, Fr vs Distancia.

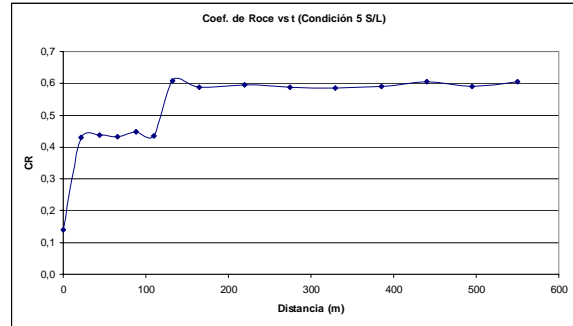


Gráfico E10. Coef. de Roce vs Distancia

### a.6) Condición 6

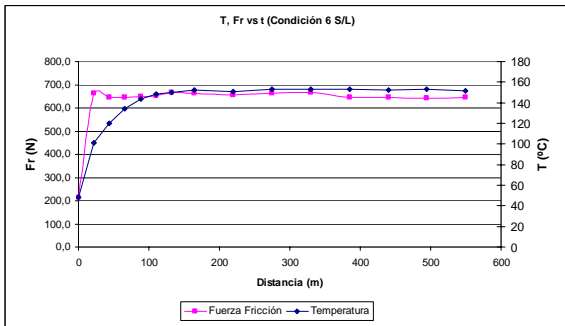


Gráfico E11. T, Fr vs Distancia.

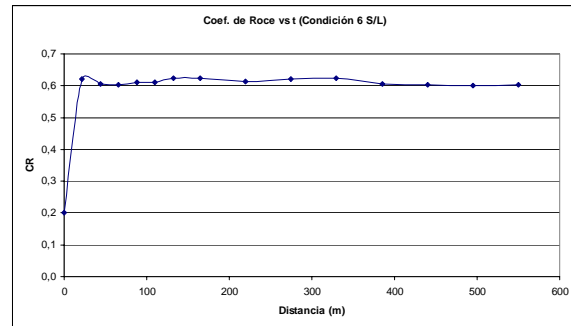


Gráfico E12. Coef. de Roce vs Distancia

### a.7) Condición 7

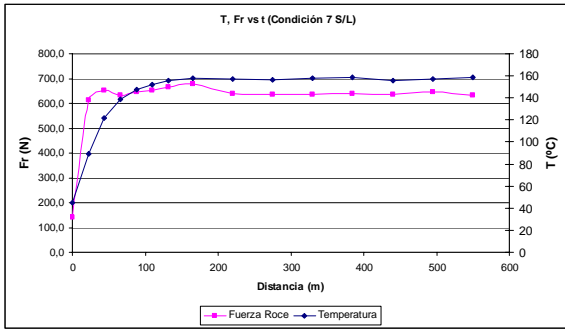


Gráfico E13. T, Fr vs Distancia.

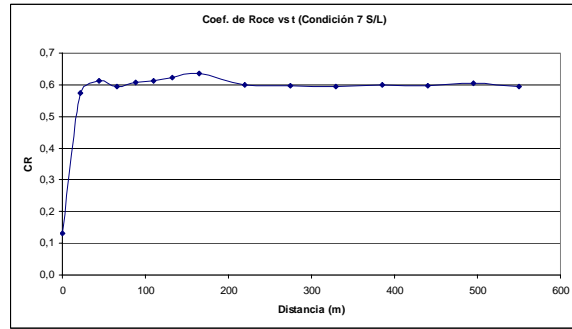


Gráfico E14. Coef. de Roce vs Distancia

### a.8) Condición 8

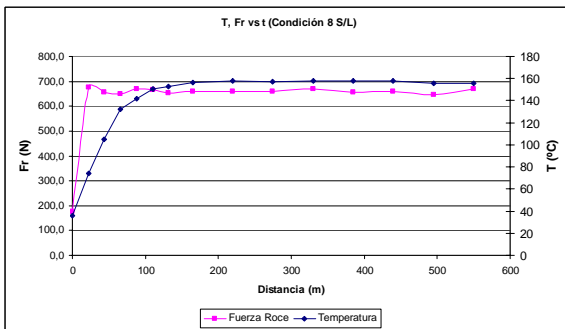


Gráfico E15. T, Fr vs Distancia.

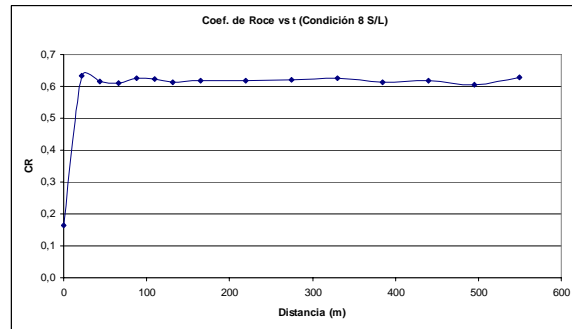


Gráfico E16. Coef. de Roce vs Distancia

### a.9) Condición 9

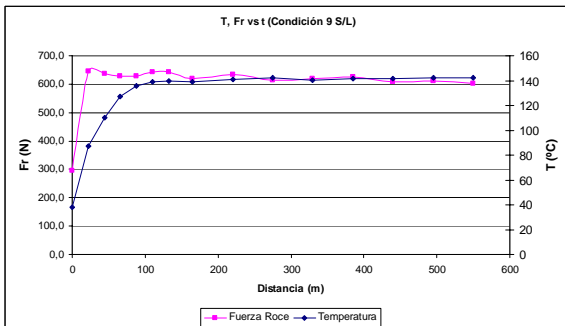


Gráfico E17. T, Fr vs Distancia.

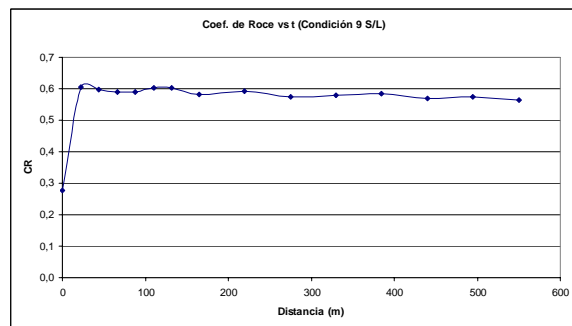


Gráfico E18. Coef. de Roce vs Distancia



### a.10) Condición 10

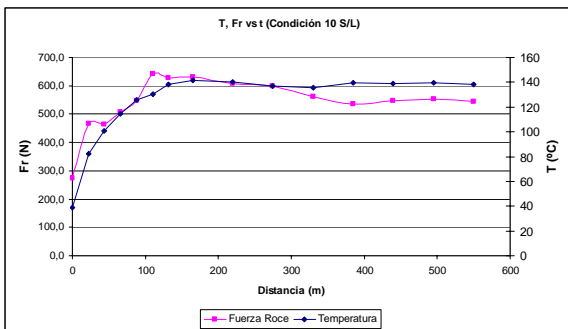


Gráfico E19. T, Fr vs Distancia.

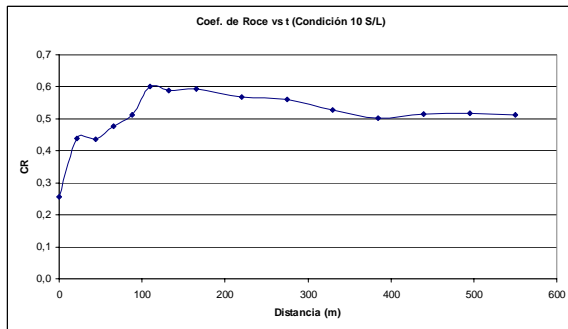


Gráfico E20. Coef. de Roce vs Distancia

### a.11) Condición 11

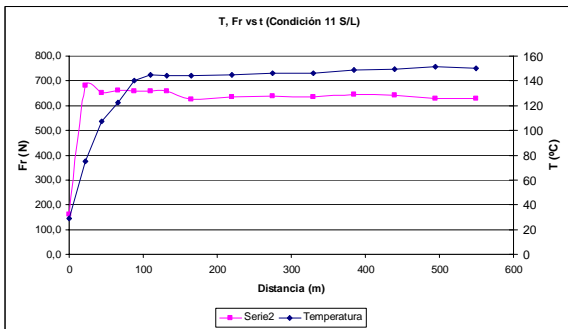


Gráfico E21. T, Fr vs Distancia.

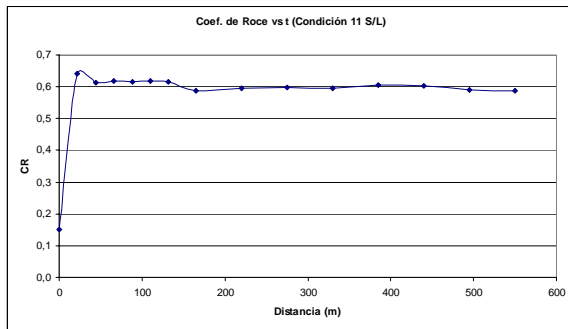


Gráfico E22. Coef. de Roce vs Distancia

### a.12) Condición 12

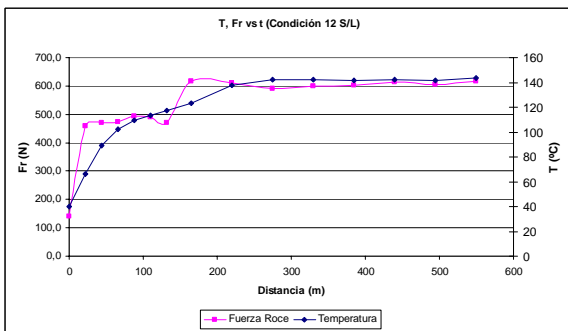


Gráfico E23. T, Fr vs Distancia.

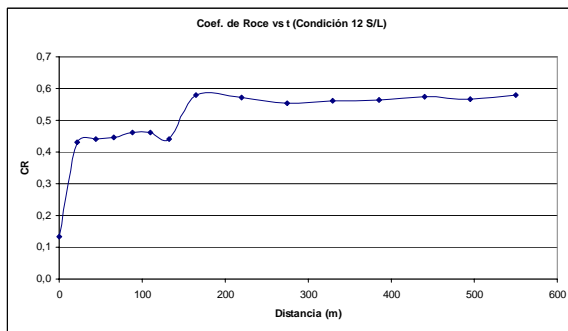


Gráfico E24. Coef. de Roce vs Distancia

### a.13) Condición 13

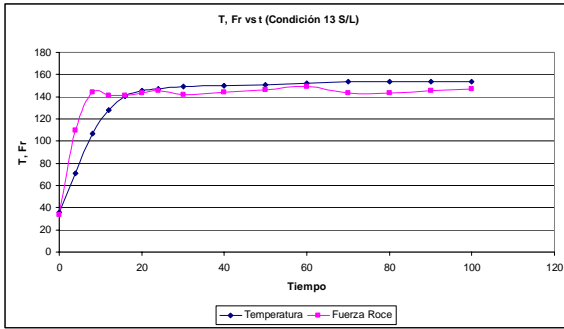


Gráfico E25. T, Fr vs Distancia.

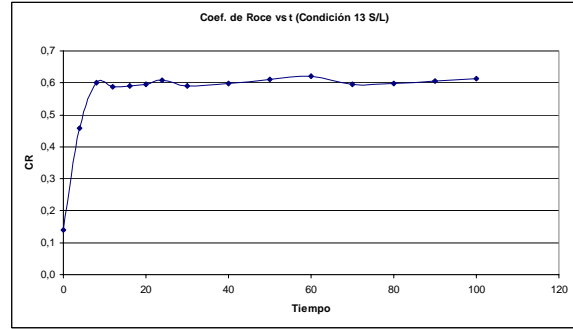


Gráfico E26. Coef. de Roce vs Distancia

### a.14) Condición 14

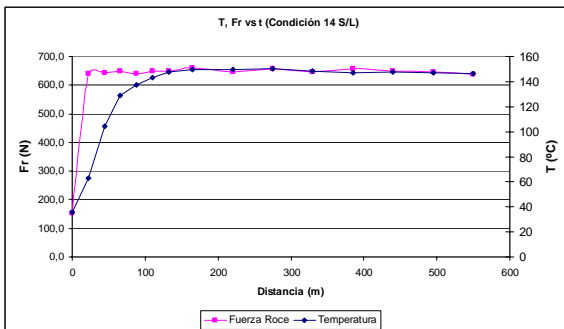


Gráfico E27. T, Fr vs Distancia.

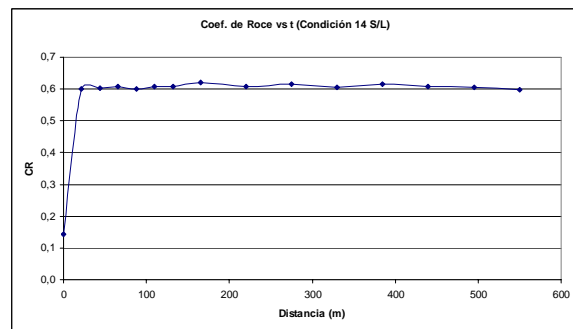


Gráfico E28. Coef. de Roce vs Distancia

### a.15) Condición 15

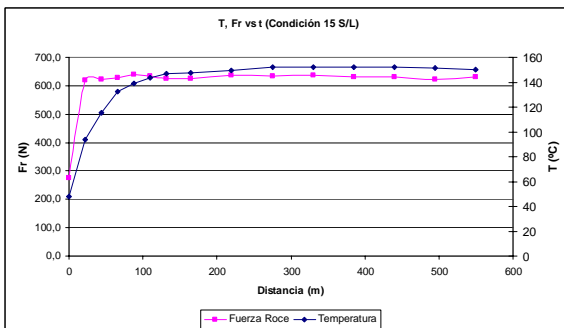


Gráfico E29. T, Fr vs Distancia.

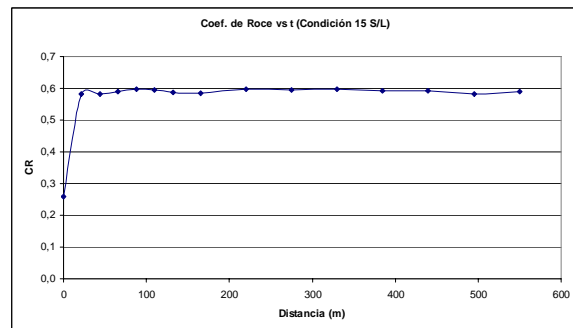
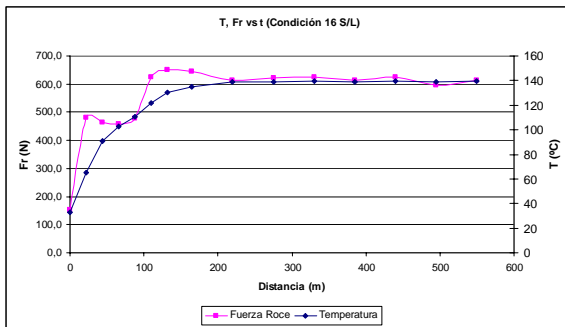
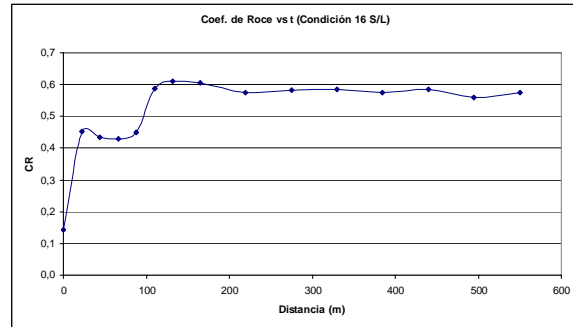


Gráfico E30. Coef. de Roce vs Distancia

**a.16) Condición 16**

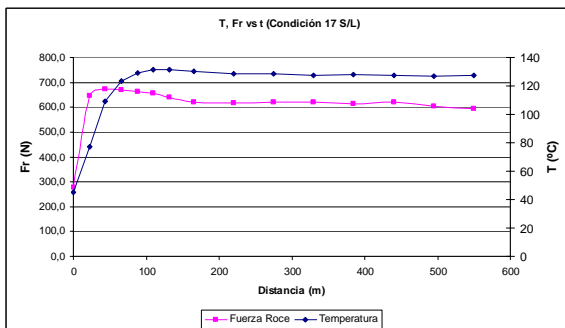


**Gráfico E31. T, Fr vs Distancia.**

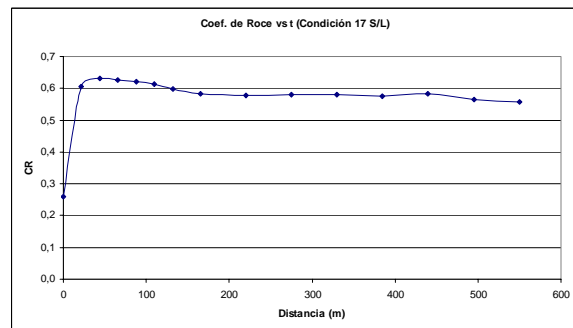


**Gráfico E32. Coef. de Roce vs Distancia**

**a.17) Condición 17**



**Gráfico E33. T, Fr vs Distancia.**



**Gráfico E34. Coef. de Roce vs Distancia**

## b) CON LUBRICACIÓN:

### b.1) Condición 2

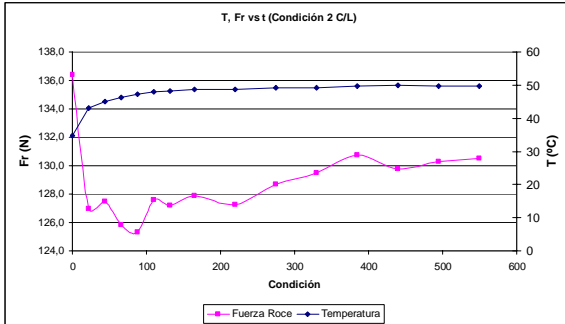


Gráfico E35. T, Fr vs Distancia.

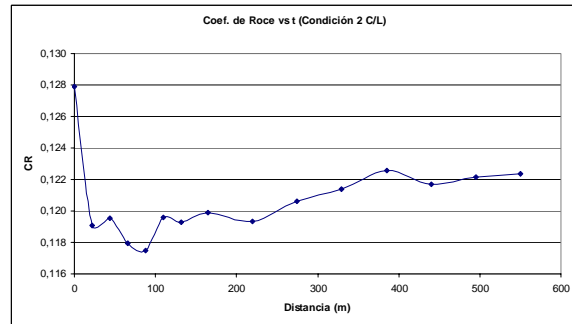


Gráfico E36. Coef. de Roce vs Distancia

### b.2) Condición 3

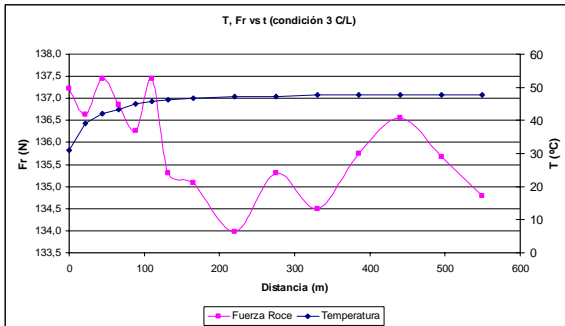


Gráfico E37. T, Fr vs Distancia.

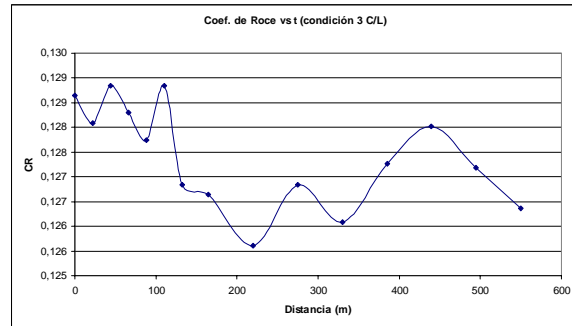


Gráfico E38. Coef. de Roce vs Distancia

### b.3) Condición 4

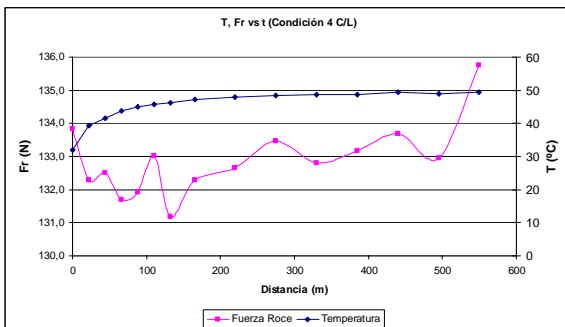


Gráfico E39. T, Fr vs Distancia.

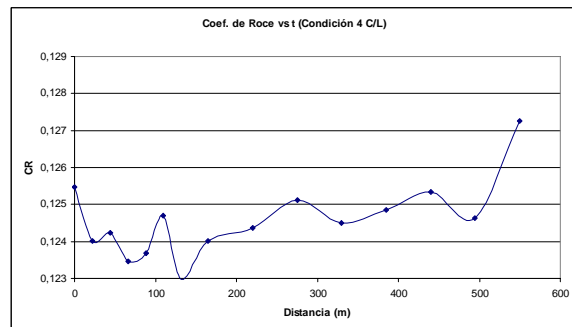


Gráfico E40. Coef. de Roce vs Distancia

### b.4) Condición 5

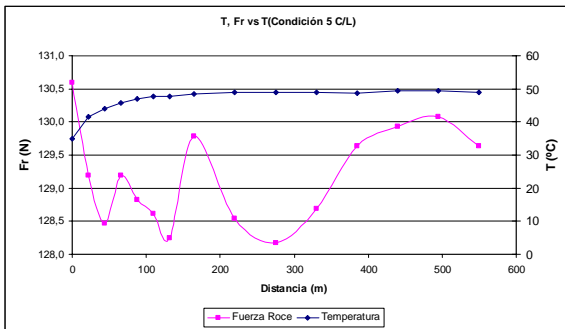


Gráfico E41. T, Fr vs Distancia.

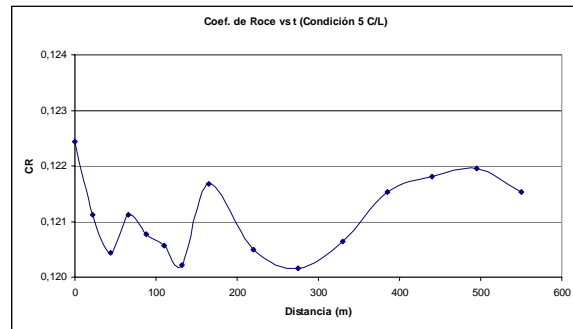


Gráfico E42. Coef. de Roce vs Distancia

### b.5) Condición 6

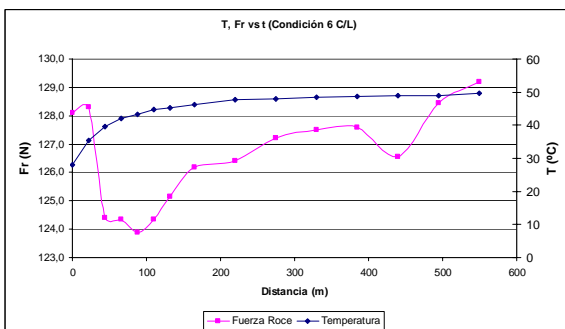


Gráfico E43. T, Fr vs Distancia.

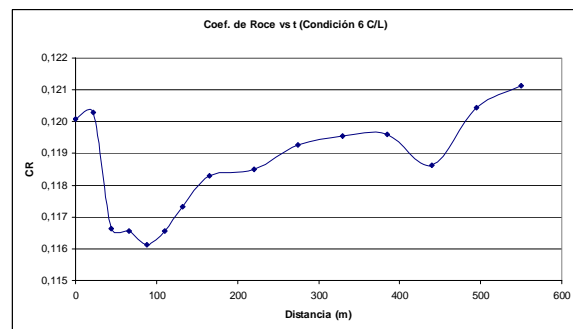


Gráfico E44. Coef. de Roce vs Distancia

### b.6) Condición 7

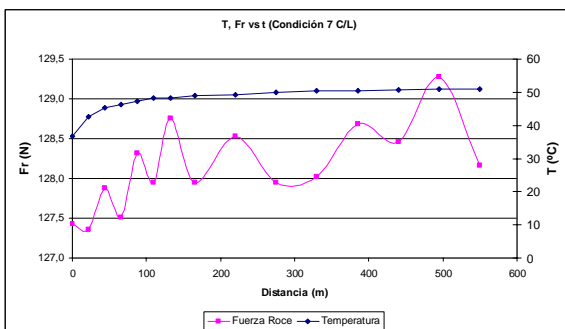


Gráfico E45. T, Fr vs Distancia.

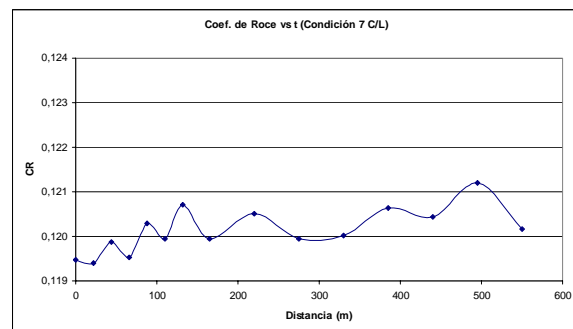


Gráfico E46. Coef. de Roce vs Distancia

### b.7) Condición 8

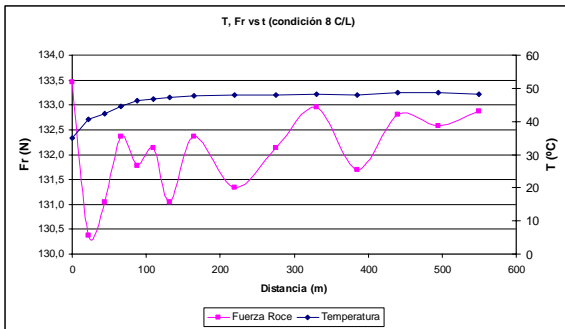


Gráfico E47. T, Fr vs Distancia.

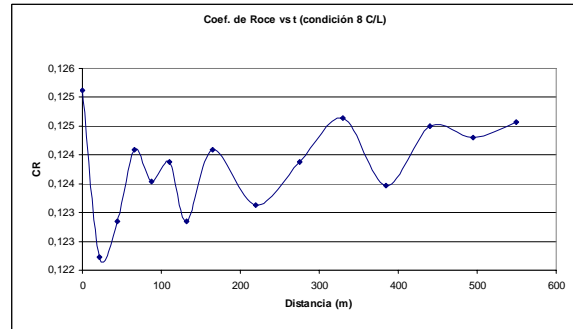


Gráfico E48. Coef. de Roce vs Distancia

### b.8) Condición 9

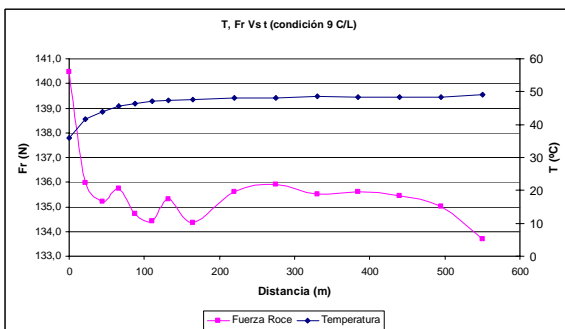


Gráfico E49. T, Fr vs Distancia.

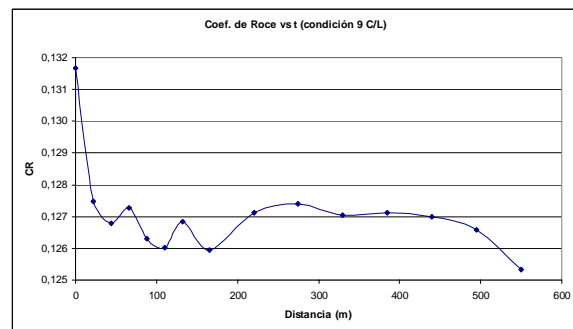


Gráfico E50. Coef. de Roce vs Distancia

### b.10) Condición 11

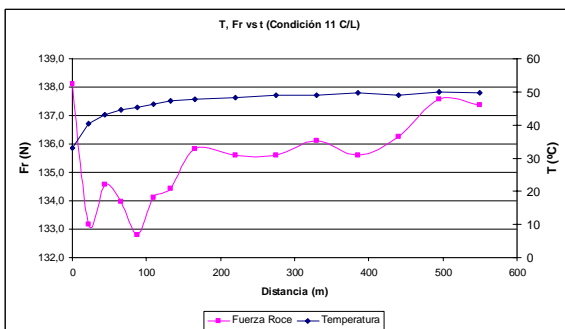


Gráfico E51. T, Fr vs Distancia.

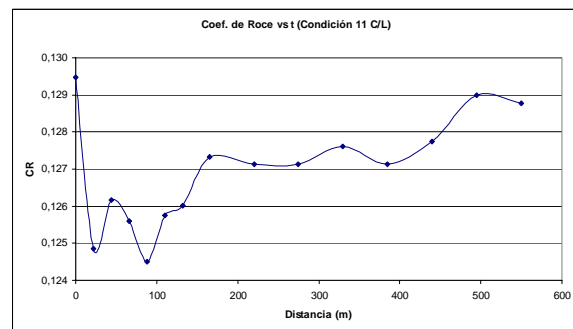


Gráfico E52. Coef. de Roce vs Distancia

### b.11) Condición 12

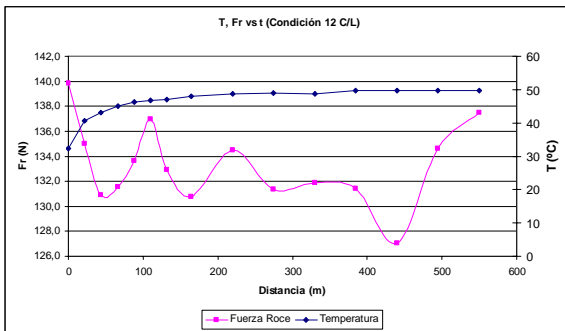


Gráfico E53. T, Fr vs Distancia.

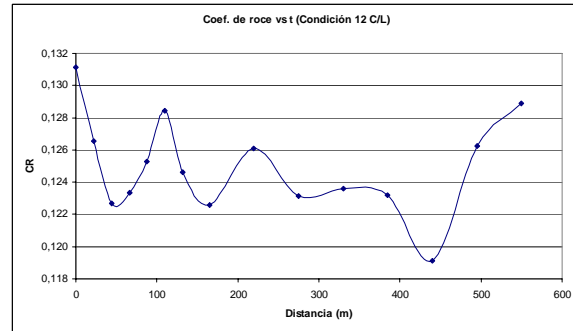


Gráfico E54. Coef. de Roce vs Distancia

### b.12) Condición 13

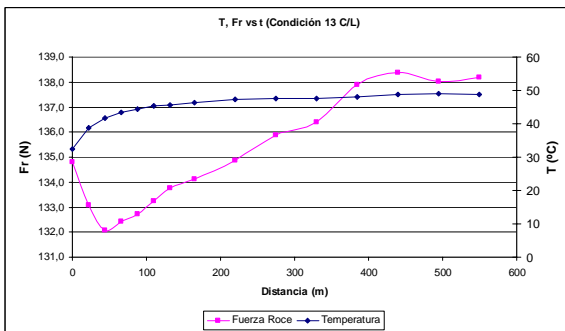


Gráfico E55. T, Fr vs Distancia.

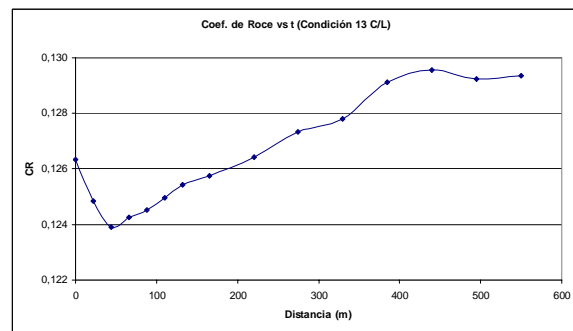


Gráfico E56. Coef. de Roce vs Distancia

### b.13) Condición 14

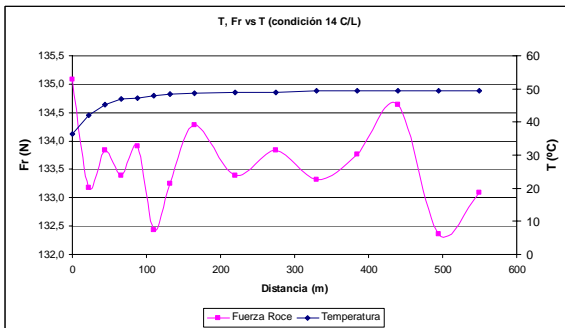


Gráfico E57. T, Fr vs Distancia.

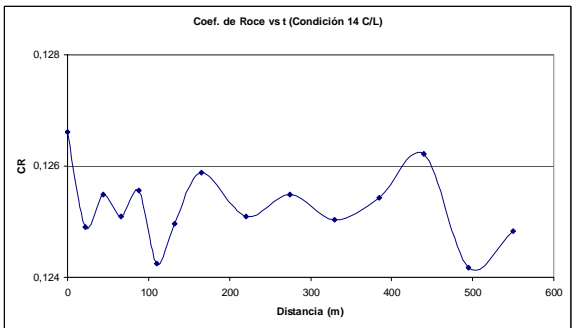


Gráfico E58. Coef. de Roce vs Distancia

### b.14) Condición 15

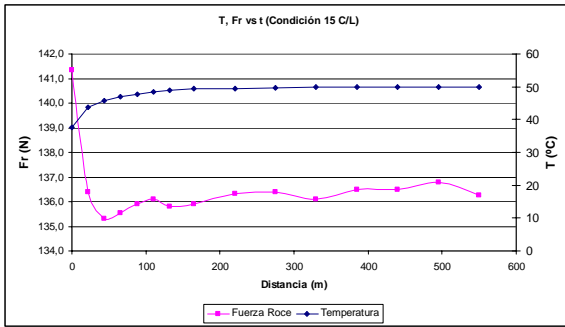


Gráfico E60. T, Fr vs Distancia.

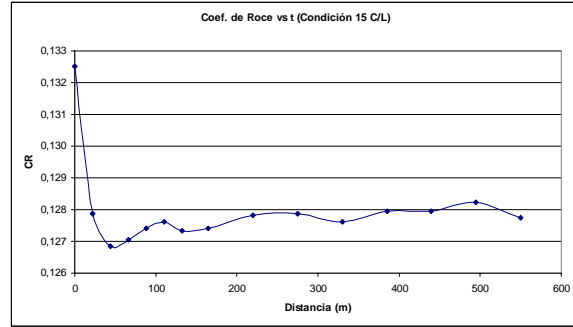


Gráfico E61. Coef. de Roce vs Distancia

### b.15) Condición 16

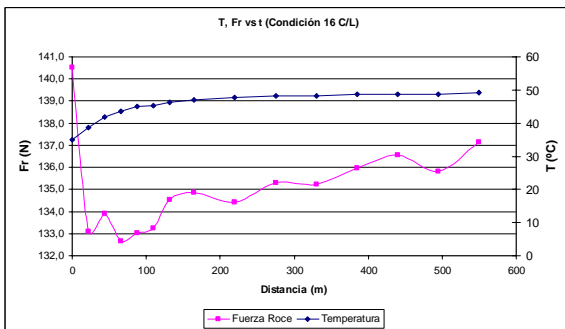


Gráfico E62. T, Fr vs Distancia.

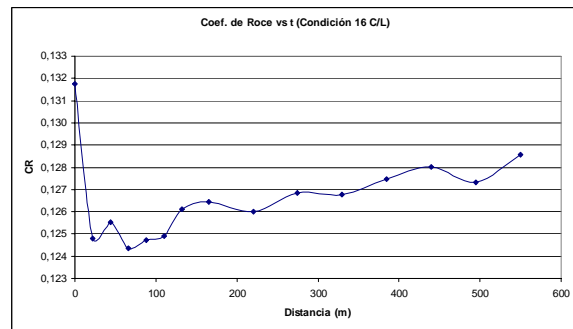


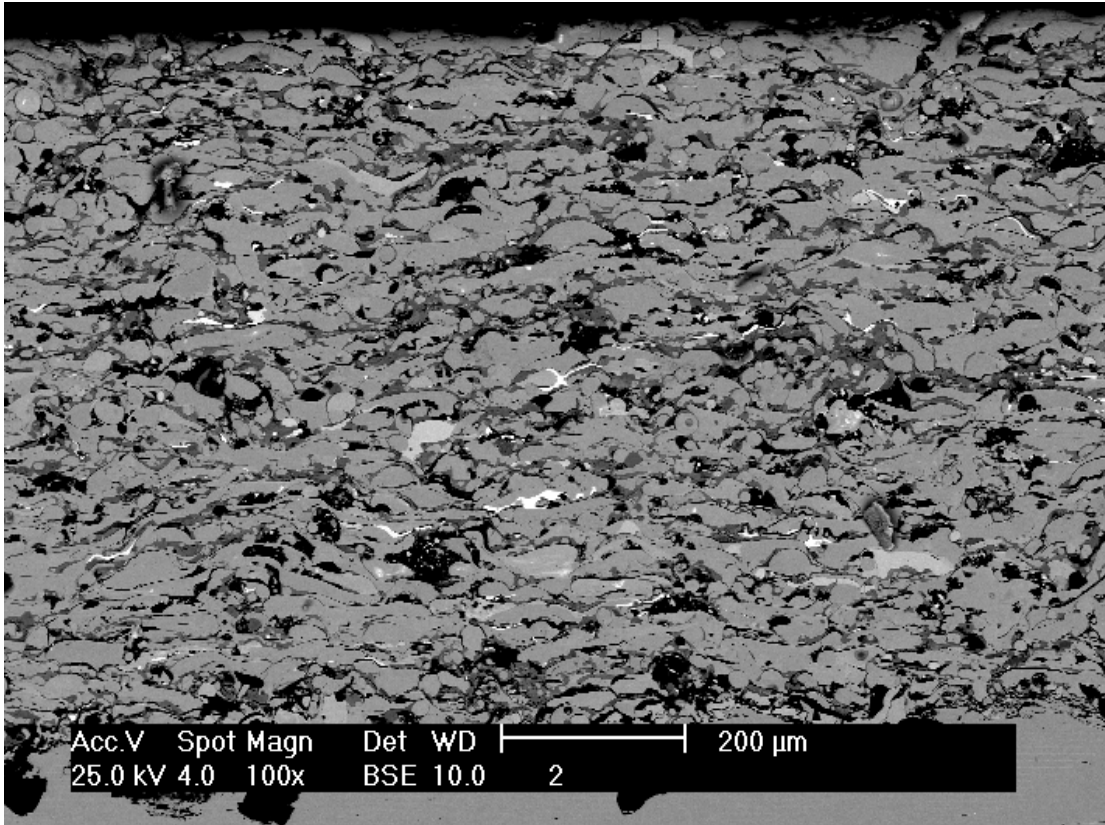
Gráfico E63. Coef. de Roce vs Distancia



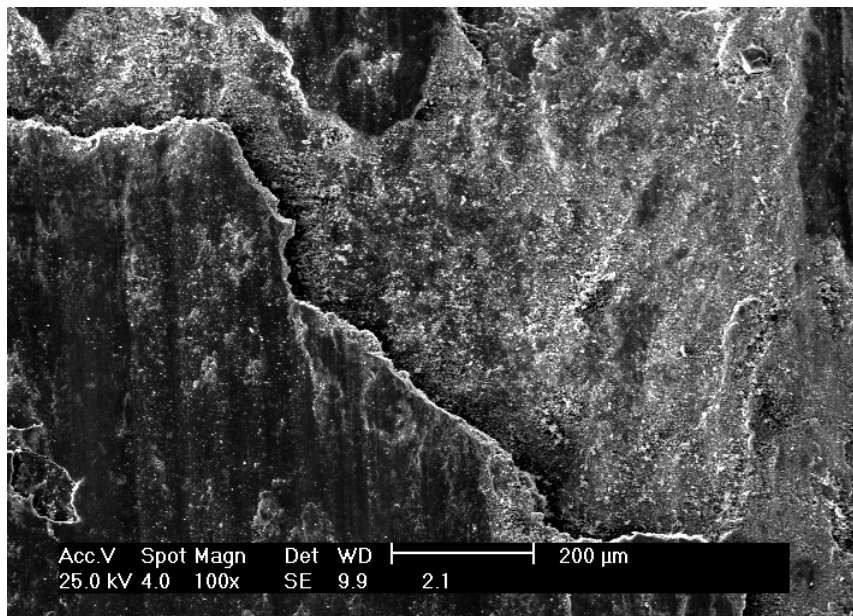
ANEXO F

Micrografías.

**CONDICIÓN 2:**

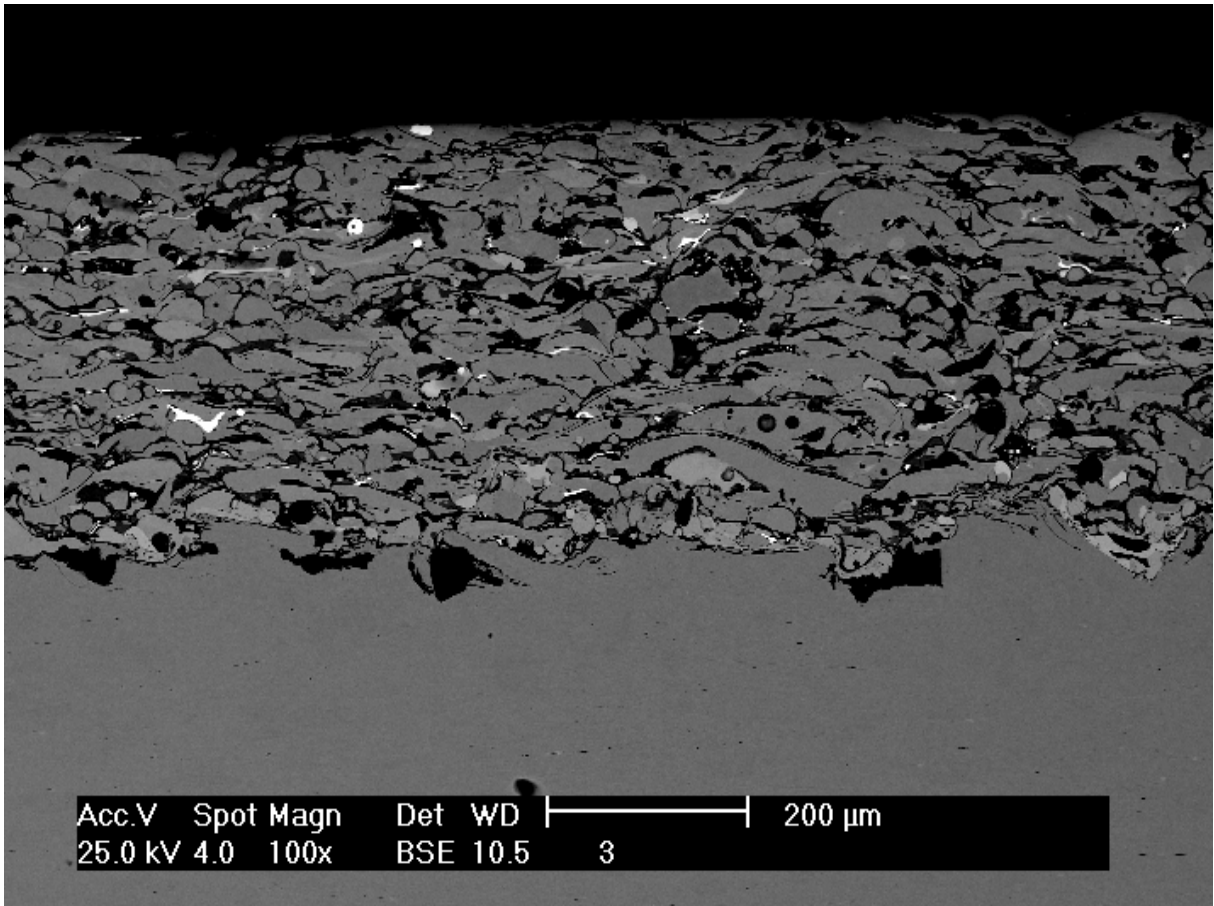


**Micrografía del recubrimiento.**

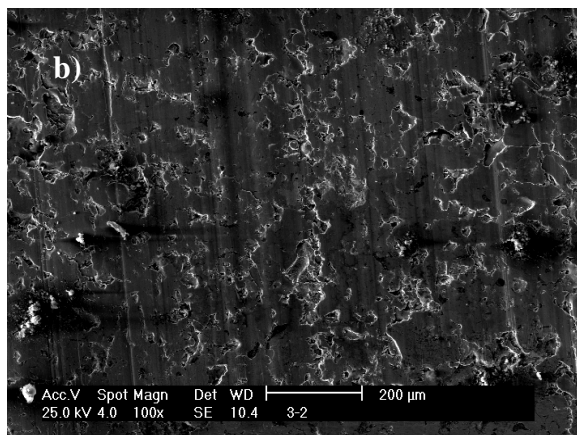
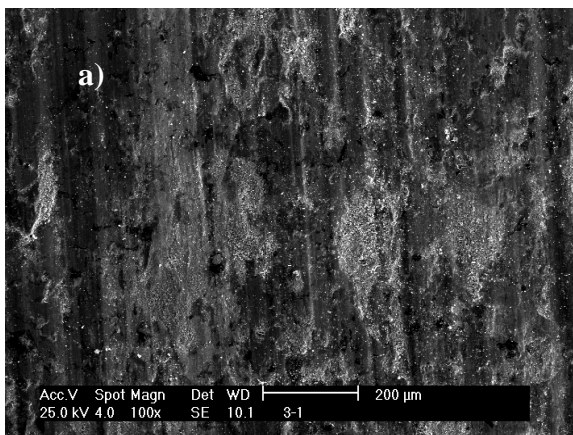


**Superficie de desgaste sin lubricación en electrones secundarios.**

**CONDICIÓN 3:**

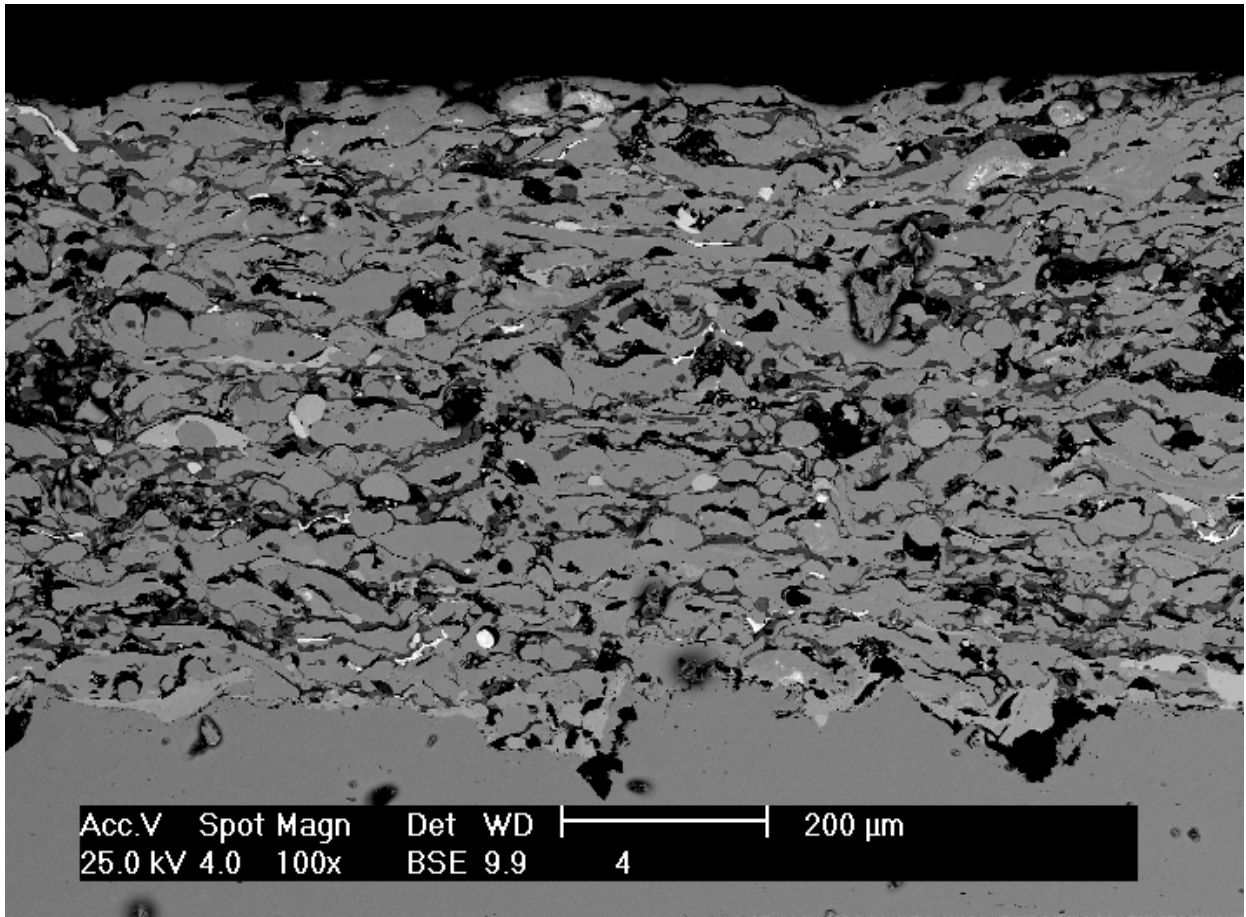


**Micrografía del recubrimiento.**

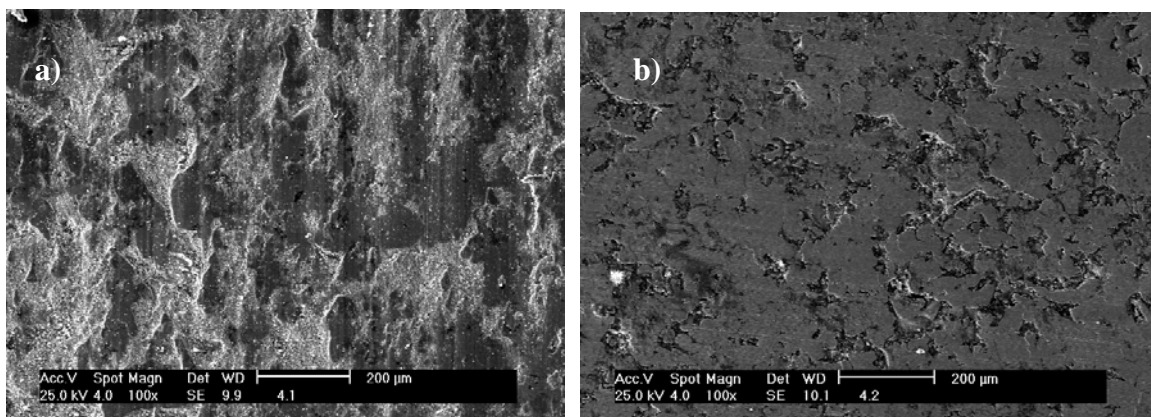


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICIÓN 4:**

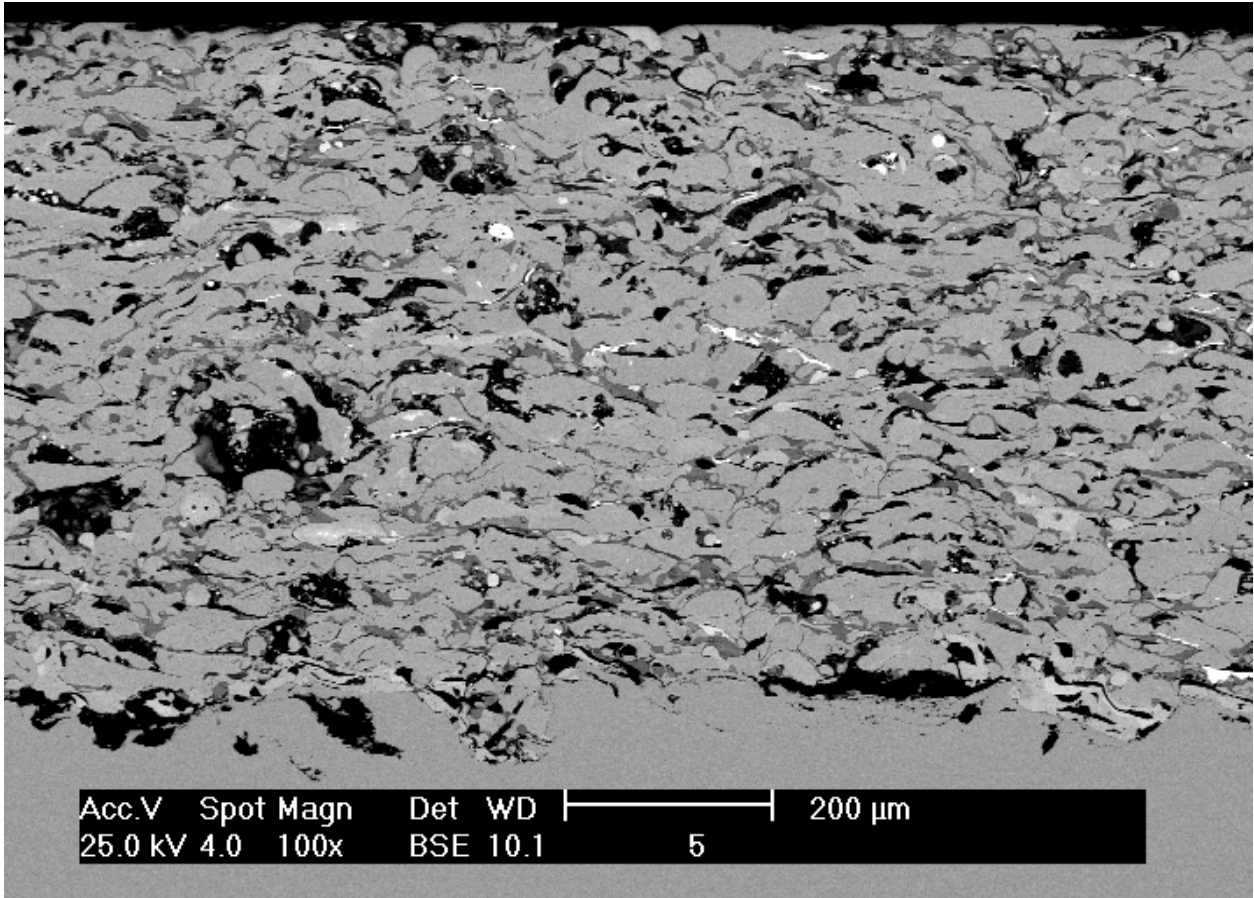


**Micrografía del recubrimiento.**

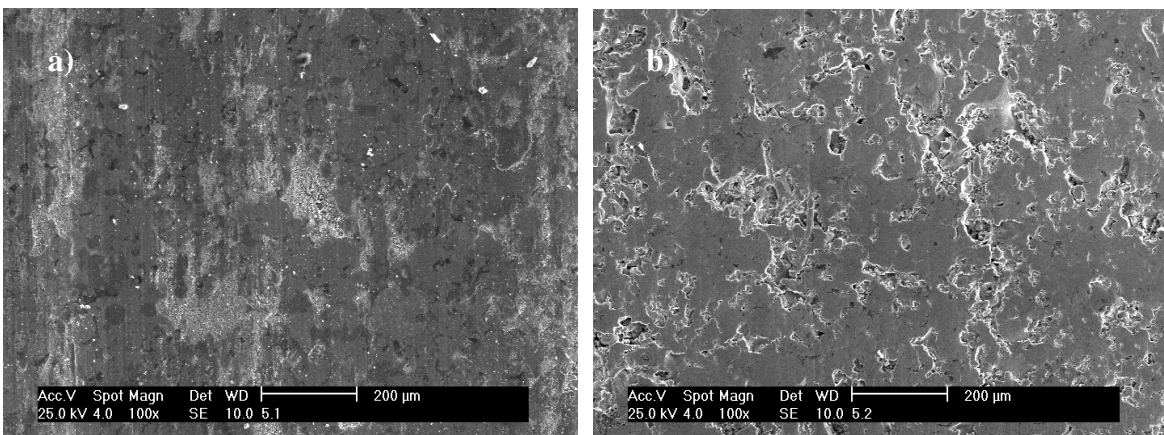


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICIÓN 5:**

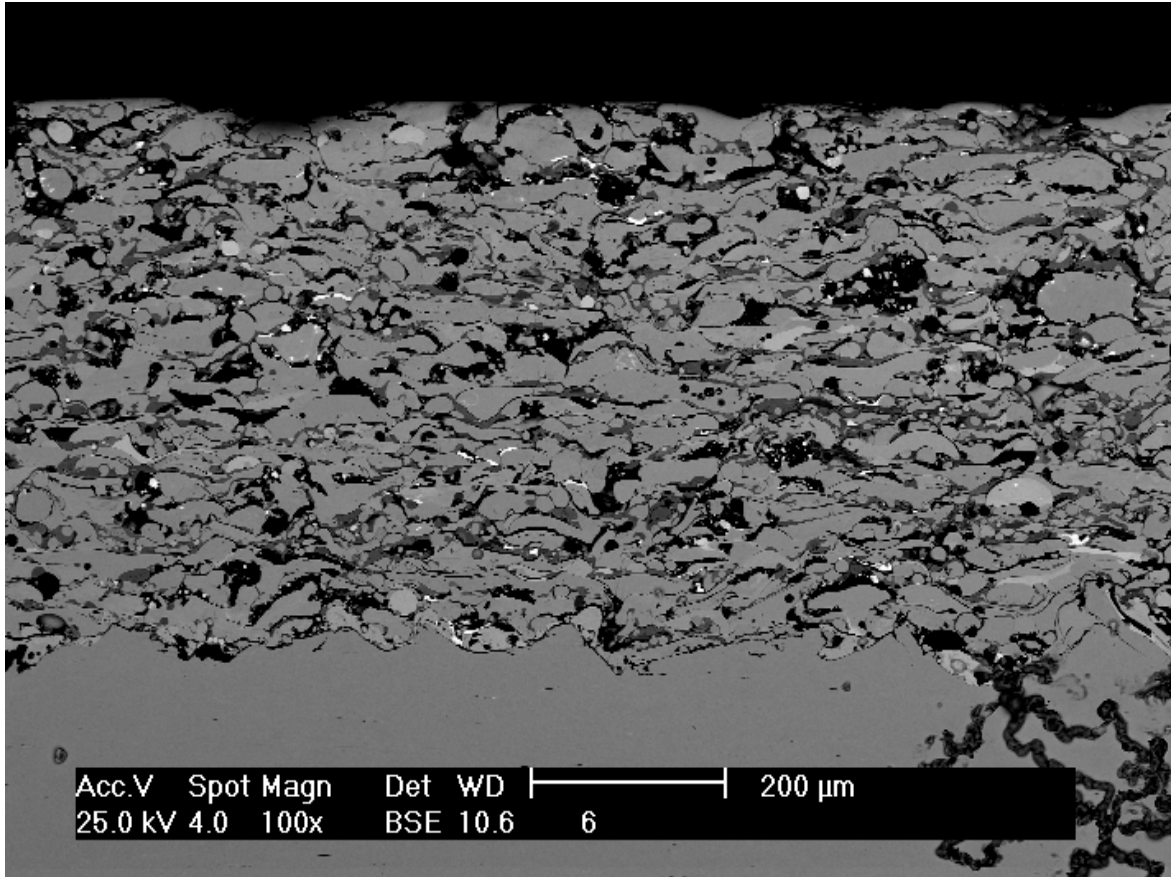


**Micrografía del recubrimiento.**

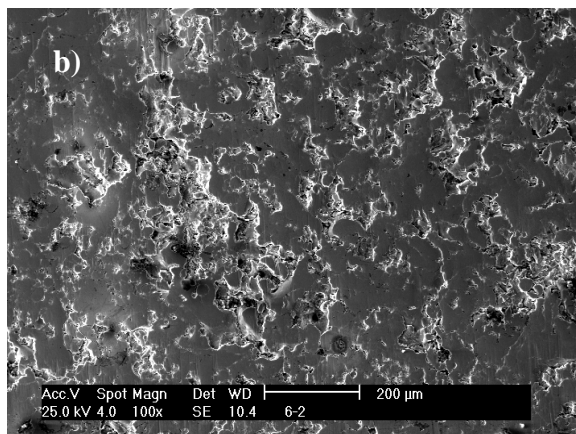
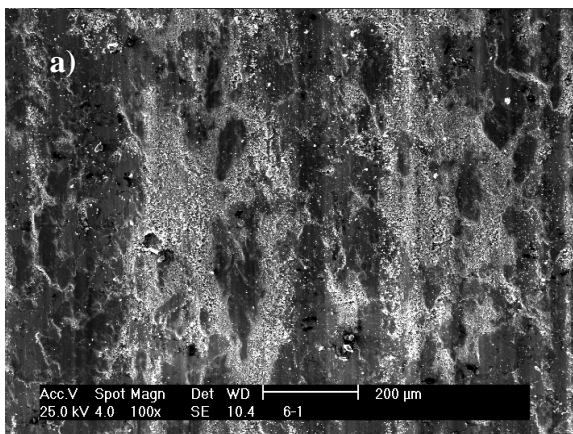


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICIÓN 6:**

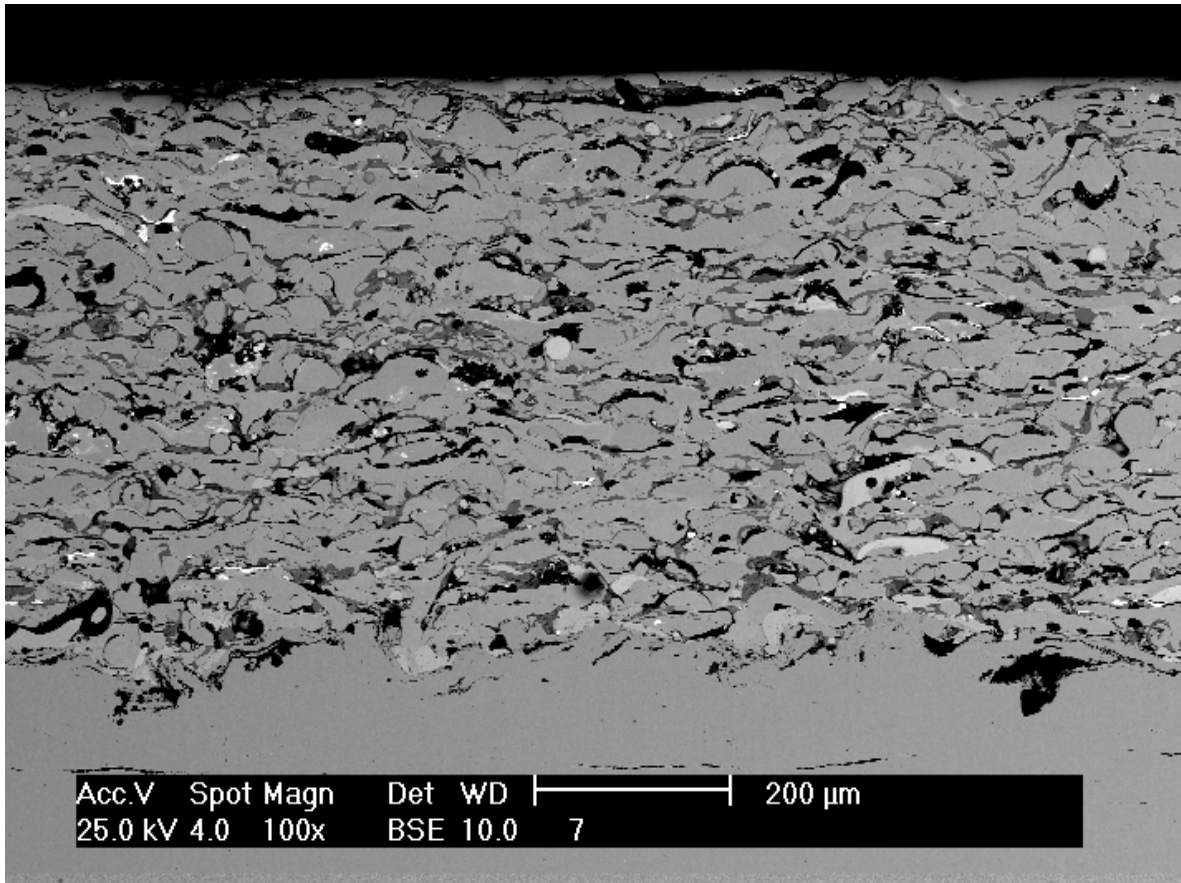


**Micrografía del recubrimiento.**

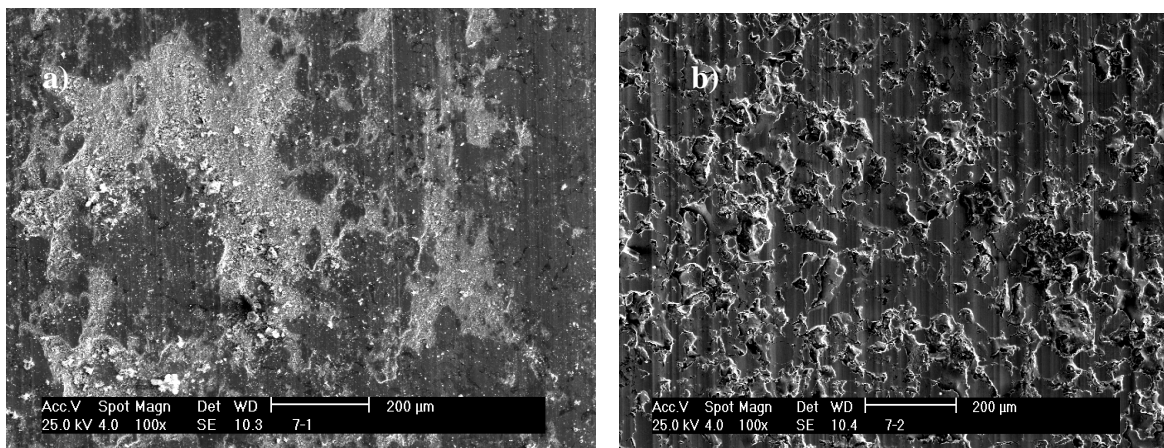


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICIÓN 7:**

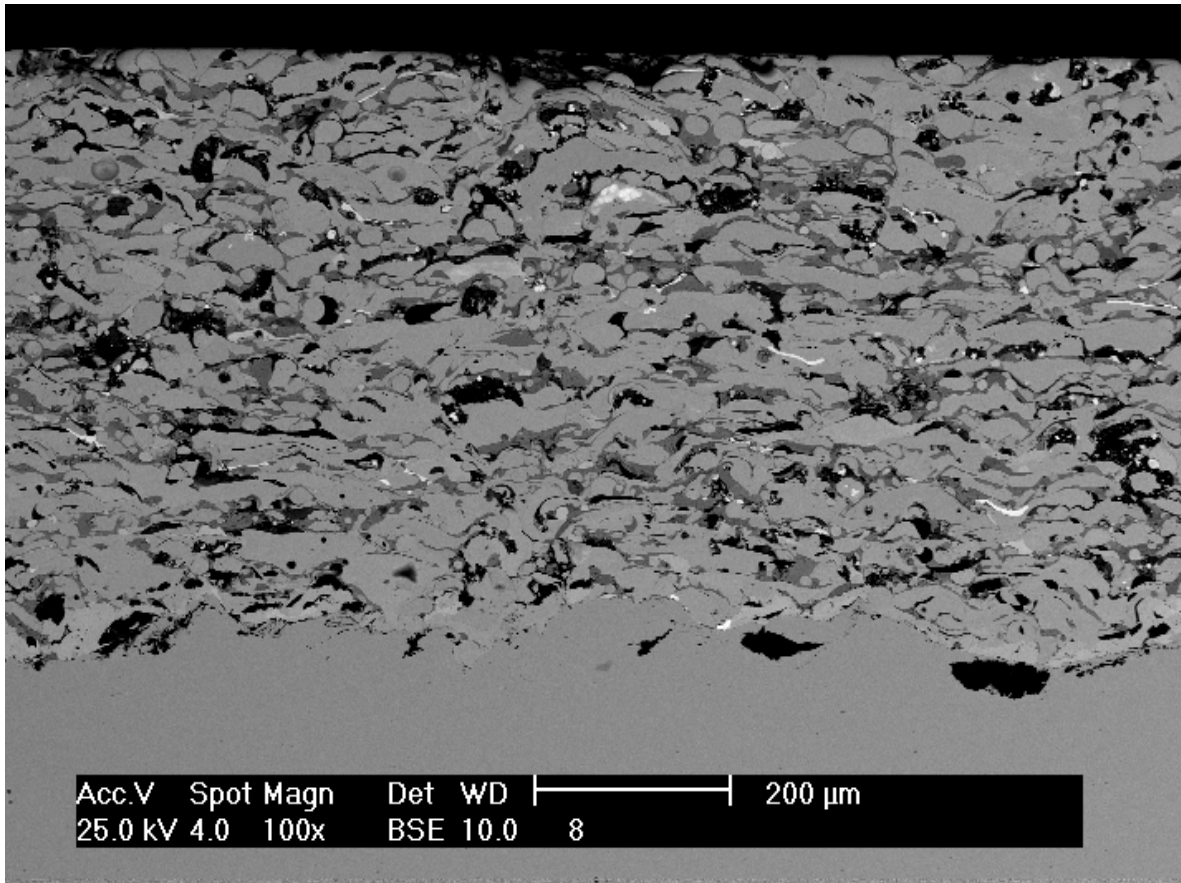


**Micrografía del recubrimiento.**

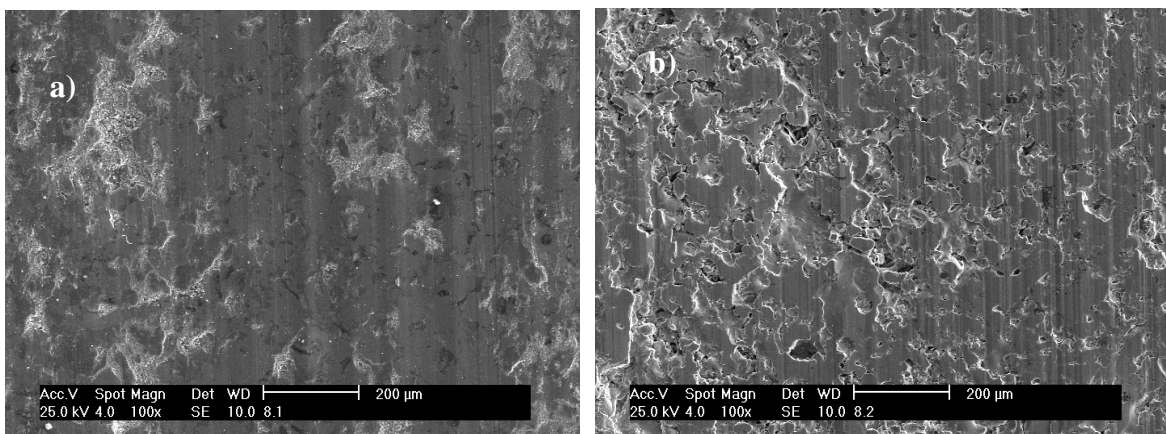


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICIÓN 8:**



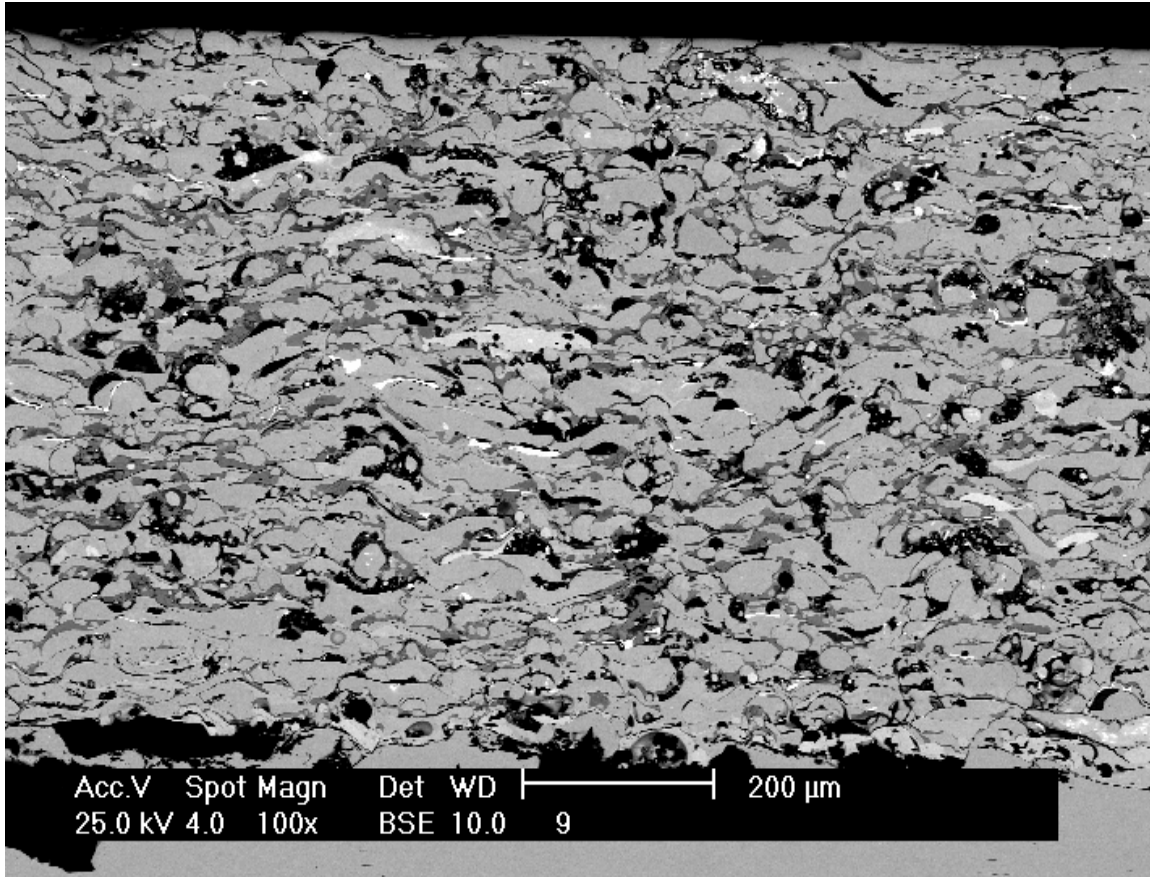
**Micrografía del recubrimiento.**



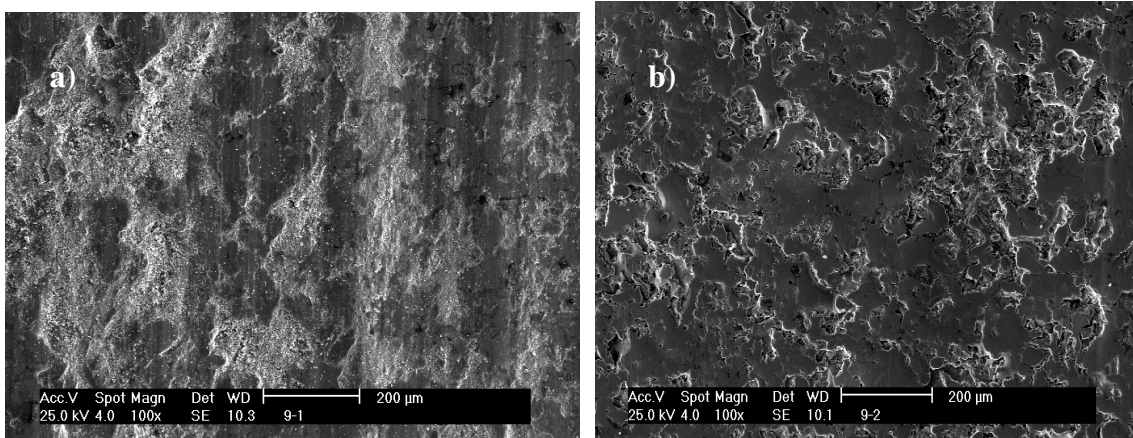
**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**



**CONDICION 9:**

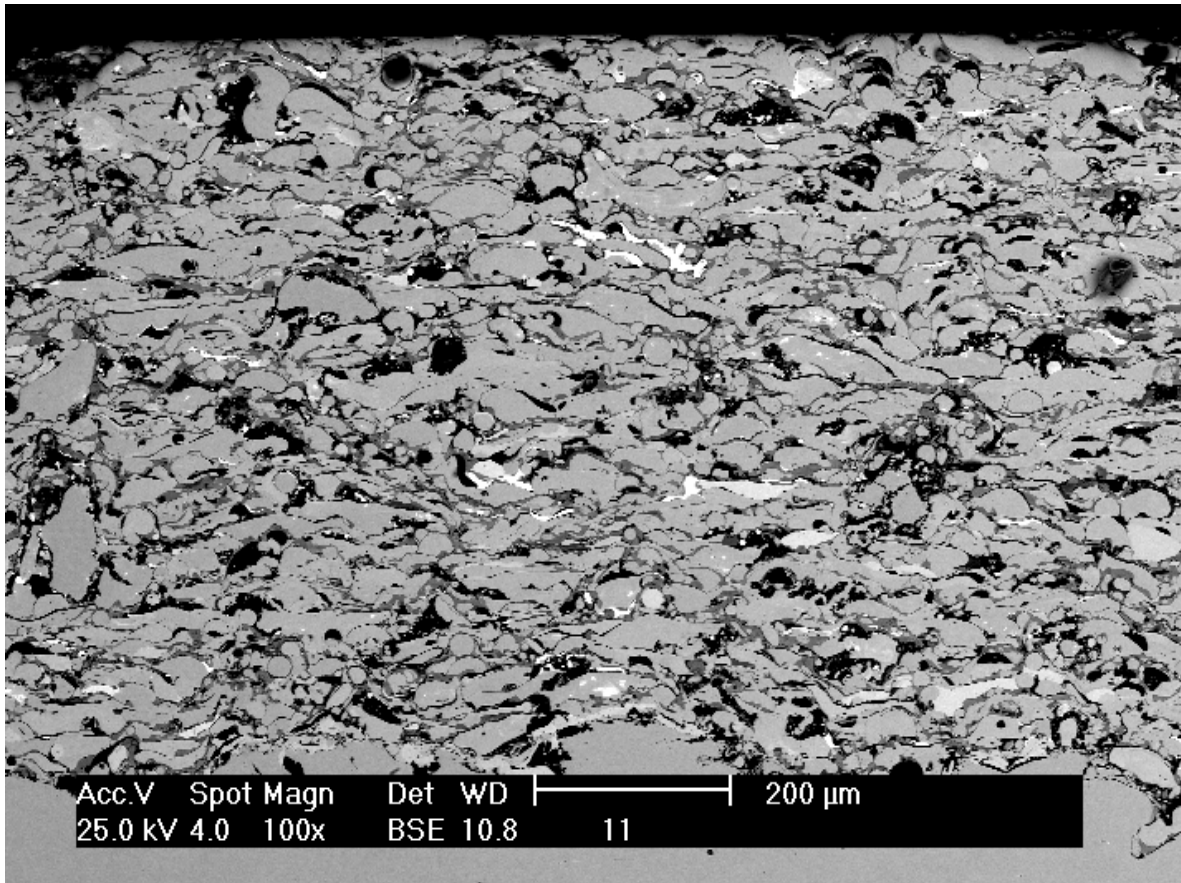


**Micrografía del recubrimiento.**

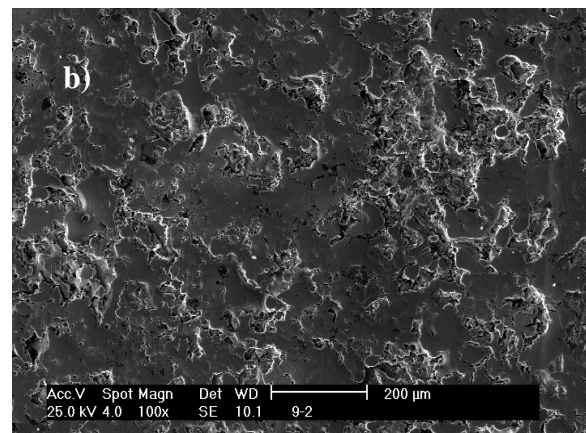
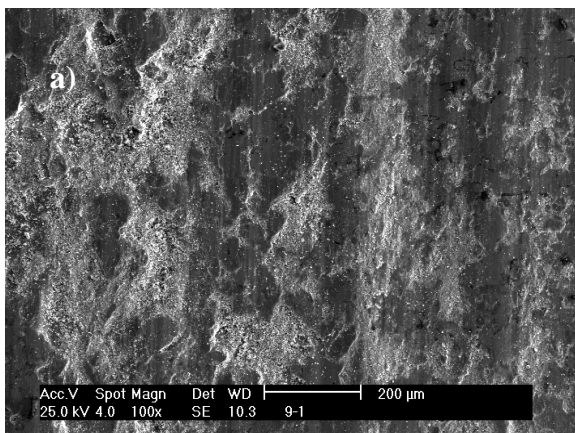


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICION 11:**

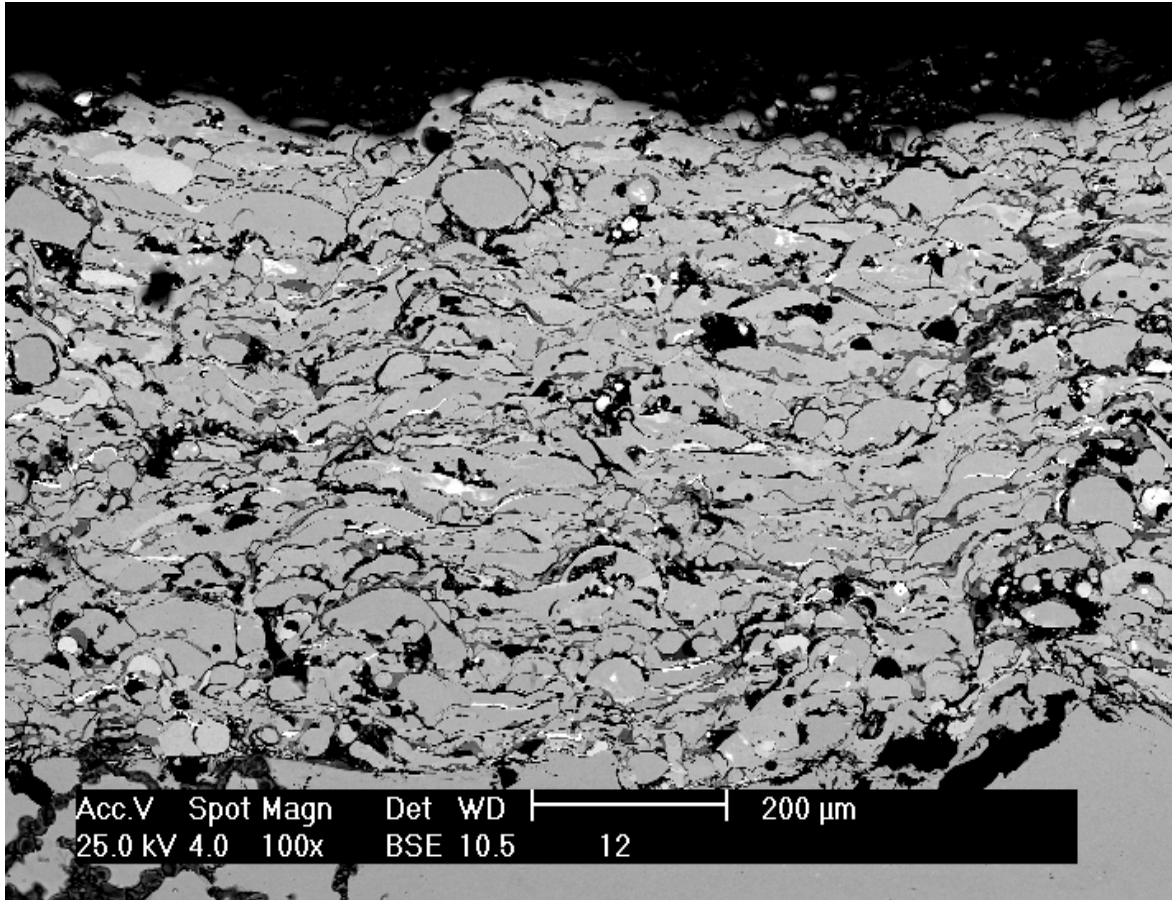


**Micrografía del recubrimiento.**

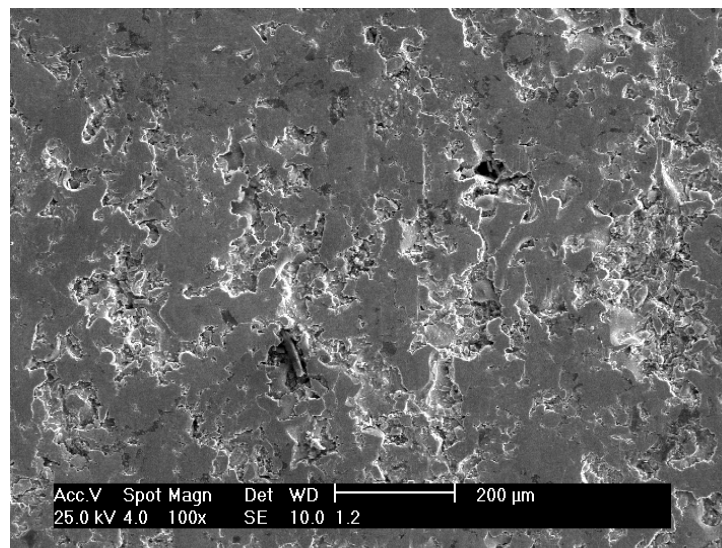


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICION 12:**

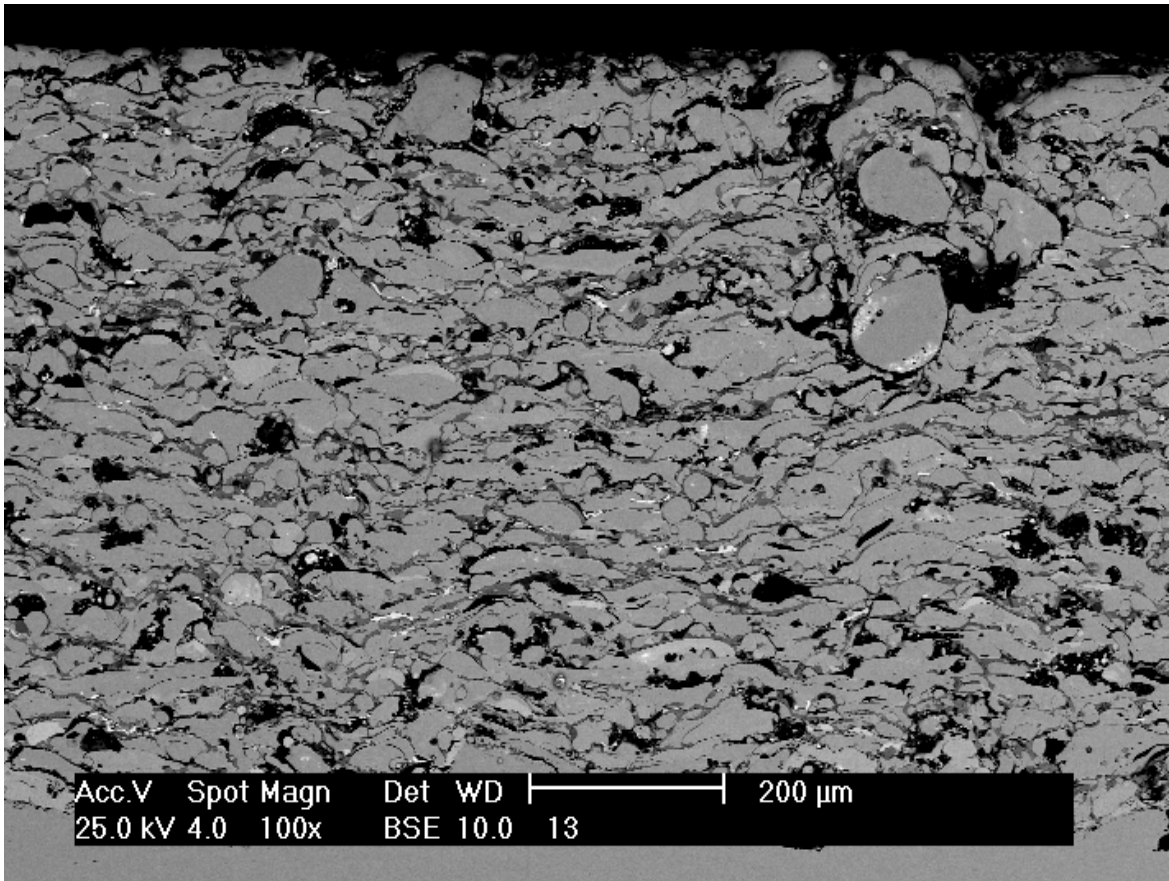


**Micrografía del recubrimiento.**

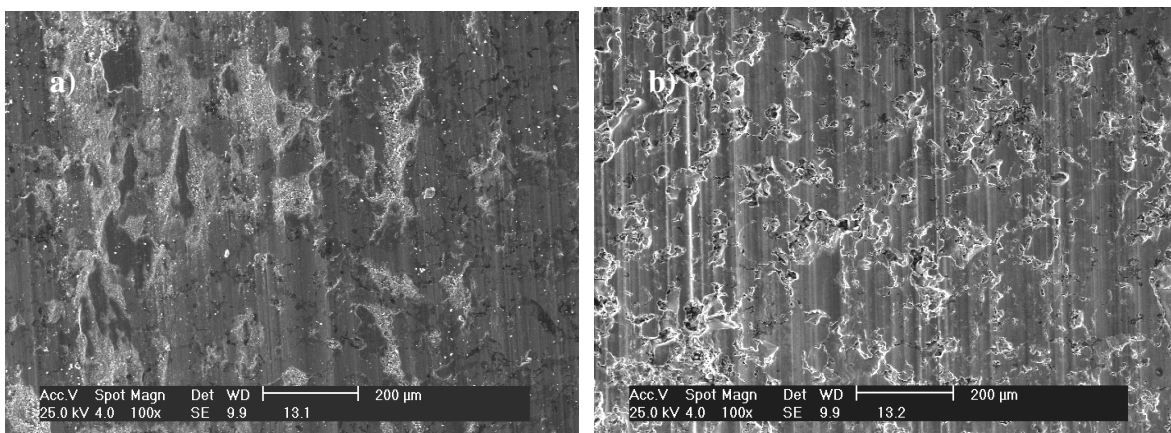


**Superficie de desgaste en electrones secundarios con lubricación**

**CONDICION 13:**

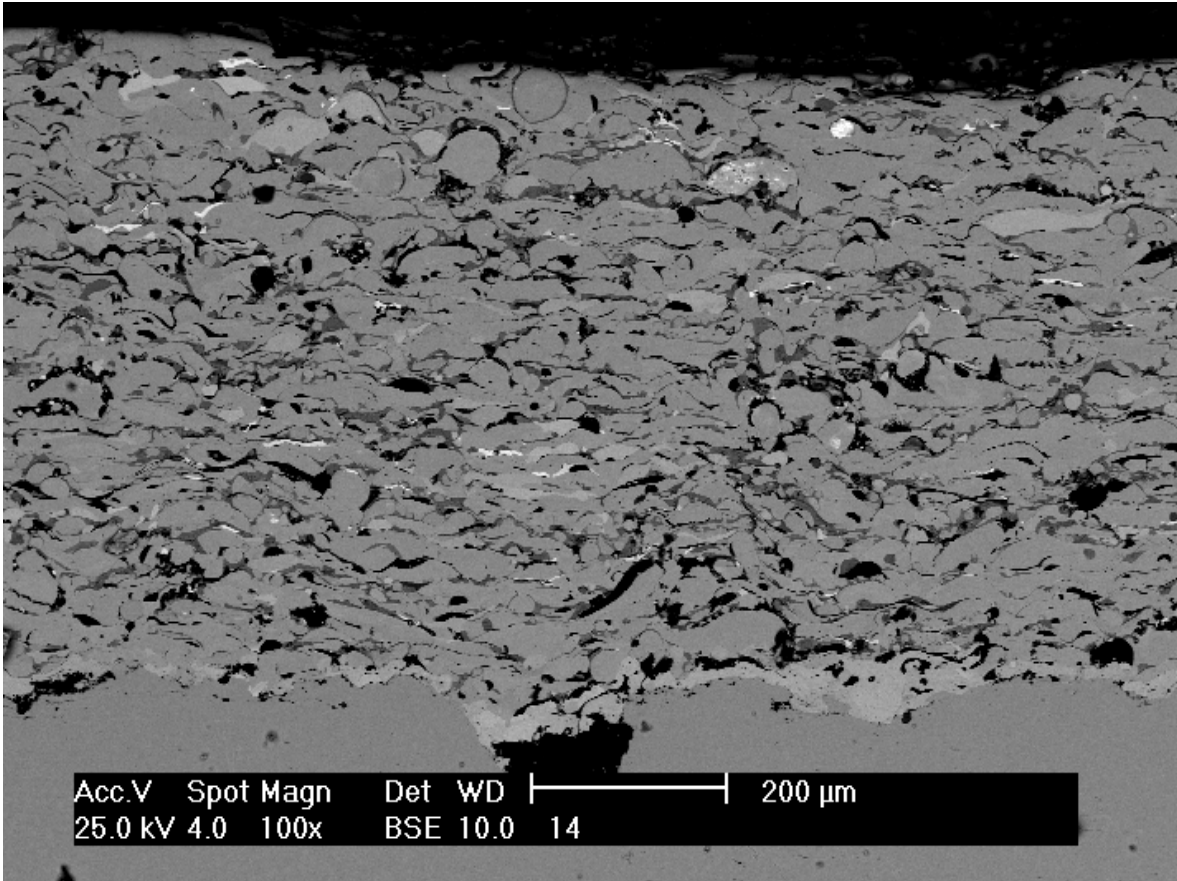


**Micrografía del recubrimiento.**

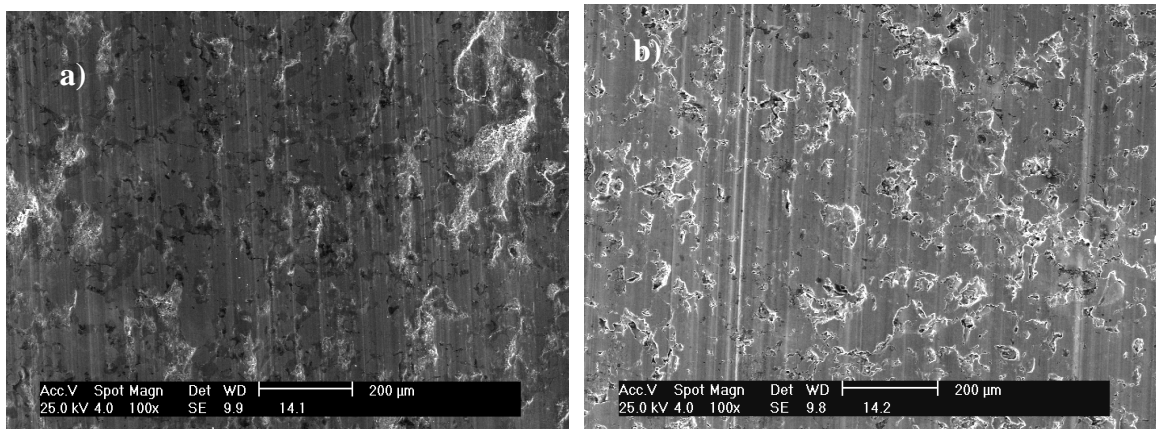


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICION 14:**

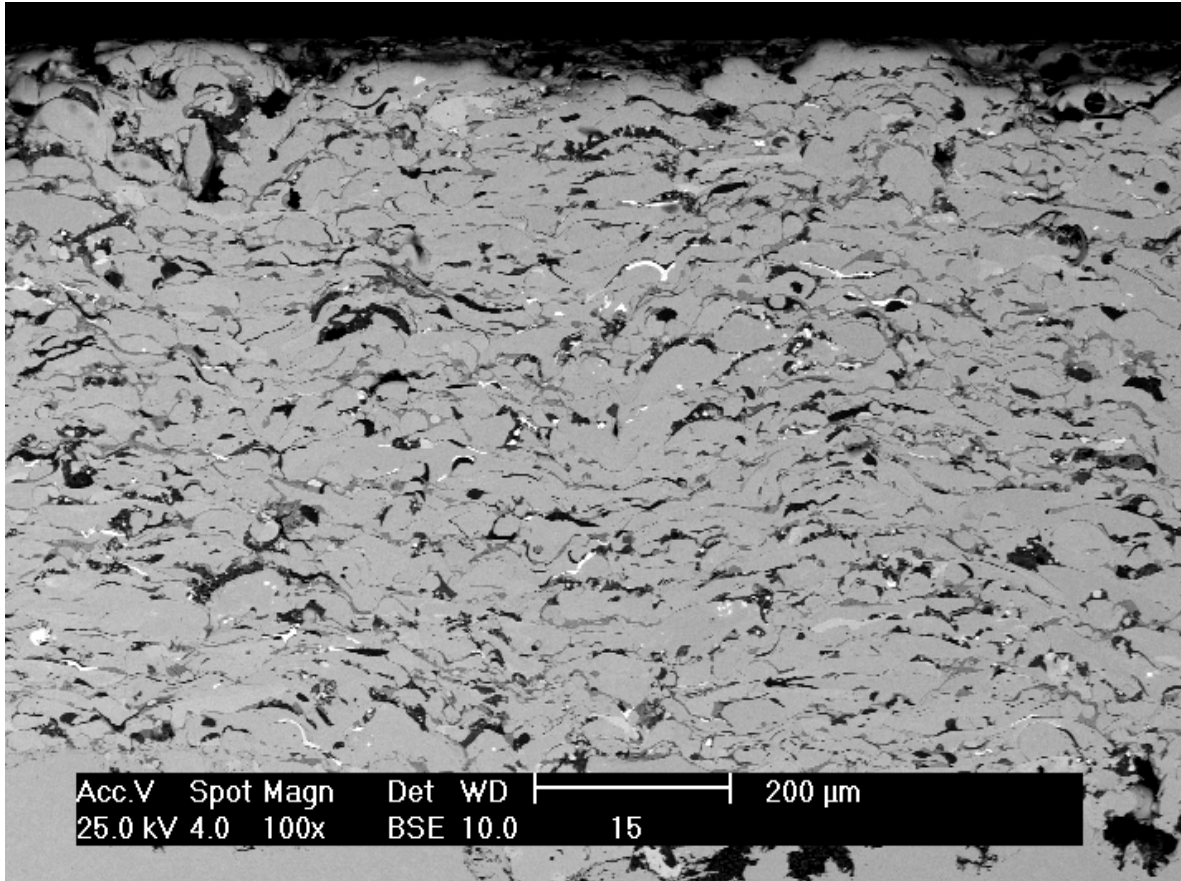


**Micrografía del recubrimiento.**

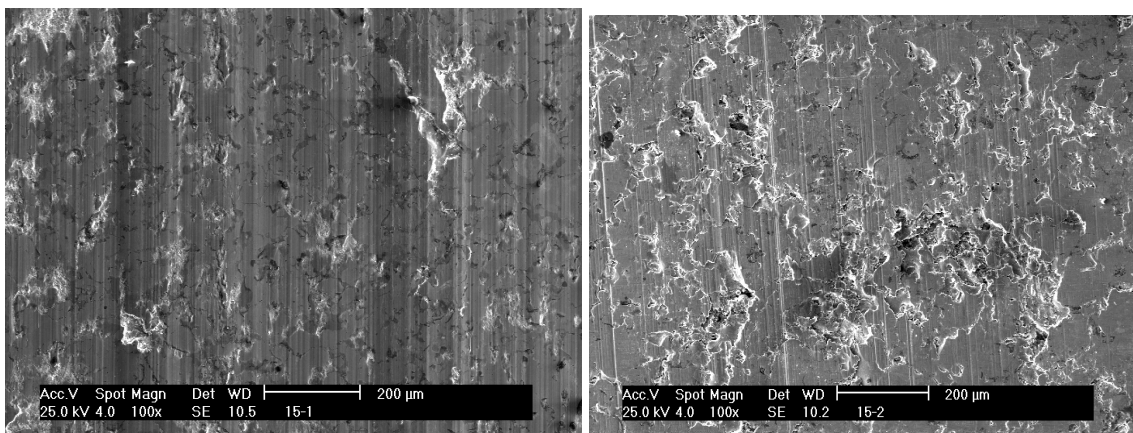


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICION 15:**

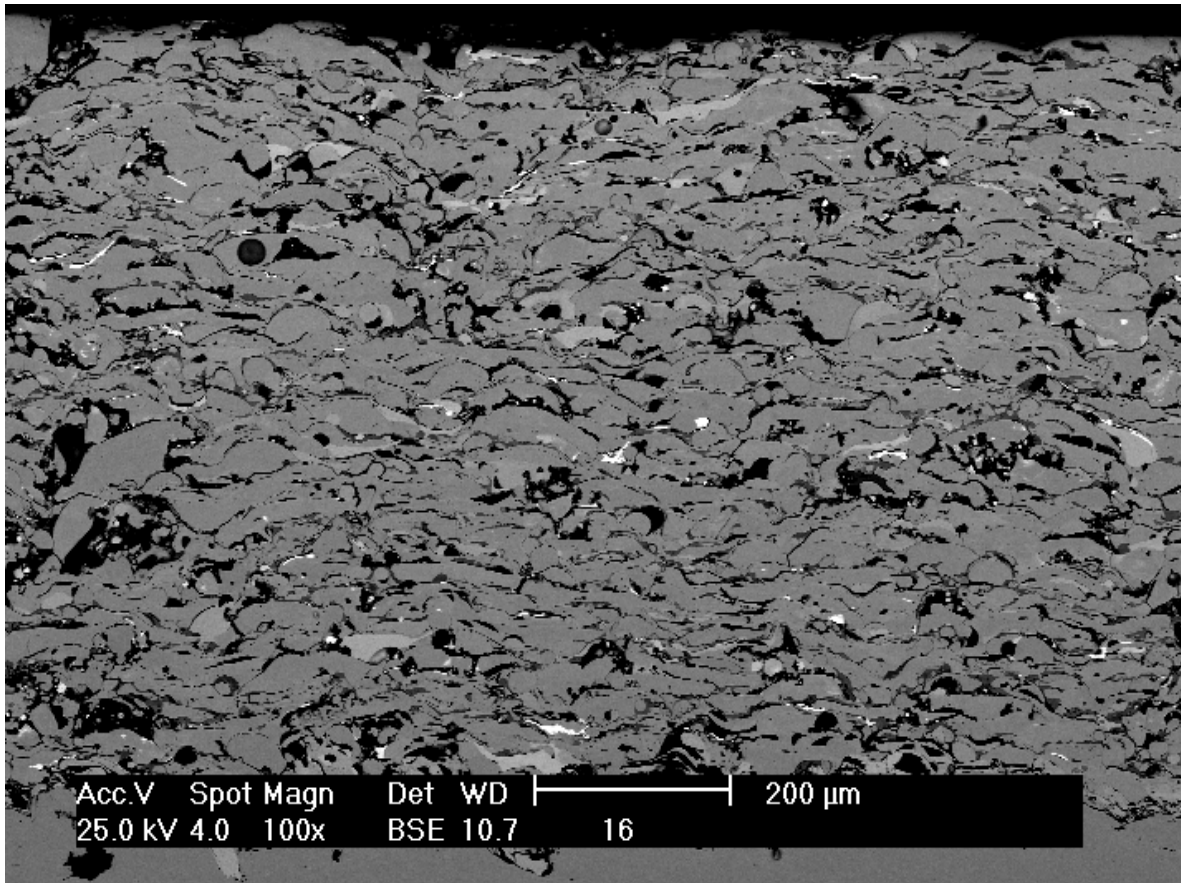


**Micrografía del recubrimiento.**

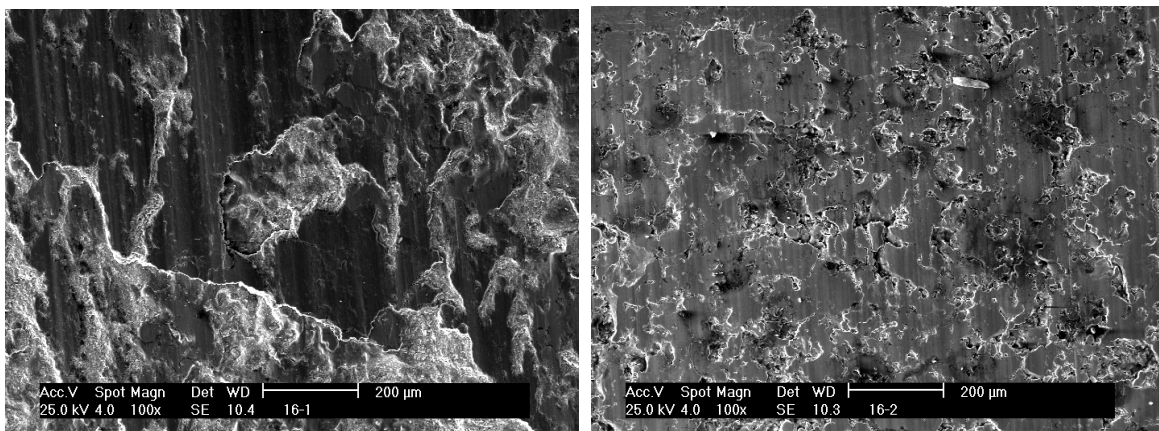


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICION 16:**

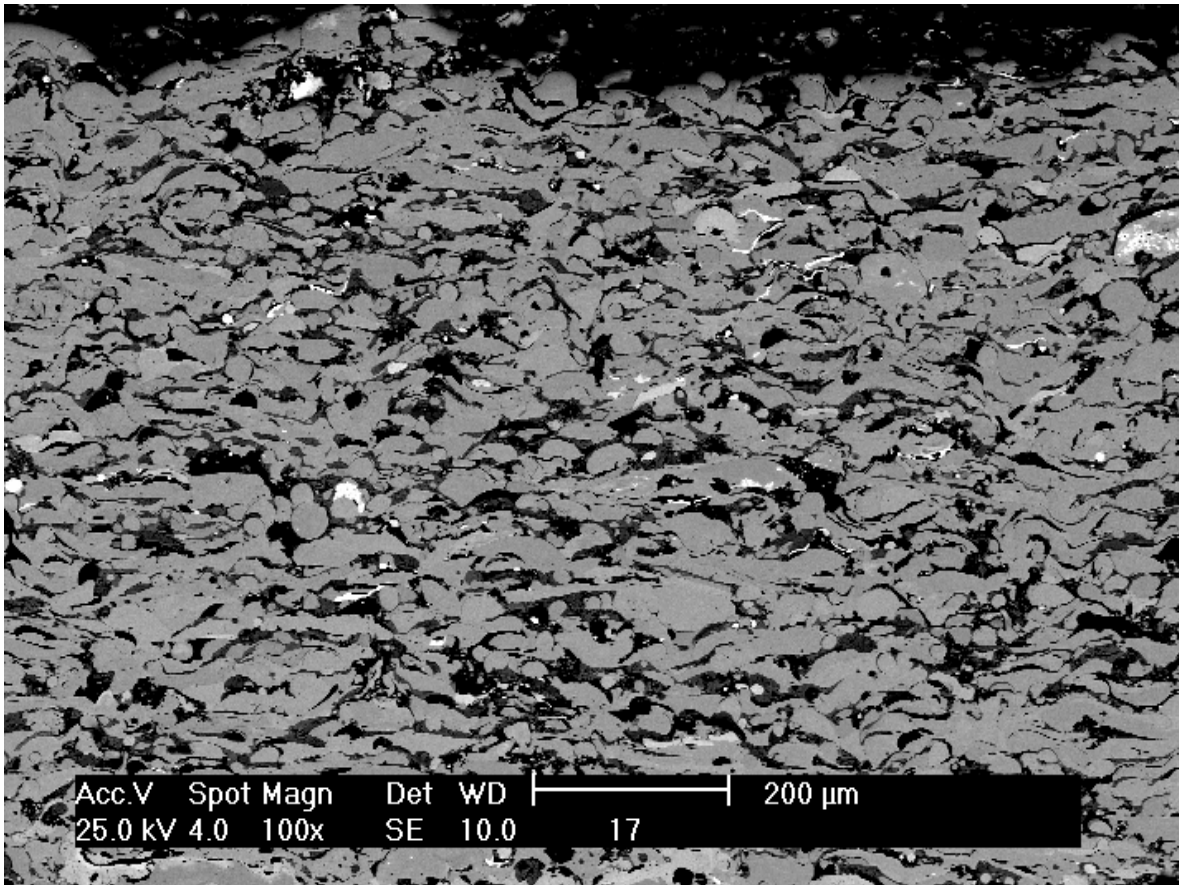


**Micrografía del recubrimiento.**

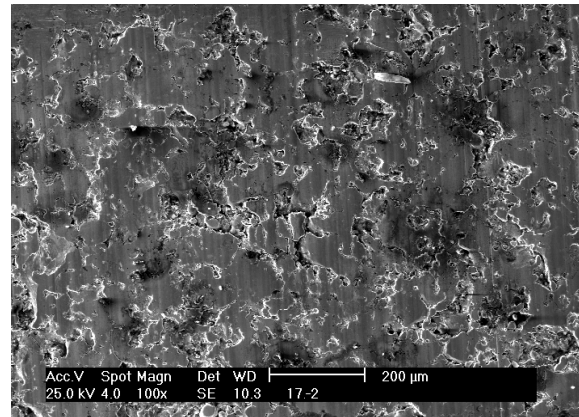
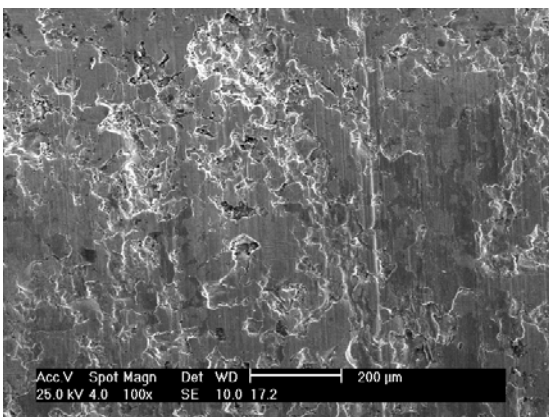


**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

**CONDICION 17:**



**Micrografía del recubrimiento.**



**Superficie de desgaste en electrones secundarios: a) Sin lubricación y b) Con lubricación**

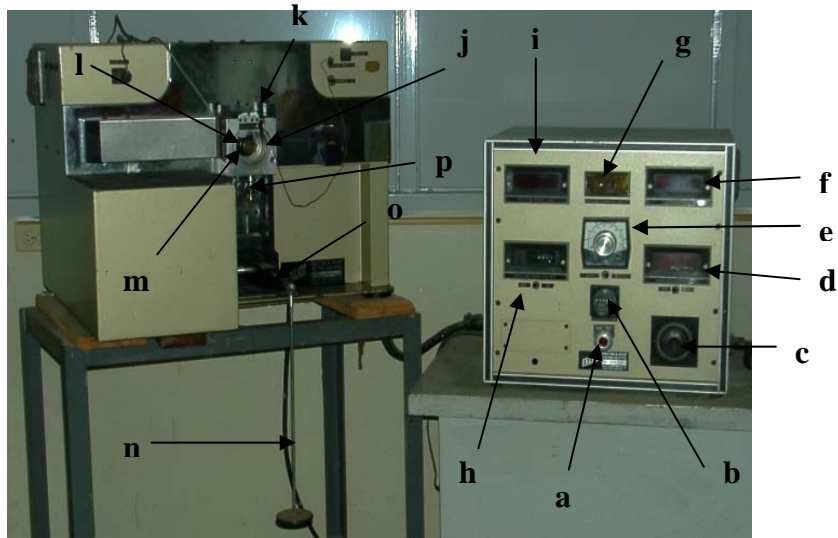


## ANEXO G

### Calibración de la máquina FALEX

Los ensayos se realizan en un tribómetro para simulación de desgaste en la configuración bloque sobre anillo (Block on Ring).

La interacción bloque – anillo se lleva a cabo sin y con lubricación en la máquina Falex Alfa LFW – 1, como se esquematiza en la Figura:



**Máquina Falex Alfa LFW - 1.**

Componentes de la máquina de ensayo:

- a. Interruptor
- b. Contador mecánico de tiempo de funcionamiento
- c. Selector de velocidad de rotación del eje
- d. Contador digital de ciclos
- e. Controlador e indicador de temperatura del baño de aceite
- f. Indicador digital de las r.p.m.
- g. Indicador digital de la temperatura (°C)
- h. Interruptor automático de la fuerza de roce
- i. Indicador digital de la fuerza de roce (Libras)
- j. Cámara de ensayos
- k. Dial indicador de la penetración (in  $10^{-4}$ )
- l. Cavidad para el alojamiento del anillo
- m. Soporte para alojar las pesas

- n. Brazo palanca
- o. Llave de drenaje para la limpieza de la cámara

### **Calibración de la máquina.**

1. Accionar el interruptor “a”. Espere durante 15 minutos para estabilización del instrumento.
2. Una vez hecho esto, quite la tapa plástica del indicador digital de la fuerza de roce “i”. Ajuste el cero con el tornillo de la derecha de los tres de la esquina inferior derecha. Accione el interruptor 7 hacia la derecha y debe aparecer el número de calibración eléctrica indicado en la parte interior de la tapa. Si no es así, ajuste el tornillo central (ganancia) de los tres de la esquina inferior derecha del medidor. El tornillo de la derecha es el cero (el instrumento mide una vez por segundo). Deje el interruptor 7 hacia la izquierda, ajuste el cero y vuelva a ajustar el número de calibración.
3. Coloque el porta pesas de calibración y compense a cero su efecto (-0,3 lbf). Coloque pesas en el soporte y ajuste el tornillo central de ganancia para la lectura correcta.
4. Retire el porta pesas de calibración, ajuste el instrumento a cero y accione el interruptor número 7 para obtener una lectura de calibración en el instrumento que pueda diferir del número de calibración inicial de fábrica, debido a cualquier cambio en el sistema de fricción. Anote el nuevo número de calibración. Accione el interruptor número 7 en cualquier momento para controlar la calibración del instrumento (el nuevo número de calibración).
5. Instale el anillo en el eje cónico de la máquina “m” con la arandela de seguridad y la tuerca. Apriete manualmente, de tal manera que una de las seis esquinas de la tuerca apunte hacia arriba, apretando con la arandela. (Para lograr esto: Coloque cuidadosamente el anillo en el eje hasta que calce). Inserte la arandela y apriete la tuerca suavemente hasta simplemente apoyarla contra la arandela, sin ejercer “ningún tipo de presión”. Haga girar cuidadosamente la arandela, sin tocar la tuerca ni el anillo con los dedos, en el sentido horario hasta que sienta que esta lo más apretado posible. Si ninguna de las esquinas de la tuerca apunta

hacia arriba (90°) haga girar el eje con la llave Allen grande. Coloque la llave especial (placa rectangular con agujero hexagonal y una pequeña proyección perpendicular en uno de sus vértices) en la tuerca y permita que la oreja a la derecha de la llave se apoye lateralmente en el soporte del espécimen empujándolo hacia la izquierda. Use la llave Allen grande y apriete en el sentido antihorario hasta que el medidor de fuerza de roce “i” indique 50 a 60 lbf.

6. Instale el bloque de manera que se apoye sobre el anillo “l”, alcanzando su posición más posterior. El agujero para el termopar debe quedar hacia fuera, con una pequeña carga en la palanca o una carga de 5 lbf. Apriete ligeramente el tornillo de la derecha del soporte, para asegurar el bloque en su lugar. Quite la pesa (este peso depende de la carga a aplicar en el ensayo, se recomienda un tercio de las pesas aplicar).
7. Al tener el bloque y el anillo montados, se coloca un papel en la parte inferior de la cámara “j”, en la que van a caer los residuos del desgaste.
8. Ajuste el contador digital de ciclos “d” y el reóstato o selector de velocidad de rotación del eje “c” a la velocidad prevista para el ensayo, manteniendo el brazo palanca “o” levantado, con el fin de no aplicar todavía la carga.
9. Se colocan las pesas en el soporte “n”, teniendo en cuenta que, debido a la longitud del brazo palanca, estas deben ser 1/10 de la carga que se desea aplicar al bloque.
10. Aplique la carga bajando el brazo palanca “o”, para evitar choques.
11. Durante el ensayo se toman lecturas de temperaturas en el centro del bloque mediante el indicar digital de temperatura “g”, y de fuerza de roce mediante el indicador digital de fuerza de roce “i”. La lectura de penetración no se tomó, ya que el dial de penetración “k” se encuentra dañado.
12. En los ensayos definitivos, posterior a los ensayos previos, se tomaron lecturas tanto de temperatura como de fuerza de fricción cada 200 ciclos hasta 1.200 ciclos, después hasta 1.500, y posteriormente cada 500 ciclos hasta los 5.000 ciclos.
13. Al finalizar el ensayo, se retira el bloque y el anillo y cuidadosamente mediante una escobilla especial se retiran restos de las partículas de desgaste en ambas

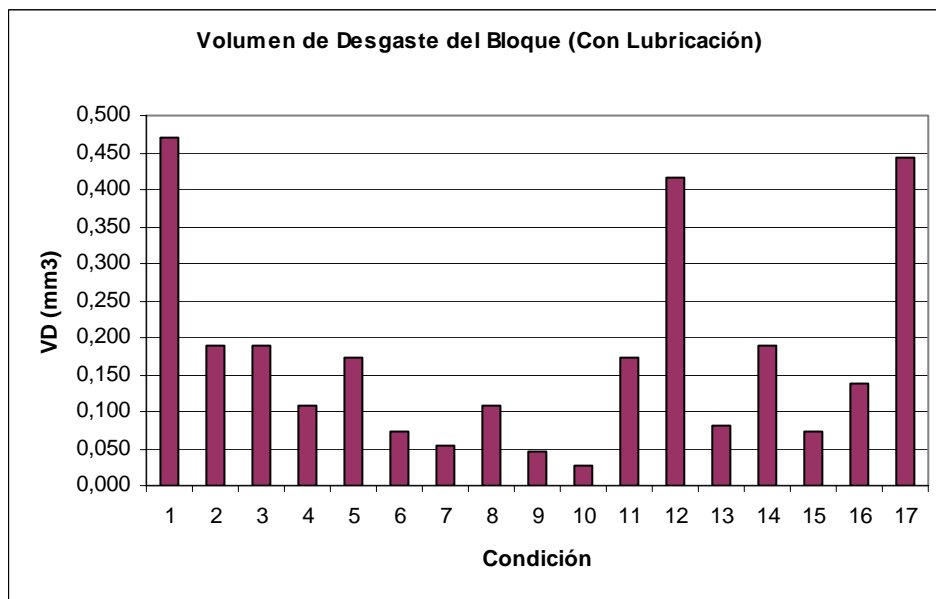
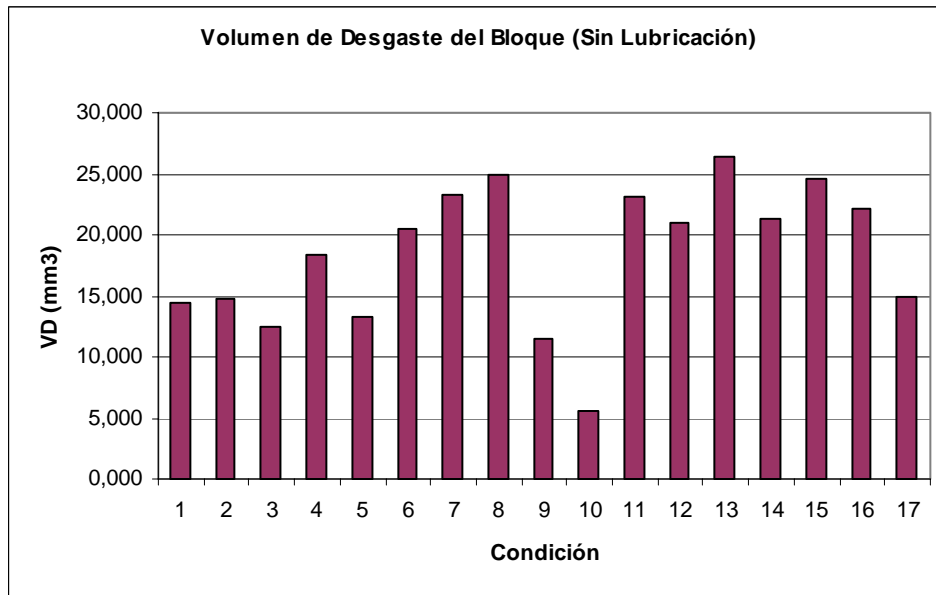
piezas para luego ser guardadas en sus respectivos envoltorios. Posteriormente el bloque y el anillo son nuevamente pesados en la balanza analítica y finalmente depositado en el desecador, mientras se les realiza el análisis de microscopía electrónica.

14. Para los ensayos con lubricación, se debe colocar los anillos de goma en el canal circular de la cámara y posteriormente atornillar la tapa frontal plástica transparente, para finalmente colocar los 100 ml de aceite mineral Havoline SJ 10W - 30 para motor.
15. Prelubricación de las superficies del bloque y del anillo sin carga a 10 r.p.m. durante 5 segundos.
16. Los ensayos efectuados con una carga constante de 1066,667 N (240 lb – f) aplicada sobre el bloque, con una velocidad de rotación de 0,1 m/s (50 rpm) y una distancia deslizada de 549,78 m (5000 ciclos), punto en el cual la máquina deja de funcionar automáticamente por medio de un dispositivo que permite detener la máquina cuando se alcanza el número de ciclos estipulado.

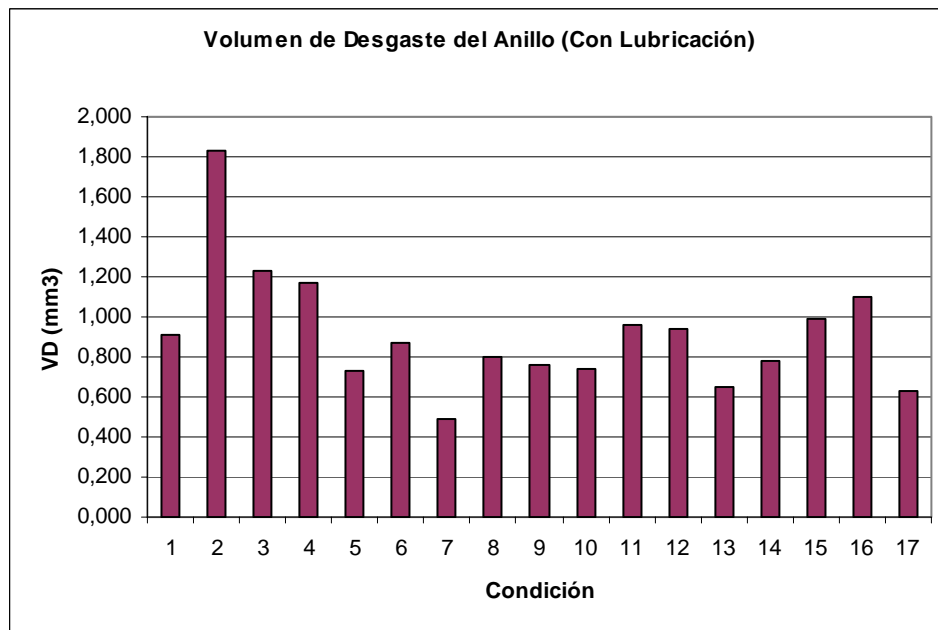
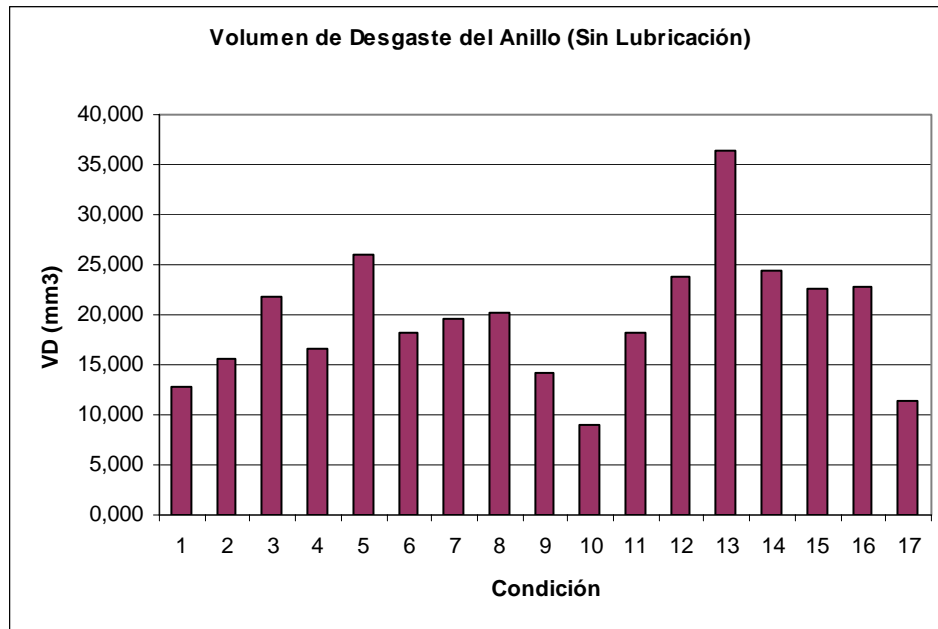
# ANEXO H

## Volumen de Desgaste

- **Volumen de Desgaste del Bloque:**

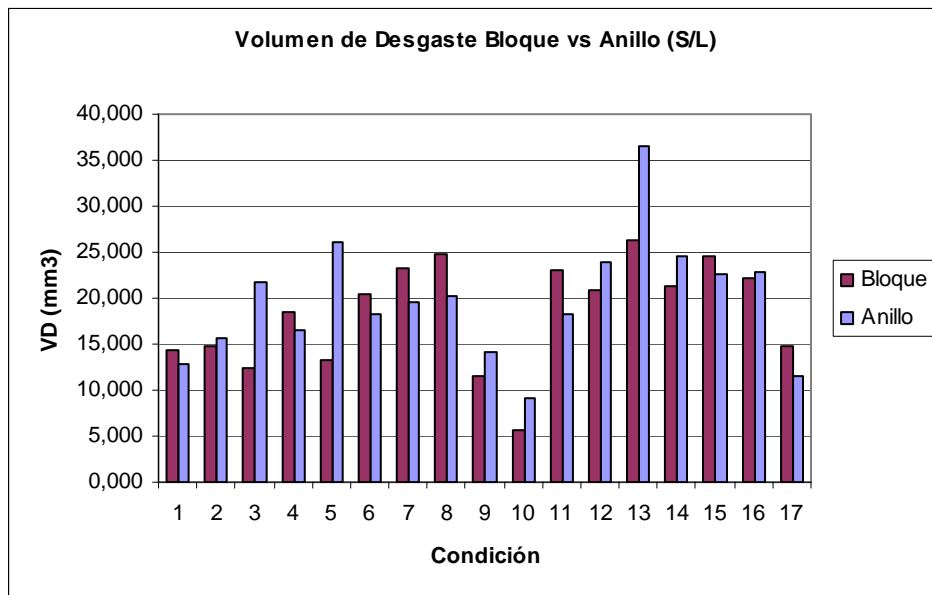
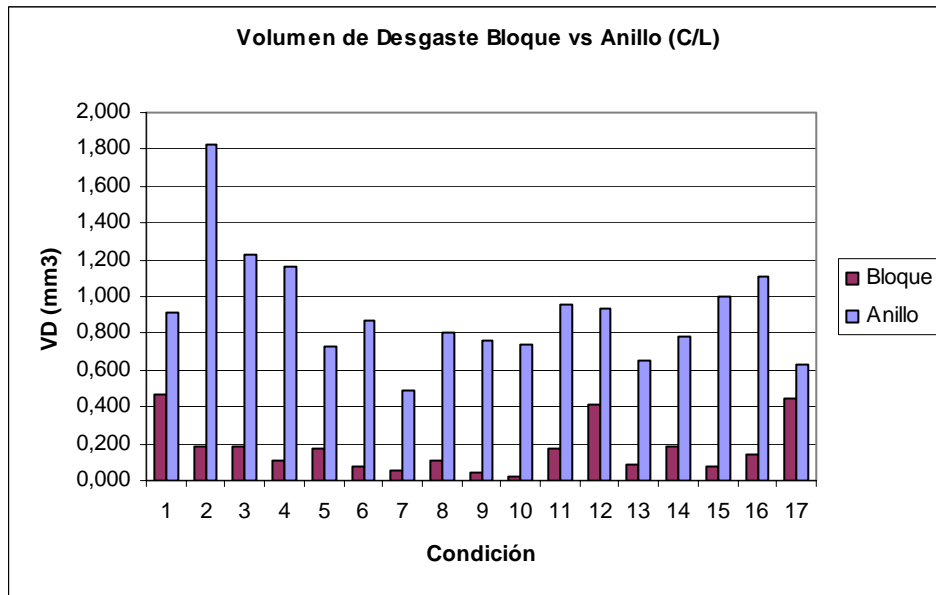


- **Volumen de Desgaste del Anillo:**





- **Volumen de Desgaste del Bloque vs. Anillo:**



**ANEXO I**  
**Tablas ANOVA**

- ANOVA para tasa de desgaste:

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Dist_ Rociado _m	5,83615E-9	1	5,83615E-9	0,09	0,7725
B:Rel O_F	2,78243E-9	1	2,78243E-9	0,04	0,8414
C:Presión Alimenta	1,85834E-7	1	1,85834E-7	2,97	0,1457
D:Gas Protector _P	6,4052E-9	1	6,4052E-9	0,10	0,7621
INTERACTIONS					
AB	5,16949E-8	1	5,16949E-8	0,83	0,4054
AC	4,52897E-8	1	4,52897E-8	0,72	0,4340
AD	8,89847E-8	1	8,89847E-8	1,42	0,2868
BC	7,44407E-10	1	7,44407E-10	0,01	0,9174
BD	7,54365E-8	1	7,54365E-8	1,20	0,3225
CD	2,97763E-11	1	2,97763E-11	0,00	0,9835
RESIDUAL	3,13286E-7	5	6,26572E-8		
TOTAL (CORRECTED)	7,76323E-7	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

#### The StatAdvisor

The ANOVA table decomposes the variability of Tasa de Desgaste into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since no P-values are less than 0,05, none of the factors or interactions have a statistically significant effect on Tasa de Desgaste at the 95,0% confidence level.

- ANOVA para microdureza:

### Analysis of Variance for Micro - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Dist_ Rociado _m	213,891	1	213,891	0,05	0,8387
B:Rel O_F	2701,4	1	2701,4	0,58	0,4805
C:Presión Alimenta	7,42562	1	7,42562	0,00	0,9697
D:Gas Protector _P	599,026	1	599,026	0,13	0,7344
INTERACTIONS					
AB	4163,48	1	4163,48	0,89	0,3876
AC	599,026	1	599,026	0,13	0,7344
AD	303,631	1	303,631	0,07	0,8086
BC	1795,64	1	1795,64	0,39	0,5617
BD	9355,73	1	9355,73	2,01	0,2154
CD	1130,64	1	1130,64	0,24	0,6429
RESIDUAL	23265,5	5	4653,11		
TOTAL (CORRECTED)	44135,4	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

### The StatAdvisor

The ANOVA table decomposes the variability of Micro into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since no P-values are less than 0,05, none of the factors or interactions have a statistically significant effect on Micro at the 95,0% confidence level.