

***TRABAJO ESPECIAL DE GRADO***

***EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN  
RECUBRIMIENTO DEPOSITADO POR ROCIADO TERMICO (HVOF).***

***TUTOR ACADEMICO:***

***Prof. MARIA RODRIGUEZ DE PRATO.***

***PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
POR LOS BACHILLERES:***

***FERRARA A., SALVADOR  
PEREZ R., RAFAEL P.***

***PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO.***

***CARACAS, 2.001***

## INDICE GENERAL

	Pag.
<b>PORTADA</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>IV</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>11</b>
<b>I FUNDAMENTO TEORICO</b>	<b>18</b>
<hr/>	
1.1.- El rociado térmico	19
1.2.- Tipos de procesos de rociado térmico	21
1.2.1.- Rociado térmico por Arco Eléctrico	22
1.2.2.- Rociado térmico por Plasma	22
1.2.3.- Rociado térmico por Llama	23
1.3.- Tratamientos térmicos	25
1.3.1.- Tratamiento térmico por Llama	26
1.3.2.- Otros tratamientos	26
1.4.- Aleaciones Base Níquel	27
1.5.- Teoría del Desgaste	28
1.6.- Tipos de Desgastes	29
1.6.1.- Desgaste Adhesivo	30
1.6.2.- Desgaste Abrasivo	30
1.6.3.- Desgaste Corrosivo	31
1.6.4.- Desgaste por Fatiga Superficial	31
1.6.5.- Desgaste Erosivo	31
1.7.- El fenómeno de la erosión	32
1.8.- El fenómeno de la abrasión	37

	Pag.
<b><u>II METODOLOGIA EXPERIMENTAL</u></b>	<b>44</b>
2.1.- Material de las probetas	45
2.2.- Preparación Superficial de las Probetas	46
2.3.- Rociado térmico de las Probetas	47
2.4.- Aplicación del Tratamiento Térmico	48
2.5.- Ensayo de Erosión	49
2.6.- Ensayo de Abrasión	52
2.7.- Ensayo de Desgaste Deslizante (Pin on Disk)	55
2.8.- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microdureza	57
2.8.1.- Preparación de las muestras	57
2.8.2.- Microscopía Electrónica de Barrido	59
2.8.3.- Medición de la Microdureza	59
2.9.- Determinación de la rugosidad	60
<b><u>III ANALISIS Y RESULTADOS</u></b>	<b>61</b>
3.1.- Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido	62
3.2.- Análisis de la Microdureza	64
3.3.- Resultados de la Rugosidad Superficial	65
3.4.- Análisis del Ensayo de Erosión	67
3.5.- Análisis del Ensayo de Abrasión	74
3.6.- Análisis del Ensayo de Desgaste Deslizante	79
<b><u>IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u></b>	<b>90</b>
4.1.- Conclusiones	91
4.2.- Recomendaciones	93

<b>V REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>94</b>
-------------------------------------	-----------

---

<b>VI ANEXOS</b>	<b>100</b>
------------------	------------

---

## INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.- Variación del número de Best con el tipo de daño	34
Tabla 2.- Valores de K calculados de tasas de erosión de datos publicados	36
Tabla 3.- Composición Química de la aleación Colmonoy 88 (% en peso)	46
Tabla 4.- Parámetros del Proceso HVOF	48
Tabla 5.- Microdureza Vickers	64
Tabla 6.- Rugosidad Promedio	66
Tabla 7.- Pérdida de Peso de muestras erosionadas	67
Tabla 8.- Tasa de Erosión	68
Tabla 9.- Pérdida de Volumen de diferentes aleaciones	75
Tabla 10.- Coeficientes de Fricción	80

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.- Esquema de un sistema de rociado térmico por HVOF	24
Figura 2.- Morfología de un recubrimiento rociado térmicamente	25
Figura 3.- Tipos de cortes producidos por el impacto de las partículas	37
Figura 4.- Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión	39
Figura 5.- Influencia del contenido de carbono en la resistencia a la abrasión	40
Figura 6.- Geometría y dimensiones (en mm) de las probetas	45
Figura 7.- Muestras Granalladas	47
Figura 8.- Rociado Térmico de las muestras utilizando una pistola JP-5000	47
Figura 9.- Tratamiento Térmico de las muestras	49
Figura 10.- Banco de ensayo de Erosión	50
Figura 11.- Balanza Analítica	53
Figura 12.- Banco de ensayo de Abrasión	54
Figura 13.- Geometría del Tribosistema “Pin on Disk”	55
Figura 14.- Tribómetro	55
Figura 15.- Cortadora de precisión	57
Figura 16.- Moldes para embutir en frío	58
Figura 17.- Equipo de plato giratorio	58
Figura 18.- Microscopio Electrónico	59
Figura 19.- Microdurómetro	59
Figura 20.- Rugosímetro	60
Figura 21.- Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra como rociada	62
Figura 22.- Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra tratada térmicamente	63
Figura 23.- Microdureza Vickers de diferentes materiales	65

Figura 24.- Valores de Rugosidad	66
Figura 25.- Pérdida de Peso de las muestras ensayadas	68
Figura 26.- Tasa de Erosión de las muestras estudiadas	69
Figura 27.- F.E.N. de las muestras estudiadas	70
Figura 28.- Factor de Erosión Normalizado de diferentes aleaciones estudiadas	71
Figura 29.- Muestras Erosionadas sin Tratamiento Térmico	72
Figura 30.- Muestras Erosionadas con Tratamiento Térmico	74
Figura 31.- Pérdida Volumétrica de las muestras después del ensayo	75
Figura 32.- Pérdida Volumétrica de las muestras 90-10, comparadas con aleaciones estudiadas con anterioridad	76
Figura 33.- Muestra de la aleación 90%WC-12%Co y 10% Colmonoy 88 en estado como rociada después del ensayo abrasivo	77
Figura 34.- Muestra de la aleación 90%WC-12%Co y 10% Colmonoy 88 con tratamiento térmico después del ensayo abrasivo	78
Figura 35.- Coeficiente de fricción durante el ensayo	79
Figura 36.- Recorrido del pin sobre ambas muestras	80
Figura 37.- Muestra sin tratamiento térmico con evidencias de desgaste abrasivo	81
Figura 38.- Muestra con tratamiento térmico	82
Figura 39.- Morfología y perfilometría de la muestra en estado como rociado	84
Figura 40.- Morfología y perfilometría de la muestra con tratamiento térmico	85
Figura 41.- Huellas de desgaste del pin producida por el par tribológico de una muestra como rociada	87
Figura 42.- Huellas de desgaste del pin producida por el par tribológico de una muestra con tratamiento térmico	88
Figura 43.- Análisis puntual de EDX en zona de Fe adherido	89

## DEDICATORIA

*A mis padres, que con su amor me brindaron todo su apoyo y confianza,  
A mi hermano, que siempre me guió en todo momento,  
A mis tíos y padrinos: Salvatore y Lina, por ser mis segundos padres,  
A toda mi familia por permanecer unida en las buenas y en las malas,  
A mi futura esposa Ingrid, que me ayudó con su amor a ser lo que soy,  
A todos mis amigos por compartir los éxitos y fracasos,  
A Dios por regalarme la felicidad de culminar mi carrera.*

***Salvador Ferrara Alú.***

*A mis padres,  
A mis familias,  
A mis amigos.  
A la vida.*

***Rafael Paramaconi Pérez Regnault.***



## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros mas sinceros agradecimientos :

- A nuestra Tutora: **Prof. María de los Angeles Rodríguez de Prato**, por su invaluable apoyo y orientación durante la realización de este trabajo.
- A la empresa Plasmatec Ingenieros S.A., y al Ing. Andrea Scagni por brindarnos ayuda en la realización de los recubrimientos y de los tratamientos térmicos.
- A la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería, en especial al Departamento de Tecnología de Producción.
- Al laboratorio de Microscopía Electrónica del Instituto Universitario de Tecnología (I.U.T.), en especial al prof. Freddy Arenas, por su colaboración en la realización de la microscopía electrónica.
- A la Prof. Mariana Staia, por su colaboración en la realización de distintas tareas y ensayos necesarios para la culminación de este estudio.
- A los Laboratorios de Aluminio y Nuevos Materiales, de la escuela de Metalurgia, por su colaboración en la realización de la preparación metalográfica y el ensayo “pin on disk”, en especial al Prof. Crisanto Villalobos, Carlos Sánchez y Víctor Torres.
- A la empresa Bauxilum, por su gran aporte del material necesario para los ensayos erosivos.
- Al Sr. Cleofas Carvajal y a Reneo Carvajal por su desinteresada colaboración.
- A la Empresa Distribuidora y Acrílicos Fergold, en especial a Michele Ferrara por la facilitación de herramientas y equipos.
- A Alejandro Yllaramendy, por su apoyo incondicional.
- A Itziar Unzaga, por su aporte.
- A Verónica Revilla, por su tiempo.
- A Wilmer Colmenarez, por su ayuda.
- A la Prof. Mirian Regnault, por su colaboración y aporte.
- A la Prof. Omaira de Rosas, por brindarnos su ayuda y su valioso tiempo.
- A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de este Trabajo Especial de Grado.

## **RESUMEN**

Ferrara A., Salvador y Pérez R., Rafael P.

### **EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN RECUBRIMIENTO DEPOSITADO POR ROCIADO TERMICO (HVOF).**

**TUTOR ACADEMICO:** PROF. MARIA DE LOS A. RODRIGUEZ DE PRATO.

**TESIS. U.C.V. FACULTAD DE INGENIERIA. ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA, CARACAS, 2001. 126 PAGINAS.**

**Palabras claves:** Desgaste, Erosión, Abrasión, Rociado Térmico, Tratamiento Térmico, Pin on Disk.

El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar la resistencia al desgaste de un recubrimiento de una mezcla que contiene un 10% de una aleación Ni-Cr-B-Si-W, conocida comercialmente como Colmonoy 88 y un 90% de WC-12%Co depositado por rociado térmico. Un acero AISI 1020 certificado fue utilizado como sustrato. La mezcla fue depositada mediante la técnica de rociado térmico HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) utilizando para ello una pistola JP-5000. Para el tratamiento térmico posterior se utilizó una llama oxiacetilénica.

La evaluación de la resistencia al desgaste para este recubrimiento, se logró mediante el ensayo de erosión regido por la norma ASTM G76-83, el ensayo de abrasión según lo indica la norma ASTM G65-C y el ensayo de desgaste deslizante (pin on disk) bajo la norma ASTM G99-95<sup>a</sup>. Siendo reportados los resultados como lo indican dichas normas.

Las muestras luego de ser preparadas metalográficamente, fueron observadas a través de un microscopio electrónico, a fin de estudiar la superficie de desgaste y la microestructura. Otras de las propiedades medidas fueron la microdureza y la rugosidad.

Se determinó que la resistencia al desgaste, tanto erosivo como abrasivo aumentó con la aplicación del tratamiento térmico. La microdureza no se vio afectada al tratar térmicamente las muestras. La menor rugosidad y el menor coeficiente de fricción fueron presentados por las muestras tratadas térmicamente. La microscopía electrónica de barrido no evidenció densificación ni homogeneización de las fases, luego de la aplicación del tratamiento térmico.

## ***INTRODUCCION.***

Se ha hecho énfasis en el estudio del desgaste para encontrar la mejor manera de evitarla o por lo menos prolongar la vida útil de los elementos de máquina y así disminuir gastos por concepto de reparación y/o sustitución.

El desgaste es el desplazamiento del material de zonas que se encuentran en contacto hacia lugares libres de carga. Normalmente el desgaste no ocasiona fallas violentas pero puede traer como consecuencias: pérdida de potencia por fricción, el aumento del consumo de lubricante, la disminución del rendimiento de operación y en el peor de los casos el reemplazamiento de los distintos componentes desgastados.

No se puede generalizar sobre un solo tipo de desgaste, ni un material especial que resista todos los tipos de desgaste que pueden presentarse sino que por el contrario se debe estudiar cada fenómeno y material en particular, para así poder diseñar equipos que simulen condiciones especiales de desgaste y poder así seleccionar los materiales más idóneos para cada requerimiento.

Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste; éste fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento. Materiales metálicos, cerámicos, carburos, entre otros; son utilizados en la actualidad para reconstruir las piezas desgastadas, producir superficies resistentes al desgaste, a la corrosión y a la oxidación, reduciendo los costos de sustitución. Dentro de los procesos más utilizados a escala industrial para la reconstrucción de piezas desgastadas se encuentran la soldadura. Sin embargo, este proceso de recuperación produce una zona afectada por el calor que compromete la resistencia de la pieza, lo cual limita su uso.

Los recubrimientos obtenidos por inmersión, electrodeposición, implantación iónica, entre otros, también han sido utilizados para la recuperación de piezas, evitar el deterioro superficial y prolongar su vida útil. El proceso de rociado térmico, se viene utilizando para este fin desde hace más de 100 años pero es en los últimos veinte años, cuando ha ganado realmente terreno, debido al acelerado desarrollo tecnológico de los equipos utilizados para lograr los recubrimientos.

El rociado térmico es un proceso que consiste en proyectar partículas, las cuales han sido calentadas y aceleradas en una pistola de proyección, sobre un substrato previamente preparado. Un sistema básico de rociado térmico se encuentra generalmente conformado por una pistola de rociado, una fuente de poder o una consola para el control de gas y un alimentador de material de deposición. Los materiales de alimentación pueden encontrarse en forma de polvo o alambre.

Una de las técnicas de proyección térmica de más reciente desarrollo es la proyección térmica de alta velocidad conocida por sus siglas HVOF y ésta viene determinada por un proceso de combustión que tiene lugar en la cámara de la pistola de proyección. La capacidad de este proceso para producir recubrimientos de excelente calidad en lo que se refiere a porosidad, contenido de óxido, densidad y dureza (Wang, 1995) han permitido que éste haya sido exitosamente utilizado en la recuperación de numerosas piezas para gran variedad de industrias como lo son: petrolera, química, petroquímica, del papel y otros.

En numerosas aplicaciones una baja tasa de desgaste puede producir significativas ventajas técnicas y económicas lo cual ha sido en gran medida alcanzado mediante la aplicación de recubrimientos denominados "endurecedores" dentro de los cuales el carburo de tungsteno (WC) mezclados

con porcentajes variables de cobalto han otorgado los mejores resultados. El cobalto es utilizado como un enlazante de las partículas de carburo de tungsteno a fin de mejorar la cohesión y tenacidad del recubrimiento. Las propiedades de los recubrimientos de WC-Co se derivan precisamente del alto porcentaje de carburos duros enlazados con un metal dúctil. Sin embargo, ha sido reportado que estos recubrimientos no tienen un buen comportamiento frente a la erosión.

Ahmend y colaboradores (1997) indican que los recubrimientos termorociados a base de Carburo de Tungsteno y Cobalto (WC-Co) tienen muchas aplicaciones debido a la resistencia contra el desgaste deslizante, abrasivo y por rozamiento. Estos recubrimientos han mostrados aumentos en el tiempo de vida de componentes que trabajan en condiciones ambientales hostiles, como corrosión y abrasión. Estas características han capacitado a los recubrimientos rociados térmicamente para convertirse en una parte integral de la industria automotriz y aeronáutica.

En los últimos años algunas investigaciones han demostrado que la resistencia al desgaste de recubrimientos de WC-Co puede ser mejorada por la adición de aleaciones base níquel, las cuales forman fases endurecedoras cuando son depositadas y estos recubrimientos pueden ser tratados térmicamente para mejorar porosidad, cohesión y adhesión del mismo (Klisans 2000; Bangueses 2000).

El propósito principal de éste Trabajo Especial de Grado es estudiar el efecto sobre la resistencia al desgaste erosivo, abrasivo y deslizante de un recubrimiento logrado mediante una aleación 90% (WC-12%Co) y 10% de aleación Ni-Cr-B-Si-W (conocida comercialmente como Colmonoy 88) depositada por rociado térmico a través de la técnica HVOF y con tratamiento térmico posterior. La dureza, microestructura y rugosidad también fueron evaluadas.

## ***ANTECEDENTES.***

Los bachilleres Bangueses y Rodríguez (2000) utilizaron una mezcla 80% WC-12%Co y 20% Colmonoy 88, realizando un ensayo de erosión para tres ángulos de incidencia: 30°, 45° y 60°, bajo la norma ASTM G76-83. Determinaron el coeficiente de fricción mediante el ensayo de Pin on Disk, la microdureza y rugosidad del recubrimiento y concluyeron en su trabajo que la microdureza superficial no se altera con la aplicación del tratamiento térmico, sin embargo la resistencia al desgaste erosivo aumentó con la aplicación del tratamiento térmico y disminuyó el coeficiente de fricción. La microscopía electrónica de barrido (MEB) evidenció la densificación y distribución homogénea de las fases.

Los bachilleres Bavaresco y Klisans (2000) utilizaron una mezcla 80% WC-12%Co y 20% Colmonoy, realizaron ensayos de adhesión y abrasión. Determinaron que el recubrimiento tratado térmicamente presentó 40 veces más resistencia a la abrasión que el acero AISI 1020; además reportaron que la dureza no es directamente proporcional a la resistencia al desgaste. Según estos autores el tratamiento térmico no logró afectar los valores de dureza del recubrimiento pero creó una zona de difusión en la interfase substrato-recubrimiento, produciendo un anclaje metalúrgico, lo cual mejoraría la resistencia a la adhesión del recubrimiento. La misma no pudo ser reportada ya que la falla producida por el ensayo de adhesión siempre se produjo en modo cohesivo del epóxico.

Pinto y Rangel (1999) basaron su trabajo en el ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65 C. El ensayo no consistió en predecir la resistencia exacta de un material dado en un ambiente específico, sino en clasificar el rango de materiales ensayados en un orden relativo de méritos similar al que ocurriría en un ambiente abrasivo. Los materiales evaluados fueron un tipo de acero comercial del tipo AISI 4340 templado 52-54 RC y dos tipos de recubrimiento, depositados HVOF. Los

materiales rociados térmicamente fueron Carburo de Tungsteno 12% Cobalto (WC) y Colmonoy (NiWCrBSi), aplicados en un material base de acero AISI 4340. En orden, para el tiempo correspondiente a la prueba de 30 segundos, el material que presentó la menor pérdida volumétrica fue el carburo de tungsteno ( $0,3808 \text{ mm}^3$ ), seguido del Colmonoy 88 ( $3,0594 \text{ mm}^3$ ) y por último el acero templado AISI 4340 ( $5,5685 \text{ mm}^3$ ), en términos de proporción, la resistencia del recubrimiento de carburo de tungsteno fue 15 veces mayor que la del acero base y la del Colmonoy, 8 veces mayor .

Los bachilleres García y Redden (1998), estudiando las propiedades mecánicas y metalúrgicas de un recubrimiento depositado con aleación Colmonoy 88, determinaron que la microestructura superficial y la resistencia al desgaste erosivo aumentaron con la aplicación del tratamiento térmico posterior con llama oxiacetilénica para varios ángulos estudiados.

D. Guo y colaboradores (1995), concluyeron que los tratamientos térmicos proporcionan una distribución uniforme de las fases en el depósito incrementando de esta forma la densidad y dureza superficial.

Los bachilleres Malaver y Barbera (1995), diseñaron un equipo de ensayos erosivos, utilizando como material erodante Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y concluyeron que un buen acabado superficial del recubrimiento proyectado por rociado térmico favorece la resistencia al desgaste por erosión.

Fillion (1994), utilizando un recubrimiento de una aleación Ni-Cr-W-B-Si hoy día conocida comercialmente como Colmonoy 88, observó un incremento de 5 a 10 veces en el tiempo de servicio de piezas de maquinarias expuestas a desgastes.

Según L. Moskowitz (1992), los recubrimientos depositados por rociado térmico, comercialmente disponibles, se han visto limitados en sus aplicaciones contra la corrosión debido a la presencia de una interconexión entre la porosidad y los óxidos en el recubrimiento. El uso de cámaras de vacío o post-tratamiento pueden eliminar estos defectos, pero estos métodos son poco prácticos a grandes escalas.

Tu et. al. (1991) y Shieh et. al. (1.993), desarrollaron aleaciones base Níquel de alta dureza. Algunas de estas aleaciones contiene cantidades sustanciales de Boro y Silicio, disponiendo de la propiedad de ser autofundentes, es decir, que permiten la realización de un tratamiento térmico posterior al termorociado. A altas temperaturas ambos elementos reaccionan con óxidos para formar borosilicatos con un punto de fusión bajo los cuales forman escoria y protegen al resto de los elementos de la aleación del proceso de la oxidación.

Sobre la base de estos antecedentes radica la importancia de lograr la reducción del desgaste mediante la técnica de recubrimientos por rociado térmico de una mezcla a partir de WC-Co mezclado con Colmonoy 88.



## **1.- FUNDAMENTO TEORICO.**

### ***1.1.- El Rociado Térmico.***

La técnica del rociado térmico es una expresión que define un grupo de procesos en el cual se proyectan partículas de materiales metálicos o no metálicos, en condición de fundidas o semifundidas dentro de un rango plástico, siendo éstas atomizadas y aceleradas sobre un substrato, previamente preparado, para así formar el recubrimiento.

El material proyectado puede ser suministrado en forma de polvo, varilla, cordón o alambre; los mismos son introducidos a una pistola diseñada para tal fin, en la cual, una fuente de calor generada por un proceso de combustión o por la resultante de un arco eléctrico, pasan a un estado de fundidos o semifundidos, y son aceleradas y proyectadas a altas velocidades por gas comprimido hacia el substrato previamente preparado, aplastándose sobre el substrato y formando delgadas capas que se conforman y se adhieren a las irregularidades de la superficie y entre ellas mismas. Estas capas se van enfriando y consolidando, partícula por partícula y a través de varias pasadas se consigue finalmente el revestimiento.

Los recubrimientos logrados por rociado térmico son comúnmente utilizados en la industria; en áreas como mantenimiento, producción, biomedicina, entre otras; y éstos pueden ser tan blandos como el Babbit (aleación estaño-cobre) utilizados en superficies antifricción (cojinetes de cigüeñales) o tan duros como el carburo de tungsteno, siendo estos utilizados en superficies antidesgaste (herramientas de corte).

Virtualmente cualquier material puede ser rociado térmicamente, con tal de que no se descomponga antes de fundirse. (Klisans, 2000).

Por otra parte, esta técnica permite aplicar revestimientos sin llegar a calentar significativamente la superficie del sustrato. Por lo general esta temperatura se encuentra por debajo de los 200 °C (400 F) eliminándose así los posibles cambios metalúrgicos y las posibles distorsiones en el sustrato. (Bangueses y Rodríguez, 2000).

El enlace entre el sustrato y el recubrimiento (adhesión), y entre el mismo material proyectado (cohesión), generalmente se realiza por medio de enlaces mecánicos, metalúrgicos y químicos. El enlace mecánico es el principal método de adherencia de material y el sustrato, por lo cual es necesario tener en cuenta varios factores para lograr una buena adherencia :

- Material para el recubrimiento.
- Rugosidad de la superficie.
- Limpieza de la superficie.
- Temperatura a lo largo del proceso.
- Velocidad de las partículas.

Para lograr un buen recubrimiento rociado térmicamente, es necesario estudiar ciertos factores como son :

- Propiedades del material a rociar.
- Propiedades del sustrato.
- Interacciones del sistema de deposición con el material de aporte.
- Interacción entre el material de aporte y el sustrato.
- La atmósfera en que se desarrolle el proceso.

- Preparación del sustrato.

El material de aporte y el tipo de sustrato son los factores más determinantes para la preparación de superficies, los materiales aportados por el método de rociado térmico no incrementan la resistencia del sustrato. (American Welding Society).

Es necesario preparar el sustrato para el proceso de rociado térmico, para lo cual es necesario limpiarlo de contaminantes como son: pintura, aceite, etc.; luego de haber cumplido este paso, se deben manipular con una gran pulcritud y cuidado.

El siguiente paso es el granallado abrasivo; este proceso es el encargado de eliminar los óxidos presentes y otorgarle rugosidad al sustrato, necesario para lograr una efectiva adherencia. Es importante mantener los abrasivos limpios, secos y libres de contaminantes.

Es importante resaltar, que luego de esta preparación del sustrato, es necesario una casi inmediata aplicación del rociado térmico, ya que se podría experimentar oxidación en la superficie, entre otros contaminantes, y lograr así una menor adherencia.

### ***1.2.- Tipos de procesos de Rociado Térmico.***

A continuación se expone la clasificación del rociado térmico según el sistema de proyección y la fuente de energía :

### *1.2.1.- Rociado térmico por Arco Eléctrico.*

El material de aporte empleado mediante esta técnica es en forma de alambre. El calor necesario para la fusión es generado por el arco eléctrico creado entre los dos alambres corto-circuitados. Las partículas fundidas se atomizan y se aceleran sobre la pieza que se recubre por medio de aire a presión o algún gas inerte (Torelliz, 1994).

Con este método se alcanza una excelente adherencia y una baja porosidad; y los costos son sumamente bajos, comparados con los procesos de combustión similares. Teniendo como limitante que el material de deposición debe ser maleable para ser convertido en alambre conductivo.

### *1.2.2.- Rociado Térmico por Plasma.*

El plasma puede verse como un gas ionizado, separado total o parcialmente de sus electrones. Este método se logra mediante la aplicación de alta energía al gas seleccionado.

Los componentes del plasma (núcleos y electrones) tienen fuertes cargas eléctricas opuestas, haciendo que este sea sumamente inestable y con tendencia a reconstruir su estado molecular. En el proceso de reconstrucción se libera gran parte de la energía utilizada. Esta liberación se manifiesta con una llama de muy alta energía que puede alcanzar velocidades hasta 3.000 m/s y temperaturas cercanas a los 20.000 °C .

La unidad básica de este equipo es la pistola a través de la cual se alimenta el gas seleccionado. Este gas se somete a la acción de un arco eléctrico (alrededor de 80 Kw), convirtiéndolo en un plasma. Cuando sale por la boquilla regresa a su estado molecular, liberando su energía por medio de la llama de plasma.

Al punto donde se forma la llama, llega el suministro del polvo que se va a deponer, el cual es fundido y acelerado por la intensa energía liberada en el proceso. Este proceso tiene la desventaja de ser muy complejo y de un alto costo (Torelliz, 1994).

### *1.2.3.- Rociado térmico por llama.*

Este grupo se refiere a los procesos en los que el material de alimentación es calentado en una cámara de combustión, en la cual convergen un grupo de inyectores con la finalidad de proporcionar el combustible y el oxígeno.

Este grupo se divide según la velocidad que alcanza la partícula a depositar en el momento de ser proyectada sobre el sustrato :

- Rociado térmico por llama subsónica.

La velocidad de la partícula en este proceso es inferior a la del sonido (360 m/s). En este tipo de procesos debido a que la velocidad de impacto, es baja, existe poca energía cinética y los recubrimientos presentan una menor adhesión al sustrato comparada con otros procesos, además de presentar una porosidad elevada.

- Rociado térmico por llama supersónica.

En este proceso la partícula alcanza velocidades superiores a la del sonido. En este grupo podemos ubicar el HVOF.

Estos sistemas siguen básicamente el esquema presentado en la Figura 1:



**Figura 1.-** Esquema de un sistema de rociado térmico por HVOF.

La continua alimentación, tanto de los gases como del polvo, hacen que este proceso pueda incrementar la presión en la cámara, lo cual trae como consecuencia el aumento de la velocidad de la partícula, transformándose esta presión en energía cinética a través de una tobera convergente-divergente.

El proceso HVOF, ha tenido una influencia dramática en el campo industrial. Esta técnica se basa en el diseño de antorchas especiales en las que una llama comprimida experimenta libre expansión al terminar la boquilla de la antorcha, por eso se logra una dramática aceleración del gas, hasta valores cercanos a 4 veces la velocidad del sonido (Mach 4). Mediante una apropiada inyección del polvo de alimentación desde la parte trasera de la antorcha, y concéntricamente con la llama, las partículas también se someten a velocidades tan altas, que logran valores supersónicos. Por consiguiente, en el impacto hacia el sustrato, las partículas sufren un aplastamiento, y se unen bien al sustrato y a todas las demás partículas que se van depositando a su alrededor, produciéndose así un recubrimiento bien adherido, de alta densidad, comparable o superior al producido por el proceso de plasma inducido.

Sin embargo, debe notarse la limitación debido a la temperatura de llama de combustión relativamente baja. No obstante, los recubrimientos obtenidos por

HVOF tienen durezas y resistencias al desgaste superiores a los producidos por el rociado térmico por plasma (Bangueses y Rodríguez, 2000).

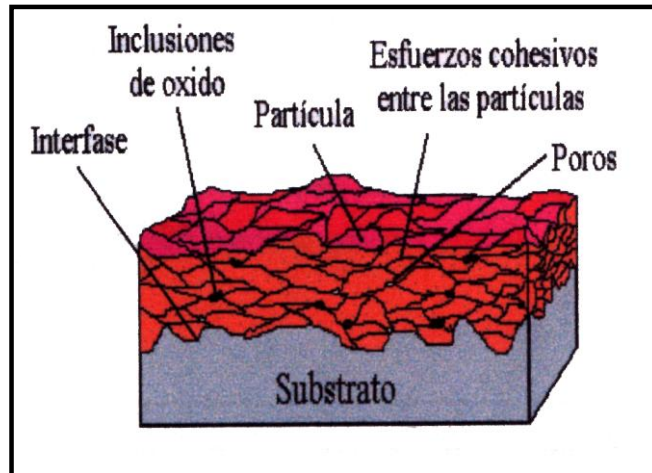


Figura 2.- Morfología de un recubrimiento rociado térmicamente.

### 1.3.- Tratamientos Térmicos.

El tratamiento térmico es en algunos casos, una forma de mejorar la calidad del recubrimiento, especialmente en las aleaciones autofundentes.

Durante el rociado térmico, el material de alimentación se aproxima a su temperatura de estado líquido, aplastándose y deformándose luego con el impacto. Los tratamientos térmicos producen una densificación de los recubrimientos, eliminando una cantidad considerable de poros y grietas. Un buen tratamiento térmico puede reducir considerablemente la porosidad del recubrimiento (García y Redden, 1998).

### *1.3.1.- Tratamiento térmico por llama.*

El tratamiento térmico por antorcha o llama, es uno de los más comúnmente realizados en la industria, se puede emplear llama oxiacetilénica o llama de oxipropano. La técnica varía con el tamaño de las piezas, forma y metal base. Una llama neutral es usada en las aleaciones base níquel y una reducción ligera de la llama es usada para aleaciones base cobalto, las partes cilíndricas se rotan a bajas velocidades con el fin de causar una menor pérdida de metal fundido debido a la fuerza centrífuga y otorgar a la superficie un buen acabado superficial.

El conjunto substrato - recubrimiento es gradual y uniformemente conducido a un color rojo mate (760 - 870 °C); la temperatura del recubrimiento es elevada al rango de fusión por un calentamiento progresivo de la banda delgada del recubrimiento, a través del tiempo, mientras la antorcha se mueve de un extremo a otro. La antorcha debe moverse a velocidad constante, lo suficientemente lenta para que el calor se extienda y lo suficientemente rápido para prevenir escoriaciones (García y Redden, 1998).

Para el control de la temperatura, se requiere que el operador tenga una amplia experiencia en este tipo de procesos; sin embargo el color de la superficie del recubrimiento, una buena apariencia reflectiva (brillo vidrioso o glass shine) y la ayuda de equipos para la medición de la temperatura (pirómetros), pueden ser utilizados como buenos y seguros indicadores.

### *1.3.2.- Otros Tratamientos.*

Existen otros tratamientos térmicos como son el tratamiento al horno, al vacío, eléctrico, inducido, entre otros, en los cuales se tiene la ventaja de controlar el calor, el enfriamiento y la atmósfera. Debido a la necesidad de una limpieza



severa de sus componentes, no son usados comúnmente como los de llama. Son apropiados para componentes planos, piezas con formas irregulares y recubrimientos muy delgados, entre otros. También puede ser usado en piezas muy largas donde la llama no pueda generar el calor suficiente para permitir al recubrimiento la temperatura de fusión.

El Tratamiento térmico inducido ha despertado gran interés, debido a su ahorro de tiempo de fusión y costo energético. Para piezas muy largas, este método reduce los niveles de calor y ruido, otorgando mayor comodidad al operador (García y Redden, 1998).

#### ***1.4.- Aleaciones Base Níquel.***

Los recubrimientos rociados térmicamente con aleaciones base níquel autofundentes cuentan con una alta gama de aplicaciones sobre partes de maquinarias y herramientas, mejorando su resistencia al desgaste abrasivo y/o erosivo.

Una de estas aleaciones es la conocida con el nombre de Colmonoy 88 (Fillion, 1994), la cual está compuesta por níquel, cromo, tungsteno, silicio, boro, carbono y hierro. Estos elementos reaccionan durante la fusión y están presentes en las partículas después del rociado térmico.

El boro y el silicio después del rociado térmico se distribuyen a todo lo largo del recubrimiento, obteniendo así una composición homogénea y evitando la acumulación de fases duras en una sola zona, lo cual haría que el recubrimiento fuese frágil. También provee a estas aleaciones de un comportamiento

autofundente, lo cual nos permite tratarlos térmicamente sin alterar su composición.

Los elementos níquel, cromo y carbono otorgan las propiedades primarias de los recubrimientos, dándole alta tenacidad y resistencia a la oxidación y resistencia a la abrasión (Bangueses y Rodríguez, 2000).

### ***1.5.- Teoría del Desgaste.***

Para poder entrar en el tema del desgaste en los materiales, se debe enunciar la ciencia que estudia todos los procesos que involucran este fenómeno. La TRIBOLOGIA es la ciencia y técnica que interpreta la totalidad de los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí, en presencia o ausencia de algún medio circundante. Etimológicamente el término griego "TRIBOS" significa frotar, rozar, luego la TRIBOLOGIA estudiará los mecanismos de fricción. A ésta se le incorporan una multitud de tópicos que incluyen la fricción, el desgaste, la lubricación y comportamiento de materiales vitales en la industria ingenieril. De tal manera que todo diseño mecánico, es afectado por estos tópicos, y sin la aplicación de una práctica tribológica firme, estos diseños serían incompletos.

El desgaste es una de las principales causas por la cual se hace necesario el mantenimiento industrial. Comparado con los otros dos problemas que ocasionan el remplazo de máquinas y/o componentes : fatiga y corrosión; el desgaste ha sido el menos estudiado y probablemente por esta razón, aún no sea posible predecirlo con exactitud.

El desgaste puede definirse como el deterioro al uso, siendo el mismo una falla inevitable, siempre y cuando existan cuerpos en contacto bajo carga y con movimiento relativo entre sí. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas; la fractura repentina no es aceptada universalmente como una forma de desgaste, pero podría ser considerada en el análisis de fallas por desgaste, debido a que los materiales más resistentes al desgaste son con frecuencia considerablemente frágiles y propensos a la fractura (García y Redden, 1998).

El desgaste trae, entre otras, consecuencias tales como :

- Reducción de la eficiencia de operación.
- Pérdida de la potencia por fricción.
- Incremento del consumo de lubricantes.
- Eventualmente conduce al remplazo de componentes desgastados.
- Obsolescencia de las máquinas en su totalidad.

En general, el desgaste usualmente es perjudicial, pero en determinados usos tal como, la preparación de superficies para la aplicación de recubrimientos, es beneficioso. Cabe destacar que, en ocasiones, pequeñas variaciones en la velocidad, carga, entre otras condiciones, pueden influir notablemente en la tasa de desgaste de una pieza.

### ***1.6.- Tipos de Desgastes.***

Existen diferentes tipos de desgastes, que habitualmente actúan en forma combinada. En función de una amplia variedad de criterios se han logrado definir cinco tipos primarios de desgaste :

### 1.6.1.- Desgaste Adhesivo.

Ocurre cuando dos superficies metálicas se deslizan entre sí bajo una presión local muy alta, creando uniones entre las irregularidades microscópicas o asperezas de la superficie de deslizamiento.

Subsecuentemente las fuerzas de deslizamiento fracturan las uniones separando el material de una superficie transfiriéndola a otra; esto resulta en la formación de pequeñas cavidades en una de las superficies y pequeñas proyecciones en la otra, que a su vez puede conducir a un daño adicional. El proceso podría también resultar en la formación de partículas desprendidas.

Se presenta típicamente en cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bocinas, bujes, engranajes, etc.

### 1.6.2.- Desgaste Abrasivo.

Es el desplazamiento del material de una superficie por contacto con proyecciones duras de otra superficie o con partículas duras que se mueven relativas a la superficie de desgaste. También existen abrasión cuando partículas duras son atrapadas entre dos superficies deslizantes y desgastan por rozamiento una o ambas superficies o pueden quedar empotradas en cualquiera de las superficies y desgastar por rozamiento la superficie opuesta.

El desgaste abrasivo puede ocurrir en estado seco o en presencia de líquidos. Se hace evidente en equipos de perforación, trituradoras, cuerpos de contacto deslizante, entre otros.

### 1.6.3.- Desgaste Corrosivo.

Es ocasionado por la reacción superficial de muchos metales con el medio que los rodea, lo cual conlleva a la formación de películas superficiales u óxidos. Por lo general estas partículas son duras y crean una capa protectora sobre la superficie, que llegan a crecer a un punto que se vuelven frágiles y por ende es propensa a ser removida dejando al material expuesto nuevamente para que el ciclo se vuelva a repetir. Esto trae como consecuencia que las partículas removidas se comporten como un tercer cuerpo y conducir a la aparición del desgaste abrasivo.

Este tipo de desgaste se puede observar en los cascos de los barcos, carrocerías de autos, y en general en superficies expuestas al medio ambiente.

### 1.6.4.- Desgaste por Fatiga Superficial.

Este tipo de desgaste, se produce por la aplicación continua de cargas que crean tensiones sobre las capas superficiales, y crean fisuras sobre los mismos, y a medida que las fisuras crecen ocurre un repentino desprendimiento de material.

### 1.6.5.- Desgaste Erosivo.

Es un desgaste abrasivo que envuelve pérdida de material de una superficie en contacto con un fluido que contiene partículas. El movimiento relativo entre la superficie y el fluido es esencial para este proceso, y las fuerzas de las partículas que causan el daño es aplicada por el fluido.

La distinción más clara entre la erosión y la abrasión es que, en la primera la fuerza ejercida por las partículas erosivas en el material, es debida a su desaceleración, mientras que en la segunda, la fuerza se aplica externamente y aproximadamente constante.

La erosión en la cual el movimiento relativo es casi paralelo a la superficie erosionada es llamada erosión abrasiva, mientras que la erosión en la cual el movimiento relativo es casi normal a la superficie erosionada es llamada erosión por choque.

Este fenómeno es característico observarlo en procesos industriales que involucran chorros de líquidos o gases con sólidos en suspensión, como son: compresores, turbinas, equipos para granallado y otros.

### ***1.7.- El fenómeno de la erosión.***

La erosión podría ser convenientemente citada como la masa o volumen perdida o removida de la superficie por la unidad de masa de las partículas erosionantes. Es recomendable usar el volumen, ya que el mismo nos permite evaluar la pérdida de materiales de diferentes densidades.

Existe una buena correlación entre la resistencia a la erosión y el módulo de resistencia del material ( Redden, 1998) :

$$R = S_y^2 / 2 * E$$

En donde : E = Módulo de elasticidad de Young.

Sy = Resistencia a la fluencia.

R = Módulo de resistencia.

Este parámetro representa la cantidad de energía que puede ser absorbida por un cuerpo antes de que ocurra una deformación plástica o fractura por impacto.

Las partículas responsables del desgaste erosivo varían en tamaños desde 5 a 500  $\mu\text{m}$  generalmente y las velocidades de impacto en un rango entre 5 y 500 m/s. A menudo las partículas erosivas varían en composición y son generalmente más duras que la superficie a desgastar. El cuarzo, óxido de aluminio y el carburo de silicio tienen dureza Vickers de 1300, 1750, 2000 Kg/mm<sup>2</sup> respectivamente y son generalmente usados en pruebas de simulación de procesos de erosión.

También el impacto de una partícula con una superficie metálica puede provocar la deformación elástica o plástica; la deformación plástica existirá cuando el valor del esfuerzo de fluencia del material sea excedido durante el impacto.

El valor adimensional denominado número de Best representa la magnitud del daño de la superficie (Malaver, 1995) :

$$B = \rho * V^2 / Y$$

En donde : B = Número de Best.

V = Velocidad de impacto.

Y = Esfuerzo de fluencia del material.

$\rho$  = Densidad del material.

En la siguiente tabla se presenta el tipo de deformación producto del impacto en relación con el número de Best.

**Tabla 1 .** Variación del número de Best con el tipo de daño.

Número de Best	Tipo de daño
$10^{-5}$	Cuasi-estático
$10^{-3}$	Inicios de deformación plástica
10	Deformación plástica extensiva
$10^3$	Fenómeno de hipervelocidad

Tomado de Malaver et. al., 1995.

Haciendo referencia a Finnie (García, 1998); las variables que afectan la erosión pueden ser ampliamente separadas en tres tipos, las referidas a las características del impacto del fluido, las de la partícula y las del material. Las variables básicas de impacto son : ángulo de incidencia ( $\theta$ ), velocidad de la partícula (V), concentración de las partículas en el fluido. El ángulo de incidencia está definido como el ángulo que forma la dirección del flujo de las partículas abrasivas y la superficie proyectada. Las variables referidas a las partículas pueden ser : la forma, el tamaño, facilidad para la fractura y dureza de la partícula.

En cuanto a las características del material, la tasa de erosión se ve afectada por el ángulo de impacto y la velocidad de la partícula erodante acorde con la relación de la forma :

$$E = K * V^n * f(\theta)$$



En donde : E = el factor de erosión.

V = velocidad de la partícula.

K = Magnitud absoluta de la erosión.

f ( $\theta$ ) = Función adimensional del ángulo de impacto, medido éste con respecto al plano del objetivo.

n = Este valor se encuentra entre 2,3 y 2,5 para los metales.

Los valores de K, los cuales definen la magnitud absoluta de la erosión, pueden ser obtenidos de datos publicados de una variedad de materiales. La tabla siguiente (Tabla 2), lista los valores de K calculados de tasas de erosión, conjuntamente con los detalles de las condiciones experimentales bajo las cuales fueron obtenidas.

Tilly (Bangueses, 2000), estudió y calculó las trayectorias de las partículas de 5  $\mu\text{m}$  en la proximidad de las probetas, y muestra que los ángulos de impacto pueden diferir significativamente de la orientación original; para un flujo de 100 m/s únicamente el 44% de las partículas proyectadas se espera que choquen con la superficie de la probeta a un ángulo de 45° de incidencia.

Smeltzer (García, 1998), demostró que otra posible causa de la variación de las partículas es que éstas alcanzan la velocidad del flujo del gas aproximadamente a 3 metros de proyección.

**Tabla 2 .** Valores de K calculados de tasas de erosión de datos publicados.

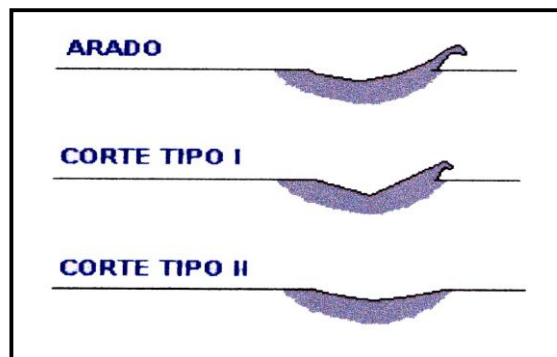
Material	Abrasivo	V (m/s)	Angulo	K ( 10 -8 )	Referencia
Al 2024	Cuarzo	125	20 °	0.83	Gat y Tabakoff, 1978
Al 2024	Cuarzo	117	60 °	0.38	Gat y Tabakoff, 1978
Al 2024	Cuarzo	122	90 °	0.41	Gat y Tabakoff, 1978
Al 6061-T6	SiC	90	30 °	1.46	Sheldon, 1977
Al 6061-T6	SiC	91	20 °	2.28	Tilly y Sage, 1970
Al - puro	SiC	282	20 °	0.31	Tilly y Sage, 1970
Al - aleación	Cuarzo	244	90 °	2.2	Tilly y Sage, 1970
Al - puro	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	129	20 °	1.49	Neilson y Gilchrist, 1968
Al - puro	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	129	30 °	1.3	Neilson y Gilchrist, 1968
Al - puro	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	129	90 °	1.46	Neilson y Gilchrist, 1968
Al 1100-0	SiC	76	20 °	1.46	Finnie, 1967
Al 1100-0	SiC	137	20 °	1.32	Finnie, 1967
Al - 4.75% Cu	SiC	30.5	30 °	0.68	Brass, 1977
Cu	SiC	76	20 °	2.54	Finnie, 1967
Cu	SiC	137	20 °	2.55	Finnie, 1967
Cu	Cuarzo	82	20 °	1.17	Tadolder, 1966
Ni	Cuarzo	82	20 °	0.56	Tadolder, 1966
Ni	SiC	90	30 °	1.82	Sheldon, 1977
Ti - aleación	Cuarzo	128	90 °	2.32	Tilly y Sage, 1970
Ti - aleación	Cuarzo	244	90 °	1.85	Tilly y Sage, 1970
Ti - puro	Cuarzo	82	45 °	0.69	Tadolder, 1966
Ti - puro	Cuarzo	82	90 °	1.11	Tadolder, 1966
Ti 6A14V	Cuarzo	122	20 °	0.83	Gat y Tabakoff, 1978
Ti 6A14V	Cuarzo	116	60 °	0.59	Gat y Tabakoff, 1978
Fe - puro	Cuarzo	82	20 °	0.59	Tadolder, 1966
Fe - puro	SiC	76	20 °	2.44	Finnie, 1967

Tomado de Malaver et. al, 1995.

Estos valores fueron calculados para un mismo valor de  $n = 2,4$  ; en la ecuación del factor de erosión.

Estudios experimentales, hechos con partículas angulares simples, con ángulos de incidencia oblicuos, indican que, el comportamiento de las partículas puede ser clasificado en tres tipos como sigue a continuación :

- Arado o “Ploughing”, tiene como característica que el material deformado es desplazado hacia el borde final del cráter de impacto.
- Corte I, presenta un corte en la superficie, levantando un gran fragmento de viruta al final del cráter, el cual es vulnerable a la remoción por el impacto de otra partícula.
- Corte II, la partícula rota en sentido contrario a la trayectoria del impacto, provocando una remoción de material bajo la acción de un maquinado.



**Figura 3.-** Tipo de cortes producidos por el impacto de las partículas.

### ***1.8.- El fenómeno de la abrasión.***

La abrasión es el desgaste producido por partículas duras que penetran en una superficie, ocasionando deformación plástica y/o desprendimiento de material.

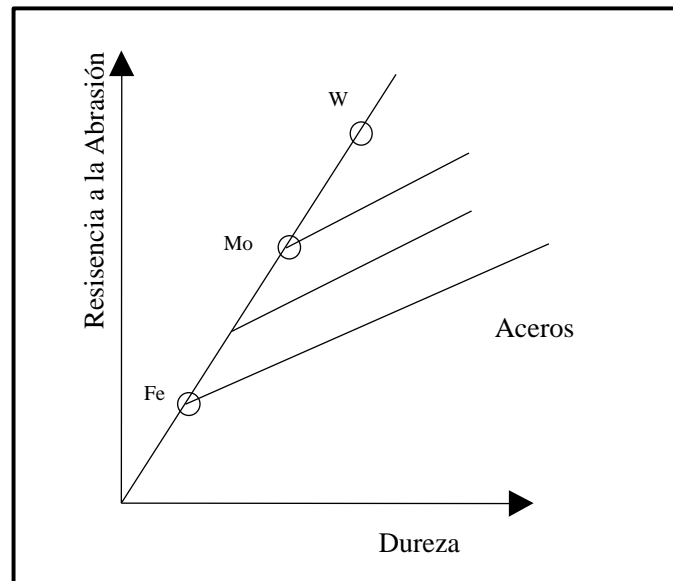
El desgaste abrasivo se produce cuando partículas duras penetran una superficie y desplazan, o remueven material en forma de astillas alargadas o tiras. Debido a ello, una superficie lisa o pulida, se vuelve áspera, con marcas y ranuras bastante regulares, pudiendo o no haber productos o restos metálicos desprendidos o adheridos. Cuando las partículas de abrasivo se ponen en contacto con el material, éste es removido por mecanismos que dependen de la naturaleza del sistema. El principal de ellos es, en este caso, el micro maquinado de la superficie, ocasionado por las partículas duras que se comportan como pequeñas herramientas de corte. Por otro lado, la deformación plástica localizada y el endurecimiento por trabajado que trae como consecuencia efectos de fatiga.

Entre las formas de desgaste abrasivo tenemos la abrasión a baja presión, donde el metal es desgastado gradualmente por la acción de las partículas abrasivas, produciendo en su superficie un rayado o pulido. Las partículas pueden ser, por ejemplo, de cemento, de arena, polvo y otros, que se desplazan a velocidad variable. La partícula abrasiva, dada la baja presión, no es fracturada en este caso; este tipo de desgaste es también llamado “abrasión de dos elementos”.

En el caso de la abrasión a alta presión, el abrasivo es forzado a penetrar entre las dos superficies; por ser tres los elementos en contacto, por ejemplo, metal-abrasivo-metal, se llama también abrasión de tres elementos. Dadas las fuerzas de compresión aplicadas, en este caso las abrasivas se fracturan. Aún cuando la carga aplicada pueda ser baja, el esfuerzo ejercido sobre el grano del abrasivo lo llevan hasta el punto de resistencia de rotura por compresión, causando deformación de los constituyentes dúctiles, agrietamiento en aquellos que son frágiles y producción de fragmentos afilados del abrasivo roto.

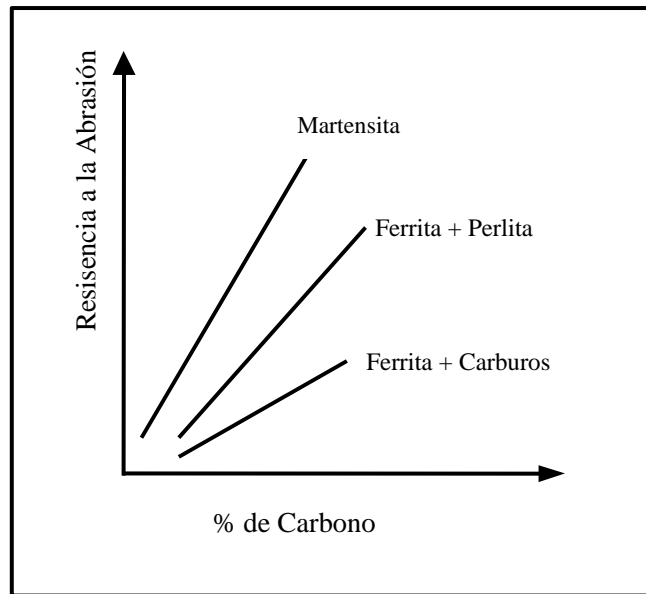
La situación denominada de dos cuerpos, es más frecuentemente encontrada en transporte de minerales desprendidos o sueltos, y la de tres cuerpos en tratamiento de minerales.

Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones provenientes de una superficie o bien partículas sueltas. Este tipo de desgaste se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas y en algunos casos en cuerpos en contacto deslizante, etc.



**Figura 4.-** Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.

Por otra parte, se observa en la Figura 5 que el contenido de carbono hace disminuir la abrasión en los aceros. De acuerdo al gráfico, se observa que la martensita presenta mejor resistencia a este fenómeno, entre las tres microestructuras que se comparan, pero también se han tenido buenos resultados con refinamientos de perlita y esto se atribuye a una tasa alta de endurecimiento por deformación.



**Figura 5.-** Influencia del contenido de carbono en la resistencia a la abrasión.

A fin de obtener un aumento apreciable en la resistencia de la abrasión la dureza superficial debe hacerse mayor que la mitad de la dureza Vickers del abrasivo. Por otra parte, no es recomendable, aumentar la dureza de la superficie por encima de 1,3 veces la dureza del abrasivo, ya que esto podría resultar contraproducente. En general, para metales ferrosos, las mejores resistencias al desgaste se obtienen en matrices martensíticas, con carburos secundarios uniformemente distribuidos. Cuando la dureza de los carburos es aumentada mediante una aleación, la resistencia al desgaste también aumenta, pero hay que tener en cuenta la dureza de las partículas abrasivas. Si se requiere una matriz más tenaz, para condiciones de impacto fuertes, es más recomendable una estructura austenítica inestable, la cual tiende a endurecerse por deformación o sufrir transformación de fase, o bien ser sometida a ambos procesos durante el trabajo de abrasión (Babaresco y Klisans, 2000).

Con relación al material abrasivo : tamaños reducidos, formas redondeadas, disminución de las velocidades y de las cargas de impacto, son todos factores que hacen disminuir el fenómeno de la abrasión.

En general los factores más importantes que hacen disminuir la abrasión son los siguientes:

- Aumento de la dureza.
- Aumentos del contenido de carbono y carburos duros.
- Control de la relación entre la dureza superficial y del abrasivo.
- Disminución del tamaño de las partículas abrasivas.
- Partículas abrasivas con formas redondeadas.
- Disminución de velocidades.
- Disminución de cargas.

La mayoría de las teorías se basan en el concepto de que la abrasión es el proceso de rayado, además simplifican la punta del abrasivo como un cono anguloso. Por lo tanto, se concentran en explicar el efecto de dicho cono deslizándose a través de la superficie del material.

Debido a lo anteriormente expuesto, varias ecuaciones han sido derivadas para correlacionar el desgaste y las otras propiedades; la más conocida es la ecuación de Archard, si bien fue deducida para el desgaste adhesivo, ha resultado ser muy útil para el desgaste abrasivo. Cuando un grano de abrasivo efectúa la remoción de material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que puede obtenerse, está descrito por :

$$W = A * d$$

Donde :

W = Volumen del material removido.

A = Sección transversal de la ranura.

d = Distancia de desplazamiento.

Al mismo tiempo, la sección transversal de la ranura, depende de la forma del grano abrasivo representado por el factor  $k_1$  y de la profundidad de penetración  $p$ . A su vez la profundidad de penetración es función de la carga aplicada  $L$ , la dureza del material  $H$ , y nuevamente de la forma del grano de abrasivo, representado por  $k_2$ . Dando como resultado, luego de reducir los términos, que la ecuación de Anchar, sea igual a :

$$W = k_3 * L * d / H$$

Siendo  $k_3$  una constante que engloba las otras.

Generalmente un material posee buena o mala resistencia al desgaste cuando éste se refiere al recíproco del volumen desgastado, siendo así :

$$R = 1 / W$$

La ecuación de Anchar, con pequeñas modificaciones es ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más complejas.

Los factores más importantes que afectan el desgaste abrasivo son los siguientes :

- Tiempo.
- Carga.
- Temperatura.
- Materiales.



- Lubricantes.
- Medio Ambiente.
- Vibración.
- Desgaste.
- Fricción.
- Acabado Superficial.
- Geometría.
- Velocidad.

El volumen desgastado aumenta con la distancia de resbamiento. Si ocurren desviaciones, éstas se deben generalmente a una reducción del tamaño del abrasivo o a una obstrucción o destrucción de la superficie.

La presencia de humedad durante el desgaste ayuda a la acción abrasiva e incrementa la tarea de desgaste en un factor que algunos autores cuantifican entre 2 y 4.

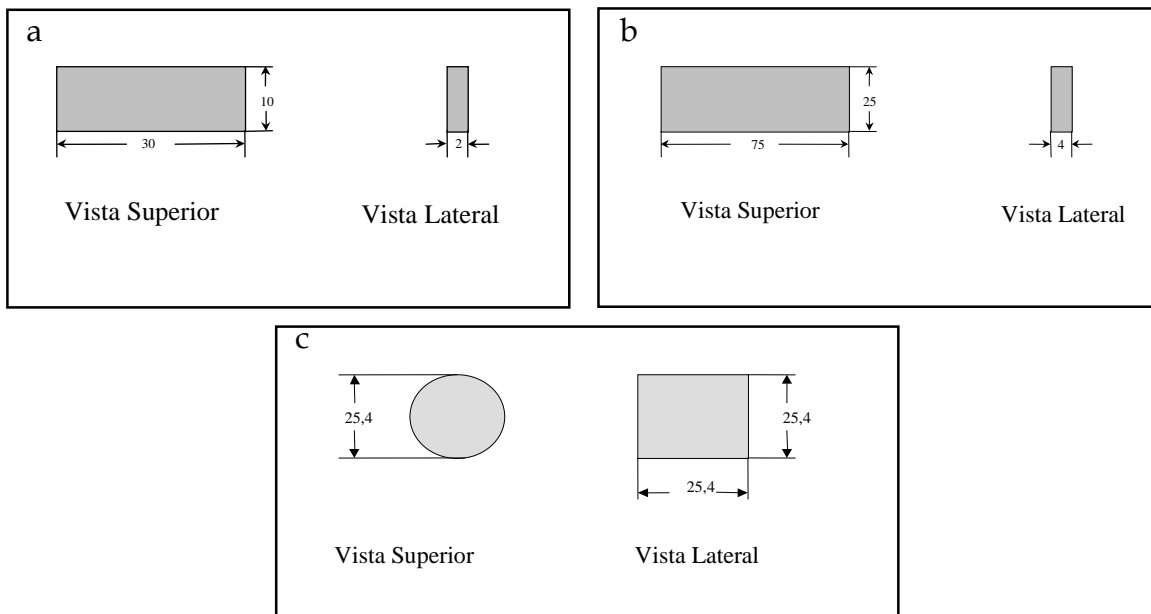
El daño causado por los abrasivos guarda relación directa con la carga aplicada.

## 2.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

### 2.1.- Material de las probetas.

Como material base se utilizó un acero AISI 1020 certificado. Las muestras fueron preparadas como lo indica la norma ASTM G76-83 para el ensayo de erosión, ASTM G65-C para el ensayo de abrasión y ASTM G99-95<sup>a</sup> para el ensayo de desgaste deslizante.

Las dimensiones de las probetas son de 30 mm X 10 mm X 2.5 mm para los ensayos de erosión, de 25 mm X 75 mm X 4 mm para los ensayos de abrasión y 25,4 mm X 25,4 mm de diámetro para los ensayos de desgaste deslizante, como puede ser observado en la Figura 6 a, b y c respectivamente.



**Figura 6.-** Geometría y dimensiones (en mm) de las probetas de a) Erosión, b) Abrasión y c) Pin on Disk.

El material utilizado para lograr el recubrimiento consistió en una mezcla de 88% de Carburo de Tungsteno con 12% de Cobalto y una aleación base níquel denominada comercialmente como Colmonoy 88 (Ni-Cr-W-B-Si), cuya composición química está dada en la Tabla 3. Las proporciones utilizadas para preparar la mezcla fueron 90% (WC-12%Co) y 10% Colmonoy 88. Estas aleaciones fueron mezcladas mecánicamente durante 5 horas aproximadamente.

Se rociaron cuarenta (40) muestras para los ensayos de erosión, seis (6) muestras para los ensayos de abrasión y cuatro (4) muestras para los ensayos de desgaste deslizante (pin on disk).

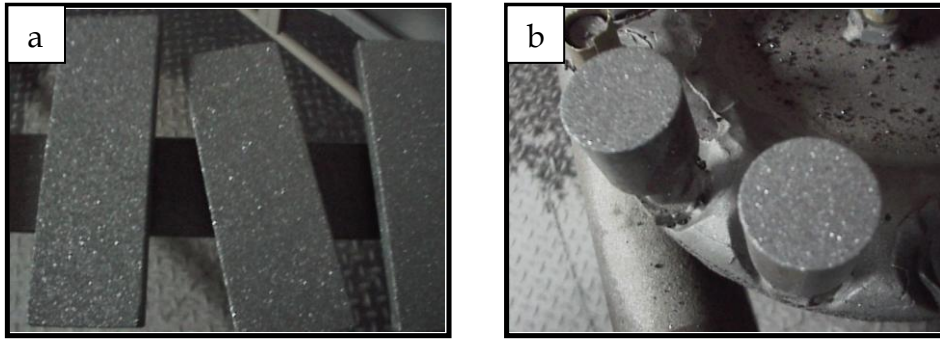
**Tabla 3.** Composición Química de la aleación Colmonoy 88 (% en peso).

<b>Cr</b>	<b>W</b>	<b>B</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Ni</b>
15	17.3	3	4	3.5	0.8	56.4

## *2.2.- Preparación Superficial de las Probetas.*

Antes de realizarles el rociado térmico de las probetas, éstas fueron limpiadas con Thinner comercial para liberarlas de impurezas como la grasa, aceite, polvo, entre otros; seguidamente fueron precalentadas, con la finalidad de eliminar la humedad en la superficie; para luego aplicar el granallado con alúmina a una presión aproximada de 0.41 MPa y con una dirección perpendicular a la superficie de las muestras, para así garantizar una buena adherencia del recubrimiento con el substrato.

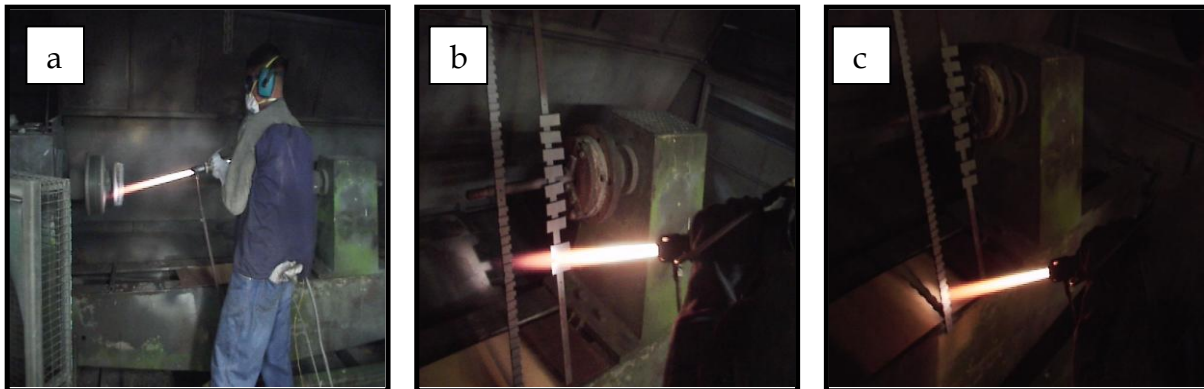
En la Fig 7a y 7b se presentan las probetas de abrasión y de pin on disk respectivamente después de realizar el granallado.



**Figura 7.-** Muestras Granalladas.

### ***2.3.- Rociado Térmico de las Probetas.***

Seguidamente se realizó el rociado térmico vía HVOF a las muestras como se ve en la Figura 8, el cual se llevó a cabo en las instalaciones de Plasmatec Ingenieros C.A., utilizando para ello una pistola modelo JP 5000, con alimentación en forma de polvo, para poder realizar el recubrimiento.



**Figura 8.-** Rociado Térmico de las muestras utilizando una pistola JP-5000.

La Figura 8a muestra el proceso de rociado térmico para las probetas del ensayo deslizante (pin on disk), estando éstas montadas en un disco que se

encuentra acoplado a un torno convencional; las Figuras 8b y 8c corresponden a las probetas de abrasión y erosión, respectivamente, estando ambos grupos de piezas montados en pletinas diseñadas para tal fin.

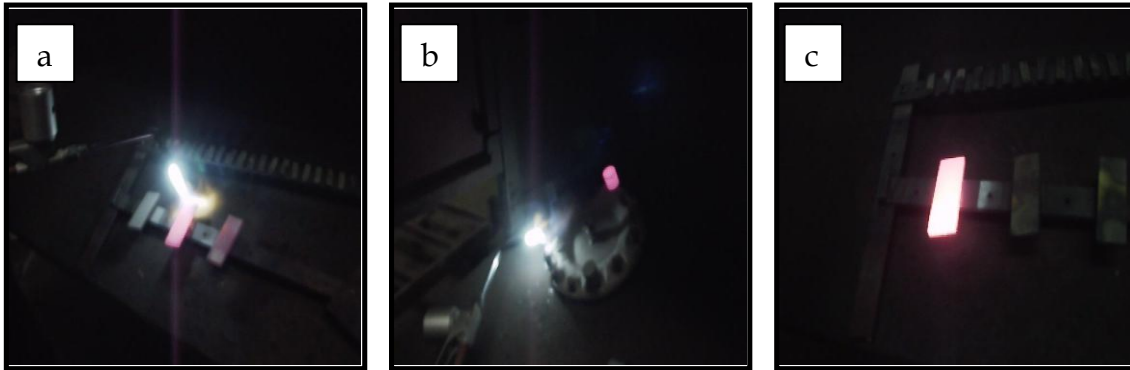
La Tabla 4 presenta los parámetros utilizados en el proceso los cuales corresponden a los sugeridos por el fabricante de la aleación base níquel.

**Tabla 4.-** Parámetros del Proceso HVOF.

Temperatura de precalentamiento del sustrato (°C)	80
Distancia de rociado térmico (cms)	45
Presión de oxígeno (MPa)	1,37
Flujo de oxígeno (l/min)	500
Presión de Kerosén (Mpa)	0,75
Flujo de Kerosén (l/min)	0,41
Presión de la cámara de combustión (Mpa)	0,75
Velocidad de Alimentación (r.p.m.)	354

#### ***2.4.- Aplicación del Tratamiento Térmico.***

Se procedió a realizar el tratamiento térmico, utilizando para ello una llama oxiacetilénica, hasta obtener sobre la superficie un brillo glaseado (Glazed Shine) característico de las aleaciones autofundentes cuando son calentadas por encima de los 980 °C.



**Figura 9.-** Tratamiento Térmico de las muestras.

La Figura 9a y 9b muestran las probetas de abrasión y pin on disk respectivamente cuando eran tratadas térmicamente con llama oxiacetilénica. En la Figura 9c se observa una de las probetas de abrasión en cuya superficie se observa el brillo glaseado.

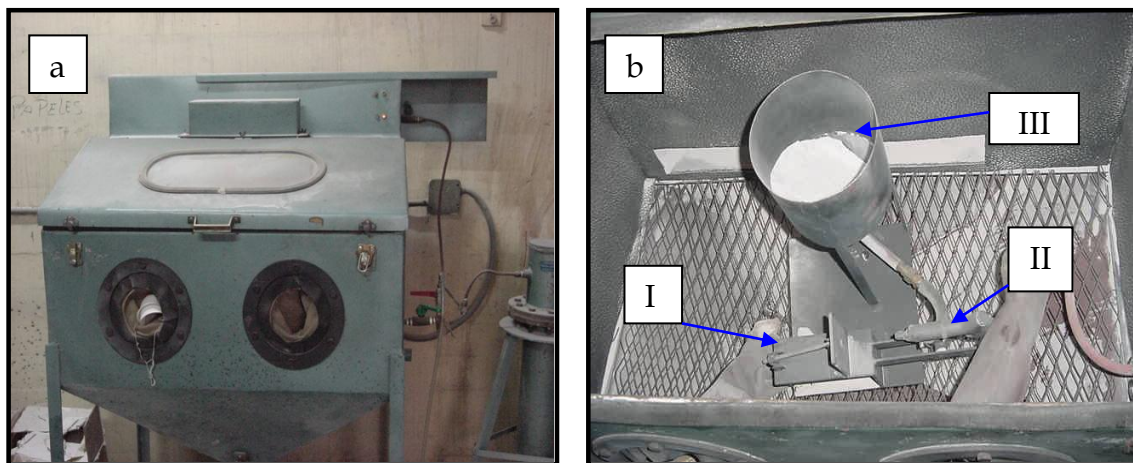
### ***2.5.-Ensayo de Erosión.***

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM G76-83, se tomaron las 40 muestras rociadas térmicamente, 20 de las cuales se les aplicó tratamiento térmico, logrando finalmente dos grupos de probetas: 20 probetas en estado como rociado (CR) y 20 probetas tratadas térmicamente (TT).

Los ángulos seleccionados para este ensayo fueron 30°, 45°, 60°, y 90°, con un total de 5 muestras de cada condición para cada ángulo. Con este barrido de ángulos se desea determinar el comportamiento de esta mezcla tanto en estado como rociado (CR), como tratado térmicamente (TT), frente a los diferentes tipos de erosión, desde la erosión por choque (90°), hasta la erosión abrasiva (30°).

El material erodante utilizado es alúmina, la cual, siguiendo los parámetros de la norma debe ser de un tamaño aproximado de 50  $\mu\text{m}$ . Si el tamaño del grano es muy superior a éste, se debe proceder a tamizarla para garantizar la norma. La alúmina fue donada por la empresa Bauxilum.

El banco de ensayos utilizado, fue desarrollado por Ignacio R. Malaver y Luis J. La Barbera en 1995. Tesis U.C.V. (ver Figura 10a).



**Figura 10.-** Banco de Ensayo de Erosión.

Este equipo consta de las siguientes partes: Bastidor, porta probetas, tolva, manguera de alimentación de polvo abrasivo, y una pistola de chorro abrasivo.

En la Figura 10b, se pueden observar partes del banco de ensayos como son: El porta probeta (detalle I), la tolva (detalle II), la pistola de chorro (detalle III), entre otros.

El procedimiento del banco de ensayos fue el siguiente:

- Se realizó el montaje de todos los componentes del banco de ensayos, conectando el sistema de inyección de aire y poniendo en funcionamiento el compresor.
- Se tomó muestra por muestra, la medición de peso y luego se le colocó en el porta probetas con la orientación del ángulo de estudio, y a una distancia de 12 cm. de la boquilla.
- Se abrió la válvula de compuerta y se ajustó a una presión de aire de 0.34 MPa a la entrada de la pistola.
- Se cargó la tolva con alúmina.
- Se cerró la puerta de la cámara de erosión.
- Se proyectó el material erodante durante 3 minutos, y luego se abre la cámara, para así retirar la muestra del portaprobetas.
- Se le realizaron mediciones de peso.
- Se realizaron todas las probetas restantes, para luego finalmente poder calcular la Tasa de Erosión (RE) y el Factor de Erosión Normalizado (FEN).

En estudios realizados se comprobó que no existe desgaste considerable del diámetro interno de la boquilla de la pistola, lo cual garantiza la uniformidad de los ensayos en cuanto a la velocidad de la partícula.

Los resultados del ensayo de erosión se reportaron basándose en la pérdida de peso de las distintas muestras por Kilogramo de erodante para cada ángulo de incidencia. Esta pérdida fue obtenida por medio de la utilización de una balanza analítica marca Metter Toledo, modelo AG 245, la cual nos permite obtener una precisión de 0.00001 gr (Figura 11).



Para cuantificar la resistencia erosiva, se calcularon dos factores: (RE) y (FEN);

$$RE = \Delta P / \rho * ma \quad (Eq 1)$$

Donde: RE = Tasa de erosión (mm<sup>3</sup>/gr)

$\Delta P$  = Pérdida de peso (gr)

$\rho$  = Densidad del material (gr/mm<sup>3</sup>)

ma = Masa del abrasivo (gr).

De igual manera se reportó el Factor de Erosión Normalizado (Ecuación N° 2), el cual nos permite calcular la erosión del recubrimiento relativo a la erosión del material de referencia; estos valores nos permiten compararlos con otros resultados obtenidos con estudios anteriores.

$$FEN = (Re_{recubrimiento} / Re_{control}) \times 100 \quad (Eq 2)$$

Donde: FEN = Factor de erosión normalizado (%)

$Re_{recubrimiento}$  = Tasa de erosión del recubrimiento (mm<sup>3</sup>/gr).

$Re_{control}$  = Tasa de erosión del material de referencia (mm<sup>3</sup>/gr).

## ***2.6.- Ensayo de Abrasión.***

Se prepararon un total de 6 muestras, 3 en estado como rociado (CR) y 3 tratadas térmicamente (TT).

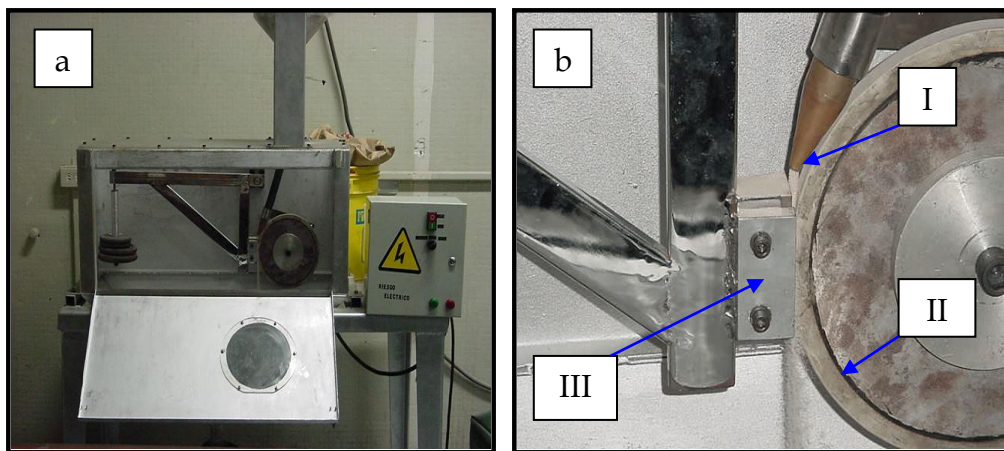
La norma ASTM G65 exige que las probetas cumplan con un valor mínimo de rugosidad, además deben ser planas y libres de impurezas, ya que estos defectos superficiales pueden afectar los resultados de los ensayos; por consiguiente se procedió al rectificado de las mismas en una estación de mecanizado que se encuentra en los laboratorios de Ingeniería Mecánica. Para tal fin se utilizó una piedra de copa de diamante. Luego de ser mecanizadas, las probetas se lavaron, se limpiaron y se secaron, para después proceder a pesarlas. Para el pesado de las probetas se utilizó la misma balanza semi-micro analítica que se utilizó en el ensayo de erosión (Figura 11).



**Figura 11.-** Balanza Analítica.

Siguiendo la norma, el tipo de abrasivo utilizado para el ensayo fue una arena de Cuarzo redondeado exigida por la American Foundry Sand N° AFS 50-70 (300 – 212 micrómetros).

Una vez determinado que la arena cumplía las especificaciones, se colocaron las muestras a ensayar en el porta probetas y luego fueron aseguradas; a continuación se abre el flujo de arena, se enciende el motor e inmediatamente se baja la palanca cuidadosamente para permitir que la probeta contacte con el disco de goma. En este caso el tipo de ensayo referido por la norma es el Tipo C, el cual indica un tiempo de prueba de ½ minuto, con una carga de 130 N. (5159 gr); el disco gira a 200 rpm y el flujo de arena se encuentra alrededor de 300 gr/min.



**Figura 12.-** Banco de Ensayo de Abrasión.

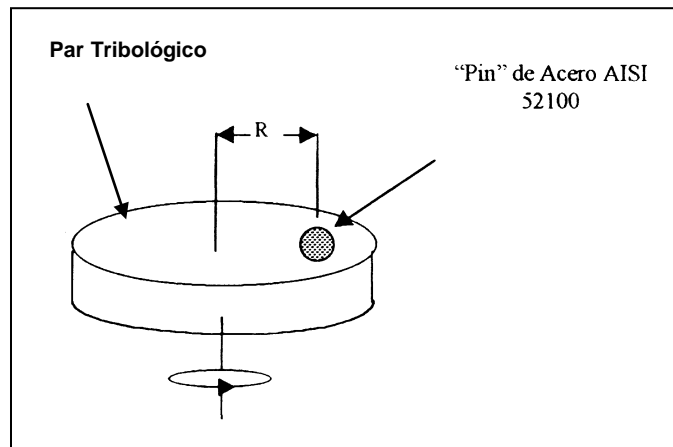
La Figura 12a muestra el banco de ensayo de abrasión, elaborado por Pinto y Rangel en 1999. Tesis. U.C.V. En la Figura 12b, se puede apreciar la máquina en funcionamiento, además de observar el flujo de arena (detalle I), la rueda de goma (detalleII), así como también el portaprobeta y la probeta (detalle III).

Luego de culminar los ensayos se procedió a la limpieza de las probetas como lo indica la norma, para posteriormente volverlas a pesar en la balanza.

Por último se calcula la pérdida de masa de las probetas ensayadas. La norma recomienda reportar los resultados en pérdida volumétrica.

## 2.7.- Ensayo de Desgaste Deslizante (Pin on Disk).

Los ensayos se realizaron en un tribómetro para simulación de fricción y desgaste, en la configuración bola sobre disco o “Pin on Disk” (Figura 13).



**Figura 13.-** Geometría del Tribosistema “Pin on Disk”.

El comportamiento tribológico de estos recubrimientos se estudió basándose en las pruebas de desgaste acelerado sin lubricante, los cuales se realizaron en un tribómetro, marca CSEM, modelo 2-115, tipo bola sobre disco (Pin On Disk), como se muestra en la figura 14.



**Figura 14.-** Tribómetro.

El Pin utilizado es una esfera de acero AISI 52100 y diámetro de 6 mm. Los ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales constantes a una temperatura de 27 °C y una humedad de 55 %. La velocidad de desgaste es de 10 cm/s a una carga constante de 5 N y a una distancia de 26528 vueltas. El objeto de trabajar con estos parámetros tan específicos, es el de comparar los resultados obtenidos en este trabajo con estudios hechos con anterioridad de aleaciones base níquel, similares a los estudiados en el presente trabajo.

El ensayo fue aplicado sobre dos muestras, una como rociada (CR) y otra tratada térmicamente (TT). Procediendo de la siguiente manera:

- Se calibró el equipo según manual de instrucciones del tribómetro.
- Fueron limpiadas las probetas por método de inmersión en ultrasonido por 5 minutos en acetona y 3 minutos en alcohol.
- Se secaron las probetas en un secador de aire caliente, para eliminar la humedad.
- El disco fue colocado en la mordaza del tribómetro y asegurarlo de manera que quede perpendicular al eje de rotación de la mordaza.
- Colocada la bola en su mordaza y asegurada de manera que quede perpendicular a la superficie del disco, se desplazó la bola hasta el radio de deslizamiento.
- Se colocó el peso correspondiente a la carga normal respectiva, para luego ser ajustada la velocidad de deslizamiento del ensayo.

Finalmente los resultados fueron reportados en pérdida volumétrica (tanto para el pin como para el disco) como lo indica la norma.

Para la determinación del desgaste de las muestras, se utilizó un perfilómetro de marca SIGO.

## ***2.8.- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microdureza.***

Para realizar el estudio de los recubrimientos se tomaron 2 muestras de cada condición. Un par de muestras para la Microscopía y otro par de muestras para la Microdureza.

### **2.8.1.- Preparación de las muestras.**

El corte de las muestras se realizó en una cortadora de precisión, como se muestra en la Figura 15. Utilizando un disco de diamante, a fin de asegurar un corte limpio, sin desprendimiento del recubrimiento, necesario para poder realizar los estudios de Microscopía y Microdureza.



**Figura 15.-** Cortadora de Precisión.

Seguidamente las piezas fueron embutidas en frío, en los moldes que muestra la Figura 16, evitando así cualquier exposición de las muestras, a temperaturas y

presiones que pudiesen alterar los ensayos, como es el caso del embutido en caliente.



**Figura 16.-** Moldes para embutir en frío.

Las muestras fueron preparadas metalográficamente en un equipo de marca LECO modelo VP-50 a 240 r.p.m. (Figura 17), según se muestra a continuación:

- Para el desbaste se utilizaron papeles de carburo de silicio desde granulometría 240 hasta 1200.
- Para el pulido se utilizaron paños de fieltro y alumina en suspensión con diferentes granulometrías, las cuales variaron de 1, 0.5, 0.3, 0.05  $\mu\text{m}$ .



**Figura 17.-** Equipo de plato giratorio.

### 2.8.2.- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

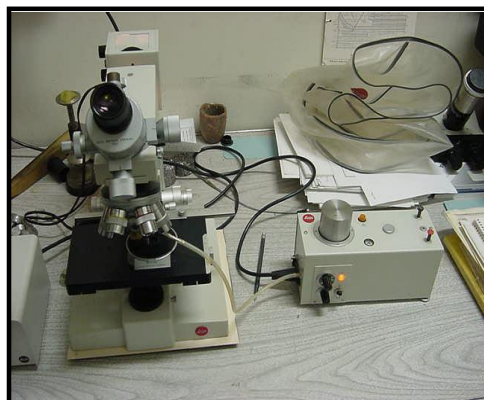
La microestructura y composición del recubrimiento fueron estudiadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca Philips, modelo XL 30, acoplado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (Figura 18).



**Figura 18.-** Microscopio Electrónico.

### 2.8.3.- Medición de la Microdureza.

La microdureza se obtuvo a través de un Microdurómetro Vickers marca Leitz Wetzlar modelo 7520, el cual se muestra en la Figura 19.



**Figura 19.-** Microdurómetro.



Los resultados se obtuvieron por el promedio de cinco (5) indentaciones aplicadas en la sección transversal del recubrimiento, con una carga de 300 gr durante 15 segundos.

Para el cálculo de la microdureza se utilizó la siguiente ecuación:

$$HV = 1.8544(K/D^2) \quad (Eq\ 3)$$

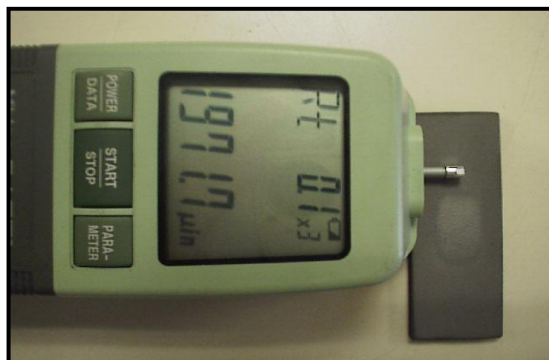
Donde:

K: Carga aplicada (Kgf).

D: Diagonal de la huella Vickers (mm).

### ***2.9.- Determinación de la Rugosidad.***

Para la medición de la rugosidad se utilizó un Rugosímetro marca Mitutoyo SJ-201 (Figura 20), se tomaron mediciones de rugosidad, y el valor reportado es el denominado Ra (desviación promedio aritmética del perfil) la cual consiste en el promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias desde la línea media al perfil.

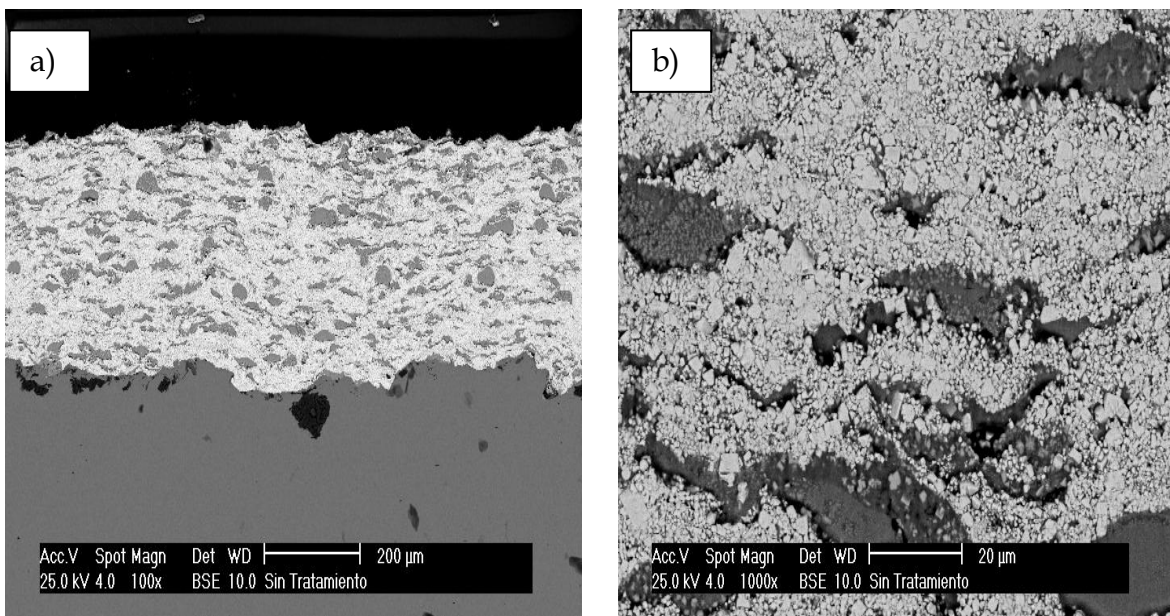


**Figura 20.-** Rugosímetro.

### 3.- ANÁLISIS Y RESULTADOS.

#### 3.1.- Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido.

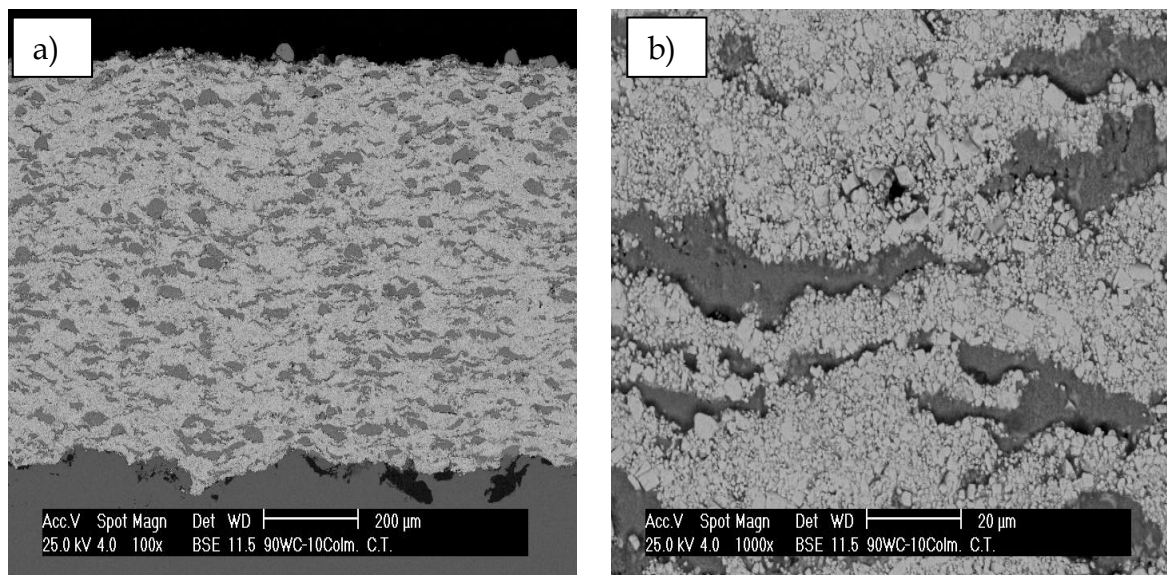
La Figura 21a corresponde a una vista transversal del recubrimiento compuesto por la mezcla de WC-12%Co y Colmonoy 88, en estado como rociado a un aumento de 100x. En ésta se puede observar una estructura laminar heterogénea y con escasa porosidad. La porosidad observada en la interfase es debido al proceso de granallado.



**Figura 21.-** Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra como rociada.  
a) a 100x, b) a 1000x.

La Figura 21b corresponde al mismo recubrimiento observado en la Figura 21a, pero a una mayor magnificación. Un análisis químico mediante EDX (Energía de Dispersión de Rayos X), reveló que las fases blancas pertenecían al Carburo de Tungsteno-12% Cobalto y las fases oscuras al Colmonoy 88.

La Figura 22a nos muestra la microestructura del recubrimiento en estudio tratado térmicamente. Como puede observarse en la figura no se aprecian diferencias notorias comparado con el recubrimiento en estado como rociado. Sin embargo, en la Figura 22b, la cual corresponde a un detalle a mayor aumento (1000x) del recubrimiento mostrado en la Figura 22a, se observa una menor porosidad y mejor cohesión entre las partículas blancas y la fase negra. En estas figuras se aprecia además, que el tratamiento térmico posterior no logró una homogeneización del recubrimiento. Este comportamiento pudo haber sido ocasionado por un insuficiente tiempo de exposición de la muestra en la llama oxiacetilénica, impidiendo cambios significativos en la microestructura del recubrimiento.



**Figura 22.-** Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra tratada térmicamente. a) a 100x, b) a 1000x.

Dado que no existe en la literatura revisada para el presente trabajo ninguna referencia a una mezcla similar ni en estado como rociado ni tratada térmicamente;

en este estudio preliminar se utilizó para el tratamiento térmico las recomendaciones dadas por el fabricante de la aleación Colmonoy 88. Sin embargo se deben hacer experiencias a diferentes temperaturas para determinar el efecto del tratamiento sobre la microestructura.

### ***3.2.-Análisis de la Microdureza.***

La Tabla 5 contiene los resultados de los ensayos de microdureza realizados a los recubrimientos rociados con la aleación 90% WC-12%Co y 10% Colmonoy 88, tanto con tratamiento térmico (TT) como sin tratamiento térmico (CR). Los valores presentados en este estudio reflejan el promedio de cinco (5) indentaciones, hechas a cada muestra.

**Tabla 5.-** Microdureza Vickers.

<b>MATERIAL</b>	<b>HV<sub>(300)</sub></b>	<b>Desviación Prom.</b>
CR	1090	40
TT	1110	40

El análisis de los resultados indica que los recubrimientos como rociado y tratado térmicamente, presentan una dureza similar, por lo tanto se puede decir que el tratamiento no afectó esta propiedad.

En la Figura 23, se puede observar la dureza de estas muestras comparadas con otros recubrimientos realizados en estudios anteriores, pudiéndose apreciar que el recubrimiento 80%(WC-12%Co) – 20% Colmonoy 88, sí obtuvo una mejora

significativa al ser tratado térmicamente, esto puede deberse a un insuficiente tiempo de exposición de las muestras a la llama oxiacetilénica.

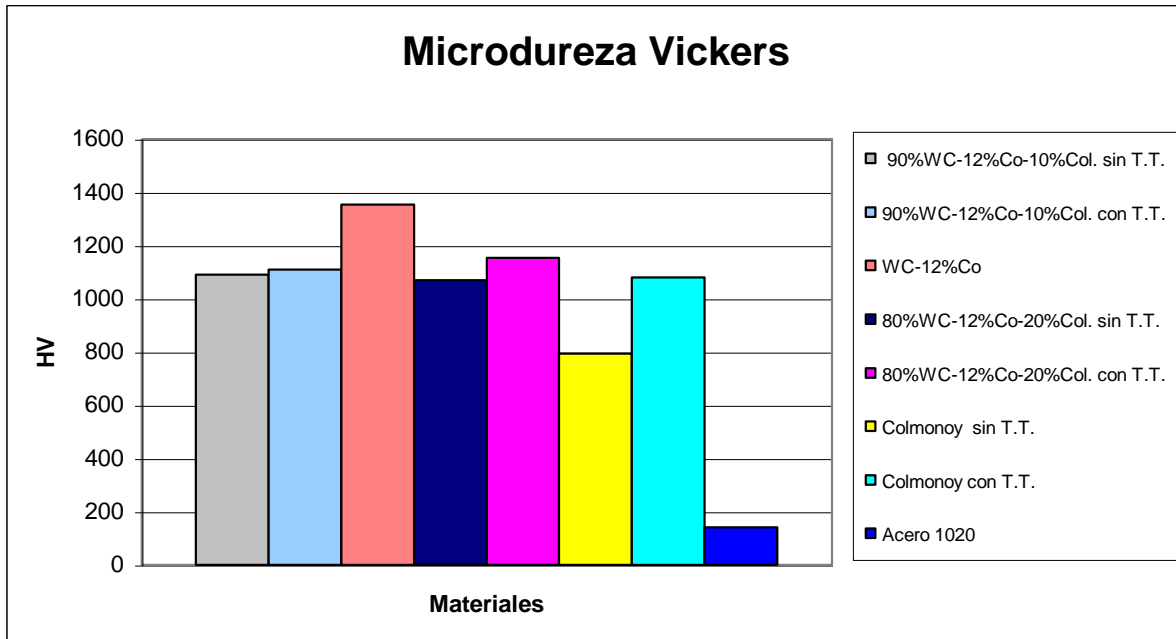


Figura 23.- Microdureza Vickers de diferentes materiales.

### 3.3.- Resultados de la Rugosidad Superficial.

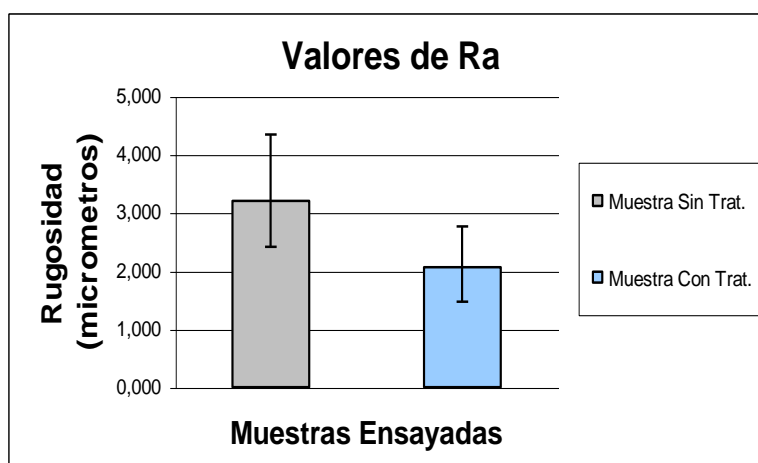
En la Tabla 6 se muestran los resultados de rugosidad, obtenidos del promedio de dieciséis (16) mediciones a cada muestra (como rociada y tratada térmicamente).

**Tabla 6.-Rugosidad Promedio.**

Muestra	Ra (micrometros)	Desviacion Prom.
CR	3,197	0,96
TT	2,064	0,64

De los resultados obtenidos en la medición, se observó una mejora del 55% de la rugosidad superficial de las probetas al ser tratadas térmicamente; esto se debe a que el tratamiento térmico logra una mejor densificación del recubrimiento, suavizando así el perfil superficial de las muestras, obteniéndose finalmente una superficie con mejor acabado.

La variación de Ra entre las muestras puede ser observada en la Figura 24.

**Figura 24.- Valores de Rugosidad.**

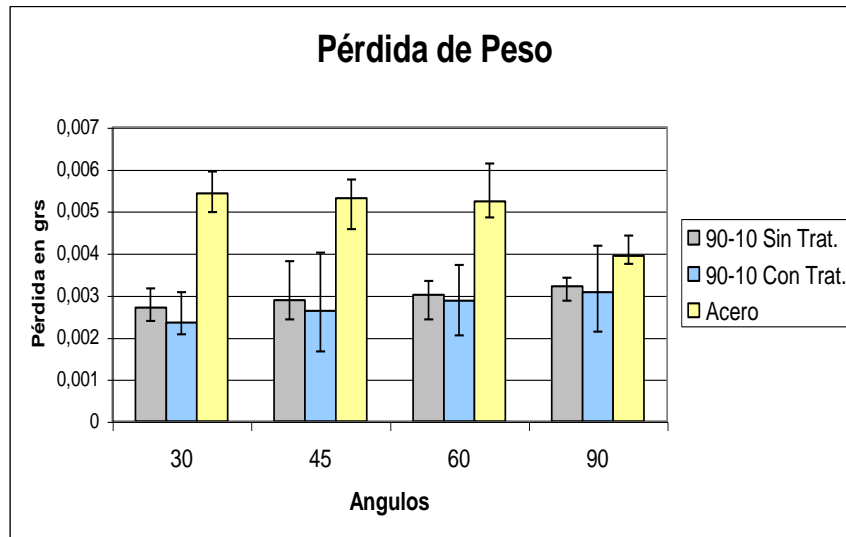
### 3.4.- Análisis del Ensayo de Erosión.

La Tabla 7 contiene los resultados de pérdida de peso para cada grupo de probetas sometidas al ensayo de erosión. Cada uno de los valores presentados en la tabla, es el resultado de cinco (5) mediciones para cada condición. La Figura 25 presenta gráficamente estos resultados en la cual se puede observar que ambos recubrimientos (CR y TT) tuvieron una menor pérdida de peso comparado con el acero base. De la figura se desprende que para un ángulo de 30° el recubrimiento presentó un 40% menos en pérdida de peso comparado con el acero base, hasta llegar a un 20% menos en pérdida de peso para las muestras ensayadas a 90°.

En la misma Figura 25 se puede observar que el acero presenta una mayor pérdida de peso a un ángulo de 30° disminuyendo este valor hasta llegar a un ángulo de 90°, mientras que los recubrimientos CC y TT presentan un comportamiento inverso. El comportamiento del acero 1020 era de esperarse ya que ha sido reportado (García, 1998), que los materiales dúctiles presentan una menor pérdida de peso a medida que aumenta al ángulo de impacto. En el caso de las muestras CR y TT se puede decir que presentan una mayor tendencia hacia el comportamiento frágil. Sin embargo la mezcla del WC (frágil) con 12% de Cobalto (dúctil) y Colmonoy 88 (matriz dúctil + fases duras) impide una mayor pendiente en la tendencia hacia el comportamiento frágil.

**Tabla 7.-** Pérdida de Peso de muestras erosionadas.

Angulos	Pérdida de peso (gr)		
	CR	TT	Acero 1020
30°	0,00271	0,00235	0,00543
45°	0,002885	0,00263	0,00531
60°	0,00301	0,00287	0,00524
90°	0,00321	0,00308	0,00394



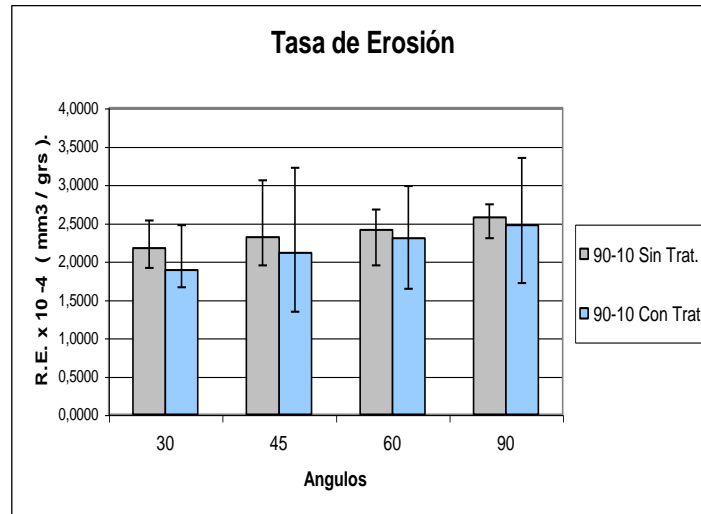
**Figura 25.-** Pérdida de Peso de las muestras ensayadas.

Con el objeto de apreciar la resistencia a la erosión de las muestras estudiadas, los resultados de la tasa de erosión de los recubrimientos reportados en la Tabla 8, fueron graficados como se muestra en la Figura 26, donde se puede visualizar que a medida que aumenta el ángulo de ataque, aumenta la tasa de erosión, lo que representa un comportamiento característico de los materiales frágiles.

**Tabla 8.-** Tasa de Erosión.

Ángulos	Tasa de Erosión (mm <sup>3</sup> /grs)		
	CR	TT	Acero 1020
30°	2,1711	1,8827	7,3131
45°	2,3113	2,1070	7,1515
60°	2,4115	2,2993	7,0572
90°	2,5717	2,4675	5,3064



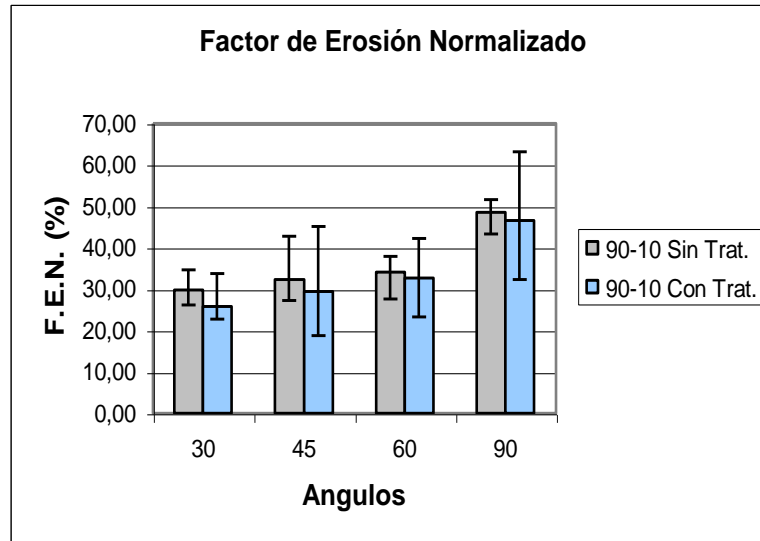


**Figura 26.-** Tasa de Erosión de las muestras estudiadas.

En la Figura 26, también se puede observar que el tratamiento térmico aumentó ligeramente la resistencia a la erosión del recubrimiento. Sin embargo se puede apreciar que a menor ángulo el tratamiento térmico produce una mayor resistencia al desgaste, lo cual podría estar relacionado con el mecanismo de desgaste dominante en cada ángulo de incidencia.

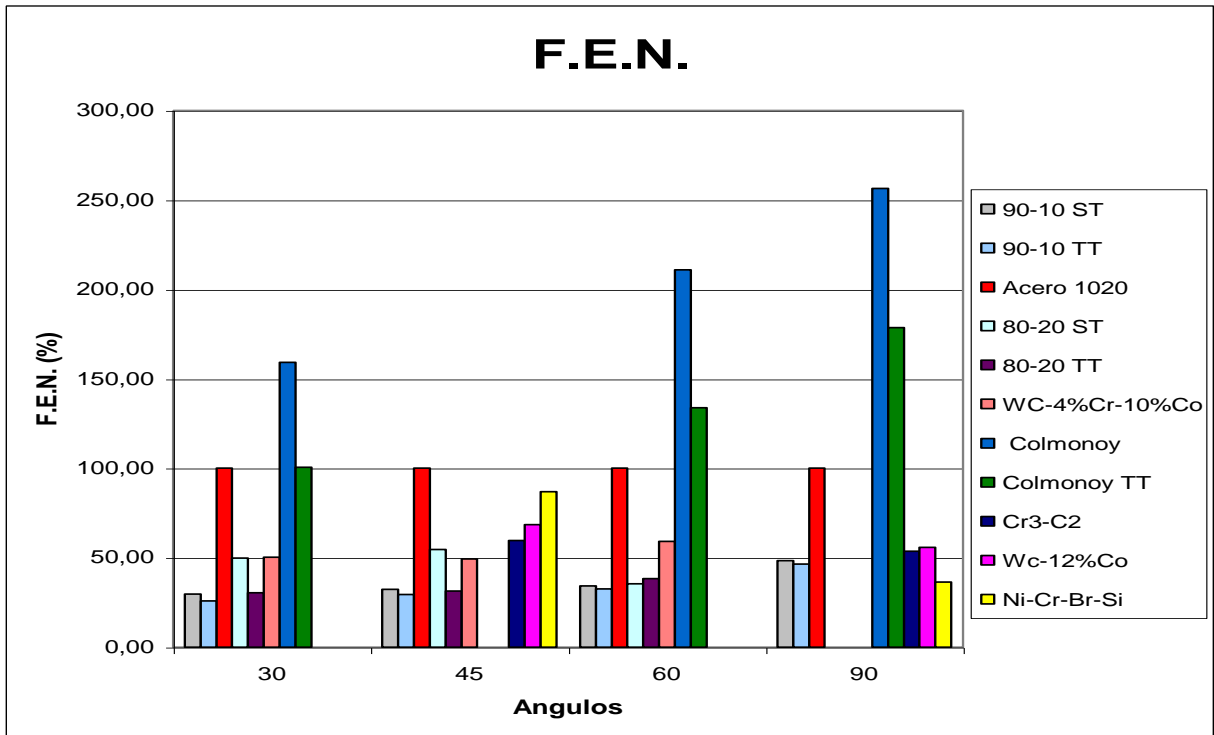
Los resultados obtenidos en este estudio están en concordancia con otros investigadores (Rodríguez M. et. al., 2000; Guo D. et. al., 1995 y Iron et. al., 1994), en los cuales se ha reportado que los tratamientos térmicos realizados sobre recubrimientos, incrementan la resistencia a la erosión. Estos autores aseveran que la mejora de esta resistencia se debe a una mayor densificación, menor nivel de porosidad y una mayor distribución de las fases duras.

En la Figura 27 se muestra el Factor de Erosión Normalizado (definido en la metodología experimental) en función del ángulo de incidencia. Este Factor nos indica qué porcentaje de pérdida normalizada (referido al acero) presentan las aleaciones estudiadas.



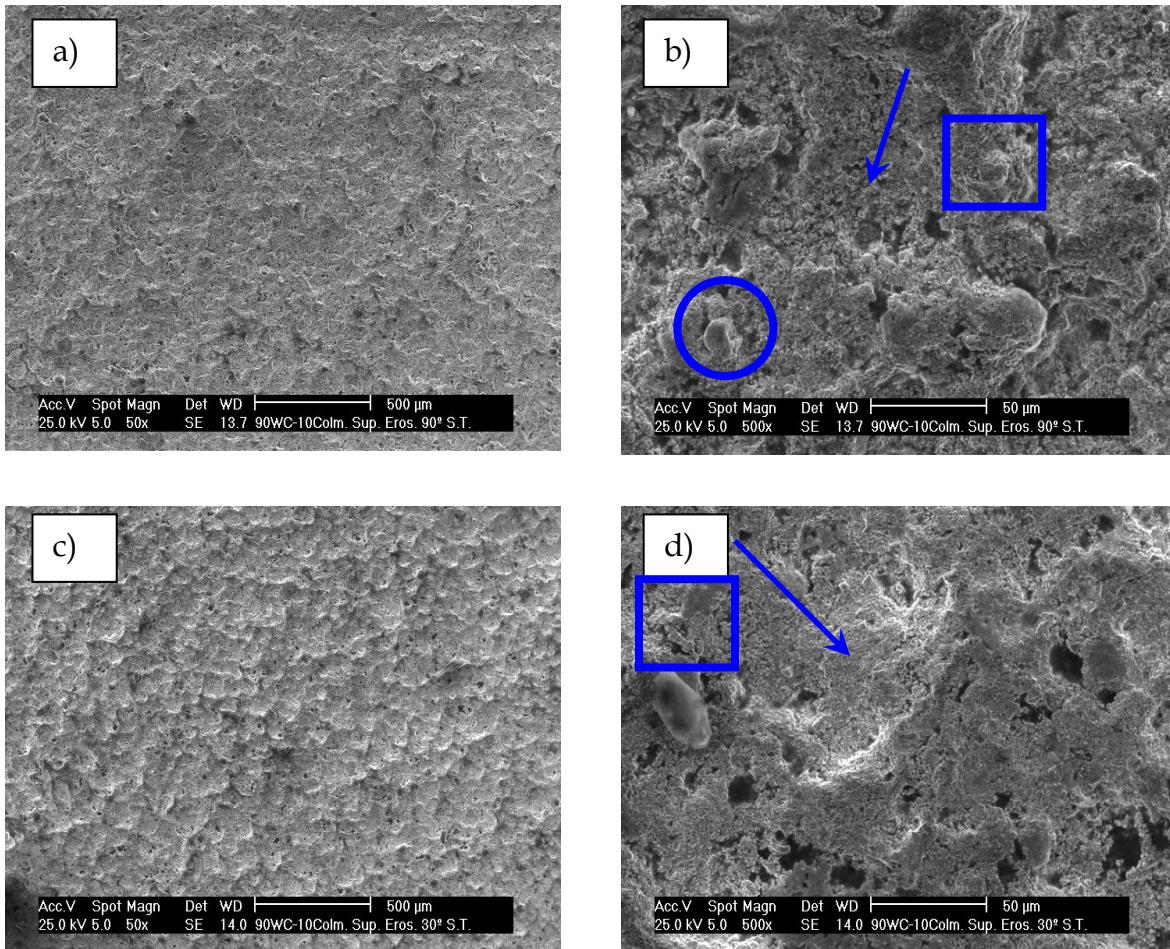
**Figura 27.-** F.E.N. de las muestras estudiadas.

La Figura 28 muestra el Factor de Erosión Normalizado del recubrimiento 90% (WC-12%Co) y 10% Colmonoy 88, en estado como rociado y tratado térmicamente, comparado con aleaciones de la misma base, estudiadas con anterioridad. Se puede apreciar que en líneas generales este recubrimiento es el que presenta el menor F.E.N.



**Figura 28.-** Factor de Erosión Normalizado de diferentes aleaciones estudiadas.

A fin de estudiar el comportamiento del recubrimiento frente al desgaste erosivo, a medida que se varía el ángulo de ataque, fueron observadas las huellas superficiales de las muestras que experimentaron los casos más desfavorables y los menos desfavorables, como son las muestras erosionadas ángulos de 90° y 30° respectivamente.



**Figura 29.-** Muestras Erosionadas sin Tratamiento Térmico. a) a 90° (50x); b) a 90° (500x); c) a 30° (50x); d) a 30° (500x).

La Figura 29a corresponde a la superficie de una muestra en estado como rociado erosionada a un ángulo de 90° en la cual no se observa un desgaste severo. Esto era de esperarse ya que los valores de pérdida de peso fueron relativamente bajos. La Figura 29b es un detalle de la Figura 29a a 500X. En esta figura se puede notar (ver círculo) una partícula fracturada como consecuencia de los choques producidos por las partículas de erodante lo cual nos podría indicar un mecanismo de fractura como posible modo de desgaste. Los sucesivos choques fracturarían las partículas hasta producir su desprendimiento. La flecha indicada en la figura también muestra evidencias de arado pero poca deformación plástica. En el

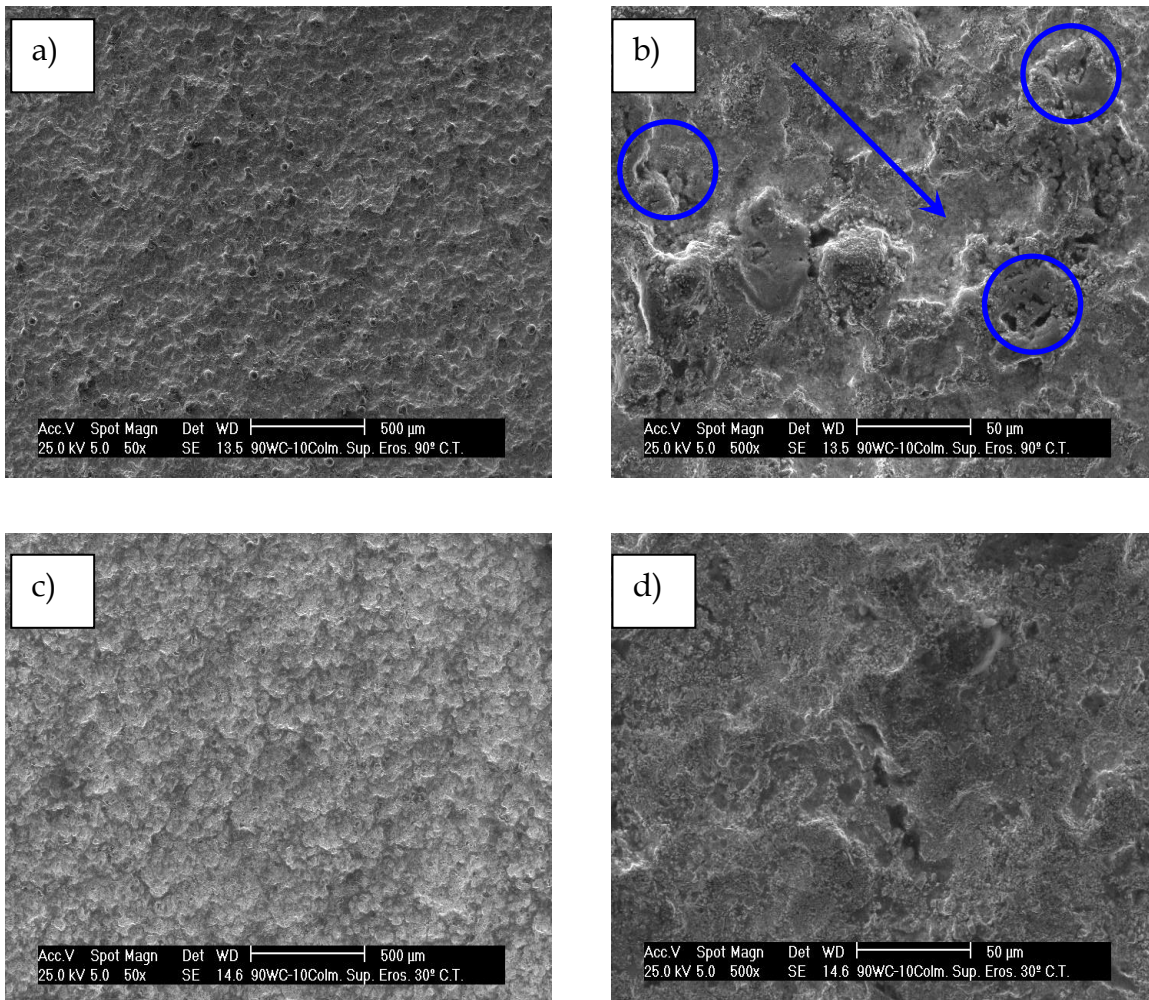
recuadro se puede observar una partícula sin fundir evidenciando que el proceso de erosión no fue crítico.

La Figura 29c corresponde a la superficie erosionada de una muestra en estado como rociado erosionada a  $30^\circ$ . La rugosidad superficial es más evidente que en el caso anterior, indicando que la pérdida de material es menor. En la Figura 29d la cual muestra una mayor magnificación de la figura anterior, se observa una zona de deformación plástica (ver flecha) indicando que el mecanismo de desgaste predominante podría ser arado y desprendimiento de partículas por fatiga en menor grado (ver recuadro).

En el caso de las muestras tratadas térmicamente y erosionadas a un ángulo de  $90^\circ$  (Figura 30a) se puede observar una superficie menos erosionada comparada con la muestra CR (Figura 29a). En la Figura 30b se observa un proceso de deformación plástica más acentuado (ver flecha) con algunas evidencias de desgaste por fatiga (ver círculos). En esta figura también puede observarse que existe menor porosidad comparada con la observada en la Figura 29b, lo cual nos indica que el tratamiento térmico produjo una densificación de recubrimiento y mejoró la tenacidad del mismo.

En la Figura 30c y 30d se observa que el mecanismo de desgaste predominante a  $30^\circ$  es el arado con mayor evidencia de deformación plástica que en las muestras anteriores erosionadas a  $90^\circ$ . En la Figura 30d se puede apreciar que el grado de deformación de la superficie de la muestra tratada térmicamente es menor que la de la muestra como rociada (Figura 29d), siendo esto evidenciado por valles de menor profundidad. Estos resultados explican el mayor efecto del tratamiento térmico para ángulos de  $30^\circ$ , observado en la Figura 26, mientras que para ángulos de  $90^\circ$  se produce desgaste por fatiga y mayor desprendimiento de

partículas a pesar de que el tratamiento térmico produjo una mejor densificación y cohesión entre las fases presentes.



**Figura 30.-** Muestras Erosionadas con Tratamiento Térmico. a) a 90° (50x); b) a 90° (500x); c) a 30° (50x); d) a 30° (500x).

### ***3.5.- Análisis del Ensayo de Abrasión.***

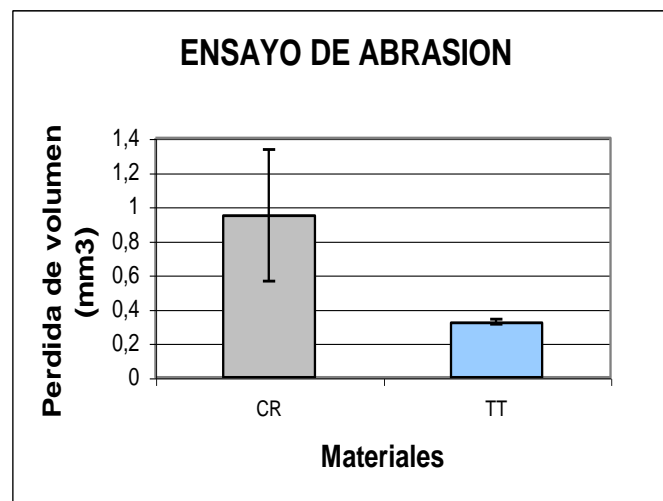
La Tabla 9 contiene la pérdida de volumen obtenida en los recubrimientos CR y TT así como también las del acero base después de realizado el ensayo de

abrasión. Se puede observar que la muestra tratada térmicamente es 67% más resistente a la abrasión que la muestra como rociada y 59 veces más resistente que el acero AISI 1020, por otro lado el recubrimiento como rociado fue 19 veces más resistente que el acero AISI 1020.

**Tabla 9.-** Pérdida de Volumen de diferentes aleaciones.

MATERIAL	PERDIDA DE VOLUMEN (mm <sup>3</sup> )
CR	0,94756
TT	0,31965
WC-12%Co	0,3808
Colmonoy	3,0594
Acero	17,9662

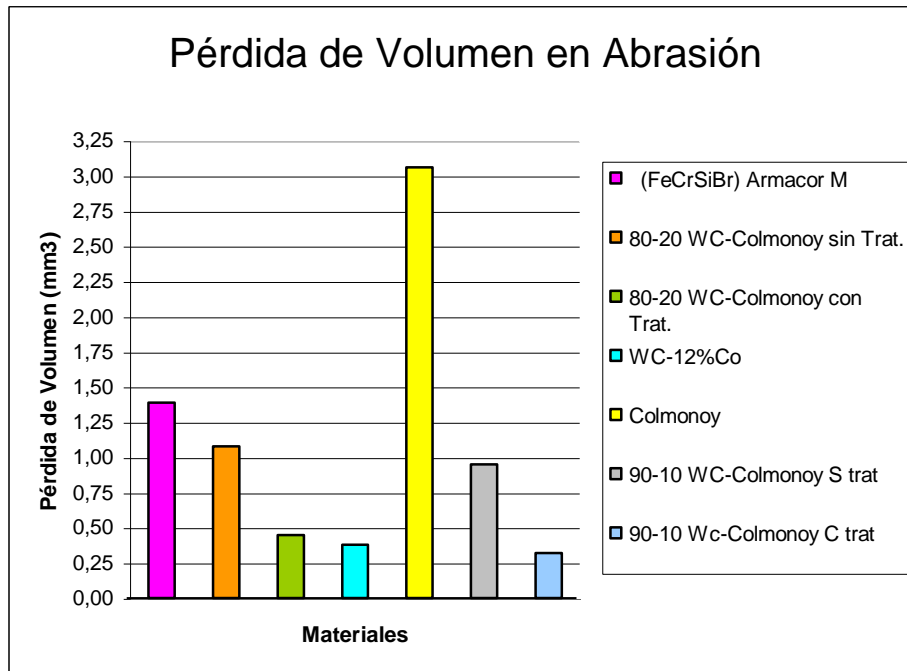
La Figura 31 muestra, gráficamente los resultados de la pérdida de volumen de la aleación 90% WC-12%Co - 10% Colmonoy 88, tanto en estado como rociada, como tratada térmicamente.



**Figura 31.-** Pérdida Volumétrica de las muestras después del ensayo.

Las barras de error mostradas en la Figura 31 nos indican que las muestras en estado como rociado presentan una mayor desviación de los valores que los alcanzados por las muestras tratadas térmicamente. Esto podría estar relacionado con la mayor rugosidad superficial de la muestra CR.

En la Figura 32 se comparan los resultados obtenidos en este estudio con resultados previos de diversas aleaciones ensayadas con los mismos parámetros. Se puede observar que la muestra TT presentó un mejor comportamiento frente al desgaste abrasivo que la muestra WC-12%Co. En esta figura también se logra apreciar que el efecto del tratamiento térmico fue más efectivo para mejorar la resistencia al desgaste abrasivo comparado con el desgaste erosivo.

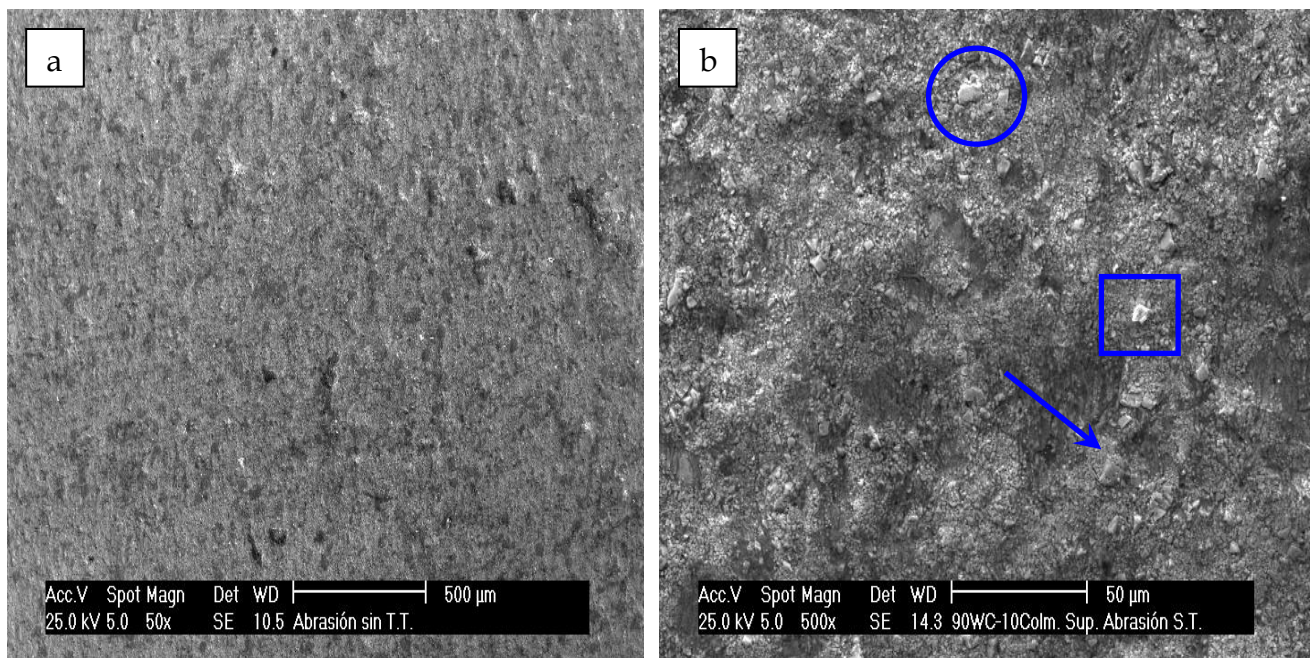


**Figura 32.-** Pérdida Volumétrica de las muestras 90-10, comparadas con aleaciones estudiadas con anterioridad.



La Figura 32 revela que la aleación 90%WC-12%Co y 10% Colmonoy 88 tratada térmicamente, es la que presenta mayor resistencia a la abrasión, comparada con otras aleaciones similares sometidas al mismo tipo de ensayo, lo que la hace una atractiva opción para piezas o componentes de máquinas que están sometidas a este tipo de desgaste.

Con el fin de estudiar la superficie de los recubrimientos después de haberlos sometido al desgaste abrasivo, las muestras fueron analizadas a través de un microscopio electrónico.

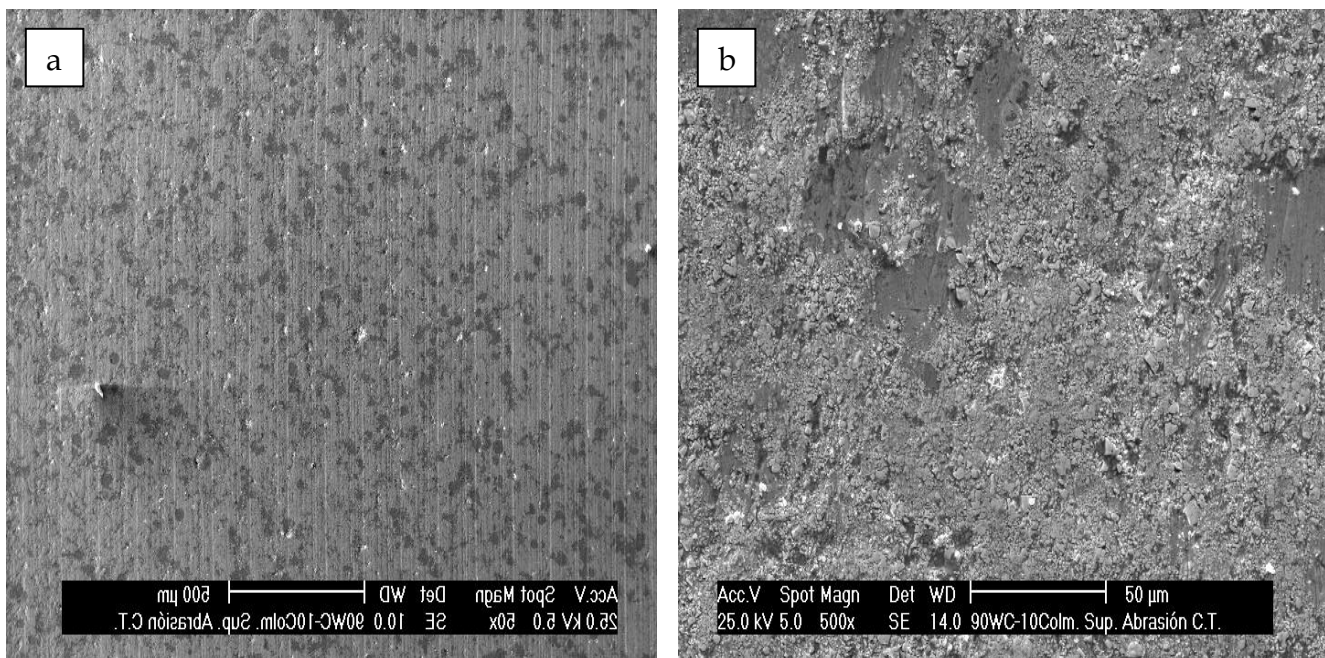


**Figura 33.-** Muestra de la aleación 90%WC-12%Co y 10% Colmonoy 88 en estado como rociada después del ensayo abrasivo. a) a 50x; b) a 500 x.

La Figura 33a corresponde a la superficie topográfica de una muestra en estado como rociado luego de haber sido sometida al ensayo de abrasión. Es notorio que las partículas abrasivas eliminaron completamente las huellas dejadas

por el proceso de rectificado previo otorgado a las muestras. Un detalle de esta superficie es mostrado en la Figura 33b en la cual se observa que el mecanismo de desgaste predominante fue la remoción de material, notándose algunas cavidades producto del material desplazado por el proceso abrasivo. Algunas evidencias de fractura por fatiga también son observadas (ver flecha). Sin embargo, la presencia de partículas no fundidas (ver círculo) y de carburos de tungsteno (ver recuadro) presentes en la superficie del recubrimiento, nos permiten deducir que el recubrimiento tiene un buen comportamiento frente al desgaste abrasivo.

La Figura 34a, presenta la superficie de la muestra tratada térmicamente, pero a diferencia de la figura anterior, en ésta todavía se evidencian las huellas del rectificado. La Figura 34b corresponde a un detalle de la figura anterior a 500X. En esta figura pueden observarse algunas huellas dejadas por la remoción de material y se evidencia un mecanismo predominante de deformación plástica lo cual igualmente puede ser atribuido al tratamiento térmico.



**Figura 34.-** Muestra de la aleación 90%WC-12%Co y 10% Colmonoy 88 con tratamiento térmico después del ensayo abrasivo. a) a 50x; b) a 500 x.

### 3.6.- Análisis del Ensayo de Desgaste Deslizante.

Mediante el ensayo deslizante (pin on disk), se puede determinar el coeficiente de fricción entre el par estático y el par tribológico, a medida que el pin recorre la distancia predeterminada (Figura 35). En las primeras vueltas del ensayo, las superficies hacen contacto en los picos, deformándolos y produciendo un aumento en el área de contacto entre ellas; esto es conocido como “running-in” o estado transitorio el cual se caracteriza por cambios muy significativos del coeficiente de fricción, seguido por un estado estacionario en donde el coeficiente de fricción permanece constante. En la Tabla 10 se observan los coeficientes de fricción promedios obtenidos en los dos ensayos.

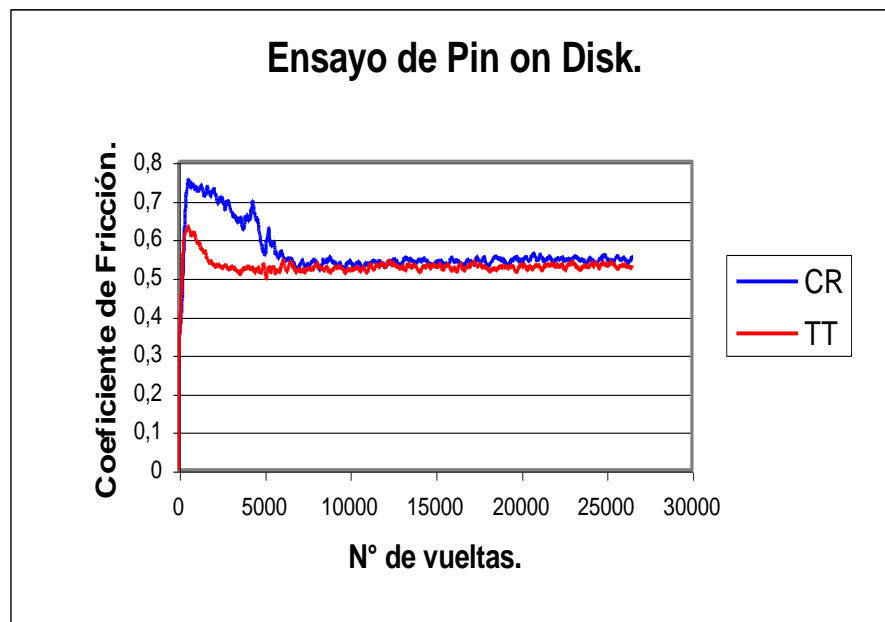


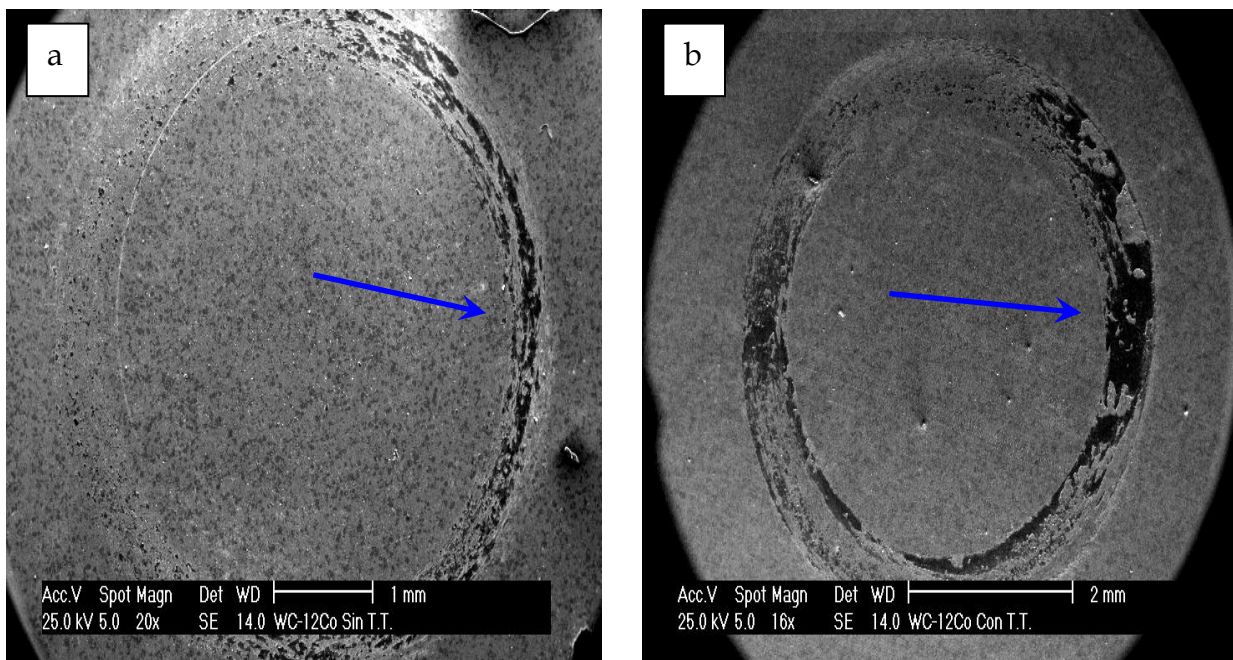
Figura 35.- Coeficiente de Fricción durante el ensayo.

**Tabla 10.-** Coeficientes de Fricción.

Muestras	Coeficiente de Fricción
CR	0,56553
TT	0,52697

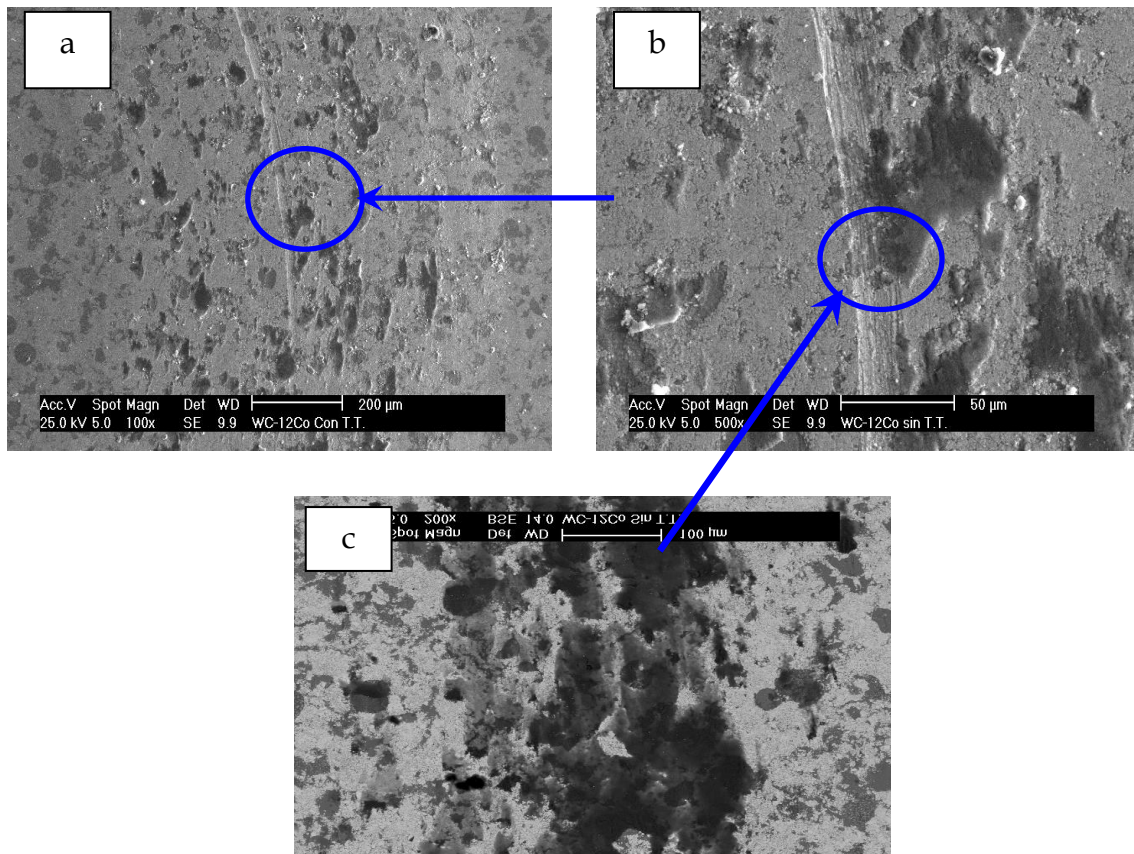
Cabe destacar que la muestra CR presenta, al inicio del ensayo, un aumento marcado del coeficiente de fricción, esto es debido a la presencia de picos e irregularidades que presenta la superficie de contacto.

Un análisis de la morfología de la huella mediante microscopía electrónica de barrido, nos permite observar que hay mayor cantidad de deposición de material en un lado de la circunferencia de la huella (ver flechas), esto puede ser debido a que las muestras, tanto en estado como rociado (Figura 36a), como la tratada térmicamente (Figura 36b), no estaban totalmente perpendiculares al eje del pin.



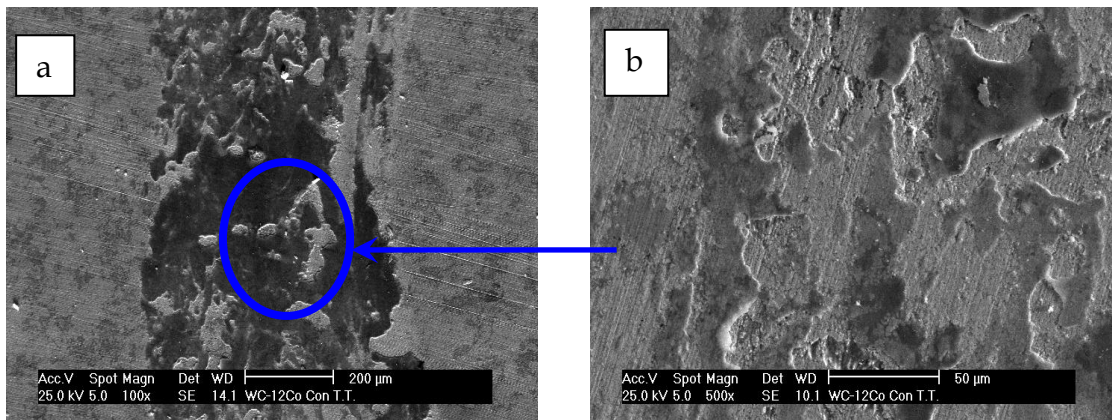
**Figura 36.-** Recorrido del pin sobre ambas muestras. a) como rociada; b) tratada térmicamente.

La Figura 37a presenta la muestra en estado como rociado a una magnificación de 100x; en esta se puede notar la presencia de material adherido a la superficie. A una magnificación mayor, (500x) correspondiente a la Figura 37b, se logra apreciar indicios de desgaste abrasivo, probablemente causados por partículas del recubrimiento desprendidas en el ensayo y arrastradas por el deslizamiento de la bola sobre el disco. La Figura 37c muestra la microestructura en modo de electrones retrodispersados (BSE) a una magnificación de 200x de la misma superficie en la cual se observa una zona gris oscura. Realizando un análisis puntual de EDX se pudo verificar que la zona gris oscura pertenecía al hierro del pin adherido al recubrimiento.



**Figura 37.-** Muestra como rociada con evidencias de desgaste abrasivo. a) a 100x; b) a 500x, c) con microscopía BSE a 200x.

En la Figura 38a, se presenta la muestra tratada térmicamente a un acercamiento de 100x, donde se puede apreciar una huella de adhesión más densa y gruesa. En la Figura 38b se puede observar claramente que el desgaste predominante en esta muestra fue de tipo adhesivo. Por otra parte se puede apreciar que la muestra presenta las marcas de rectificado, lo que no se evidencia en la muestra como rociada (Figura 37).



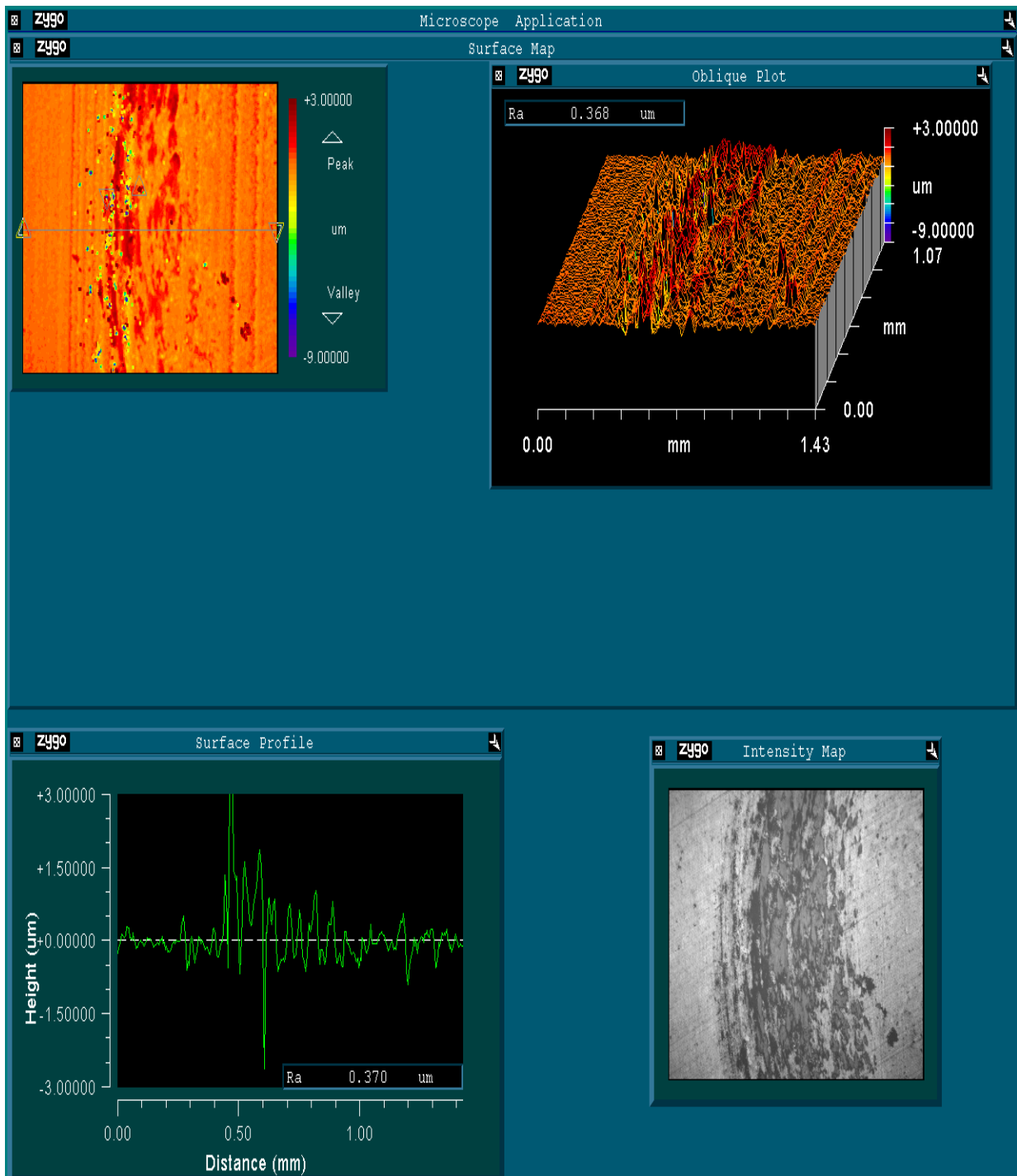
**Figura 38.-** Muestra con tratamiento térmico. a) a 100x; b) a 500x.

Con la ayuda del perfilómetro se pudieron observar las superficies de las muestras CR y TT luego del ensayo de desgaste deslizante. La Figura 39 muestra la perfilometría de la superficie de la muestra en estado como rociada, la parte inferior derecha de esta figura corresponde a la huella dejada por el pin, en esta se puede observar una zona oscura la cual corresponde al material depositado por el pin durante el ensayo; la parte gris clara corresponde a la superficie de la muestra. La imagen situada en la parte superior derecha de la Figura 39 permite corroborar lo anteriormente dicho por medio de un análisis topográfico, además se puede observar una línea vertical amarilla que corresponde a una huella de abrasión,

posiblemente ocasionada por una partícula de carburo desprendida durante el ensayo. La parte inferior derecha de la figura muestra en un perfil de la superficie evidenciado la huella de desgaste abrasivo. En la parte superior derecha de la Figura 39 se puede apreciar claramente el material adherido en la superficie de la muestra mediante un perfil topográfico en tercera dimensión.

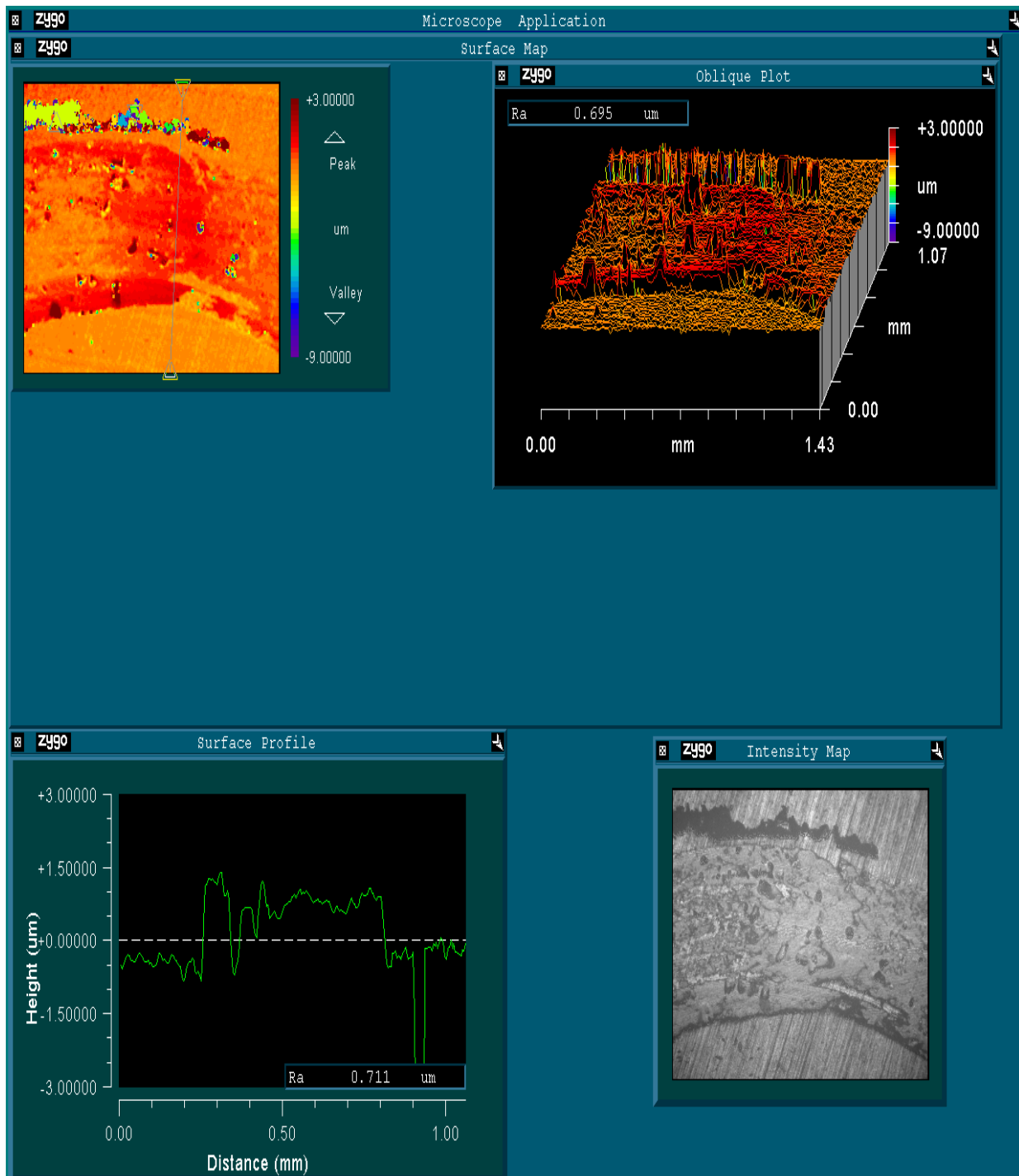
En la muestra con tratamiento térmico se puede evidenciar predominantemente desgaste de tipo adhesivo (Figura 40, parte inferior derecha), proveniente del pin hacia el recubrimiento, así como también una zona oscura perteneciente a las partículas de acero liberadas durante la abrasión del pin (llamadas comúnmente “debris”). La parte superior derecha de la figura muestra mediante un análisis topográfico una mayor cantidad de material adherido que en la presentada en la Figura 39. Por medio del perfil de la superficie (parte inferior derecha de la figura) se puede corroborar lo dicho con anterioridad. El perfil topográfico en tercera dimensión (parte superior derecha de la Figura 40) muestra las huella de adhesión dejadas por el pin sobre la superficie de la muestra.

La deposición de material proveniente del pin ocurrió para las dos condiciones, ya que la dureza de los recubrimientos es mayor a la del pin, lo que hace que éste se desgaste. Se puede observar en la parte inferior derecha de las Figuras 39 y 40 una zona gris oscura, la cual representa el material depositado por el pin y una zona gris clara que reporta la presencia del recubrimiento.



**Figura 39.-** Morfología y perfilometría de la muestra en estado como rociado.



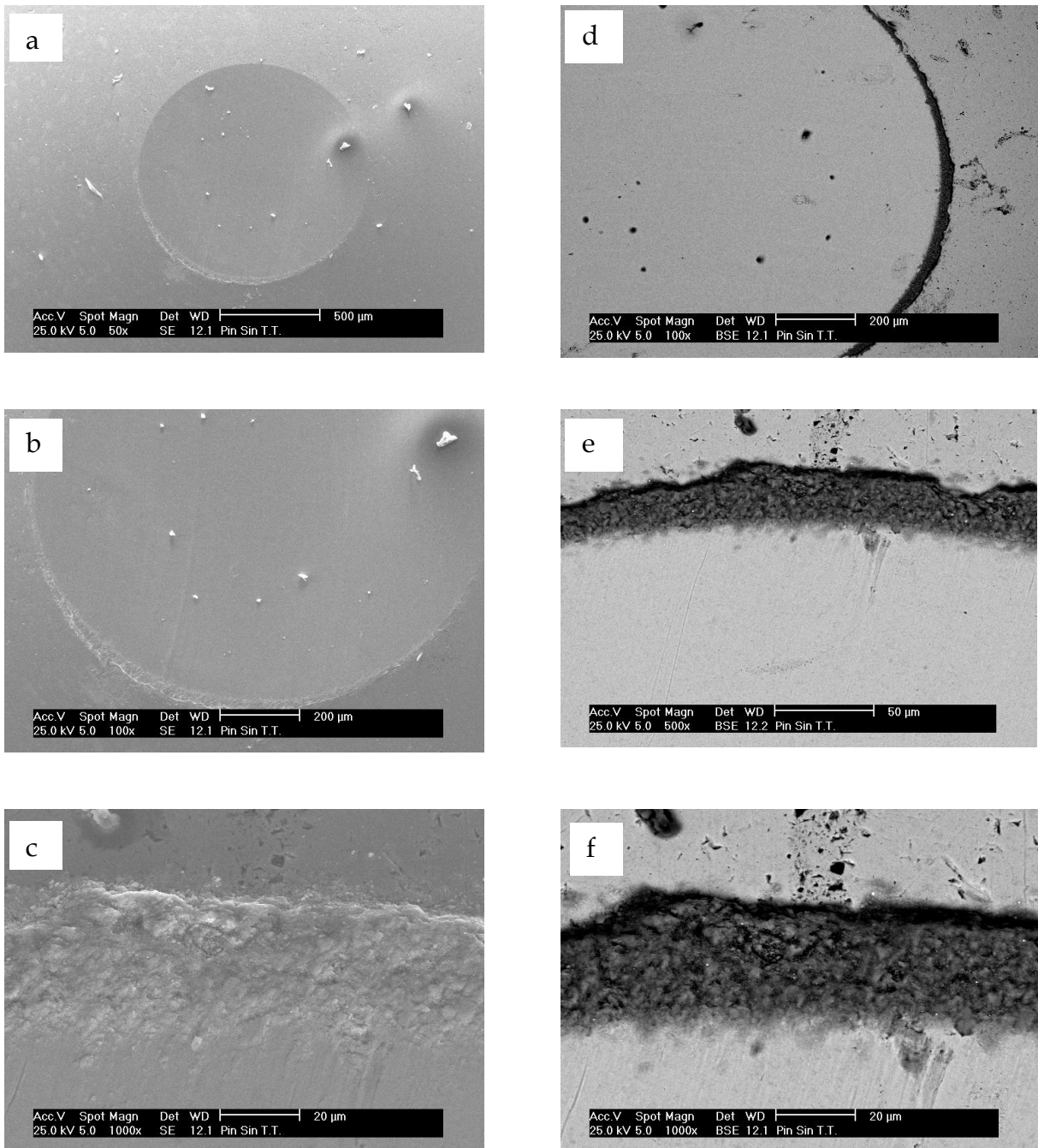


**Figura 40.-** Morfología y perfilometría de la muestra con tratamiento térmico.

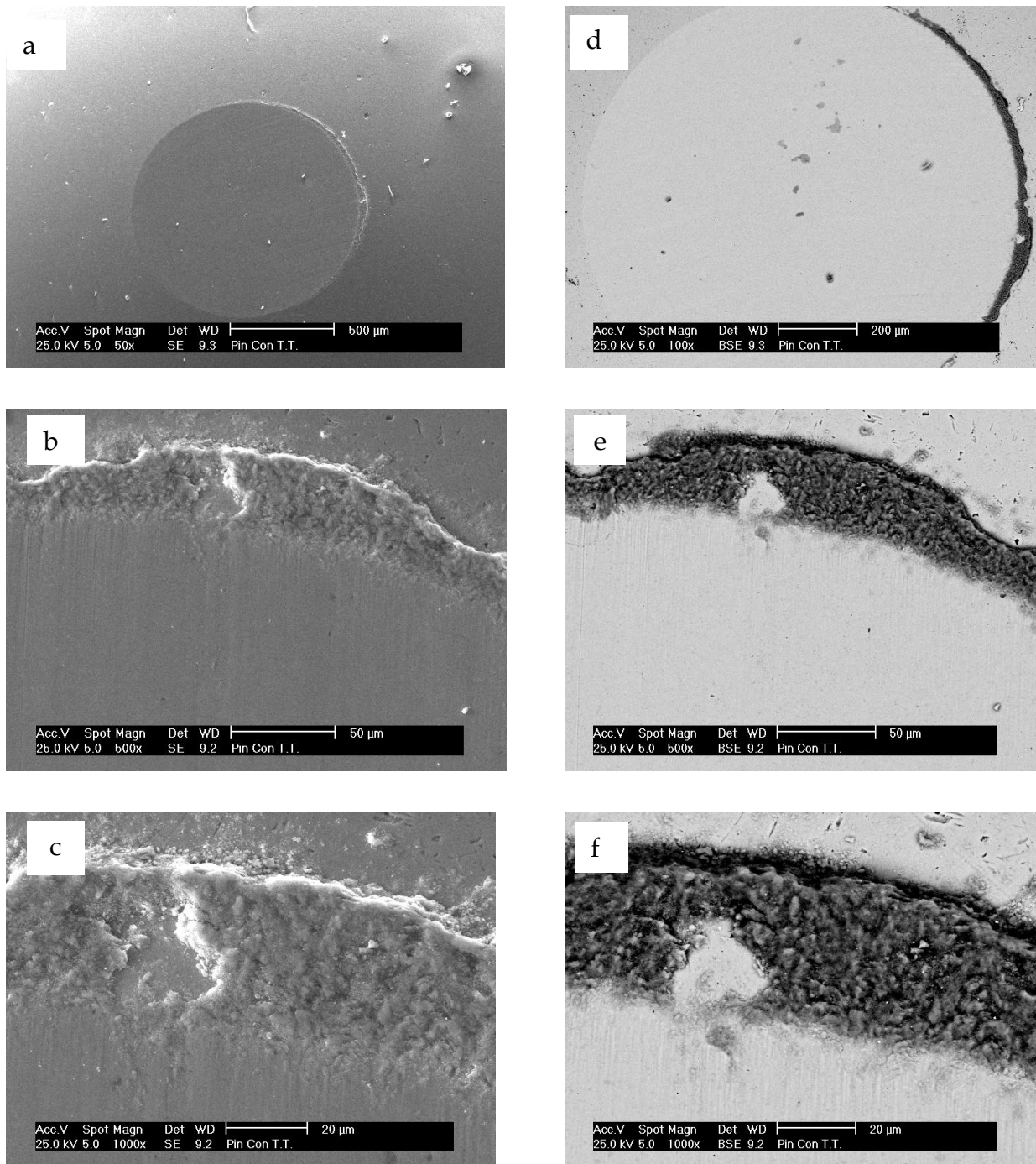
A fin de obtener una mayor información, se realizó un estudio a través de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), tanto en electrones secundarios como en electrones retrodispersados a la huella de desgaste producidas en los pines de acero AISI 52100 tanto en las muestras tratadas térmicamente como en las muestras en estado como rociado (Figuras 41 y 42). Como se puede apreciar, las huellas presentaron una geometría bien definida de forma circular (Figuras 41a y 42a); este tipo de geometría es característica cuando se presenta una transferencia de material del pin hacia el recubrimiento.

Las huellas de desgaste de las bolas ensayadas para el recubrimiento en estado como rociado, muestran la formación en el borde una acumulación de material en la dirección de arrastre del pin (Figura 41b). Esta misma acumulación de material se observa en el pin usado en el ensayo de la muestra tratada térmicamente (Figura 42b). Debido a esta acumulación se disminuye el paso de los “debris” dentro de la huella desviándose hacia los bordes de la misma durante el deslizamiento del pin; este borde se produce por la deformación plástica que sufre el acero en las condiciones de desgaste y puede ser observado en las Figuras 41c y 42c. Por medio de la modalidad de electrones secundarios del microscopio electrónico se puede observar en las Figuras 41d y 42d, la acumulación de material desprendido. A una magnificación de 500x (Figuras 41e y 42e) y 1000x (Figuras 41f y 42f), se puede apreciar mejor este fenómeno. En las Figuras 41f y 42f, también revela la estructura del material adherido, pudiéndose notar el aspecto granular del mismo.

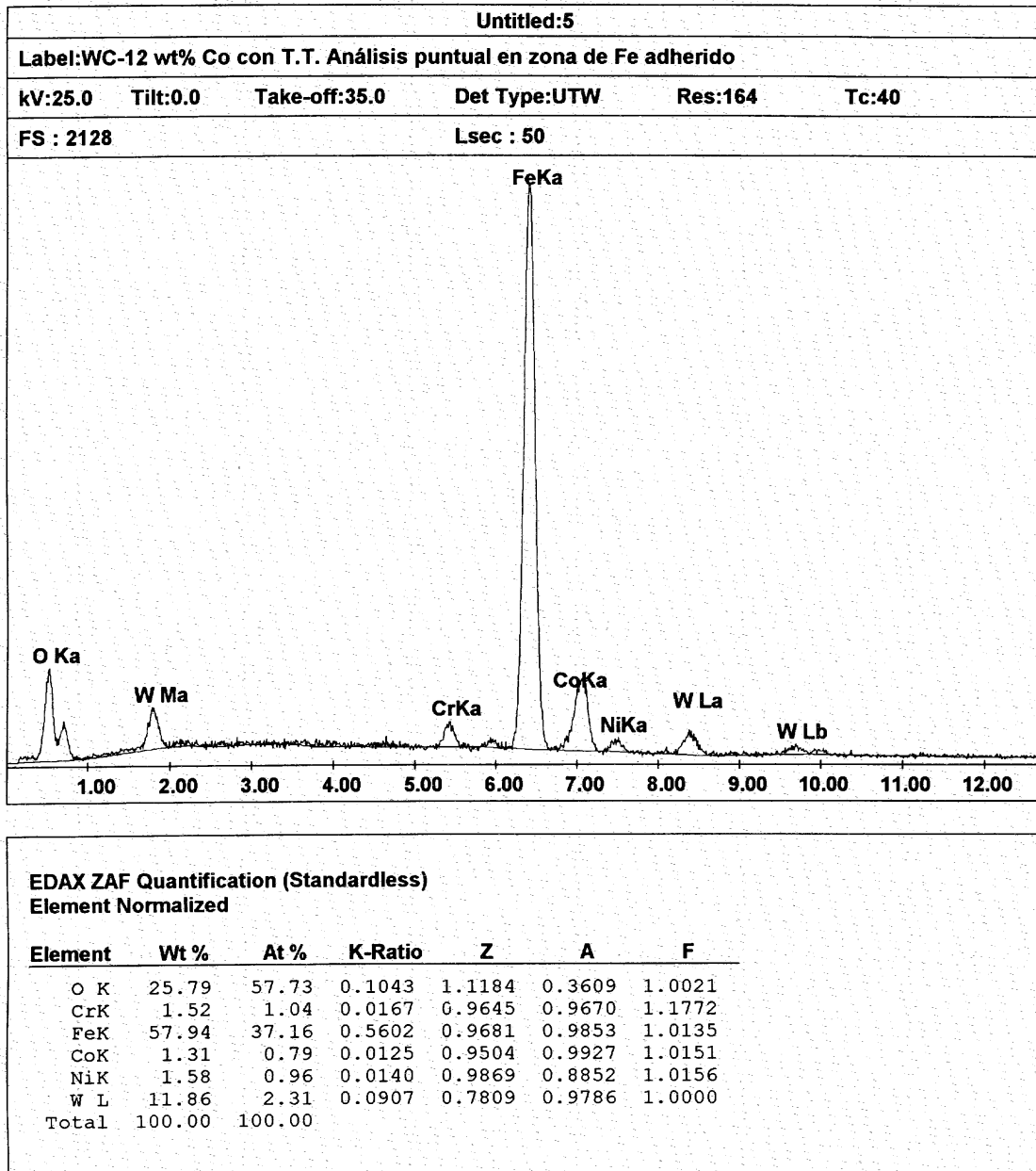
Para verificar que el material adherido en los pines usados para los ensayos era hierro, se realizó un análisis puntual de EDX, reportando efectivamente hierro (Fe) adherido (Figura 43).



**Figura 41.-** Huellas de desgaste del pin producida por el par tribológico de una muestra como rociada. En una microscopía de electrones secundarios a) a 50x; b) a 100x y c) a 1000x. En una microscopía de electrones retrodispersados d) a 100x; e) a 500x y f) a 1000x.



**Figura 42.-** Huellas de desgaste del pin producida por el par tribológico de una muestra con tratamiento térmico. En una microscopía de electrones secundarios a) a 50x; b) a 500x y c) a 1000x. En una microscopía de electrones retrodispersados d) a 100x; e) a 500 X y f) a 1000x.



**Figura 43.-** Análisis puntual de EDX en zona de Fe adherido.

Los pines (tanto el usado para el ensayo de la muestra como rociada, como el usado en la muestra tratada térmicamente) presentaron una pérdida volumétrica de  $0.0258 \text{ mm}^3$ . La constante de desgaste en los ensayos fue de  $1,24 * 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ .

## **4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### ***4.1.- Conclusiones.***

El tratamiento térmico realizado con llama oxiacetilénica no mejoró considerablemente la resistencia a la erosión del recubrimiento estudiado. Esto probablemente fue debido a un tiempo insuficiente de tratamiento térmico. El escaso porcentaje de aleación autofundente no permite apreciar visualmente el brillo característico de estas aleaciones cuando son sometidas a un tratamiento térmico posterior con llama.

Sin embargo la resistencia al desgaste erosivo del recubrimiento en estado como rociado y tratado térmicamente mejoró en un 74% con respecto al acero.

El tratamiento térmico mejoró en un 67% la resistencia a la abrasión del recubrimiento, lo cual puede ser atribuido a una menor porosidad y mejor cohesión entre las partículas, otorgadas por el tratamiento térmico.

Se pudo corroborar que la dureza no está relacionada con la resistencia al desgaste abrasivo, ya que el tratamiento térmico no aumentó la dureza pero sí la resistencia del desgaste abrasivo. Esto puede estar relacionado con el aumento en la ductilidad ya que el modo predominante de desgaste en las muestras sin tratamiento fue el desprendimiento y fractura, mientras que en las tratadas térmicamente fue la deformación plástica.

El tratamiento térmico también mejoró el coeficiente de fricción del recubrimiento en un 7%.

En el ensayo de Desgaste Deslizante (Pin on Disk), la muestra tratada térmicamente presentó un mejor comportamiento que la muestra en estado como rociada, ya que en la muestra tratada térmicamente se evidenció una mayor cantidad de material adherido proveniente del pin, que en la muestra en estado como rociada.

La aplicación del tratamiento térmico, mejoró la rugosidad del recubrimiento en un 55%. Reportando las muestras, como rociada y tratada térmicamente, unos valores de rugosidad de 3.197 y 2.064 micrómetros respectivamente.

La aleación 90% WC-12%Co + 10% Colmonoy 88, tratada térmicamente, obtuvo excelentes resultados tribológicos, frente a los ensayos realizados.

#### ***4.2.- Recomendaciones.***

Controlar de una manera más precisa los parámetros del ensayo de erosión, para así obtener resultados más certeros y puntuales; y de alguna manera automatizar algunos de éstos.

Mejorar el control de los parámetros para la aplicación del tratamiento térmico con llama oxiacetilénica, para así asegurar el rango de trabajo de las aleaciones y poder reproducir los resultados.



## **5.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.**

- Ahmed R. y Hadfield M.; (1997). "Wear of High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) coated cones in rolling contact". *Wear* 203-204. Pag 98-106.
- Bavaresco, Luis y Klisans, Jorge; (2000). "Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos rociados mediante la técnica alta velocidad oxígeno combustible". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Bangueses, Ana María y Rodríguez José; (2000). "Influencia del tratamiento térmico sobre la resistencia a la erosión de un recubrimiento de aleación autofundente obtenidos por rociado térmico high velocity oxy-fuel". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Carrasquero, Edwain; (1999). "Caracterización microestructural y tribológica de un revestimiento industrial de WC-Co obtenido por deposición via HVOF". Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.
- Chirinos, Lucrecia y León, Aristarco; (2000). "Estudio comparativo de la vida útil de herramientas comerciales widia (WC) sinterizadas y herramientas termorrociadas por proyección hipersónica (HVOF). Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

- Fillion, G.L.; (1994). "Colmonoy 88: A new development in Nickel-Based hardfacing alloys". *Welding Journal*. Volumen 78. Pag 365-368.
- García, Euro V. y Redden, Emmett E.; (1998). "Influencia del tratamiento térmico sobre la resistencia a la erosión de un acero 1020 termorrociado con una aleación base níquel por la tecnica High Velocity Oxi-Fuel". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Gonzalez, Evelin y Rangel, Jenkared; (1998). "Influencia del metodo de deposición sobre la resistencia a la erosión". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Guo, D. et. al.; (1995). "Effects of post-coatings processing on structure and erosive wear characteristics of flame and plasma spray coatings". *Surface and Coating Technology*. Volumen 73. Pag 73-78.
- Howes Jr; (1994). "Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications". *Welding Journal*. Volumen 78. Pag 47-51.
- Irons, W. et. al.; (1994). "Investigation of erosion-resistant chromium carbide coatings sprayed with the high pressure HVOF process". *Proceeding of the 7<sup>th</sup> Thermal Spray Conference 20-24*. Boston. Massachesetts. U.S.A. Pag 373-377
- Kosel, T.; (1992). "Solid Particle Erosion". *ASM Handbook, 6<sup>o</sup> edición, Friction, Lubrication and Wear Technology*. ASM International, Volumen 18. Pag 199-213.

- Lipson, Charles; (1970). *"Importancia del Desgaste en el Diseño"*. México. Herreros Hermanos. Sucesores S.A.
- Lira-Olivares, Joaquin ; (1993). *"Estudio de recubrimientos antidesgaste a base níquel"*. Trabajo especial de ascenso. Caracas: Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingeniería.
- Lozada, Rafael y Paolillo, Fabio ; (1998). *"Evaluación de la capacidad de carga en ejes que han sido termorrociados por medio de técnicas de deposición de arco eléctrico y High Velocity Oxi-Fuel (alambre)"*. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Malaver V., Ignio R. y La Barbera S., Luis J.; (1995). *"Evaluación de la resistencia por erosión de termorrociado"*. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Moskowitz, L.; (1992). *"Application of HVOF Thermal Spraying to solved corrosion problems in the petroleum industry"*. *Proceeding of the International Thermal Spray Conference & Exposition*. Orlando. Florida. USA. Pag 611-618.
- Niemi, K.; Vuoristo, P.; Mantyla, T.; Barbezat, G. & Nicoll, A.; (1992). *"Abrasion wear resistance of carbide coatings deosited by plasma and high velocity combustion processes"*. *Proceeding of the international thermal spray conference & exposition*. Orlando, Florida, USA. Pag. 685-689.
- Nerz, J.; Kaufold, R.; Kushner, A. & Rotolico, A.; (1991). *"Reduction of solid Particle Erosion by using HVOF and HEP coating depositions methods"*.

*Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference*. Pittsburg. P.A. U.S.A. Pag 285-291.

- Pinto, Nicola y Rangel, Aldrin ; (1999). "Diseño, construcción y puesta a punto de una máquina para ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Rodríguez, M.; Staia, M.; Gil L.; Arenas F. & Scagni A.; (2000). "Effect of heat treatment on properties of nickel hard surface alloy deposited by HVOF". *Surface Engineering*. Volumen 16, Number 5. Pag 415-420.
- Shieh, Y. H. J-T. Wang, H.C. Shih & S-T. Wu; (1993). "Alloying and post-heat-treatment of thermal-srprayed coating of self-fluxing alloys". *Surface and Coating Technology*. Volumen 58. Pag 73-77.
- Smith, W. and Fast, D.; (1991). "The future of thermal spray technology". *Welding Journal*. Volumen 47. Pag. 56-65.
- Torelliz, Claudio; (1994). " Resistencia al desgaste erosivo de pastillas sinterizadas de aleaciones de níquel". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingeniería.
- TU, J.; Mao, Z.;Li, J. & Wang, Z.; (1991). "Erosion Behavior of Thermally Sprayed Ni-WC coating at high temperature". *Proceeding of the 4<sup>th</sup> National Thermal Spray Conference*. Pennsylvania. USA. Pag. 259-263.

- Viñado R., Natividad; (1986). "Evaluación de recubrimientos termorrociados para cojinetes de deslizamiento". Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingeniería.
- Wang B.; (1995). "The elevated temperature erosion of hvof tungsten carbide cermet coating". *8<sup>th</sup> National Thermal Spray Conference*. Houston. Texas. U.S.A. Pag 711-715.
- ASTM Designation: G 76-83. Standard practice for conducting erosion test by solid particle impingement using gas jets.
- ASTM Designation: G65-C. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand / rubber wheel.
- ASTM Designation: G99-95<sup>a</sup>. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus.
- ASTM Designation: E 92-82. Standard test method for Vickers hardness of metallic materials.
- ASTM Designation: E 384-89. Standard test method for microhardness of materials.