

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y  
PROPIEDADES MECANICAS DE PIEZAS SINTERIZADAS**

*TUTOR ACADÉMICO:*  
*Prof. ING. MARIA RODRÍGUEZ DE PRATO*

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

*ROJAS G., DANIEL E.  
SUAREZ L., LUIS A.*

*PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO MECÁNICO.*

*CARACAS, 2.003.*

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y  
PROPIEDADES MECANICAS DE PIEZAS SINTERIZADAS**

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

**ROJAS G., DANIEL E.  
SUAREZ L., LUIS A.**

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

**CARACAS, 2.003.**

## DEDICATORIA

A Dios todo poderoso.

A mis padres y mis hermanos por darme la fuerza y el estímulo para luchar en las adversidades, así como también poder haber contado con ellos siempre.

A mis Panas, por contar con ellos tanto en los estudios como en la " Parroquia ".

A todos los profesores de Ingeniería en especial a los de la Escuela de Mecánica por haberme enseñado y formado como profesional.

*Daniel Rojas*

A Dios todo Poderoso

A mi familia que siempre me apoyaron en todas mis decisiones  
A todos mis compañeros de la Escuela de Mecánica que en todo momento me ayudaron y siempre pude contar con ellos

*Luis Suárez*

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

- ◆ A nuestra Tutora: Prof. Ing. María de los Ángeles Rodríguez de Prato, por su gran apoyo y orientación durante la realización de éste Trabajo Especial de Grado.
- ◆ Al Prof. Ing. Crisanto Villalobos por su invaluable ayuda, colaboración y asesoría en la realización de nuestro trabajo.
- ◆ Al Prof. Freddy J. Arenas, por su apoyo en la elaboración del presente trabajo.
- ◆ Al Ing. Adolfo Saez por su apoyo en la elaboración del presente trabajo.
- ◆ Al Prof. Juan Carlos Mestre, por su apoyo y colaboración en la realización de nuestro trabajo.
- ◆ A la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UCV, en especial al Dpto. de Tecnología y Producción.
- ◆ Al Laboratorio de Microscopía Electrónica del Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacios”.
- ◆ A la Empresa Rías C.A., por su gran aporte del material (sílice) necesario para la realización de los ensayos abrasivos.
- ◆ A la Empresa Bauxilum C.A., en especial al Ing. Mario Albarran por colaboración para el aporte del material (alumina) necesario para la realización de los ensayos erosivos.
- ◆ Al Ing. Jorge Shell de la Empresa Gomainca, por su gran colaboración en la fabricación de los discos de goma necesarios para la realización de los ensayos abrasivos.
- ◆ A todos nuestros amigos de la Escuela de Mecánica que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Caracas, 24 de Octubre de 2003.

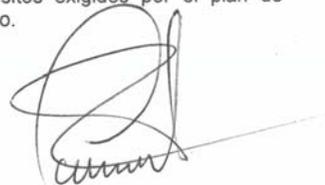
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el consejo de la escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Daniel Rojas, Luis Suárez., titulado:

"ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE PIEZAS SINTERIZADAS"

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



Prof. (Alfonso Quiroga)  
Jurado



Prof. (Crisanto Villalobos)  
Jurado



Profa. (Maria Rodríguez de Prato)  
Tutor Académico



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



*Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres DANIEL ROJAS, Cédula de Identidad V.- 12.958.321 y LUIS SUÁREZ, Cédula de Identidad V.- 10.814.311, el cual lleva por título*

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE PIEZAS SINTERIZADAS”**

*Decidimos conferirle una*

**MENCION HONORIFICA**

*En reconocimiento al esfuerzo realizado como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, el cual constituye un aporte importante e inédito al estudio en el área de Recubrimientos Resistentes al Desgaste.*

*En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas, a los veinticuatro días del mes de octubre del año dos mil tres, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador la Profa. María de los A. Rodríguez de Prato.*

Prof. Alfonso Quiroga

Prof. Crisanto Villalobos

Profa. María A. Rodríguez de Prato  
Coordinador

## **RESUMEN**

*Rojas G., Daniel E. y Suarez L., Luis A.*

### **ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y LAS PROPIEDADES MECANICAS DE PIEZAS SINTERIZADAS**

**TUTOR ACADÉMICO: PROF. MARÍA RODRÍGUEZ DE PRATO**

**TESIS. U.C.V. FACULTAD DE INGENIERÍA. ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA, CARACAS, 2.003. 95 PÁGINAS.**

**Palabras claves:** Desgaste, sinterizado, cermet, abrasión, erosión.

En el presente trabajo se realizó un estudio de la resistencia al desgaste erosivo y abrasivo, así como también de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas por sinterizado. Las piezas estudiadas fueron muestras sinterizadas con las aleaciones WC-10%Co, WC-5%NbC-10%Co, WC-10%NbC-10%Co, WC-15%NbC-10%Co y WC-20%NbC-10%Co. Se realizaron pruebas de dureza, rugosidad, tenacidad de fractura y ensayos para determinar la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo según las normas ASTM G65-C y ASTM G99-95a respectivamente. Se realizó Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y análisis químicos mediante la técnica de Espectroscopia por Dispersión de Energía de Rayos X (EDS), para caracterizar las fases presentes, obteniéndose básicamente una fase clara de carburo de tungsteno, una fase gris de carburo de niobio y una fase oscura de cobalto, actuando éste último como la fase cementante de la mezcla. A partir de los resultados obtenidos se concluye que la microdureza aumenta a medida que aumenta el contenido de NbC en la composición. La composición que contiene 15% NbC fue la que mostró un mejor comportamiento al desgaste abrasivo. La composición que presentó menor desgaste erosivo para los ángulos de 30° y 60° fue la composición WC-10%Co, mientras que para un ángulo de 90° fue la composición WC-20%NbC-10%Co. La tenacidad de fractura presentó un comportamiento inversamente proporcional a la dureza.

**ÍNDICE GENERAL**

	<b>Pag.</b>
PORTADA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	iix
ÍNDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	01
<b>Capítulo I - Marco Teórico</b>	<b>04</b>
<b>1.1.- Carburos Cementados</b>	<b>05</b>
1.1.1.- Carburos Cementados	05
1.1.2.- Sinterización de Carburos Cementados	06
1.1.3.-Clasificación de los Carburos Cementados	07
1.1.4.-Manufactura de los Carburos Cementados	08
1.1.5.-Características Generales del Carburo de Niobio	09
1.1.6.-Carburo de Tungsteno	11
1.1.7.-Compuestos de Tipo (WC-MC-Co).	13
<b>1.2.- DESGASTE</b>	<b>15</b>
1.2.1.-Teoría de Desgaste	15
1.2.2.- Desgaste de Carburos	18
1.2.3.-Tipos de Desgaste	19
1.2.3.1.-Desgaste Abrasivo	19
1.2.3.2.-Desgaste Adhesivo	21
1.2.3.3.-Desgaste Corrosivo	22
1.2.3.4.-Desgaste Erosivo	23
1.2.3.5.-Desgaste por Fatiga Superficial	24

1.2.4.- El Fenómeno de la Abrasión	25
1.2.5.- El Fenómeno de la Erosión	30
1.2.6.- Tenacidad de Fractura	34
<b>Capítulo II - Procedimiento Experimental</b>	<b>38</b>
2.1.- Material	39
2.2.- Fabricación de las muestras	40
2.3.- Ensayos a realizar	42
2.3.1.-Determinación de la Densidad	42
2.3.2.-Ensayo de Erosión	42
2.3.3.-Ensayo de Abrasión	44
2.3.4.-Ensayo de Microdureza	47
2.3.5.-Ensayo de Tenacidad de Fractura	48
2.4.- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Análisis Microestructural	49
<b>Capítulo III - Análisis y Resultados</b>	<b>51</b>
3.1.- Análisis de la Microscopía Electrónica de Barrido	52
3.1.1-Análisis de la composición WC-10%Co	52
3.1.2-Análisis de la composición WC-5%NbC-10%Co	54
3.1.3-Análisis de la composición WC-10%NbC-10%Co	56
3.1.4-Análisis de la composición WC-15%NbC-10%Co	58
3.1.5-Análisis de la composición WC-20%NbC-10%Co	60
3.2.- Análisis de la Microdureza	62
3.3.- Análisis del Ensayo de Erosión	65
3.4.- Análisis del Ensayo de Abrasión	68
3.5.- Análisis de Tenacidad y Fractura	74
<b>Capítulo IV - Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>76</b>
4.1.- Conclusiones	77
4.2.- Recomendaciones	79

<b>Capítulo V - Referencias Bibliográficas</b>	<b>80</b>
--	-----------

---

<b>Capítulo VI – Anexos</b>	<b>86</b>
-----------------------------	-----------

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.1.-</b> Desgaste Bi-elemento.	20
<b>Figura 1.2.-</b> Desgaste Tri-elemento.	20
<b>Figura 1.3.-</b> Desgaste Adhesivo.	22
<b>Figura 1.4.-</b> Desgaste Erosivo.	23
<b>Figura 1.5.-</b> Desgaste por Fatiga Superficial.	25
<b>Figura 1.6.-</b> Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.	27
<b>Figura 1.7.-</b> Variación de la erosión con el ángulo de impacto Característico de materiales dúctiles y frágiles.	33
<b>Figura 1.8.-</b> Tipos de cortes producidos por el impacto de las partículas. (Hutchings, I. M.)	34
<b>Figura 1.9.-</b> Configuración de una indentación Vickers en un material frágil.	36
<b>Figura 1.10.-</b> Tipos de grietas de indentación.	37
<b>Figura 2.1.-</b> Horno Tubular usado para la sinterización.	41
<b>Figura 2.2.-</b> Ciclo de Sinterización.	41
<b>Figura 2.3.-</b> Banco de Ensayo de Erosión.	43
<b>Figura 2.4.-</b> Balanza electrónica, Marca SCIENTECH. Modelo SA 310.	44
<b>Figura 2.5.-</b> Banco de Ensayo de Abrasión.	46
<b>Figura 2.6.-</b> Microdurómetro.	47
<b>Figura 2.7.-</b> Microscopio óptico marca Olimpo modelo PMG3, acoplado a un analizador de imágenes marca Leco modelo AI300I.	48
<b>Figura 2.8.-</b> Grieta tipo Palmqvist	49
<b>Figura 2.9.-</b> Microscopio electrónico.	50
<b>Figura 3.1.-</b> a) Fotomicrografía 500x, muestra WC-10%Co. b) Fotomicrografía 5000x muestra WC-10%Co.	52 53
<b>Figura 3.2.-</b> a) EDS de la fase clara A muestra WC-10%Co. b) EDS de la fase oscura B muestra WC-10%Co.	53
<b>Figura 3.3.-</b> a) Fotomicrografía 500x muestra 5% NbC.	54

	b) Fotomicrografía 3500x muestra 5% NbC.	55
<b>Figura 3.4.-</b>	a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B.	
	c) EDS fase oscura C. Muestra 5% NbC .	55
<b>Figura 3.5.-</b>	a) Fotomicrografía 3500x muestra 10% NbC.	56
	b) Fotomicrografía 5000x muestra 10% NbC.	57
<b>Figura 3.6.-</b>	a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B.	
	c) EDS fase oscura C. Muestra 10% NbC.	57
<b>Figura 3.7.-</b>	a) Fotomicrografía 3500x muestra de 15% NbC.	58
	b) Fotomicrografía 5000x muestra de 15% NbC.	59
<b>Figura 3.8.-</b>	a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B.	
	c) EDS fase oscura C. muestra de 15% NbC.	59
<b>Figura 3.9.-</b>	a) Fotomicrografía 3500x muestra de 20% NbC.	60
	b) Fotomicrografía 5000x muestra de 20% NbC.	61
<b>Figura 3.10.-</b>	a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B.	
	Muestra de 20% NbC.	61
<b>Figura 3.11.-</b>	Microdureza Vickers.	63
<b>Figura 3.12.-</b>	Microscopia Comparativa. a)0%NbC, b)5%NbC, c)10%NbC, d)15%NbC, e)20%NbC.	64
<b>Figura 3.13.-</b>	Tasa de Erosión de las muestras estudiadas.	66
<b>Figura 3.14.-</b>	Microscopia después de realizado el ensayo de erosión, a)(3500x) a 90°, b)(500x) a 90°.	67
<b>Figura 3.15.-</b>	Microscopia Electrónica de Barrido después de realizado el ensayo de erosión, a)(5000x) a 30°, b)(5000x) a 30°.	68
<b>Figura 3.16.-</b>	Pérdida de Volumen ajustada.	69
<b>Figura 3.17.-</b>	Pérdida de Volumen Vs Tiempo de Ensayo.	71
<b>Figura 3.18.-</b>	Microscopía Electrónica de Barrido a 500x, después de realizado el ensayo de abrasión, a)0%NbC a 5 min, b)0% NbC a 30 min, c)5%NbC a 5 min, d)5%NbC a 30 min, e)10%NbC a 5 min, f)10%NbC a 30 min.	72
<b>Figura 3.19.-</b>	Microscopía Electrónica de Barrido a 500x, después de realizado el ensayo de abrasión, g)15%NbC a 5 min,	

h)15%NbC a 30 min, i)20%NbC a 5 min, j)20%NbC a 30 min.	73
<b>Figura 3.20.-</b> Indentación Vickers con una carga de 30 Kgf.	74
<b>Figura 3.21.-</b> Tenacidad de Fractura.	75

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
<b>Tabla 1.1.</b> -Propiedades de los componentes del WC-Co.	12
<b>Tabla 1.2.</b> -Variación del número de Best con el tipo de daño.	32
<b>Tabla 2.1.</b> -Composición de los Sinterizados.	39
<b>Tabla 2.2.</b> -Dimensiones de las Probetas (mm).	39
<b>Tabla 2.3.</b> -Parámetros del ensayo de abrasión.	45
<b>Tabla 3.1.</b> -Microdureza Vickers.	62
<b>Tabla 3.2.</b> -Pérdida de peso ensayo de erosión.	65
<b>Tabla 3.3.</b> -Pérdida de Volumen Ajustada (mm <sup>3</sup> ).	68
<b>Tabla 3.4.</b> -Tenacidad de Fractura (K <sub>IC</sub> ).	74

## INTRODUCCION

En los últimos años la ingeniería ha ido avanzando de manera sobresaliente en el desarrollo de una gran variedad de técnicas dedicadas a mejorar las propiedades superficiales de los materiales, dentro de estas técnicas se encuentran los procesos de rociado térmico, aplicaciones de trabajo en frío y caliente, tratamientos térmicos, o procesos de sinterizado, los cuales se presentan como unas de las alternativas más importantes a ser empleada en la fabricación y recuperación de elementos de máquinas.

La prolongación de la vida útil de los componentes mecánicos por medio del control del desgaste se ha convertido durante la última década, en una importantísima herramienta para la reducción de los costos de producción en la industria. El monitoreo del control del desgaste constituye ahora uno de los principales objetivos, tanto en el diseño mecánico como en las operaciones de mantenimiento. Siguiendo las necesidades prácticas, la investigación en ingeniería mecánica se ha dirigido hacia nuevas áreas de acción.

En los últimos años, además del análisis cinemático de piezas en movimiento que ha sido el primer objetivo del diseño mecánico y del cálculo de resistencia de las piezas se ha venido desarrollando un tercer campo "la tribología".

Esta ciencia investiga la interacción entre dos superficies en contacto y en movimiento relativo, interacción que principalmente se manifiesta como fricción y está relacionada en forma implícita con el desgaste mecánico. Como consecuencia lógica el trabajo de mantenimiento industrial, por mucho tiempo considerado como una actividad secundaria en el sistema de producción, llegó a ser el objeto de un nuevo campo de investigación llamado "terotecnología". [15]

El desarrollo industrial moderno, involucra una gran cantidad de maquinarias y elementos de máquinas, los cuales están sometidos a constantes esfuerzos, esto

trae como consecuencia el deterioro de componentes vitales en un equipo, pudiendo llegar a originar la paralización del mismo, y de esta manera generar la interrupción de forma directa o indirecta de un proceso o actividad productiva dentro de la industria, ocasionando considerables pérdidas económicas para la misma. Por consiguiente, a la hora de realizar un mantenimiento o una reparación de componentes, el desarrollo de nuevas tecnologías nos permite ofrecer la solución más eficaz y el mejor método tecnológico, a un bajo costo en el menor tiempo posible.

El desgaste es un problema que se encuentra con frecuencia en procesos en los cuales piezas de máquinas son sometidas a constante fricción. En los últimos años se han realizado numerosos estudios de este fenómeno con la finalidad de minimizarlo o eliminarlo en su totalidad. Los adelantos tecnológicos apuntan al desarrollo de nuevos materiales o a la optimización de los ya existentes.

Los materiales metálicos, cerámicos, entre otros; son utilizados en la actualidad para reconstruir piezas desgastadas, producir superficies resistentes al desgaste, etc. No se puede generalizar sobre un solo tipo de desgaste, ni un material especial que resista todos los tipos de desgaste que puedan presentarse, sino que por el contrario, es necesario estudiar cada fenómeno y material en particular. De ésta forma se seleccionarían los materiales más idóneos para cada requerimiento.

Entre las principales aplicaciones del sinterizado encontramos las siguientes: herramientas de corte, válvulas petroquímicas, piezas de equipos de minería, componentes de válvulas de control de flujo, impulsores de bombas de alta presión y en general en aquellas aplicaciones donde se necesita una alta resistencia al desgaste, las cuales en los últimos años, han mostrado una evolución y desarrollo importante en lo que se refiere a inserciones de materiales metálicos (ferrosos y no ferrosos), así como materiales no metálicos.

Continuando con el estudio de nuevas tecnologías, este trabajo especial de grado tiene como finalidad evaluar la resistencia al desgaste erosivo y abrasivo así como también las propiedades mecánicas de un material sinterizado cuya composición química se basa en la aleación WC-NbC-Co. A la cual se le han variado los porcentajes del carburo de niobio (NbC).

## Marco Teórico

### 1.1.- CARBUROS CEMENTADOS

#### 1.1.1.- Carburos Cementados.

Podemos definir los carburos cementados como el resultado de la mezcla mecánica de dos o más elementos de carburos refractarios tales como ( WC; TiC, NbC, TaC, HfC, VC, con un metal como Co, Fe y/o Ni ), cuya dureza, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la abrasión, y una temperatura de fusión muy alta entre otras, los han convertido en materiales importantes para la elaboración de herramientas de corte, válvulas petroquímicas, piezas de equipos de minería, matrices, punzones de embutición, boquillas y en general, en aquellas aplicaciones en las cuales se necesite una alta resistencia al desgaste [1].

En los carburos cementados, las propiedades físicas están directamente relacionadas con dos constituyentes: las partículas de carburo y la fase cementante. Con esta combinación, las propiedades positivas de los componentes se superponen: el componente principal (la fase carburo) provee la dureza y la resistencia al desgaste mientras que la fase dúctil (cementante) contribuye a la tenacidad necesaria. Las densidades de estos materiales oscilan entre  $13 \text{ g/cm}^3$  y  $15 \text{ g/cm}^3$ , y sus durezas van desde  $1930 \text{ HV}_{30}$  a  $770 \text{ HV}_{30}$  [2].

Es importante señalar, que el comportamiento de los carburos para piezas de corte depende mucho de la composición, el tamaño de grano y la microestructura generada. La microestructura ideal de las aleaciones de WC-Co debe exhibir solamente dos fases: granos angulares de WC y una fase de Co aglomerante. Los contenidos de carbono deben ser controlados dentro de los límites más estrechos, ya que contenidos de carbono demasiado altos resultan en la presencia de grafito libre dividido finamente, el cual en pequeñas cantidades no tiene efectos adversos en aplicaciones de maquinado. La deficiencia de carbono de cualquier manera, resulta

en la formación de una serie de carburos dobles (por ejemplo:  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  ó  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ ) comúnmente conocidos como fase  $\eta$ , la cual causa severa fragilización, ya que la formación de fase  $\eta$  envuelve la disolución de los carburos originales dentro de los aglomerantes de cobalto, la fase  $\eta$  aparece como una forma irregular en la microestructura [2].

Generalmente los carburos más utilizados son a base de WC-Co con contenidos de cobalto variable entre 4-30% en peso, según la aplicación. Pero es importante destacar que un incremento en el contenido de cobalto, conlleva a una disminución de la dureza y en la resistencia al desgaste de materiales duros como WC-Co [3].

### 1.1.2.- Sinterización de Carburos Cementados.

El primer carburo de tungsteno fue sinterizado en 1890 por el químico francés Henri Moissan, sin embargo solo se logro obtener un producto completamente consolidado en 1923 cuando Schroter mezclo polvos de WC con pequeñas cantidades de diferentes polvos metálicos ( Co, Ni, o Fe), los compacto y los sinterizo a una temperatura de aproximadamente  $1300^\circ\text{C}$  [4]. La sinterización de carburos cementados consiste en la remoción de lubricantes del prensado, densificación y desarrollo de la microestructura, logrando así la consolidación de un material por efectos del calor. Un aumento de la resistencia mecánica y generalmente una reducción en la porosidad es obtenida mediante este proceso. Existen dos tipos de sinterización una en fase líquida y otra en fase sólida. La sinterización en fase líquida es el proceso por el cual uno de los metales se funde infiltrándose entre las partículas del otro, aleándose con su superficie y produciendo así una unión metálica continua.

Para la sinterización de los carburos en fase líquida es necesario tomar en cuenta algunos aspectos en el proceso, entre ellos tenemos:

- ◆ El tamaño de partícula.

- ◆ La forma de la partícula.
- ◆ La porosidad interna del polvo.
- ◆ La estereometría del polvo.
- ◆ La densidad en verde.
- ◆ Las velocidades de calentamiento y enfriamiento.
- ◆ La temperatura.
- ◆ El tiempo y la atmósfera.

Dos métodos básicos son usados para sinterizar carburos cementados: El primero de ellos es el sinterizado por hidrogeno proceso que se realiza en una atmósfera a base de hidrógeno a presiones atmosféricas. Tienen relativamente altos potenciales de oxidación debido a las fugas de aire y las reacciones con los componentes cerámicos del horno.

El otro proceso es la sinterización por vacío se realiza en un horno de inducción al vacío, se alcanzan altas temperaturas para carburizar el tungsteno y el carbono en forma de monocarburo, este proceso tiene un alto uso comercial, debido a los bajos costos de operación, por esto se considera el proceso predominante para el sinterizado de los carburos cementados. Permite un mejor control de la composición (oxígeno contenido en los polvos carburados).

### **1.1.3.- Clasificación de los Carburos Cementados.**

No existe ningún sistema universalmente aceptado para clasificar los carburos cementados. Los sistemas comúnmente utilizados por fabricantes y usuarios, tienen inherentes pro y contra en lo que se refiere a la descripción de materiales específicos. Por esta razón, es necesaria una estrecha cooperación entre el usuario y el fabricante, con la finalidad de seleccionar el grado más adecuado para cualquier aplicación dada.

El sistema de grado C, no requiere del uso de nombres comerciales para identificar el grado de carburos específicos. Si bien esta clasificación simplifica las aplicaciones de las herramientas, esta no refleja las propiedades del material que significativamente influyen en la selección del grado de las propiedades de carburos. Adicionalmente, la definición de los materiales de trabajo envueltos en esta clasificación esquemática es imprecisa. El uso de estos términos para describir las diferentes aplicaciones categóricas, no se encuentra estandarizado. A pesar de estas limitaciones, la clasificación de grado C tiende a ser usada satisfactoriamente por la industria de la manufactura desde 1942.

Por otra parte para el año 1964, la Organización Internacional de Estandarización (ISO) publicó la recomendación "ISO R513" (Aplicación de carburos para remoción de virutas). En este sistema, todos los grados de maquinado son divididos en grupo con códigos de tres colores:

- ◆ Los carburos de tungsteno calificados como los altamente aleados (letra P, color azul) para maquinado de acero.
- ◆ Los carburos de tungsteno calificados como medios aleados (letra M, color amarillo, generalmente con menos cantidad de carburo de titanio que el correspondiente a la serie P).
- ◆ Los carburos de tungsteno calificados como exactos (letra K, color rojo) para cortes de fundición gris, metales no féreos, y materiales no metálicos.

A cada grado dentro de un grupo le es asignado un número que representa su posición de máxima dureza y tenacidad.

#### **1.1.4.- Manufactura de los Carburos Cementados.**

Su fabricación se realiza por procesos pulvimetalúrgicos, que consiste en una secuencia de pasos donde se toman en cuenta una serie de variables para obtener

las características deseadas del material, microestructura y desempeño. Para obtener una microestructura ideal del compuesto WC-Co se deben tener dos fases: los granos angulares del WC y la fase cementante de cobalto. Es importante destacar que el contenido de carbono debe ser controlado ya que un exceso produciría grafito libre y un faltante produciría la formación de la fase  $\eta$  (carburos dobles), causando fragilización; ya que esta fase involucra la disolución de los carburos originales dentro del cobalto y consume Co que proporciona cierta tenacidad [5].

El tamaño de los carburos y de la fase de Co depende básicamente del tamaño y distribución de los polvos originales, la molienda, las condiciones de sinterización y la composición de la aleación. En carburos cementados las distribuciones tienen una forma bastante constante, la distribución de tamaño de granos de WC en Co puede ser muy cerrada, aunque ocasionalmente pueden aparecer granos grandes [6].

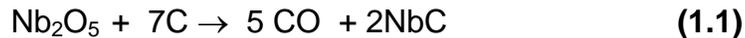
#### **1.1.5.- Características Generales del Carburo de Niobio.**

Las aleaciones del niobio se utilizan en varios campos de la ingeniería y pueden ser divididas en dos grupos; al primer grupo se atribuyen las aleaciones resistentes al calor y a altas temperaturas; al segundo grupo se atribuyen las aleaciones que poseen unas propiedades físicas especiales. Cantidades de ellas son: aleaciones superconductoras, aleaciones con un valor de coeficiente de expansión térmica lineal determinado, alta elasticidad etc. Sin embargo podemos decir que el grupo más numeroso de las aleaciones de niobio están orientadas a aleaciones resistentes a altas temperaturas [7].

Las aleaciones con carbono, es decir en forma de carburo de niobio poseen ciertas características y propiedades que pueden ser utilizadas en la fabricación de herramientas de corte por su elevada resistencia al desgaste además de poseer un alto punto de fusión. Entre sus propiedades podemos mencionar las siguientes [7].

- ◆ Estructura cristalina: FCC.
- ◆ Parámetro de red: 0.447nm.
- ◆ Temperatura de fusión: 3600 °C.
- ◆ Microdureza (50g): 2000 HV.
- ◆ Densidad teórica: 7.8 g/cm<sup>3</sup>.
- ◆ Coeficiente de expansión térmica: 6.7 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>.

El carburo de niobio (NbC), se obtiene por una reacción carbotérmica donde el óxido de niobio ( Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ) reacciona con el carbono según la ecuación (1.1) [8].



El carbono endurece al niobio en solución sólida intersticial. El endurecimiento del niobio a temperaturas que exceden los 1000°C puede provenir de la estabilidad termodinámica del carburo haciendo que durante los procesos pulvimetalúrgicos (proceso por el cual se puede fabricar este carburo), las fases mantengan una estabilidad durante el proceso de sinterización. Los óxidos, carburos, nitruros y boruros del grupo IVA de la tabla periódica son disociados y disueltos por la fusión del Nb<sup>+5</sup>, y durante la solidificación son cristalizados como separación de fases o como solución sólida de los elementos en niobio [7].

Según los estudios realizados, el carburo de niobio es adicionado en pequeñas cantidades a la aleación WC-Co principalmente para retardar el crecimiento de grano; sin embargo también mejora la habilidad de sinterización de los compuestos y la dureza en caliente de los mismos [9].

El NbC como se ha mencionado anteriormente se utiliza comercialmente en sistemas de carburos cementados como el WC-Co, en proporciones inferiores al 2% en peso como afinador del grano de la fase dura WC [7].

### 1.1.6.- Carburo de Tungsteno.

El carburo de tungsteno (WC) es un carburo con metal de transición, el cual es empleado en la elaboración de herramientas de corte. Este se obtiene mediante la reducción del óxido de tungsteno y la subsiguiente carburización a 1400 o 1500 °C. El WC, conserva el primer lugar en la tecnología de los carburos cementados y esto se debe a su estabilidad termodinámica. Además, tiene un alto módulo de elasticidad, el cual es excedido sólo por el diamante y una alta conductividad térmica, propiedades ventajosas en aplicaciones de corte.

Los carburos cementados con tamaño de grano micrométrico de WC se caracterizan por tener una alta resistencia al desgaste abrasivo y considerable dureza, pero una baja ductilidad [10].

Las propiedades específicas de los grados individuales de carburos cementados dependen no sólo de la composición de los carburos, sino también de su tamaño de partícula, cantidad y tipo de cementante. La tabla 1.1 contiene algunas de las propiedades más importantes del carburo WC y del elemento cobalto Co.

**Tabla1.1-** Propiedades de los componentes del WC-Co.

PROPIEDADES	WC	Co
Estructura	Hexagonal	Hcp-410°C
		FCC-1493°C
Parámetro de Red (nm)	a=0,291	A=2,057
	c=0,284	C=4,086
Temperatura de Fusión (°C)	2800	1493
Dureza HV (50 g)	(0001)=2200	-
	(1010)=1300	
Densidad Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	15,77	8,83
Módulo de Elasticidad (GPa)	696	210
Coeficiente de Expansión Térmica 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	(0001)=5,5	6,8
	(1010)=7,3	

Tomado de Roebuck B., 1995.

Dentro de los factores más importantes que influyen en las propiedades de compuestos a base de carburo de tungsteno, se encuentran los siguientes:

- ◆ Composición química.
- ◆ Propiedades de los constituyentes individuales.
- ◆ Tamaño, forma y distribución de la fase dura.
- ◆ Presencia de exceso o deficiencia de carbono.
- ◆ Variación composicional.
- ◆ Métodos de producción (Compactación, Sinterización).

Para que las propiedades de un compuesto a base de WC sean óptimas, es importante mantener un bajo nivel de porosidad, uniformidad en el tamaño de grano de los carburos a través de la matriz y mantener un contenido de carbono estequiométrico en la fase de carburos [11].

### 1.1.7.- Compuestos de Tipo (WC-MC-Co).

Una aleación WC-Co con un carburo cúbico adicionado es una clase muy importante de carburo cementado. Los carburos cúbicos (fase  $\gamma$ ) tienen una fórmula general MC (estructura NaCl), donde el M puede ser Ti, Ta, Nb, etc. O una combinación de estos (mezcla de carburos). Podría ser que la fase MC fuera subestequiométrica con respecto al C lo cual da al sistema un grado más fuerte de libertad. Los granos de carburo forman un esqueleto de WC-MC, y la segregación de cobalto se encuentra en los bordes de grano de WC-WC, WC-MC y MC-MC [12].

Los carburos cúbicos (TiC, TaC, NbC) que poseen una estructura del tipo NaCl, poseen un amplio rango de homogeneidad con un grado diferente de intersticios octaédricos ocupados por átomos de carbono y son completamente solubles en el WC [12].

Los materiales como el WC-NbC-Co al contener mas de dos fases de carburos tienden a formar una microestructura llamada “core-rim”, que es la estructura de la fase NbC, rodeada por (W,Nb)C. La fase llamada “core” actúa como un nucleador para los “rim”, los cuales se forman durante la sinterización [8].

Adiciones de NbC, TaC, TiC, mejoran la estabilidad química y mecánica de los compuestos WC-Co [12-13]. Sin embargo, no se encuentra suficiente información que permita conocer el efecto de estas adiciones sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del WC-Co. La adición de TaC y el TiC son utilizados porque incrementan la resistencia del compuesto WC-Co a la deformación plástica; tanto el TaC como el TiC actúan como inhibidores del crecimiento de grano pero el efecto es más fuerte con el TaC. Con respecto al NbC, este material posee propiedades similares al TaC por lo tanto también posee un efecto similar. Sin embargo, es importante destacar que el TaC usualmente contiene cantidades considerables de NbC [8].

Las características del NbC y del TaC como se mencionó anteriormente son muy parecidas, es por ello que se han realizado estudios para reemplazar al TaC por el NbC en sistemas Ti(CN)-NbC-Ni, en proporciones variables entre 5-40% en peso de NbC. Investigaciones realizadas [12-13] han determinado que el NbC en porcentajes inferiores a 5% en peso forma una solución sólida (Ti,Nb)(CN) pero a porcentajes mayores tiende a formar la estructura llamada “core-rim” lo cual es atribuido a la alta energía superficial de las partículas de NbC.

## 1.2.- DESGASTE

### 1.2.1.- Teoría de Desgaste.

En general, el desgaste lo podemos definir como un daño a una superficie sólida provocada por la remoción o desplazamiento de material cuando es puesto en contacto con otra superficie la cual puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso. El desgaste es también muy importante en la práctica de la ingeniería; ya que en muchos casos constituye uno de los principales factores que limitan la vida útil y el rendimiento de los elementos de máquinas en la industria.

El desgaste es un deterioro inevitable siempre y cuando existan cuerpos en contacto bajo carga y con movimiento relativo entre sí. Generalmente, cuando se presenta este fenómeno no se ocasionan fallas violentas, ya que éste no se presenta de manera brusca sino paulatinamente. 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 [14].

Para todo diseño mecánico que vaya a ser afectado por el fenómeno del desgaste es necesario la realización de una serie de pruebas en las cuales se verá su resistencia al desgaste para así evitar la falla de cierto componente en servicio antes de lo previsto, para lo cual existe una ciencia denominada Tribología que estudia todos los procesos que involucran este fenómeno. La palabra TRIBOLOGIA procede del griego tribos (desgaste) y "logos estudio", por tanto la "Tribología" es el estudio de la fricción. La definición académica más aceptada es "...la Ciencia y la Tecnología de la interacción de las superficies con movimientos relativos y las prácticas relativas a ellos..." [15].

Esta ciencia investiga la interacción entre dos superficies en contacto y en movimiento relativo, interacción que principalmente se manifiesta como fricción y está relacionada en forma implícita con el desgaste mecánico. Como consecuencia lógica, el trabajo de mantenimiento industrial, por mucho tiempo considerado como una actividad secundaria en el sistema de producción, llegó a ser el objeto de un nuevo campo de investigación llamado "terotecnología", que es la tecnología de instalación, puesta en marcha, mantenimiento, sustitución y remoción de maquinaria y equipos, de la retroalimentación de esas actividades sobre el diseño de equipos y sobre las operaciones de producción y otros tópicos y prácticas relacionadas.

El desgaste, la fatiga y la corrosión son unos de los principales problemas que ocasionan el reemplazo de máquinas y/o componentes industriales, por lo cual el mantenimiento industrial, ha sido una de las mejores ayudas para la prevención de estos problemas, sin embargo el desgaste es el menos estudiado y probablemente por esta razón, aún no sea posible predecirlo con exactitud.

El desgaste trae entre otras, consecuencias tales como:

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

En general, no siempre el desgaste es perjudicial ya que en determinados casos puede ser beneficioso, como por ejemplo en la preparación de superficies antes de la aplicación de cualquier recubrimiento (rociado térmico, cromo duro, pintura, etc.). Cabe destacar que en ocasiones, pequeñas variaciones en la velocidad, cargas o condiciones de los componentes en contacto, pueden influir notablemente en la tasa de desgaste de una pieza.

En el desgaste, la complejidad se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlo. Las principales variables que intervienen en el mismo pueden enumerarse en la forma siguiente:

VARIABLES RELACIONADAS CON EL SERVICIO:

- ◆ Áreas en contacto.
- ◆ Presión.
- ◆ Temperatura.
- ◆ Velocidad.

VARIABLES RELACIONADAS CON LA ESTRUCTURA METALÚRGICA:

- ◆ Composición Química.
- ◆ Rugosidad.
- ◆ Microdureza.
- ◆ Dureza.

OTRAS VARIABLES QUE CONTRIBUYEN:

- ◆ Lubricación.
- ◆ Características del medio ambiente circundante (temperatura, etc.).
- ◆ Geometría (dimensiones).

Debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso de desgaste, se torna difícil obtener el comportamiento que tendrá el material en servicio con un solo ensayo. Por lo general se analizan las variables más significativas del sistema, y se diseña en un laboratorio uno o varios tipos de ensayos que serán los más representativos de cada caso en particular.

Los ensayos de laboratorio generalmente se utilizan para:

- ◆ Estudiar los mecanismos de desgaste.
- ◆ Desarrollar mejoras en los materiales utilizados.
- ◆ Seleccionar materiales para determinar condiciones de servicio.

### 1.2.2.- Desgaste de Carburos.

Estudios realizados en lo concerniente al desgaste de carburos cementados relacionan la resistencia al desgaste con las características microestructurales y porcentajes de fases metálicas existentes. Todos estos estudios han encontrado que la propagación de las grietas en estos materiales se da de manera dúctil y preferiblemente en los límites de granos de carburo y en la interfase WC-Co donde la velocidad de propagación es muy elevada [16].

K. Jia y T.E. Fischer, [17] demostraron que la resistencia al desgaste de carburos cementados, cuando se ensayaban contra discos de carburo de silicio, aumentaba a medida que la cantidad de cobalto disminuía y aumentaba el tamaño de los granos de carburo de tungsteno. También defendieron la teoría que la remoción del material durante el ensayo se realiza mediante un mecanismo de sizalladura.

En 1995, La Barbera y Malaver, [18] hicieron evaluaciones a recubrimientos de WC-16%Co, carburo de cromo y Niquel-Cromo-Boro-Silicio usados para recuperación de elementos de maquinas expuestos a desgaste erosivo y concluyeron que el carburo de tungsteno, fue el material que presento mayor resistencia al desgaste erosivo y el que presento menor resistencia fue el Niquel-cromo-Boro-Silicio.

Díaz y Franco 2002, [19] evaluaron la resistencia al desgaste abrasivo de piezas sinterizadas con aleaciones de WC-Co al cual le variaron este último componente en 6% y 12% en peso respectivamente. Así mismo, compararon los resultados obtenidos con aleaciones WC-Co-Al el cual variaron la proporción en peso del Al-Co en 6% y 12% respectivamente. El mejor comportamiento frente al desgaste abrasivo fue logrado por la muestra sinterizada con la aleación WC-6%Co. El peor comportamiento fue obtenido por la muestra WC-12%Co-Al lo cual fue atribuido a altos valores de porosidad.

Arenas y colaboradores 2001, [20] estudio las características tribológicas de carburos cementados de base WC-10%Co, modificado con carburos cúbicos TiC y

VC en porcentajes hasta 18% en peso. El desarrollo microestructural, en cuanto a la morfología del grano de la fase dura y la fracción de fase cementante, difiere según se utilice TiC o VC como sustituto del WC. Aunque el comportamiento general de los dos sistemas de composiciones estudiado es bastante similar, se destaca la resistencia al desgaste de aquel grupo con VC que presentó unas tasas de desgaste inferiores, lo cual se puede explicar por la mayor densificación y homogeneidad microestructural obtenida que genera una mayor dureza de sistema. Los coeficientes de desgaste obtenidos se encuentran en el orden de  $1,2-6,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ .

### **1.2.3.-Tipos de Desgaste.**

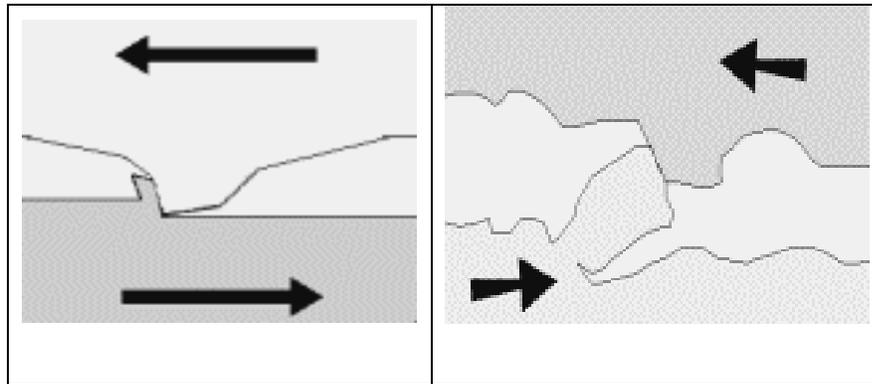
Existen diferentes tipos de desgastes los cuales habitualmente actúan en forma combinada. A continuación se realizará una breve descripción de los tipos de desgaste más comunes [21]

#### **1.2.3.1.- Desgaste abrasivo.**

El desgaste abrasivo tiene lugar cuando partículas o superficies duras son arrastradas o presionadas sobre una superficie sólida. La velocidad a la cual las superficies se desgastan por abrasión depende de: las características físicas de cada superficie (rugosidad, discontinuidad), la presencia de otros elementos abrasivos entre ambas superficies, la velocidad de contacto y otros factores ambientales (temperatura, humedad).

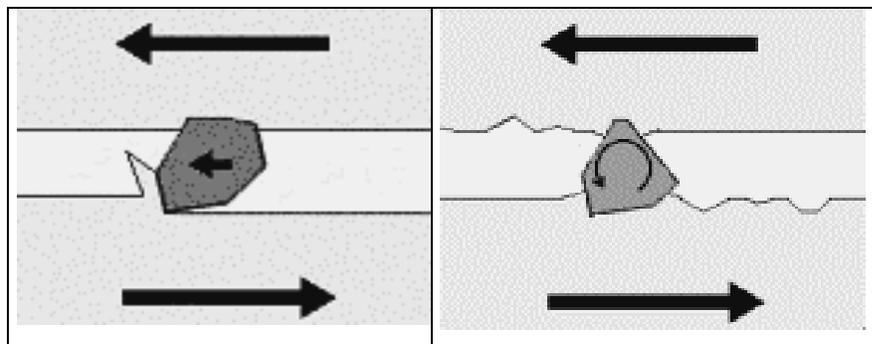
Generalmente se distinguen dos tipos principales de contacto en el desgaste abrasivo:

Desgaste bi-elemento (figura 1.1) tiene lugar cuando una superficie (o elemento) abrasivo se desliza sobre otra superficie.



**Figura 1.1.-** Desgaste Bi-elemento.

Desgaste tri-elemento (figura 1.2) la partícula abrasiva es retenida entre dos superficies.



**Figura 1.2.-** Desgaste Tri-elemento.

Las superficies metálicas sometidas a desgaste por abrasión presentan surcos, más o menos profundos, en el sentido del deslizamiento, obtenidos ya sea por deformación plástica (indentación de las partículas duras en la superficie), o por deformación y desprendimiento del material en virutas alargadas.

Este tipo de desgaste es el que más frecuentemente se encuentra en la industria. El caso típico, es el desgaste de las piezas metálicas en contacto con partículas de rocas duras, es decir el que ocurre en las herramientas de perforación, herramientas agrícolas, transportadoras de minerales, etc.

El desgaste abrasivo se puede evitar tomando las siguientes medidas:

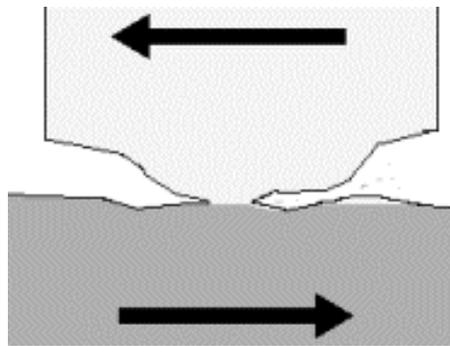
- ◆ Asegurando una adecuada estanqueidad de las piezas y mecanismos (rodamientos estancos, juntas eficaces, etc).
- ◆ Filtrado de los fluidos (aceite, aire y combustible) que transportan los contaminantes abrasivos.
- ◆ Adecuada mecanización de las superficies de los elementos en contacto, eliminando las asperezas agudas que pueden dar lugar a abrasiones.

Para neutralizar las partículas abrasivas al nivel de las superficies de fricción se prevén rayados en cruz sobre las superficies para retener los granos abrasivos.

Los cojinetes de motor se recubren con capas muy delgadas de metal blanco (de 20  $\mu\text{m}$  a 30  $\mu\text{m}$  de espesor) que permiten la incrustación de partículas de dimensiones superiores al espesor de la película de lubricante.

#### **1.2.3.2.- Desgaste Adhesivo.**

El desgaste adhesivo como se muestra en la figura 1.3, se debe al cizallamiento por tracción de las microsoldaduras que se generan cuando dos superficies entran en contacto directo metal contra metal, debido a una excesiva temperatura de trabajo o a una insuficiente lubricación, 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 y podría contribuir al desgaste abrasivo.



**Figura 1.3.-** Desgaste Adhesivo.

Este tipo de desgaste se presenta típicamente en cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bocinas, bujes, engranajes, motores de combustión interna, compresores recíprocos, matrices, etc.

Los siguientes fallos en los elementos mecánicos en contacto pueden ser generados con este tipo de desgaste:

- ◆ Rayado fino: es la formación de rayas suaves en la dirección del deslizamiento; es un daño menor producido por adhesión y/o abrasión.
- ◆ Microgripado: es un daño localizado, producido por la soldadura microscópica en fase sólida de asperezas antagonistas de las superficies deslizantes, no provoca la detención brusca del movimiento de las piezas.
- ◆ Gripado generalizado: es un defecto global originado por la soldadura total de las piezas en contacto, que provoca el bloqueo del mecanismo correspondiente.

### **1.2.3.3.- Desgaste Corrosivo.**

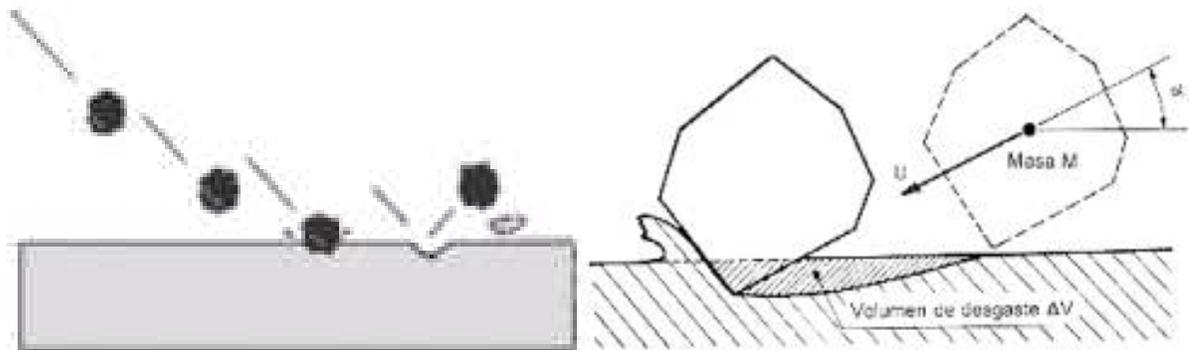
Es ocasionado por la reacción superficial de muchos metales con el medio que los rodea, conllevando a la formación de películas superficiales u óxidos. Por lo general, estas partículas son duras y crean una capa protectora sobre la superficie,

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 [20].

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

#### 1.2.3.4.- Desgaste Erosivo.

El desgaste erosivo por partículas (Figura 1.4), se define como la pérdida de material a consecuencia de repetidos impactos de pequeñas partículas, en suspensión en un medio líquido o gaseoso, sobre la superficie del metal sometido a desgaste, en este desgaste las partículas golpean y rebotan sobre la superficie, mientras que en el desgaste abrasivo se produce por el deslizamiento sobre la superficie debido a la aplicación de una fuerza externa.



**Figura 1.4.-** Desgaste Erosivo.

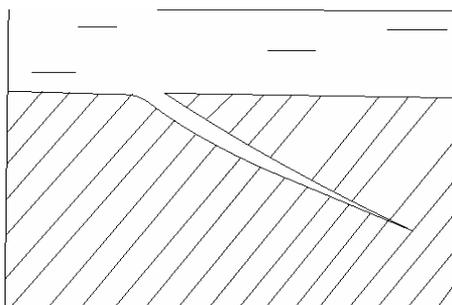
El desgaste erosivo por líquidos está producido por el impacto de líquidos a gran velocidad sobre superficies o gases con sólidos en suspensión, como son compresores, turbinas, equipos para granallado y otros. La duración del impacto es

muy pequeña y produce una muy breve y violenta compresión pulsatoria que se transmite al material originando grietas en los componentes frágiles y deformaciones plásticas en superficies blandas.

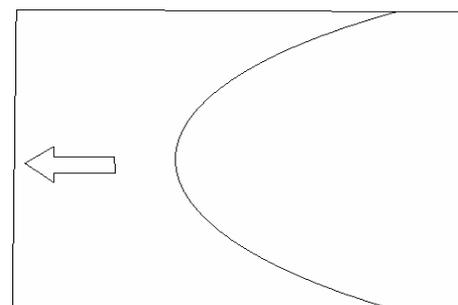
### 1.2.3.5.- Desgaste por Fatiga Superficial.

La fatiga mecánica superficial se produce entre dos superficies en movimiento de rodadura pura y deslizamiento combinado, con lubricación y sometidas a una carga que produzca esfuerzos hertzianos. En ocasiones se presenta entre superficies en deslizamiento puro con cargas cíclicas importantes, como en el caso de cojinetes. Se manifiesta con la aparición de grietas o cavidades sobre la superficie del metal.

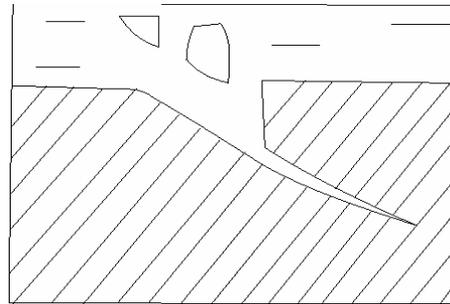
En la figura 1.5 se muestra esquemáticamente la formación de una grieta de fatiga, se observa que se desarrolla en “V” con su vértice dirigido en el sentido perpendicular de la fuerza, el desprendimiento de partículas de desgaste por ruptura se produce a partir del ángulo de la “V” debido a los esfuerzos de flexión a los que se haya sometida; cuando el deterioro es mayor se desprenden gruesas laminillas de metal, fenómeno conocido como escamado.



Fisura Inicial



Vista Superior de la  
Fisura



Cráter Final

**Figura 1.5.-** Desgaste por Fatiga Superficial.

La fatiga termomecánica afecta a las superficies duras de materiales frágiles (cerámicas, carburos, nitruros, etc) con resistencia a la tracción menor que a la compresión y sometidas a elevados gradientes térmicos. Este desgaste afecta sobretodo a las superficies en deslizamiento puro, con velocidad elevada, lubricadas o no. El deterioro producido se presenta en forma de grietas repartidas uniformemente, de dirección perpendicular a la dirección del deslizamiento.

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

La abrasión es el desgaste producido por las partículas duras que penetran en una superficie, ocasionando deformación plástica y/o, desprendimiento de material. Debido a ello, una superficie lisa o pulida, se vuelve áspera, con marcas y ranuras bastante regulares, pudiendo 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 trabajo en frío traen como consecuencia efectos de fatiga.

La velocidad de abrasión depende de 4 factores [22]:

- ◆ Las características de cada una de las superficies.
- ◆ La presencia de abrasivos entre ellas.
- ◆ La velocidad de contacto.
- ◆ Condiciones ambientales.

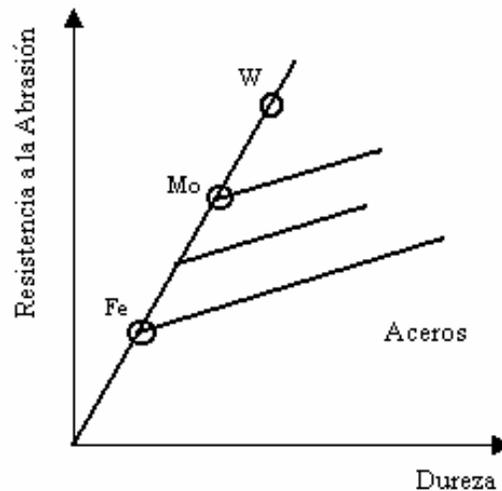
El fenómeno abrasivo se divide fundamentalmente de acuerdo al tipo y al ambiente de contacto. Debido al tipo de contacto la abrasión se divide en abrasión a baja presión y abrasión a alta presión.

Una de las más comunes es 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, 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 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 deslizando, etc.



**Figura 1.6.-** Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.

Como se puede observar en la figura 1.6 la dureza es un factor que influye en este fenómeno, ya que al aumentar la dureza aumenta la resistencia a la abrasión.

Para 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 [23].

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, viene descrito por la ecuación (1.2):

$$W = A \cdot d \quad (1.2)$$

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 (Ecuación 1.3), sea igual a:

$$W = \frac{K_3 \cdot L \cdot d}{H} \quad (1.3)$$

Siendo  $K_3$  una constante que engloba las otras dos.

Generalmente un material posee buena o mala resistencia al desgaste cuando éste se refiere al recíproco del volumen desgastado (Ecuación 1.4), siendo así:

$$R = \frac{1}{W} \quad (1.4)$$

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 deslizamiento. 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.

#### **1.2.5.- El Fenómeno de Erosión.**

La erosión se puede definir como el volumen o masa pérdida (o removida) de la superficie por la unidad de masa de las partículas erodantes. Se recomienda usar el volumen, ya que este 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 (Ecuación 1.5).

$$R = \frac{Sy^2}{2 * E} \quad (1.5)$$

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 generalmente varían en tamaños desde 5 a 500  $\mu\text{m}$  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 mas duras que la superficie a desgastar. El cuarzo, óxido de aluminio y el carburo de silicio tienen durezas de 1300, 1750, 2000  $\text{Kg/mm}^2$  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 ocurre cuando el valor del esfuerzo de fluencia del material es excedido durante el impacto.

El valor adimensional denominado número de Best (Ecuación 1.6), representa la magnitud de daño de la superficie:

$$B = \frac{\rho * V^2}{Y} \quad (1.6)$$

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 1.2.-** Variación del número de Best con el tipo de daño.

NÚMERO DE BEST	TIPO DE DAÑO
10-5	Cuasi-estático
10-3	Inicio de deformación plástica
10	Deformación plástica extensiva
103	Fenómeno de hiper velocidad

Tomado de Malave et. Al; 1995

Haciendo referencia a Finnie [24]; 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 (Ecuación 1.7):

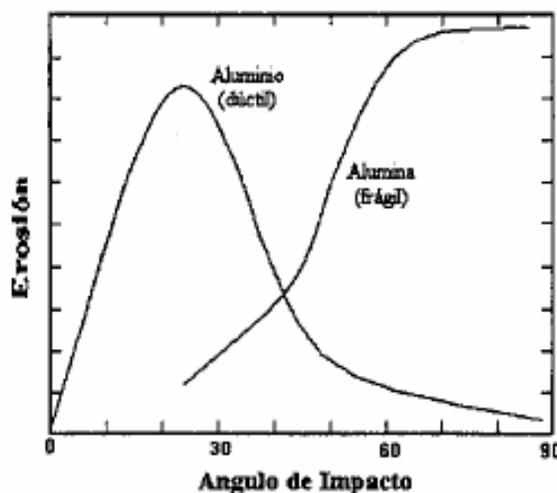
$$E = K * V^n * f(\theta) \quad (1.7)$$

Donde:

- E: Factor de erosión
- V: Velocidad de la partícula

- K: Magnitud absoluta de la erosión
- $f(\theta)$ : Función adimensional del ángulo de impacto, medido este con respecto al plano del objetivo
- n: Este valor se encuentra entre 2,3 y 2,5 para los metales

La variación de la erosión con respecto al ángulo de impacto depende críticamente de la naturaleza del material que está siendo erosionado. La Figura 1.7, revela el comportamiento típico de un metal dúctil, como el aluminio, y de un material frágil como la alúmina. La forma general de la curva muestra para el aluminio valores de máxima erosión alrededor de  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , éste ángulo de impacto ha sido establecido por muchos investigadores para una amplia variedad de metales.



**Figura 1.7.-** Variación de la erosión con el ángulo de impacto  
Característico de materiales dúctiles y frágiles.

Los valores de K, los cuales definen la magnitud absoluta de la erosión, pueden ser obtenidos de datos publicados de una variedad de materiales.

Tilly [25], 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

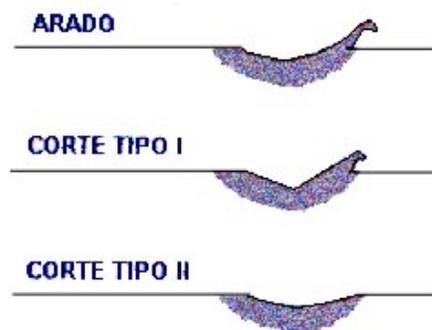
44% de las partículas proyectadas se espera que choquen con la superficie de la probeta a un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ . Por otra parte Smeltzer [24], demostró que otra posible causa de la variación de las partículas es que éstas alcanzan la velocidad del flujo del gas aproximadamente a 3 metros de proyección.

Estudios experimentales [26], hechos con partículas angulares simples, con ángulos de incidencia oblicuos, indica que, el comportamiento de las partículas puede ser clasificado en tres tipos (Figura 1.8) 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 1.8.-** Tipos de cortes producidos por el impacto de las partículas.

### 1.2.6.- Tenacidad de Fractura ( $K_{IC}$ ).

De manera general la tenacidad de fractura se define como la medida de la resistencia a la extensión de grieta [27]. El termino tenacidad de fractura

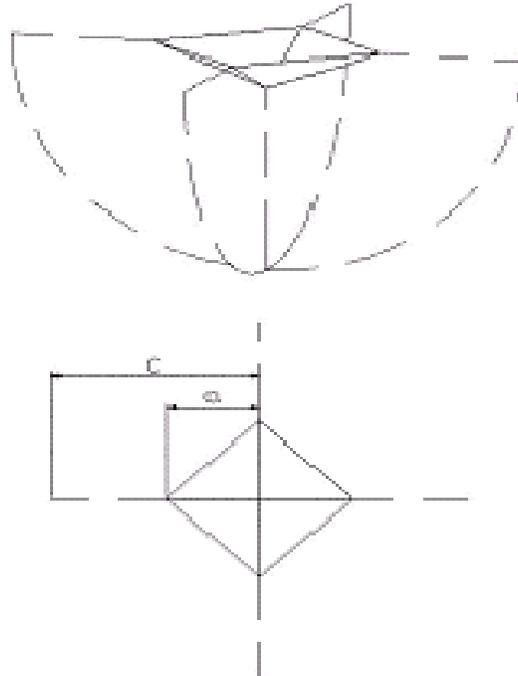
generalmente esta asociado con métodos de fractura mecánica con efectos en la capacidad de carga de un componente estructural. La tenacidad de fractura es una propiedad empírica de los materiales la cual es determinada por uno o varios métodos estándares de ensayos. En los estados unidos estos métodos han sido desarrollados por la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Otra forma de definir más concretamente la Tenacidad de Fractura es como la resistencia a la propagación de una grieta en un determinado material, en ese orden de ideas la mecánica de fractura es la ciencia que relaciona la fuerza de una estructura fracturada a la tenacidad de fractura del material y al tamaño, forma, situación y magnitud de la grieta [28].

Los materiales cerámicos presentan propiedades de gran interés en diversas aplicaciones de ingeniería, en especial por su alta dureza. Sin embargo su alta fragilidad ha limitado su uso, una de las propiedades que la caracteriza es la tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) la cual se evalúa a través de métodos normalizados. Sin embargo estos métodos son dispendiosos y sólo producen un resultado por probeta.

Otro método usado es el de indentación (IF), el cual ha sido cuestionado debido a que las ecuaciones producto del modelamiento involucran constantes de calibración que introducen errores sistemáticos y también a errores que surgen de las imprecisiones en las mediciones necesarias en el ensayo [29]. A pesar de esto y de que el método no ha sido normalizado, sigue siendo utilizado dada su relativa facilidad de aplicación [29-30].

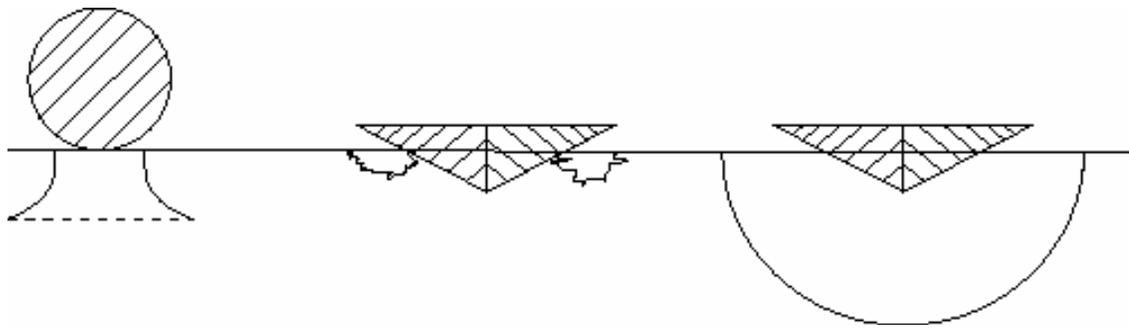
El Método (IF) requiere del conocimiento del valor de la dureza. La medida de esta propiedad en estos materiales está regulada por normas lo que la hace que los resultados obtenidos sean más confiables.



**Figura 1.9.-** Configuración de una indentación Vickers en un material frágil.

Como se puede observar en la figura 1.9 la parte de arriba muestra las grietas tipo media radial (en línea punteada) y la impresión de la pirámide (línea continua); y en la parte de abajo la vista superior de la configuración, con la notación necesaria: C longitud de la grieta, 2ª diagonal de la indentación.

En la actualidad los métodos de indentación de fractura (IF), presentan una variedad en lo que respecta al tipo de indentación, los cuales no están restringidos a la indentación piramidal para carburos cementados o de tipo Vickers. Existen tres tipos de indentación para formación de grietas muy utilizadas, y su uso varía de acuerdo al tipo de grieta para ello en la figura 1.10 se muestran los tipos de grietas de indentaciones más representativas.



1. Herzian Cone  
crack

2. Palmqvist Crack

3. Semicircular Median  
crack

**Figura 1.10.-** Tipos de Grietas de Indentación.

## Procedimiento Experimental

### 2.1.- Material.

En el presente trabajo se utilizaron polvos de WC-10%Co, como aleación base. Posteriormente se adicionaron porcentajes crecientes de carburo de niobio NbC que oscilo entre un 5% y un 20%. El porcentaje de cobalto Co se mantuvo constante en 10% en peso. La tabla 2.1 contiene los diferentes porcentajes de los componentes para cada aleación.

**Tabla 2.1.-** Composición de los Sinterizados.

Material	WC %peso	NbC %peso	Co %peso
1	90	-	10
2	85	5	10
3	80	10	10
4	75	15	10
5	70	20	10

Las muestras se fabricaron de acuerdo a las dimensiones especificadas por la norma en cada ensayo a realizar, las cuales son mostradas en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.-** Dimensiones de las Probetas (mm).

Ensayos	Vista Superior	Vista Lateral
<b>Erosión</b> Norma ASTM G 76-95		
<b>Abrasión</b> Norma ASTM G 65-00		

## 2.2.- Fabricación de Muestras.

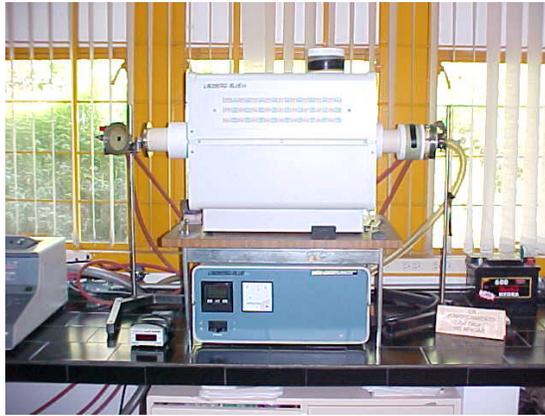
Las muestras se fabricaron por sinterizado, que requiere de una serie de pasos los cuales son descritos brevemente a continuación:

En primer lugar se procedió a mezclar los polvos para lo cual se utilizó un atritor marca Szegvari en medio húmedo (con etanol al 96%) a una velocidad de 400 r.p.m. durante 1h, empleando esferas de WC de 6,1 mm de diámetro en una relación masa de las esferas: masa del polvo 5:1.

Luego que el material fue mezclado, se dejó en reposo durante aproximadamente 2 h, con la finalidad de que se decantara y de esta manera poder eliminar el exceso de etanol. Posteriormente se colocó en una estufa a 70°C, para que se evaporara el resto del etanol y obtener del polvo el material ya mezclado. Debido a que el material se endurece por sedimentación, durante el proceso de secado en la estufa, fue necesario desagregar el material con el mortero.

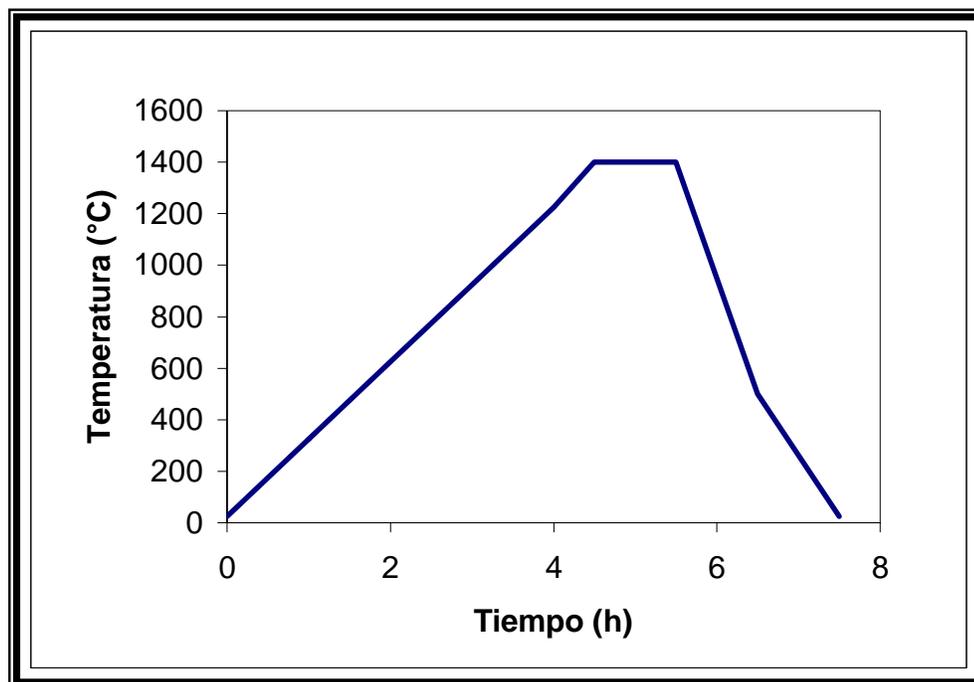
El segundo paso consistió en la compactación de polvos el cual se llevo a cabo en una máquina servohidráulica MTS (Material Test System). La presión empleada fue de 350 MPa. A una velocidad de compactación de 30 (Km/seg).

Finalmente se procedió a la sinterización de los compactos en un Horno marca lindberg/blueM (Figura 2.1) con atmósfera controlada de Argón para evitar que el material se oxide.



**Figura 2.1.-** Horno Tubular usado para la sinterización.

El ciclo de sinterización empleado puede ser observado en la figura 2.2 se realizó en un horno tubular marca LINDBERG/BLUE, Modelo 818 (Figura 2.1) el mismo con atmósfera controlada de argón para evitar que el material se oxide, bajo condiciones de vacío, con un ciclo de calentamiento y enfriamiento controlado a una temperatura de 1400°C durante 1 hora.



**Figura2.2-** Ciclo de Sinterización.

Una vez finalizados el proceso de sinterización, las probetas fueron rectificadas (previamente a la realización de los ensayos de erosión y abrasión), pretendiendo obtener de este modo las características necesarias (rugosidad, paralelismo entre caras) para llevar a cabo los ensayos propuestos. En este proceso las piezas fueron rectificadas con una piedra de Copa de Polvo de Diamante.

### 2.3.- Ensayos.

#### 2.3.1.- Determinación de la Densidad.

La determinación de la densidad de cada muestra se realizó bajo la norma ASTM “B311-92” [35], la cual indica la utilización de la ecuación 2.1.

$$D = \frac{(A * E)}{(A - B)} \quad (2.1)$$

Donde:

A: Peso de la muestra en seco (g)

B: Peso de la muestra suspendida (g)

E: Densidad del agua en g/cm<sup>3</sup> a 21 °C

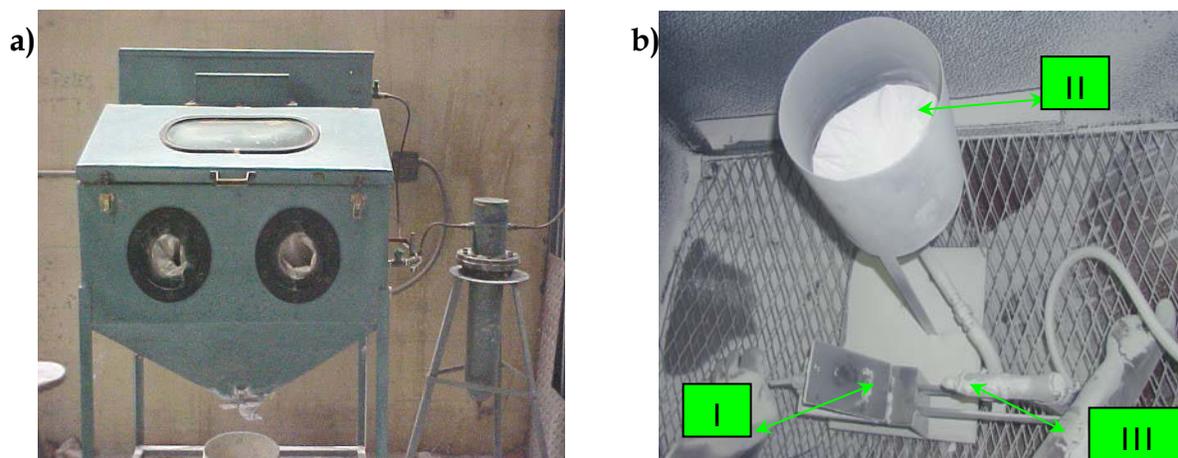
D: Densidad de la pieza g/cm<sup>3</sup> .

#### 2.3.2.- Ensayo de Erosión.

El ensayo de erosión se realizó bajo la norma ASTM G 76 – 95 [33]. Se realizaron un total de setenta y cinco (75) ensayos, con un tiempo de exposición de tres minutos (3min) y con unos ángulos de incidencia de 30°, 60° y 90°. Con los ángulos seleccionados se pretende determinar la resistencia al desgaste erosivo de las muestras sinterizadas, pasando desde erosión abrasiva (30°) hasta erosión por choque (90°).

El material erodante utilizado fue alúmina, recomendado en la norma con un tamaño aproximado de 50  $\mu\text{m}$ , si el tamaño de grano es muy superior a éste, se debe proceder a tamizar para garantizar una granulometría indicada.

El banco de ensayo de erosión utilizado se muestra en la figura 2.3 el cual fue construido según la norma para este ensayo ASTM G76-95.



**Figura 2.3.-** a) Banco de Ensayo de Erosión.

b) Componentes del banco de ensayo donde se muestran, el porta probetas (I), la tolva (II), la pistola de chorro abrasivo (III).

El procedimiento para la realización de los ensayos y para el reporte de los resultados basándose en la pérdida de peso es el contemplado por la norma ASTM G76-95 , el cual esta descrito en el Anexo 6.1.

Esta pérdida se obtuvo utilizando una balanza electrónica (Figura 2.4) Marca SCIENTECH, modelo SA 310, la cual nos permite obtener una apreciación de 0.0001 g.

Para cuantificar la resistencia erosiva, se calculo el factor (RE) utilizando la Ecuación 2.2:

$$RE = \frac{\Delta P}{\rho * ma} \quad (2.2)$$

Donde:

RE = Tasa de erosión ( $\text{mm}^3/\text{g}$ )

$\Delta P$  = Pérdida de masa (g)

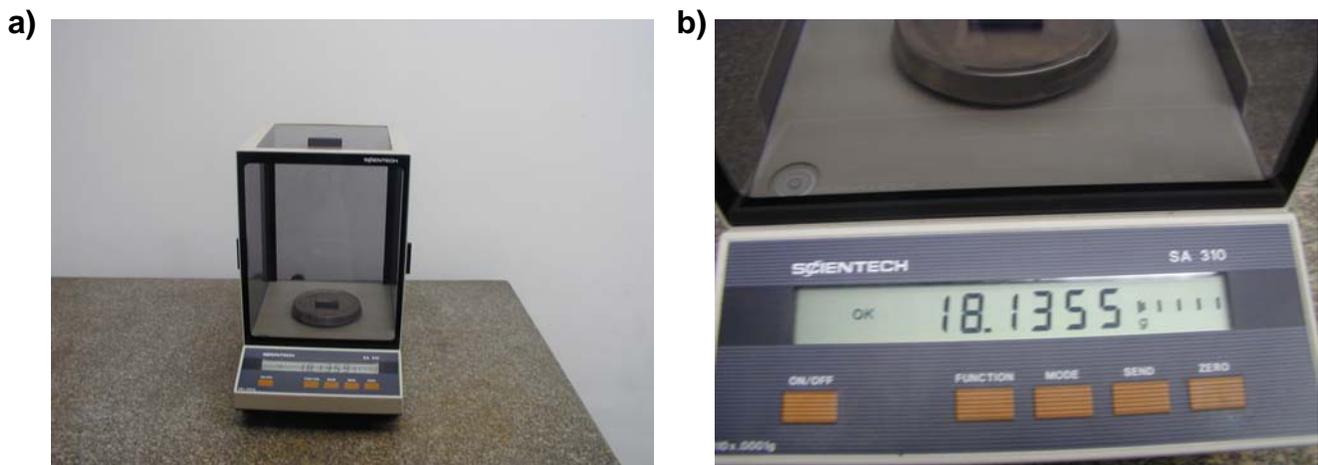
$\rho$  = Densidad del material ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )

ma = Masa del abrasivo (g).

### 2.3.3. - Ensayo de Abrasión.

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM G 65 – 00 [34]. Se realizaron un total de cuarenta y cinco (45) ensayos bajo los procedimientos A, B y E especificado en la tabla 2.3.

La norma exige que las probetas cumplan con un valor mínimo de rugosidad el cual debe ser menor a ( $0,8 \mu\text{m}$ ), además deben ser planas y libres de impurezas, ya que defectos superficiales como porosidad y asperezas pueden afectar los resultados de los ensayos. Por lo tanto, se procedió al rectificado de las mismas. 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 utilizada en el ensayo de erosión (Figura 2.4.a), en la figura 2.4.b se puede observar la apreciación de 0.0001 g.



**Figura 2.4.-** a) Balanza electrónica, Marca SCIENTECH. Modelo SA 310.

b) Detalle Balanza Electrónica indicando la apreciación.

En trabajos realizados anteriormente, se pudo observar que la huella obtenida en los ensayos de abrasión, abarca una zona específica de la probeta ensayada. Por razones de costo, para la realización del ensayo abrasivo se utilizó un “Porta Probeta”, diseñado en un trabajo especial de grado anterior [19], el cual cumple con las dimensiones estipuladas. Las dimensiones de las muestras sinterizadas corresponden al tamaño de la zona útil aprovechable en tal ensayo. El porta probetas fue fabricado en acero AISI 1020 con las siguientes dimensiones: (75x25x9) mm.

La norma recomienda la utilización de arena de cuarzo redondeado con diámetro de partícula de 300  $\mu\text{m}$ . Los parámetros utilizados en el ensayo de abrasión, fueron aquellos indicados en la norma ASTM G65, los cuales se detallan en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3.-** Parámetros del ensayo de abrasión.

Procedimiento	Fuerza contra la probeta		Pesos contra la probeta	Revoluciones de la rueda	Tiempo de cada prueba
	N	Lbf	gr.	rpm	min
<b>A</b>	130	30	5,159	6000	30
<b>B</b>	130	30	5,159	2000	10
<b>E</b>	130	30	5,159	1000	5

El procedimiento para la realización de los ensayos esta descrito en el Anexo 6.2. Los resultados de la pérdida de peso deben reportarse como pérdida de volumen en milímetros cúbicos de acuerdo a los procedimientos específicos utilizados en la norma, la ecuación utilizada para la determinación de este valor fue la siguiente:

$$V_p = \frac{mp}{\rho} * 1000 \quad (2.3)$$

Donde:

$$V_p = \text{Volumen perdido (mm}^3\text{)}$$

$m_p$  = masa perdida (g)  
 $\rho$  = densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

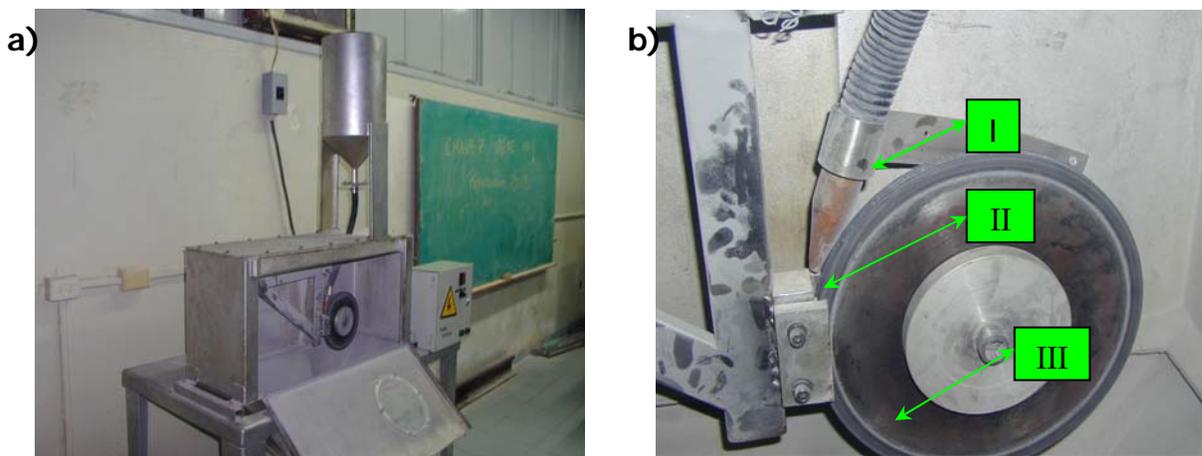
Debe tomarse en cuenta la tasa de abrasión reducida ajustando la pérdida de volumen producida por la rueda desgastada a la pérdida de volumen normalizada de una nueva rueda. Esta pérdida de volumen ajustada (PVA) se calcula utilizando la ecuación 2.4:

$$PVA = V_p * \frac{228.6\text{mm}}{\theta} \quad (2.4)$$

Donde:

$PVA$  = Pérdida de volumen ajustada ( $\text{mm}^3$ )  
 $V_p$  = Volumen perdido ( $\text{mm}^3$ )  
 $\theta$  = Diámetro de la rueda después de ser utilizada (mm)

La Figura 2.5a muestra el banco de ensayo utilizado para la realización de los ensayos de abrasión. En la Figura 2.5b se puede apreciar en detalle el banco de ensayo, pudiéndose observar la boquilla de flujo de arena (I), porta-probeta (II), la rueda de goma (III).



**Figura 2.5.-** a) Banco de Ensayo de Abrasión.

b) Componentes del banco de ensayo donde se muestran: boquilla de flujo de arena (I), porta-probeta (II), la rueda de goma (III).

### 2.3.4.- Ensayo de la Microdureza.

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E 384 – 99 [36]. La superficie de las muestras fue pulida previa al ensayo a fin de observar la huella dejada por el indentador

La microdureza se obtuvo a través de un Microdurometro Vickers marca Leco como se muestra en la figura 2.6. La carga utilizada fue de 300 gramos y el tiempo de ejecución de la carga fue de 15 segundos.



**Figura 2.6.-** Microdurómetro.

Los resultados se obtuvieron por el promedio de diez (10) indentaciones. Para el cálculo de la microdureza se utilizó la ecuación 2.6:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{D^2} \quad (2.6)$$

Donde:

P: Carga aplicada (Kgf).

D: semi suma de las diagonales de huella (mm).

### 2.3.5.- Ensayo de Tenacidad de Fractura ( $K_{IC}$ ).

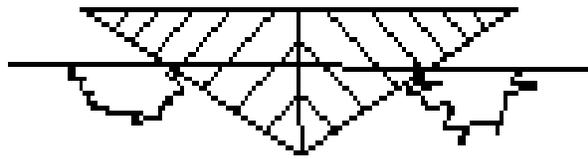
Se realizó usando un durómetro, por medio del cual se aplicó una carga de 30 kilogramos a través de un indentador vickers generando huellas con grietas en los vértices de las huellas.

Las huellas dejadas por el indentador fueron observadas en un microscopio óptico (Figura 2.7) para poder determinar cuál había sido la carga que generó la huella y la grieta, con la finalidad de medir las longitudes tanto de las diagonales de la huella, como de las grietas. Tanto las longitudes de las diagonales de la huella, como la de las grietas, obtenidas son aprovechadas por el Método IF (Indentation Fracture) para la estimación de  $K_{IC}$ .



**Figura 2.7.-** Microscopio óptico marca Olimpo modelo PMG3, acoplado a un analizador de imágenes marca Leco modelo AI300I.

Para seleccionar el tipo de grieta de indentación se procedió al pulido de la pieza después de realizada la indentación para observar el comportamiento de la grieta y verificar si permanecía unida a la pirámide de indentación o si esta se separaba de la misma. En nuestro caso la grieta se separó de la pirámide de indentación (Figura 2.8), por lo tanto se utilizó el método de Palmqvist para el cálculo de tenacidad.



**Figura 2.8.-** Grieta tipo Palmqvist

Luego, la tenacidad de fractura  $K_{IC}$  se calculó usando la ecuación 2.7 de Shetty y colaboradores [32] para una carga de 30Kgf.

$$K_{IC} = A\sqrt{H} \sqrt{\frac{P}{\sum L}} \quad (2.7)$$

Donde:

HV: Dureza Vickers de la muestra (HV).

P: Carga (Kgf).

Lprom: Longitud de grietas promedio (mm).

#### **2.4.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Análisis Microestructural (EDS).**

El estudio microestructural se realizó en un microscopio electrónico de barrido marca PHILIPS modelo XL 30, con el cual se tomaron imágenes en modalidad de electrones primarios (BSE) para observar imágenes por contraste composicional y electrones secundarios para evaluaciones morfológicas. También este permitió la

realización del análisis químico semicuantitativo por Espectroscopia de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS) de los microconstituyentes presentes en cada una de las muestras (Figura 2.9).



**Figura 2.9.-** Microscopio electrónico.

## ANALISIS DE RESULTADOS

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

#### 3.1.1.- Análisis de la composición WC-10%Co.

La figura 3.1.a corresponde a una micrografía de la muestra sinterizada con la aleación de WC-10%Co. En esta fotomicrografía se puede observar una estructura en la cual se ve una fase clara inmersa en una matriz oscura. La figura 3.1b corresponde a la misma muestra pero a una mayor magnificación en la cual se aprecia una mayor diferenciación de estas fases. La fase clara tiene una morfología angular con diferentes tamaños de grano, una distribución no homogénea. Un análisis EDS realizado sobre esta partícula (A) arrojó los resultados que se indican en la figura 3.2 a. Como se desprende del análisis composicional contiene en su mayoría puro tungsteno. Dado que el equipo no determina la cantidad de carbono presente esta partícula podría ser de WC sin embargo, un EDS tomado en la fase oscura señalada con la letra b (ver Figura 3.2b) indica que esta fase contiene mayoritariamente Co.

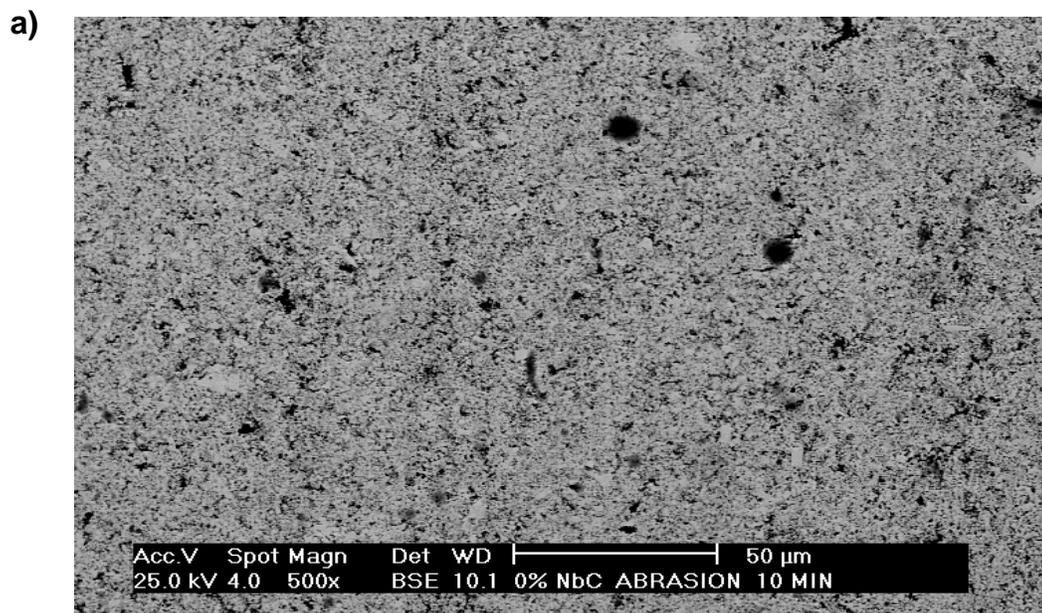


Figura 3.1.- a) Fotomicrografía 500x, muestra WC-10%Co.

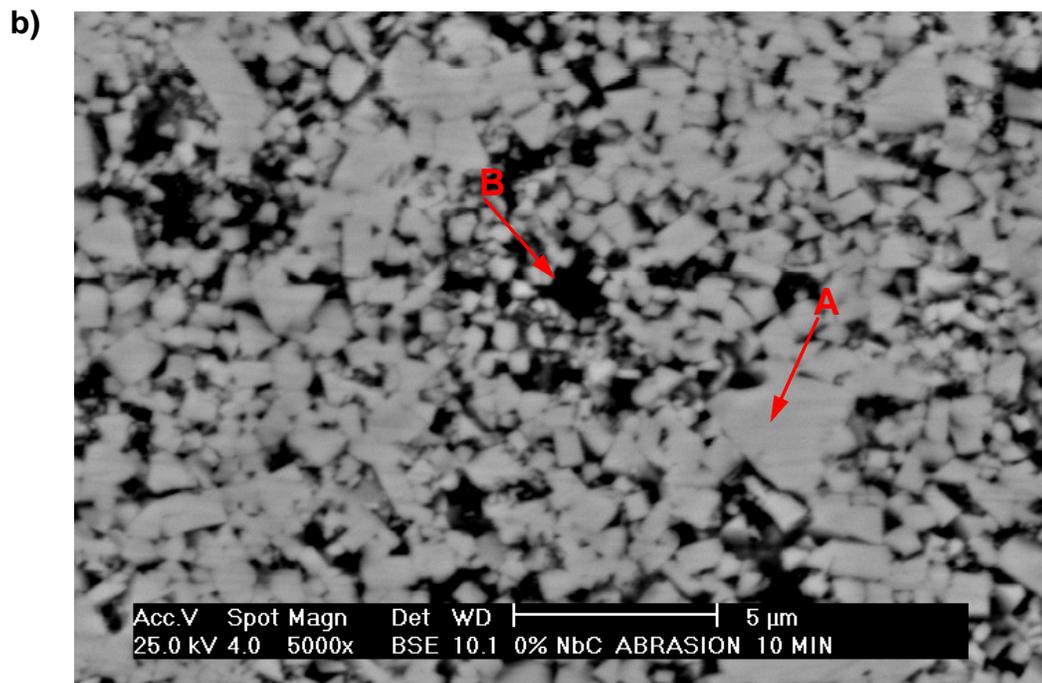


Figura 3.1.- b) Fotomicrografía 5000x muestra WC-10%Co.

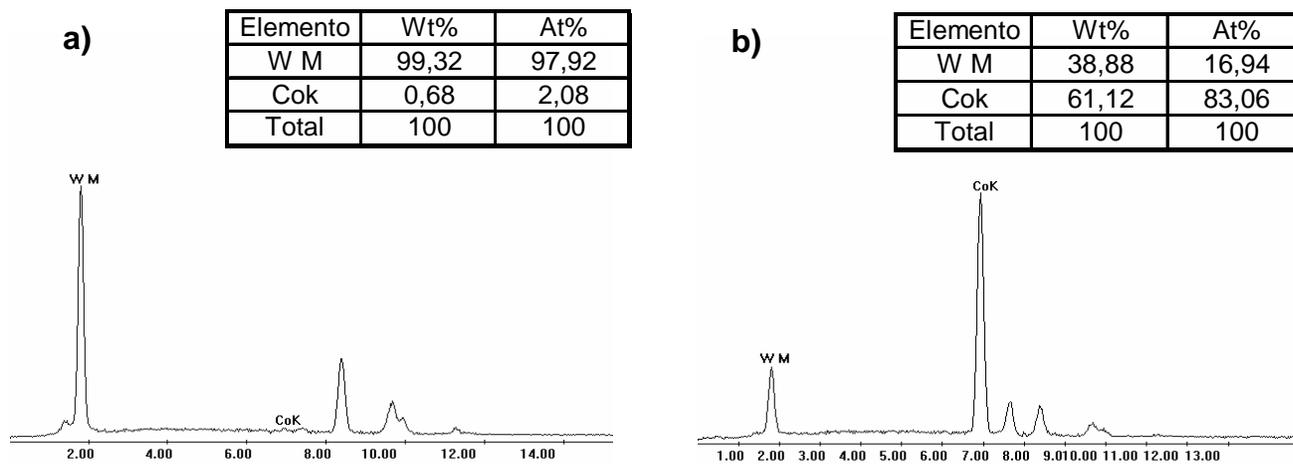


Figura 3.2.- a) EDS de la fase clara A muestra WC-10%Co.

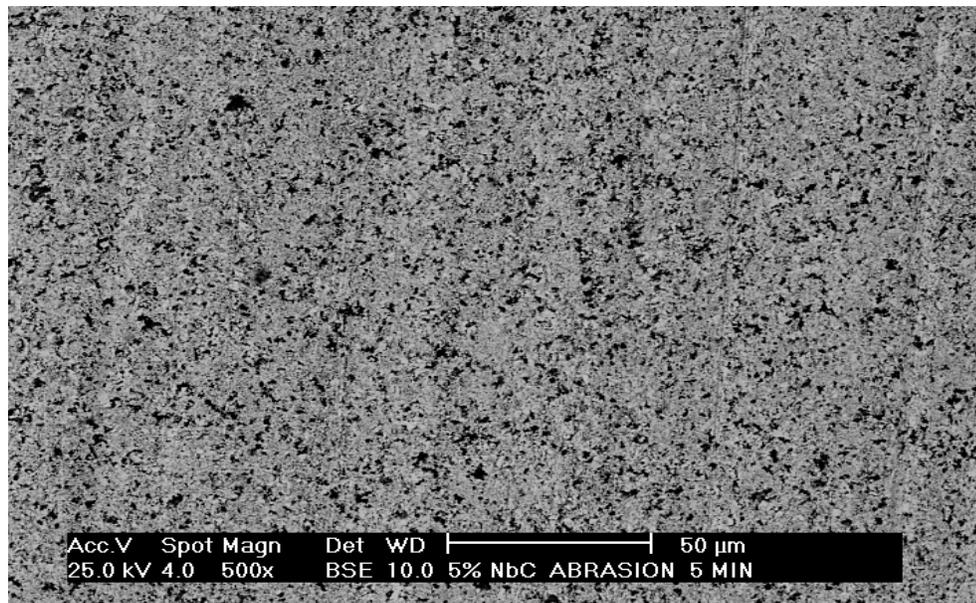
b) EDS de la fase oscura B muestra WC-10%Co.

### 3.1.2.- Análisis de la composición WC-5%NbC-10%Co.

La figura 3.3 a) corresponde a la muestra 5%NbC, en la cual se observan tres fases, una primera fase clara, una segunda fase de un color gris y por último una fase oscura. La fase clara (letra A) corresponde al carburo de tungsteno WC, en el cual se observa, como es su característica una morfología angular, esta vez se presenta con un tamaño de grano más fino y más homogéneo en su estructura. La segunda fase (letra B) tiene un color gris oscuro el cual posiblemente corresponde al carburo de niobio NbC, este se encuentra en pequeñas cantidades debido al poco porcentaje de este en la aleación, de la misma manera se observa sin una morfología definida y con un tamaño de grano diferente. La tercera fase (letra C) de color oscuro representa al cobalto Co, el cual es la matriz base y en el se encuentran inmersas las partículas de WC y NbC.

En la figura 3.4 a) b) y c) se muestra el análisis puntual de las fases descritas anteriormente en donde se puede observar los porcentajes en peso de carburo de tungsteno WC, carburo de niobio NbC, y cobalto Co, observándose en cada una de ellas cual es el elemento predominante en la composición en esa zona específica.

a)



**Figura 3.3.-** a) Fotomicrografía 500x muestra 5% NbC.

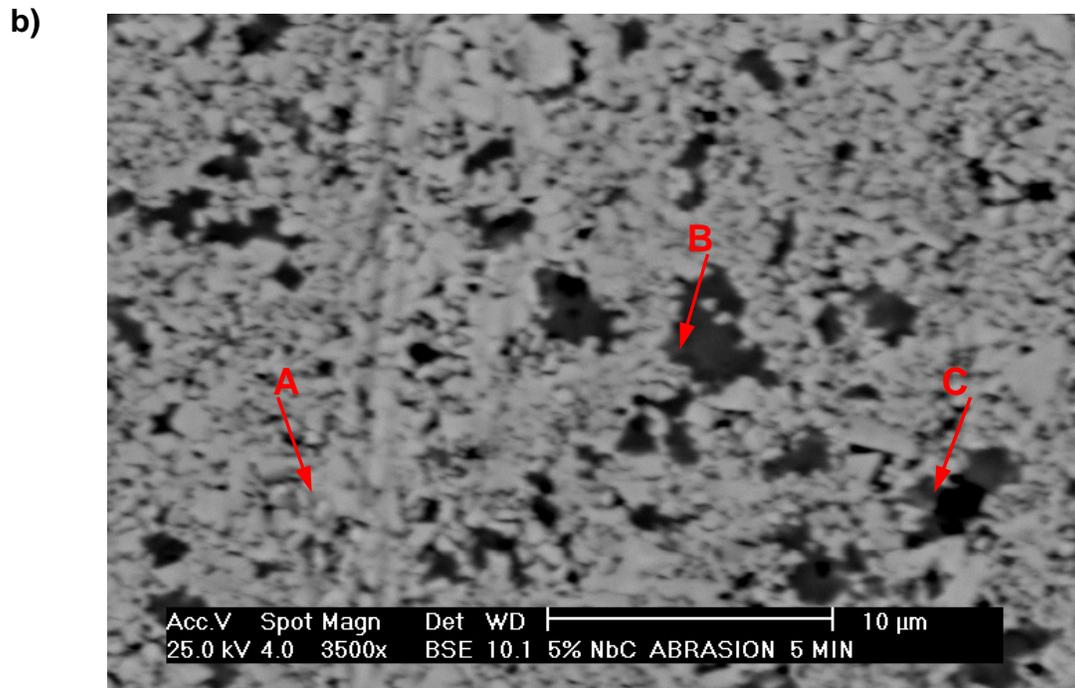


Figura 3.3.- b) Fotomicrografía 3500x muestra 5% NbC.

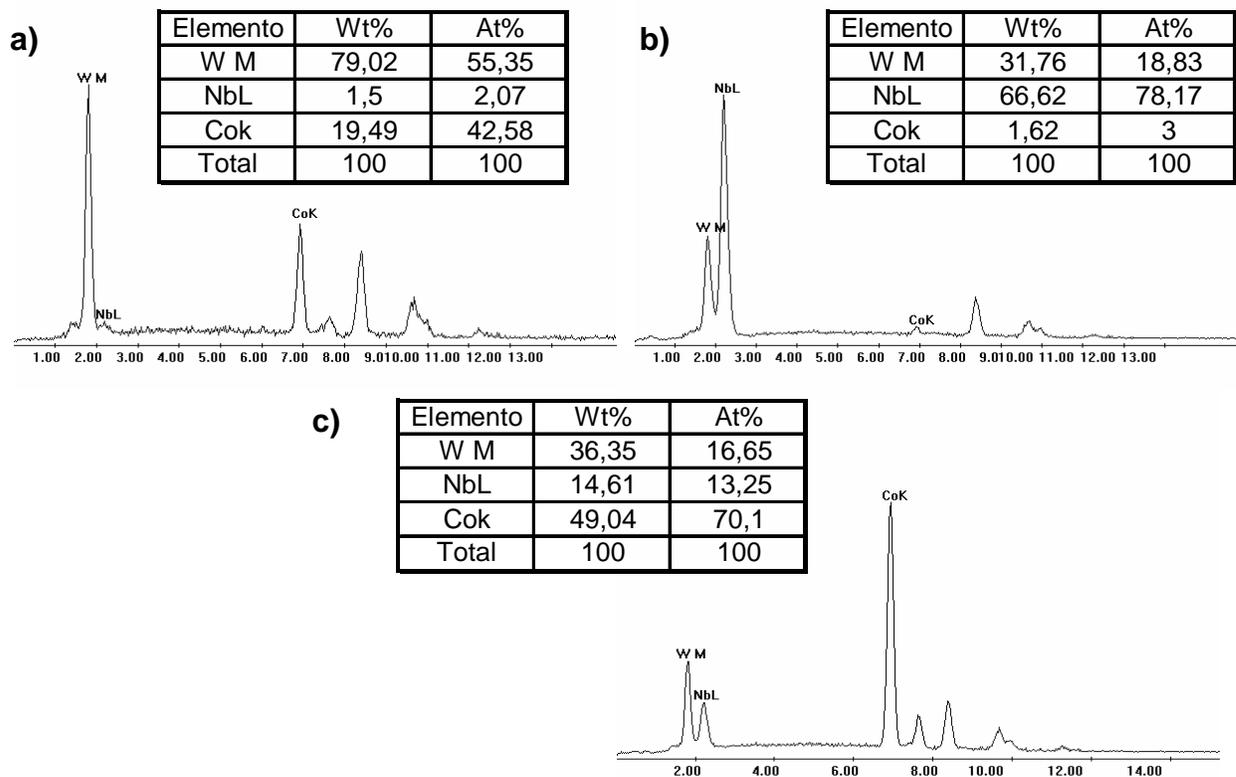
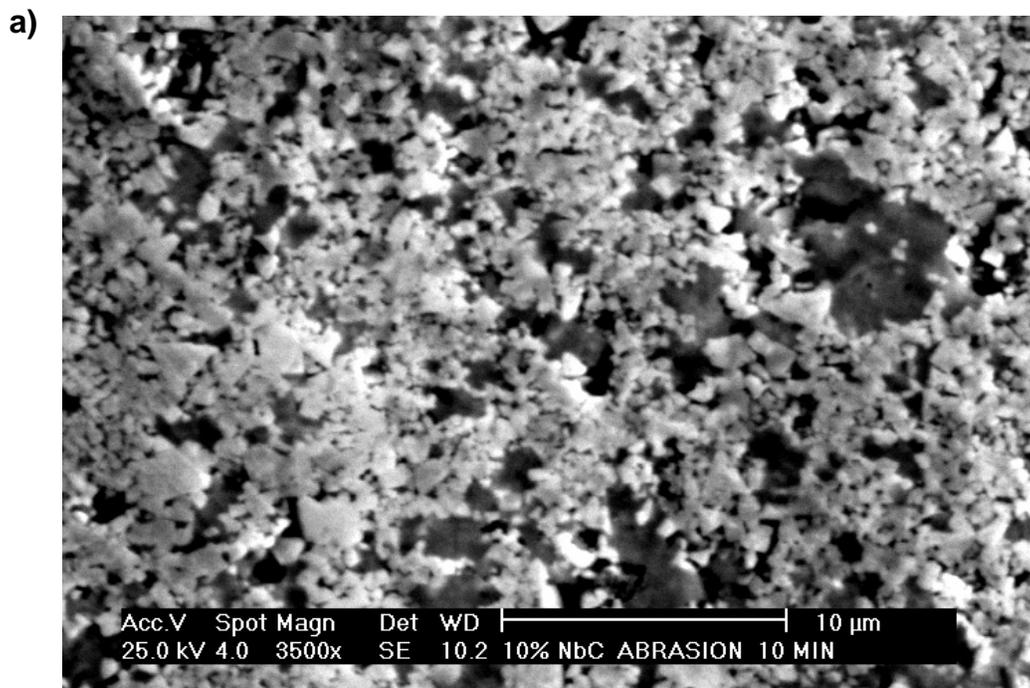


Figura 3.4.- a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B. c) EDS fase oscura C. Muestra 5% NbC .

### 3.1.3.- Análisis de la composición WC-10%NbC-10%Co.

La figura 3.5 a) corresponde a una fotomicrografía de la muestra 10%NbC en la cual se puede observar una estructura que evidencia la presencia de granos de WC con una morfología angular. Por otra parte en la figura 3.5 b) se pueden observar claramente las tres fases que conforman el sinterizado, como lo son el carburo de tungsteno fase clara (letra A), carburo de niobio fase color gris (letra B) y por último el cobalto fase oscura (letra C). Podemos observar en esta composición el incremento del carburo de niobio el cual presenta una morfología no definida.

En la figura 3.6 a) b) y c) se muestra el análisis puntual de cada una de las fases presentes, en ella se observo que en la fase oscura la cual pertenece al cobalto, los porcentajes en peso del carburo de tungsteno y del carburo de niobio tuvieron un valor similar al del cobalto. Lo cual posiblemente nos indica la presencia de carburos dobles en la aleación.



**Figura 3.5.-** a) Fotomicrografía 3500x muestra 10% NbC.

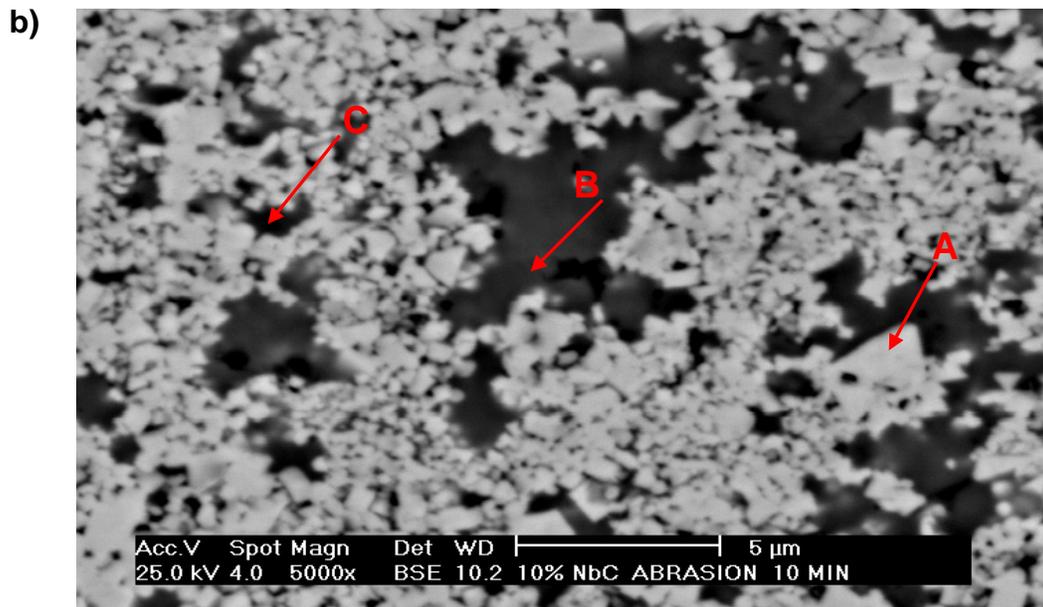


Figura 3.5.- b) Fotomicrografía 5000x muestra 10% NbC.

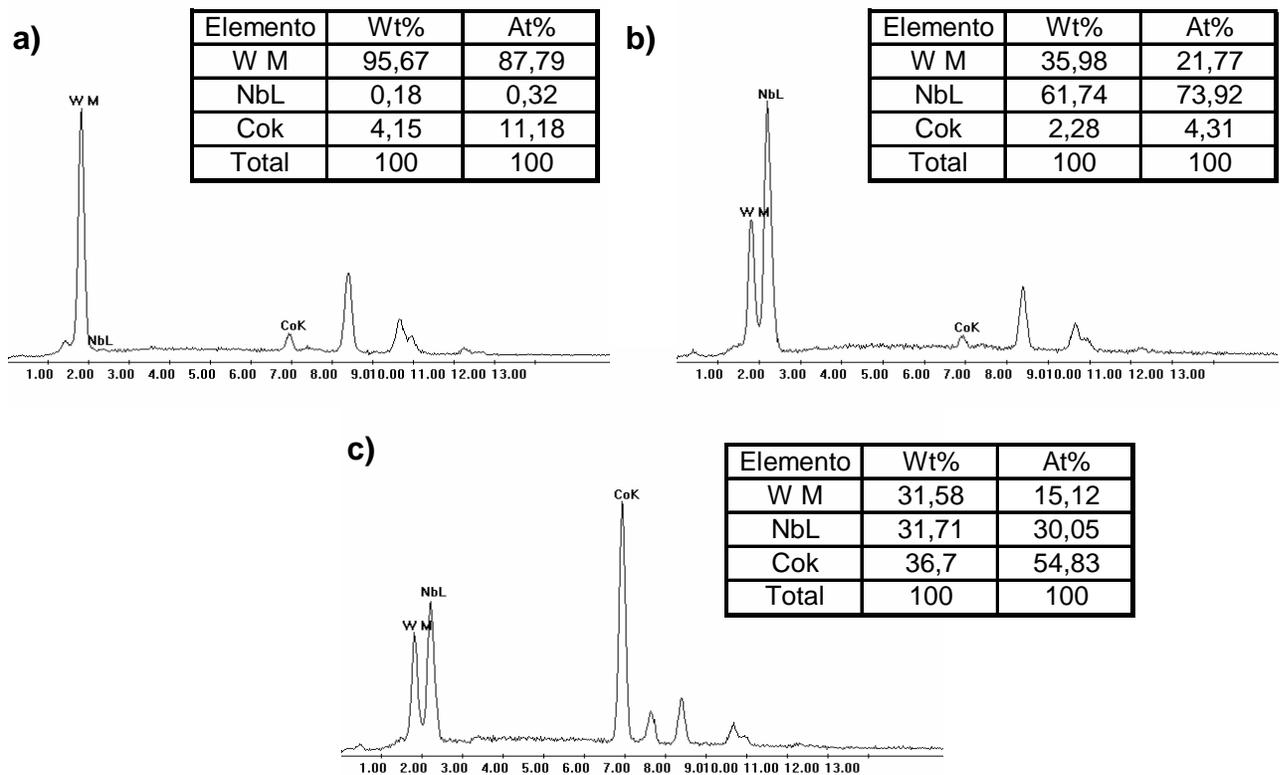
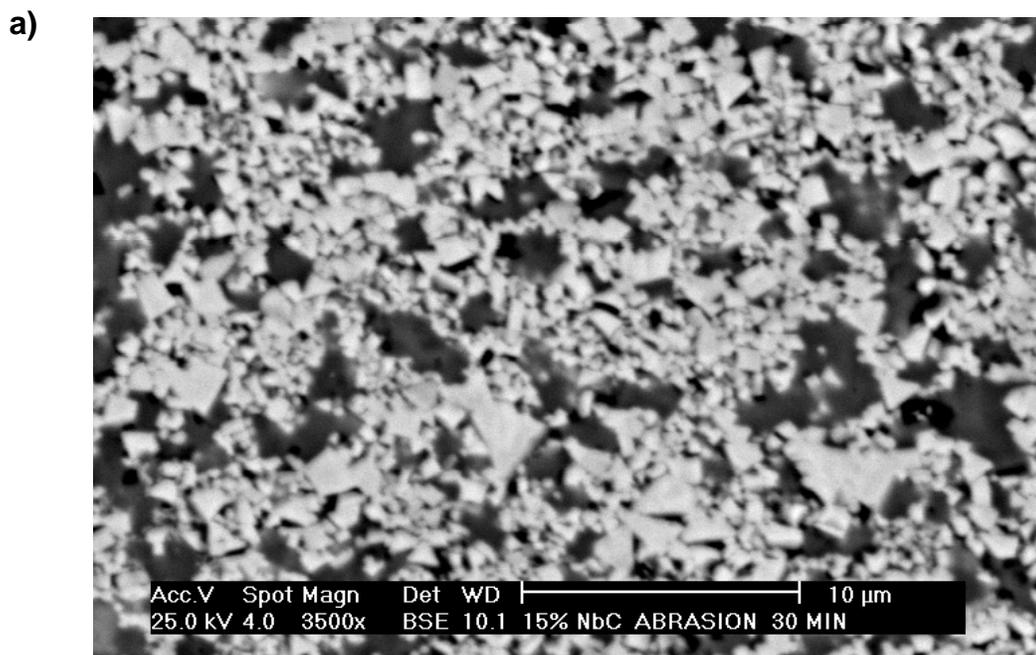


Figura 3.6.- a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B. c) EDS fase oscura C. Muestra 10% NbC.

### 3.1.4.- Análisis de la composición WC-15%NbC-10%Co.

En la figura 3.7 a) y b) se muestra la micrografía a diferentes magnificaciones en donde se pueden observar las fases presentes, siendo bastante notable la presencia de la fase gris posiblemente carburo de niobio NbC (letra B), el cual forma una especie de piscinas alrededor del carburo de tungsteno reduciendo el tamaño de grano de este ultimo pero manteniendo su morfología angular o prismática, por su parte el cobalto el cual es la matriz se observa en pequeñas cantidades, en la grafica también podemos apreciar la fase clara que es el carburo de tungsteno (letra A), y una fase oscura de cobalto (letra C).

En la figura 3.8 a) b) y c) se puede observar el análisis puntual EDS en cada una de las fases presentes en la composición. Se puede observar que el análisis puntual en (B) se realizó en una zona gris claro, con la finalidad de analizar la composición específica en esa zona, obteniendo como resultado porcentajes en peso similares de carburo de tungsteno WC y carburo de niobio NbC, lo cual podría ser la formación de carburos dobles.



**Figura 3.7.-** a) Fotomicrografía 3500x muestra de 15% NbC.

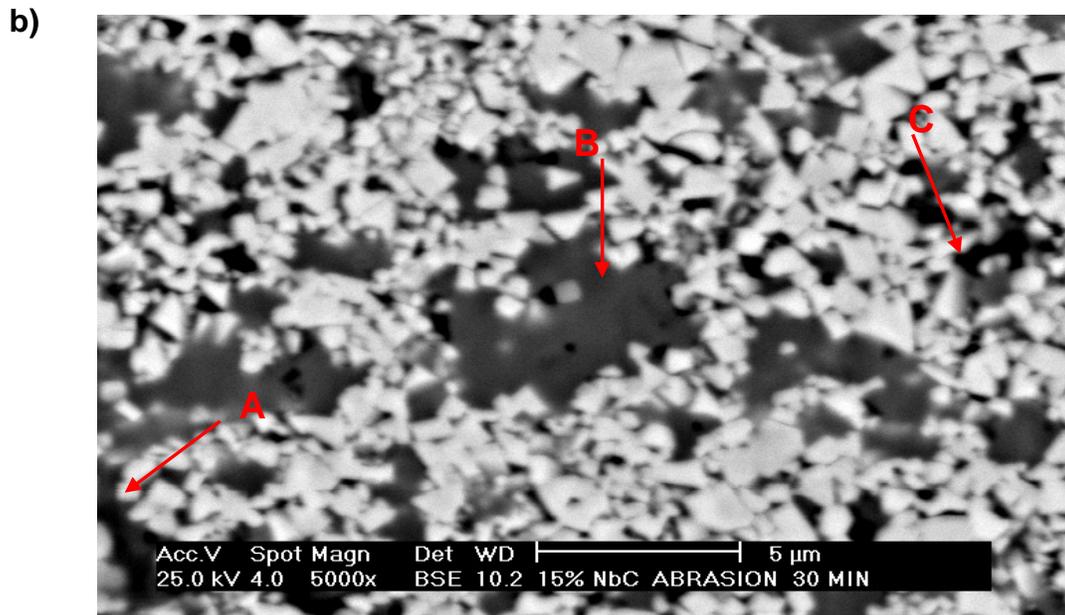


Figura 3.7.- b) Fotomicrografía 5000x muestra de 15% NbC.

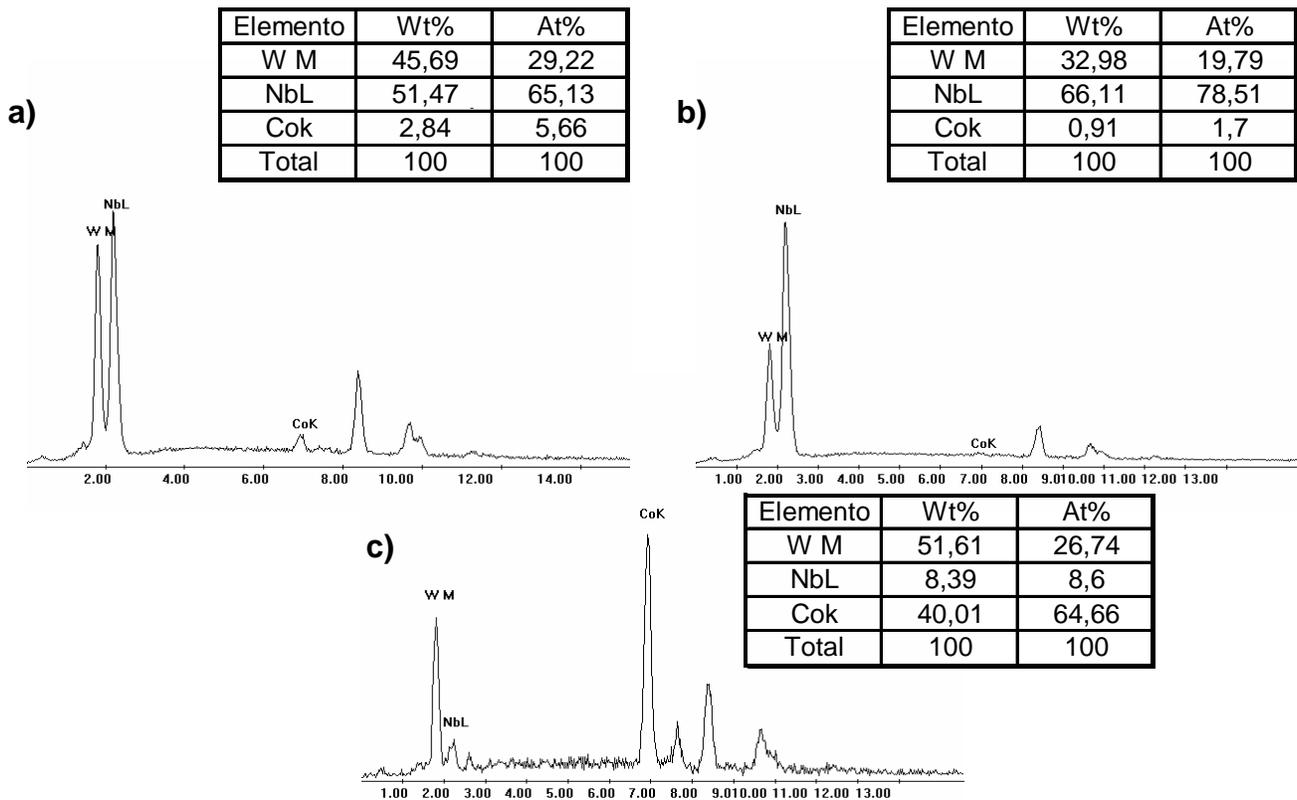
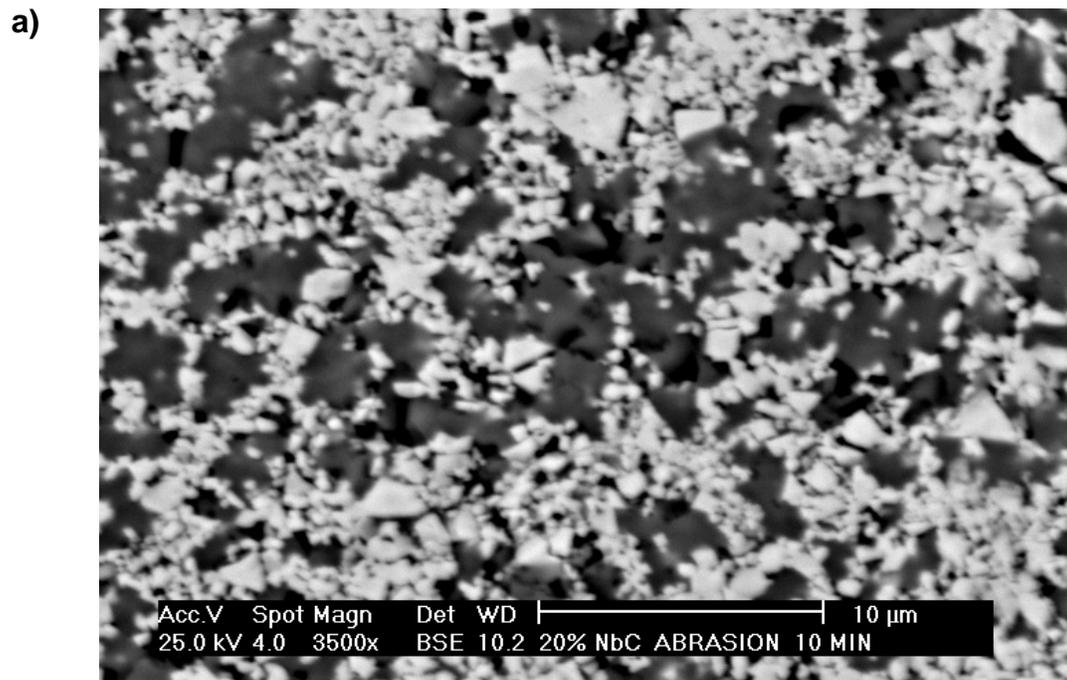


Figura 3.8.- a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B. c) EDS fase oscura C. Muestra de 15% NbC

### 3.1.5.- Análisis de la composición WC-20%NbC-10%Co.

En la figura 3.9 a) y b) se muestran las microfotografías para 3500x y 5000x, en las cuales se puede observar las grandes cantidades de carburo de niobio NbC presentes en la composición (letra B), por su parte el carburo de tungsteno WC (letra A) presenta una morfología prismática con un tamaño de grano pequeño en su mayoría, a pesar de que se observan algunos granos aislados de un tamaño mayor, también se puede apreciar la zona oscura la cual representa la matriz de cobalto Co, que no presenta ninguna variación en comparación con las muestras anteriores.

En la figura 3.10 a) y b) se muestran los análisis puntuales haciendo un estudio de la zona clara (letra A) y la zona gris (letra B), para observar los porcentajes en peso de los carburos en la composición.



**Figura 3.9.-** a) Fotomicrografía 3500x muestra de 20% NbC.

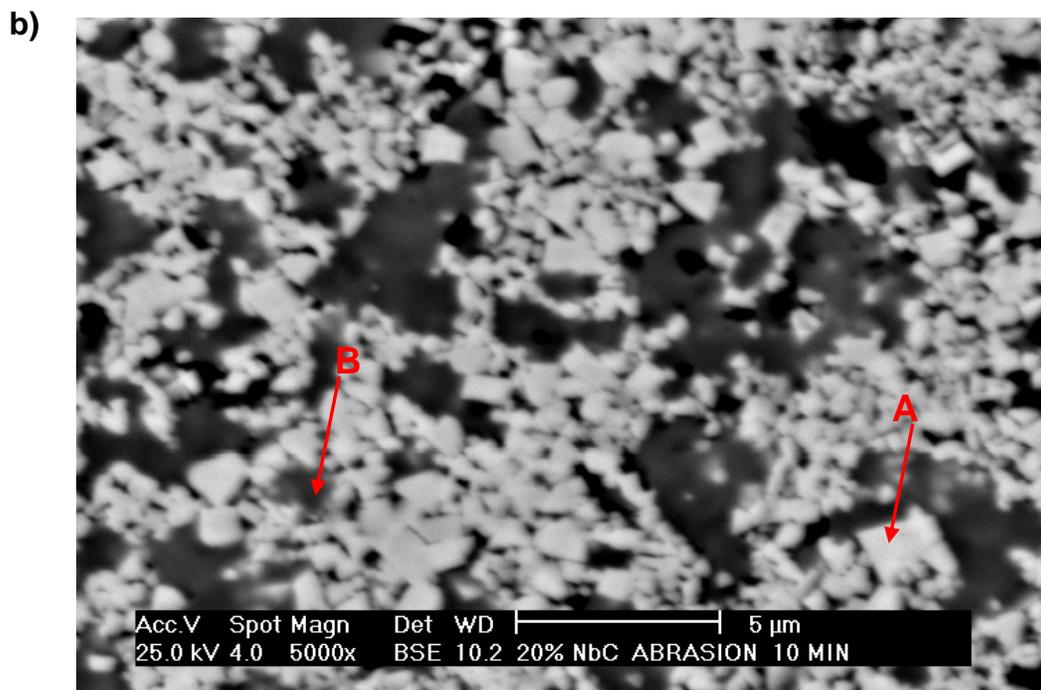


Figura 3.9.- b) Fotomicrografía 5000x muestra de 20% NbC.

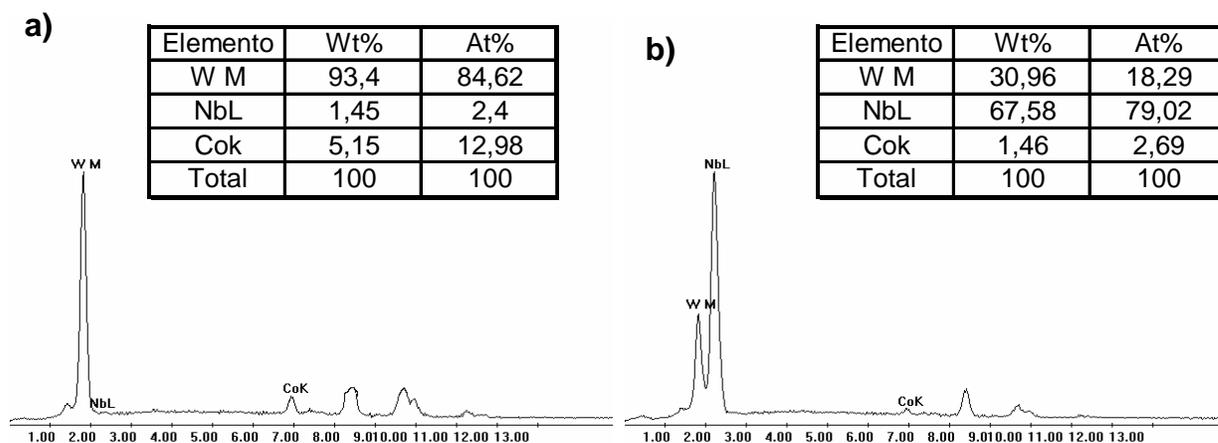


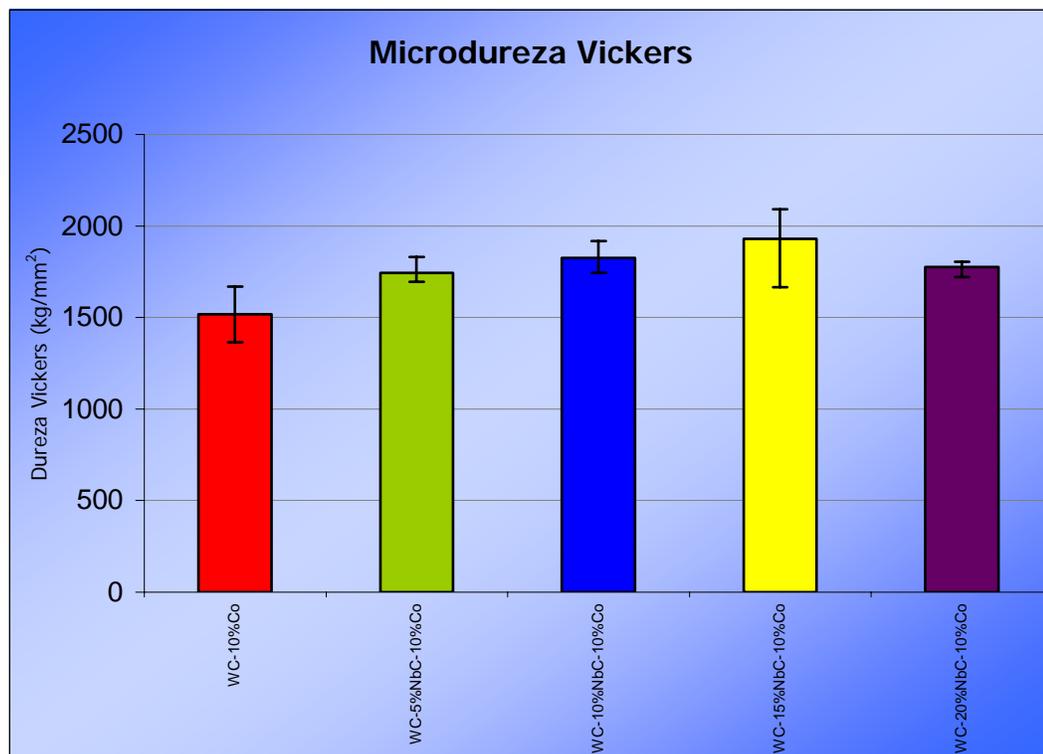
Figura 3.10.- a) EDS fase clara A. b) EDS fase gris B. Muestra de 20% NbC.

### 3.2.- Análisis de La Microdureza.

En la Figura 3.11 se presentan los valores promedios de microdureza de cada una de las muestras analizadas, siendo éstos el promedio de 10 indentaciones vickers con una carga de 300 g. en cada uno de los casos. Como se puede observar en esta Figura el mayor valor de microdureza corresponde a la muestra que contiene WC-15%NbC-10%Co, el cual es 21% mayor que el valor de microdureza de la composición que no contiene NbC, por otra parte se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de NbC en el material los valores de la microdureza se incrementan hasta un máximo valor de 1928 Kg/mm<sup>2</sup>, sin embargo para la composición de 20%NbC ocurre una disminución de 8% en el valor de la microdureza con respecto a la composición de 15%NbC.

**Tabla 3.1.** Microdureza Vickers.

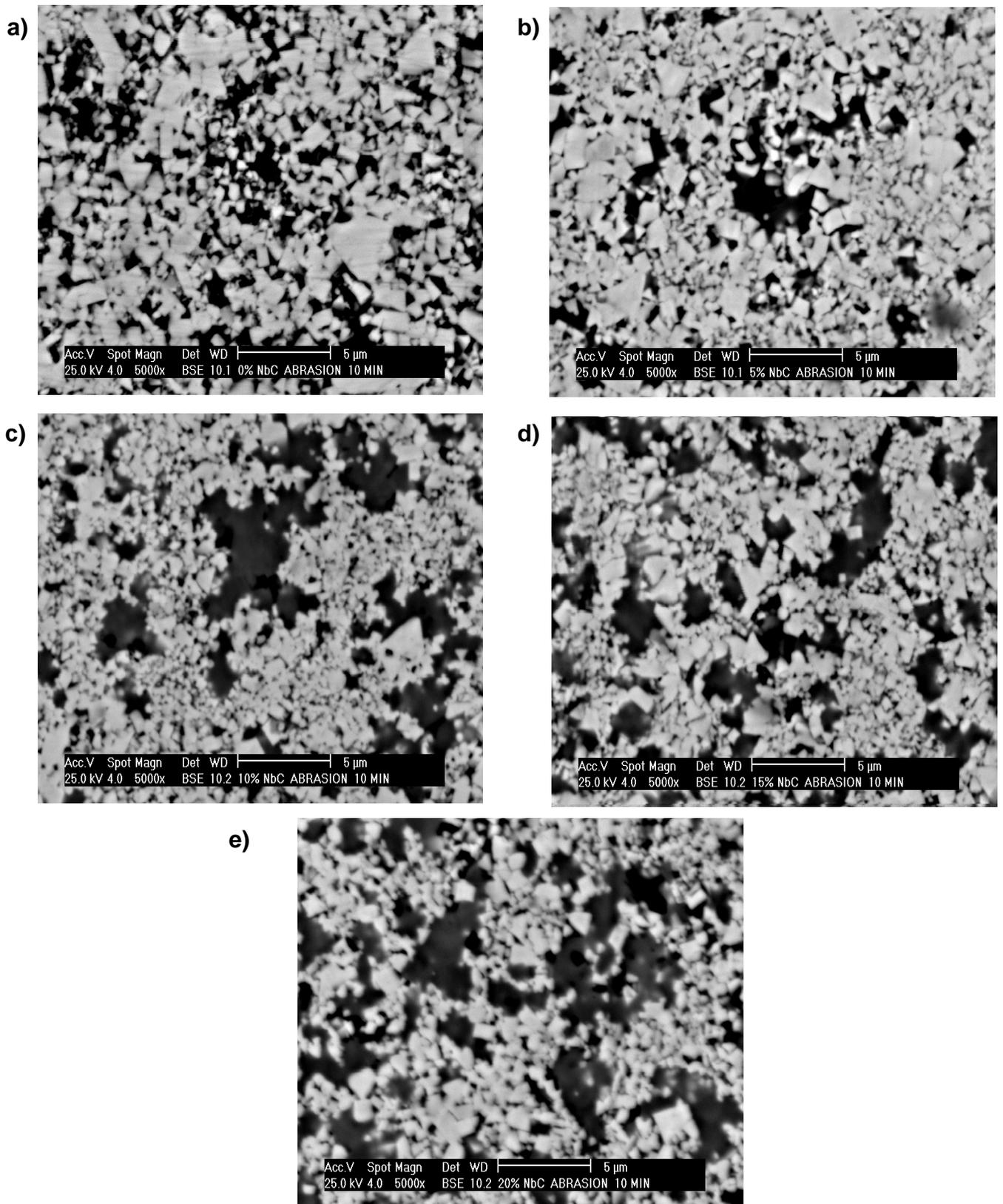
Material	Microdureza	Desviación Estándar
0% NbC	1519	97
5% NbC	1743	50
10% NbC	1826	88
15% NbC	1929	182
20% NbC	1776	43



**Figura 3.11.** Microdureza Vickers.

Este comportamiento mostrado por las diferentes composiciones en el ensayo de dureza se debe principalmente a que el incremento porcentual de carburo de niobio NbC, inhibe el crecimiento granular del carburo de tungsteno WC, por consiguiente al tener un menor tamaño de grano tenemos una composición más homogénea y una mayor dureza, también cabe destacar que para grandes cantidades de NbC, la dureza tendría una tendencia a disminuir ya que el carburo de niobio NbC, es un material de menor dureza que el carburo de tungsteno WC. Esta tendencia del incremento de la dureza a medida que se le añade un carburo cúbico a muestras de WC-10%Co también fue registrada por Arenas F.J. [31].

En la figura 3.12 se puede observar mediante la micrografía como fue disminuyendo el tamaño de grano del carburo de tungsteno WC (fase clara), a medida que aumentaba el porcentaje de carburo de niobio NbC (fase gris), en la composición.



**Figura 3.12.-** Microscopia Comparativa. a)0%NbC, b)5%NbC, c)10%NbC, d)15%NbC, e)20%NbC.

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

En la tabla 3.2 se muestran los valores promedio de la pérdida de peso para cada uno de los ángulos con su respectiva desviación.

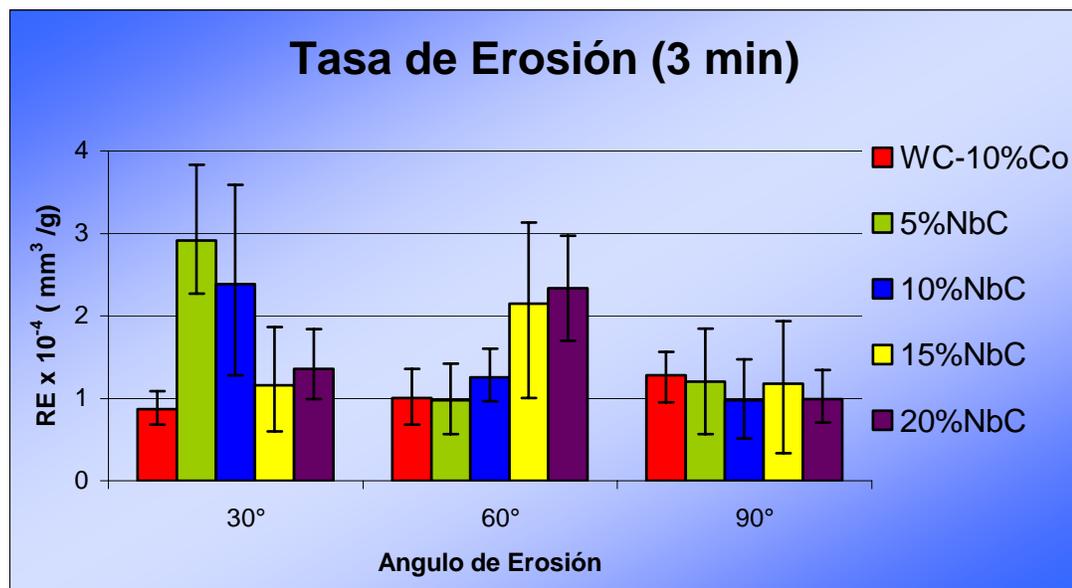
**Tabla 3.2.- Pérdida de peso ensayo de erosión ( $\text{g} \times 10^{-3}$ ).**

Muestra	30°	Desviación Estándar	60°	Desviación Estándar	90°	Desviación Estándar
<b>0% NbC</b>	1,28	0,21	1,48	0,37	1,82	0,38
<b>5% NbC</b>	4,10	0,90	1,38	0,49	1,76	0,76
<b>10% NbC</b>	3,72	1,51	1,96	0,38	1,52	0,60
<b>15% NbC</b>	1,74	0,80	3,22	1,35	1,76	1,01
<b>20% NbC</b>	1,92	0,43	3,30	0,76	1,40	0,36

En la Tabla 3.2 se representan los resultados de la pérdida de masa (g) con respecto a los diferentes ángulos de ataque utilizados en el ensayo de erosión para un tiempo de 3 min. En la tabla se puede observar que para un primer ángulo de 30° las muestras que perdieron más material fueron las que contenían un 5%NbC y 10%NbC respectivamente, las cuales perdieron un 67% mas que la de WC-10%Co siendo ésta la que tuvo una pérdida menor de masa, por su parte las muestras con contenidos de 15 y 20% de NbC respectivamente solo tuvieron una perdida del 57% y 53% con respecto a la muestra WC-10%Co. Para un ángulo de 60° el comportamiento de las muestras difiere del ángulo anterior. En este caso la muestra que sufrió una pérdida de peso mayor fue aquella cuyo contenido de NbC fue de 20% la cual fue hasta de un 58% y 55% mayor que las muestras con contenidos de 5 y 0%. Mientras que para un ángulo de 90° la composición que tuvo el mayor desgaste fue WC-10%Co, siendo este 23% mayor que la composición de 20%NbC. Cabe destacar que los otros tres materiales tuvieron una pérdida de masa muy similar y también en un porcentaje mayor a la composición de 20%NbC.

Es importante resaltar que todas las muestras que en su composición contienen NbC en diferentes porcentajes sufrieron un mayor desgaste por erosión abrasiva (30°) que la composición que no contiene NbC; Caso contrario ocurre en la erosión por choque (90°) en la cual la composición que no contiene NbC presentó un mayor desgaste que las composiciones que contienen NbC. Este comportamiento es el asumido por un material frágil como lo es el WC-10%Co.

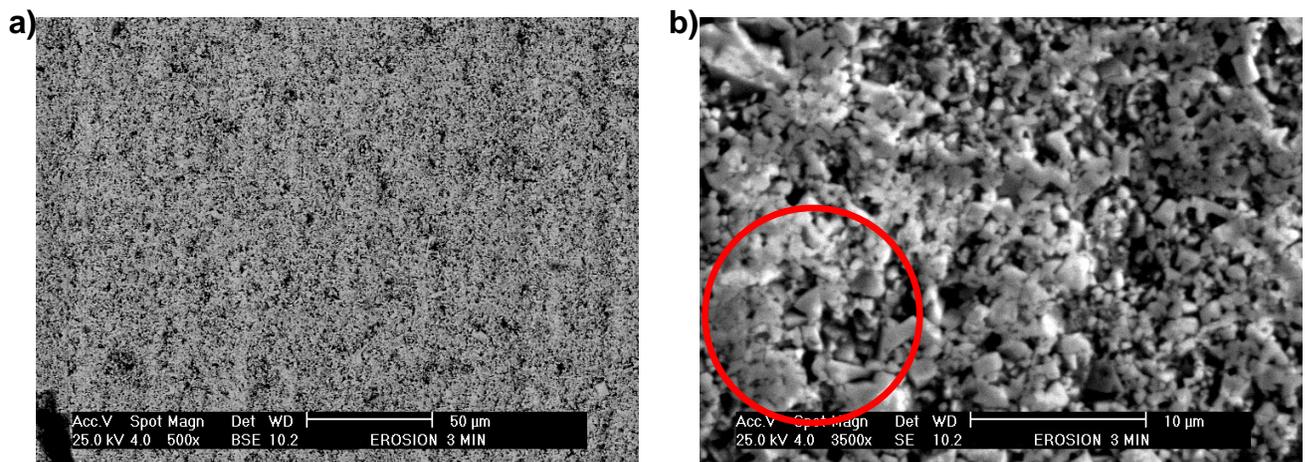
Con la finalidad de evaluar la resistencia a la erosión de las muestras sinterizadas, se calculó la tasa de erosión para cada muestra y ángulo de impacto. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.13. En esta figura se puede observar que la muestra Wc-10%Co disminuye su resistencia a la erosión a medida que aumenta el ángulo de ataque, lo que representa un comportamiento característico de los materiales frágiles [25]. Sin embargo, los materiales que contienen NbC presentan un comportamiento diferente. Esto puede ser debido a las altas desviaciones presentadas en los valores obtenidos, a características que le añade el NbC, o bien sea por la preparación y fabricación en el proceso de sinterizado.



**Figura 3.13.-** Tasa de Erosión de las muestras estudiadas para un tiempo de ensayo de 3 minutos.

Con el propósito de definir el probable mecanismo de desgaste que operó durante el ensayo erosivo, se estudio el deterioro físico de la superficie a través de las técnicas de MEB y EDS de las muestras que experimentaron los casos mas y los menos favorables para este material, como son las muestras erosionadas a ángulos de 30° y 90° respectivamente.

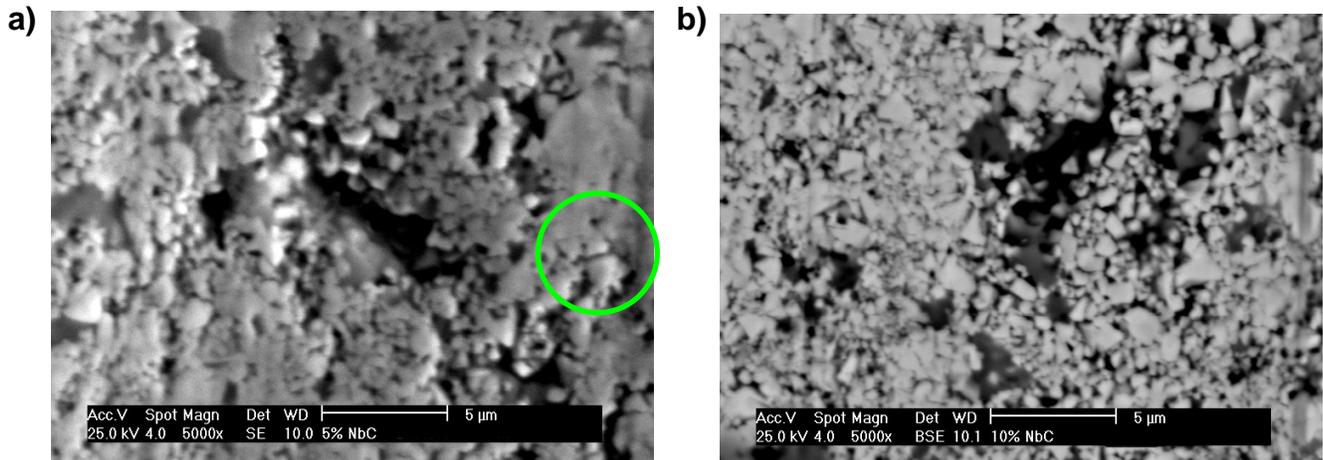
La Figura 3.14 corresponde a una imagen de la superficie erosionada correspondiente a la muestra WC-10%Co, después de haber sido sometida al ensayo de erosión a 90°. En esta micrografía se puede apreciar que el desgaste no fue significativo (Figura 3.14 a). Esto puede ser debido a que las partículas de alúmina no logran fracturar las partículas de carburo de tungsteno impidiendo la perdida de material. También se observa que algunas partículas han producido deformación plástica (círculo rojo).



**Figura 3.14.-** Fotomicrografía de la superficie erodada muestra WC-10%Co  
a) (500x) a 90°, b) Electrones Secundarios (3500x) a 90°.

En la figura 3.15 se puede observar las muestras de 5% NbC (a) y 10% NbC (b) después de erosionadas con un ángulo de 30°, en ellas se puede observar la acción de esfuerzos cizallantes que produce el desprendimiento de partículas que no están suficientemente ancladas o cementadas. También se observan algunas áreas

(círculo verde) donde se presentan leves fracturas en el grano de carburo de tungsteno WC.



**Figura 3.15.-** Fotomicrografía de la superficie erodada.

- a) Muestra con 5% NbC erosionada a un ángulo de 30° (5000x).
- b) Muestra con 10% NbC erosionada a un ángulo de 30°(5000x).

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

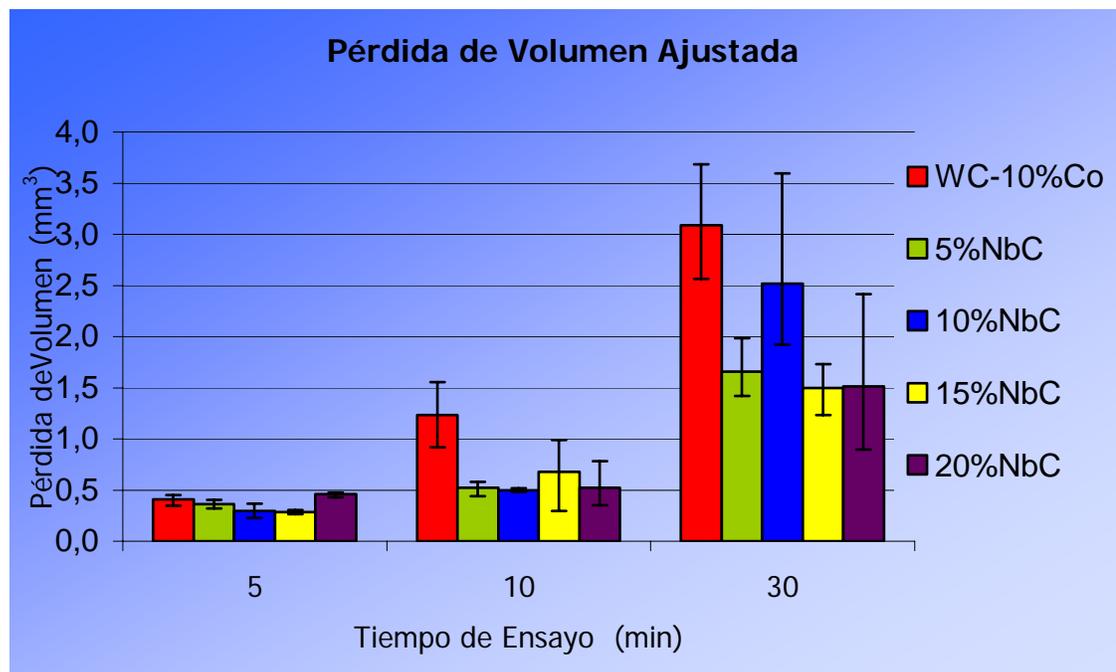
La tabla 3.3 contiene los resultados promedio de pérdida de peso en el ensayo de abrasión para cada uno de los tiempos estudiados (5, 10, 30 minutos).

**Tabla 3.3.-** Pérdida de peso ensayo de abrasión ( $g \times 10^{-3}$ ).

Muestra	5 min.	Desviación Estándar	10 min.	Desviación Estándar	30 min.	Desviación Estándar
0% NbC	5,46	0,75	16,36	4,20	40,10	7,29
5% NbC	4,50	0,50	6,46	0,92	20,06	3,52
10% NbC	4,03	0,95	6,76	0,25	33,66	12,52
15% NbC	3,76	0,25	8,76	3,90	19,20	3,21
20% NbC	5,73	0,37	6,40	2,74	18,23	9,62

En esta tabla se puede apreciar que a medida que aumenta el tiempo de exposición aumenta la pérdida de peso para todas las muestras ensayadas, por otra parte se observa que la mayor desviación estándar fue para la muestra 10% NbC en el ensayo de 30 min.

La Figura 3.16 muestra gráficamente los resultados de pérdida de volumen ajustada, con relación al tiempo de ensayo para cada condición ensayada.



**Figura 3.16.-** Pérdida de Volumen ajustada.

De esta figura se desprende que para un tiempo de 5 minutos todas las composiciones ensayadas mostraron un comportamiento similar, la muestra que presentó un mayor desgaste fue la correspondiente a 20%NbC, siendo este 35% mayor que la muestra de 10%NbC y que la de 15%NbC, que presentaron el menor desgaste, por su parte las otras dos muestras estudiadas WC-10%Co y WC-5%NbC-10%Co, presentaron un desgaste similar para este tiempo y fueron 13% y 20% respectivamente menores que la que presentó el mayor desgaste.

Para un tiempo de 10 minutos (ver figura 3.16) podemos observar que la muestra WC-10%Co, presentó el peor comportamiento frente al desgaste abrasivo comparada con las muestras que contienen NbC, siendo este desgaste hasta un 45% mayor con respecto a la muestra de 15%NbC, que fue la que presentó el mayor desgaste comparada con las muestras que contienen NbC. De estos resultados se desprende que la adición de carburo de Niobio mejoró la resistencia a la abrasión de la muestra con composición WC-10%Co, lo cual se hace mas evidente para un tiempo de ensayo de 10 minutos.

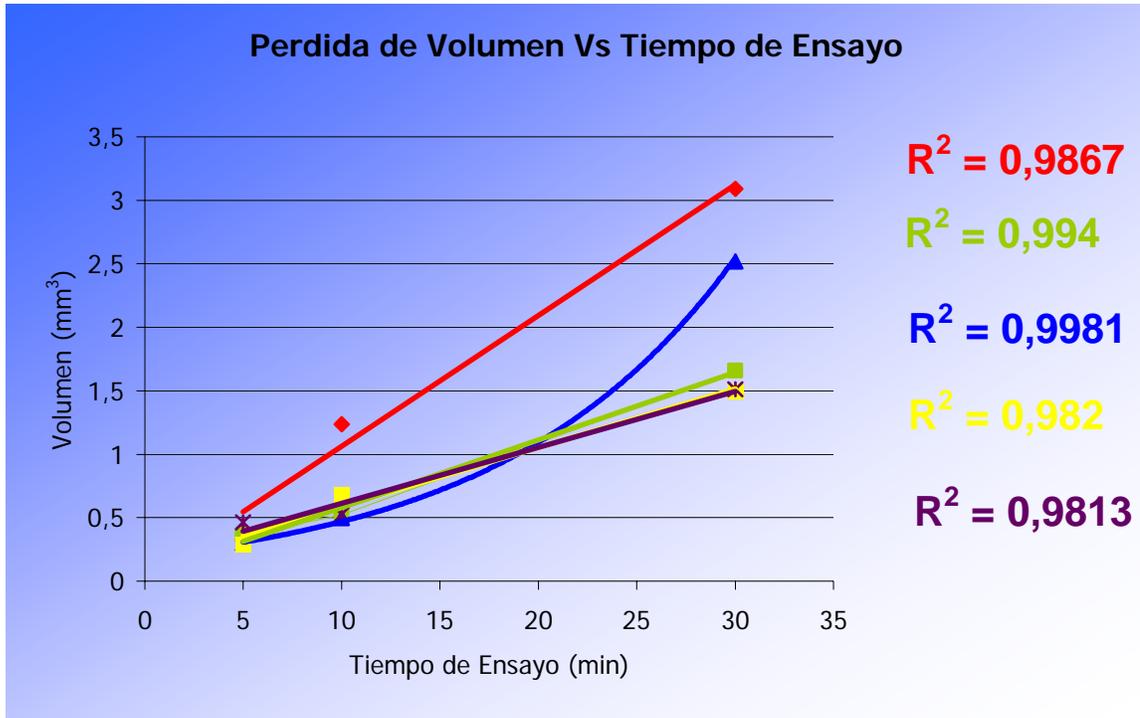
También se puede observar que la muestra que presentó el menor desgaste fue la que contiene un 10%NbC, la cual obtuvo una pérdida de volumen 59% menor que la que presentó mayor desgaste, cabe destacar que esta muestra también fue la que presentó el menor desgaste para el ensayo de 5 minutos.

Así mismo, en la Figura 3.16, se observa que para un tiempo de 30 minutos la muestra que presento el mayor desgaste fue WC-10%Co (igual que en el tiempo de 10 minutos), siendo 53% mayor que la muestra que contiene 15%NbC, que fue la que presentó el menor desgaste. La menor resistencia al desgaste abrasivo de la muestra que contiene WC-10%Co probablemente se debió a que los polvos para la sinterización no presentaron las condiciones ideales.

De las muestras que contenían NbC, la de 10% NbC fue la que presento el segundo mayor desgaste, a diferencia de lo que ocurrió en los tiempos de ensayo anteriores de 5 y 10 minutos en donde esta muestra presento el menor desgaste de todas las muestras estudiadas, esto pudo ser ocasionado por la falta de adhesión de las partículas después del sinterizado, teniendo como consecuencia el desprendimiento de las mismas cuando son sometidas a desgaste abrasivo.

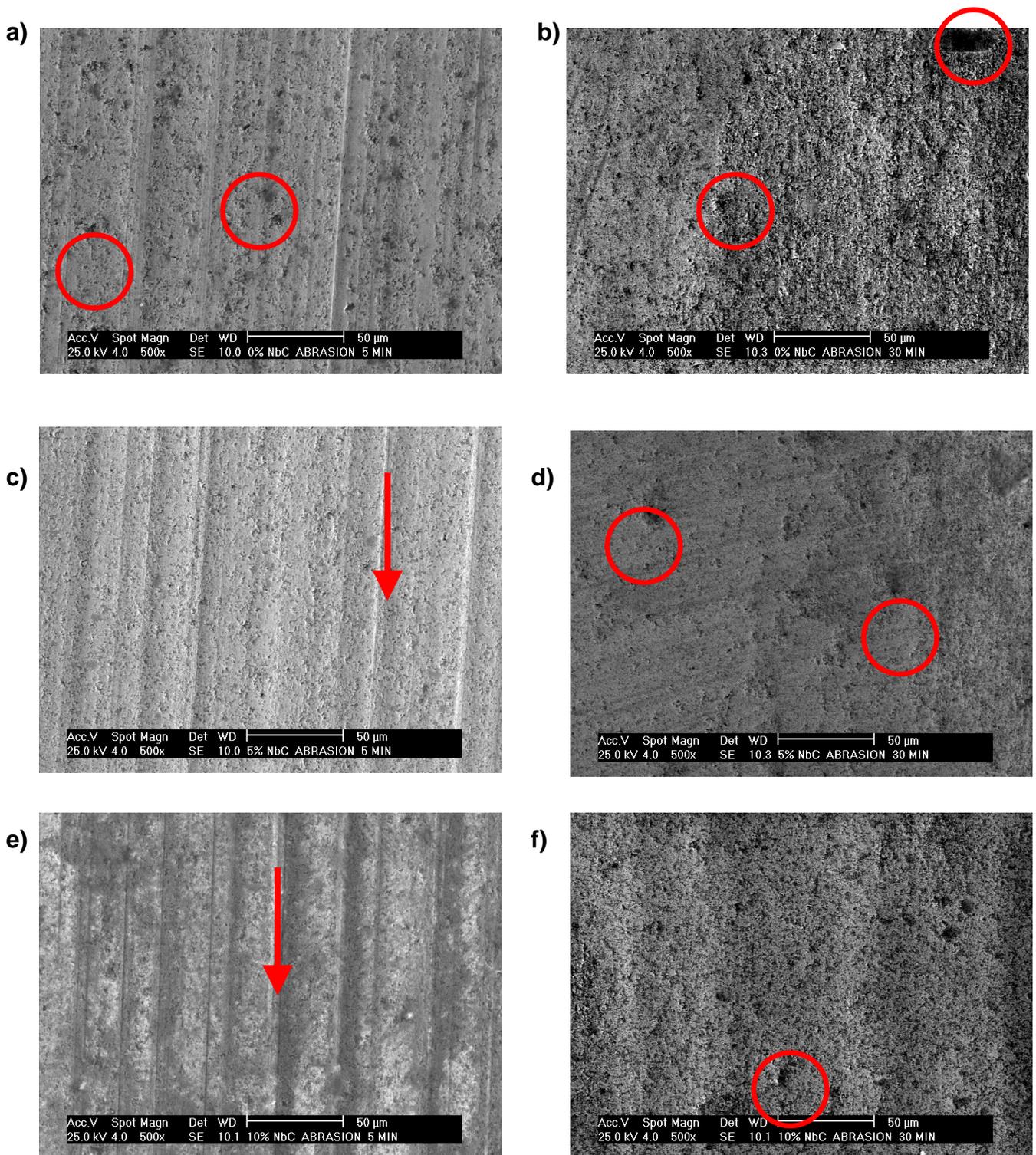
En la Figura 3.17 se puede observar la tendencia al desgaste abrasivo en función del tiempo de las muestras sinterizadas, visualizando en ella un

comportamiento exponencial en la muestra 10%NbC, y una tendencia lineal para las otras muestras, con respecto al tiempo de ensayo.

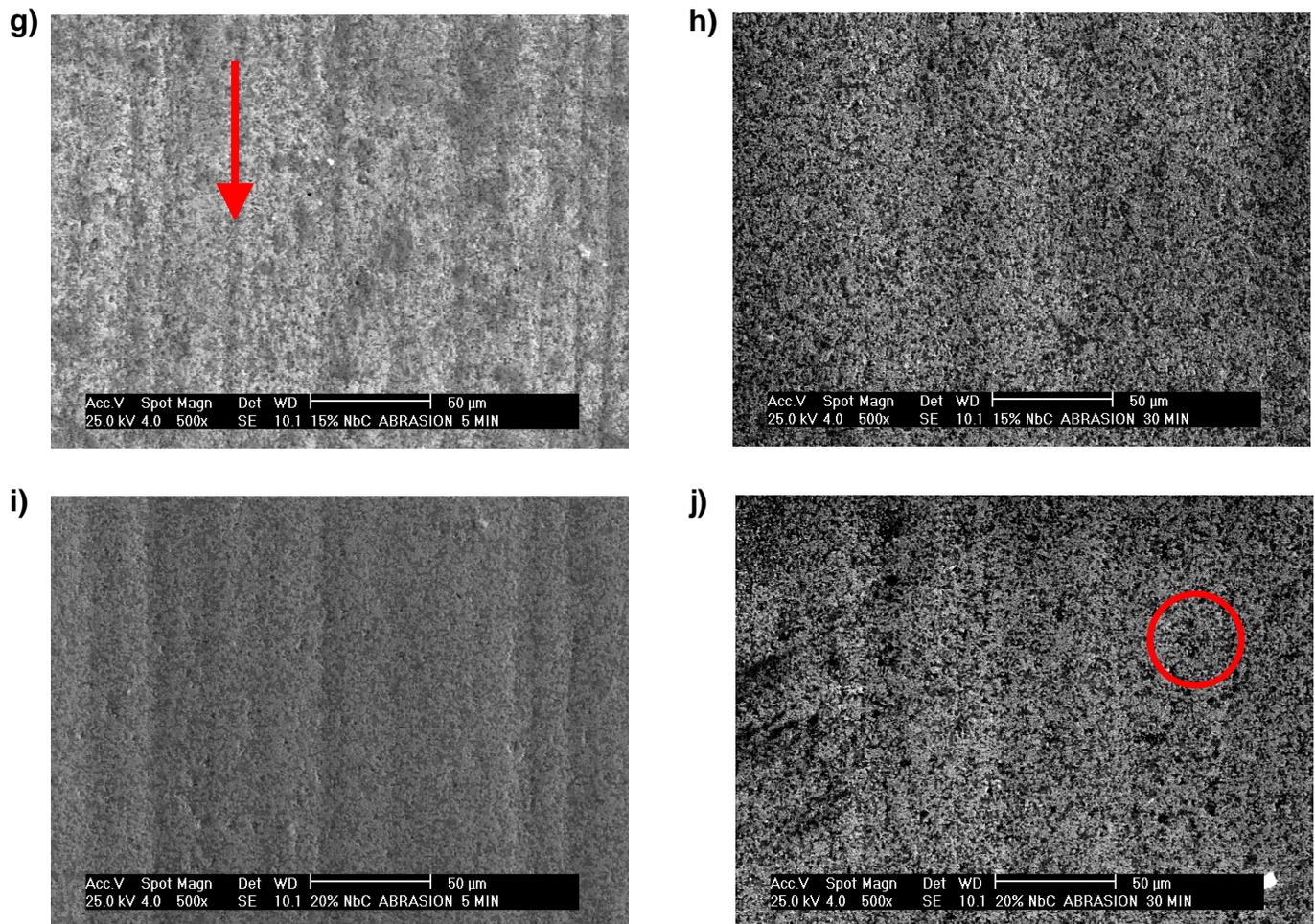


**Figura 3.17.-** Pérdida de Volumen Vs Tiempo de Ensayo.

En la figura 3.18 y 3.19 se pueden observar las fotomicrografías del desgaste abrasivo para las diferentes composiciones en estudio, para los tiempos de 5 y 30 minutos a una magnificación de 500x, en ellas se aprecia que la superficie fue removida como especie de un micro-maquinado ocasionado por las partículas abrasivas las cuales se comportan como pequeñas herramientas de corte.



**Figura 3.18.-**Microscopía Electrónica de Barrido a 500x, después de realizado el ensayo de abrasión, a)0%NbC a 5 min, b)0% NbC a 30 min, c)5%NbC a 5 min, d)5%NbC a 30 min, e)10%NbC a 5 min, f)10%NbC a 30 min.



**Figura 3.19.-**Microscopía Electrónica de Barrido a 500x, después de realizado el ensayo de abrasión, g)15%NbC a 5 min, h)15%NbC a 30 min, i)20%NbC a 5 min, j)20%NbC a 30 min.

Cabe destacar que el levantamiento del material (círculos rojos) es más notable como era de esperarse en las composiciones que fueron ensayadas durante un mayor tiempo (30 min), también se puede apreciar fácilmente (flechas rojas) los surcos ocasionados por el rectificado del material.

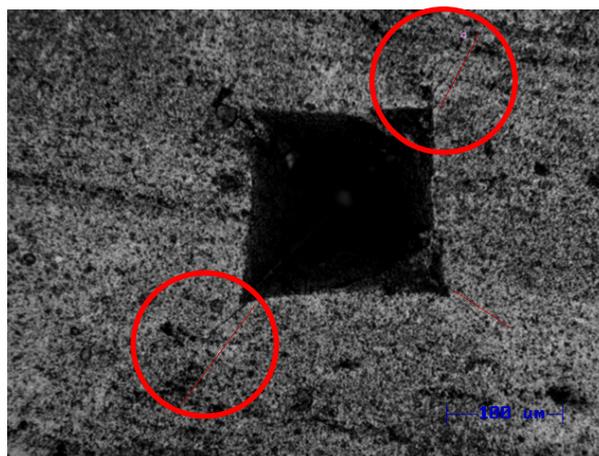
### 3.5.- Análisis de Tenacidad de Fractura.

En la tabla 3.3 se muestran las diferentes longitudes de grietas luego de las indentaciones para una carga de 30 Kgf, así como también los valores de tenacidad de Fractura ( $K_{IC}$ ) obtenidos experimentalmente para cada uno de las composiciones estudiadas.

**Tabla 3.4.-** Tenacidad de Fractura ( $K_{IC}$ ).

Material	Dureza (HV)	Longitud prom. (mm)	$K_{IC}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
WC-10%Co	1519	71,29	10,968
WC-5%NbC-10%Co	1743	87,31	10,616
WC-10%NbC-10%Co	1826	98,03	10,256
WC-15%NbC-10%Co	1929	115,03	9,730
WC-20%NbC-10%Co	1776	92,82	10,393

En la figura 3.20, se puede observar dentro de los círculos en color rojo, las grietas generadas en la probeta con una indentación vickers para una carga de 30 kgf,



**Figura 3.20.-** Indentación Vickers con una carga de 30 Kgf.

En la figura 3.21, se puede observar la resistencia a la propagación de grietas o Tenacidad a la Fractura ( $K_{IC}$ ) para las muestras estudiadas. En esta figura se puede apreciar que los valores de  $K_{IC}$  se encontraron entre 9 y 11  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Para la composición de 15%NbC alcanzó un valor mínimo de  $K_{IC}$  de 9,7  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , siendo este valor hasta un 12% menor que el obtenido en la muestra de WC-10%Co,

Asimismo se aprecia en la figura 3.21, que los valores de  $K_{IC}$  tienen una tendencia a disminuir a medida que aumenta el contenido de NbC en las muestras. Los valores obtenidos para el  $K_{IC}$  se encuentran entre los rangos para los carburos cementados ( $K_{IC}$ : 9-11  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) [37]. Por otra parte para este tipo de materiales la disminución en los valores del  $K_{IC}$  son esperados, debido al aumento en los valores de dureza, también la presencia de los diferentes cambios microestructurales modifica el comportamiento a la tenacidad de fractura de los carburos cementados.

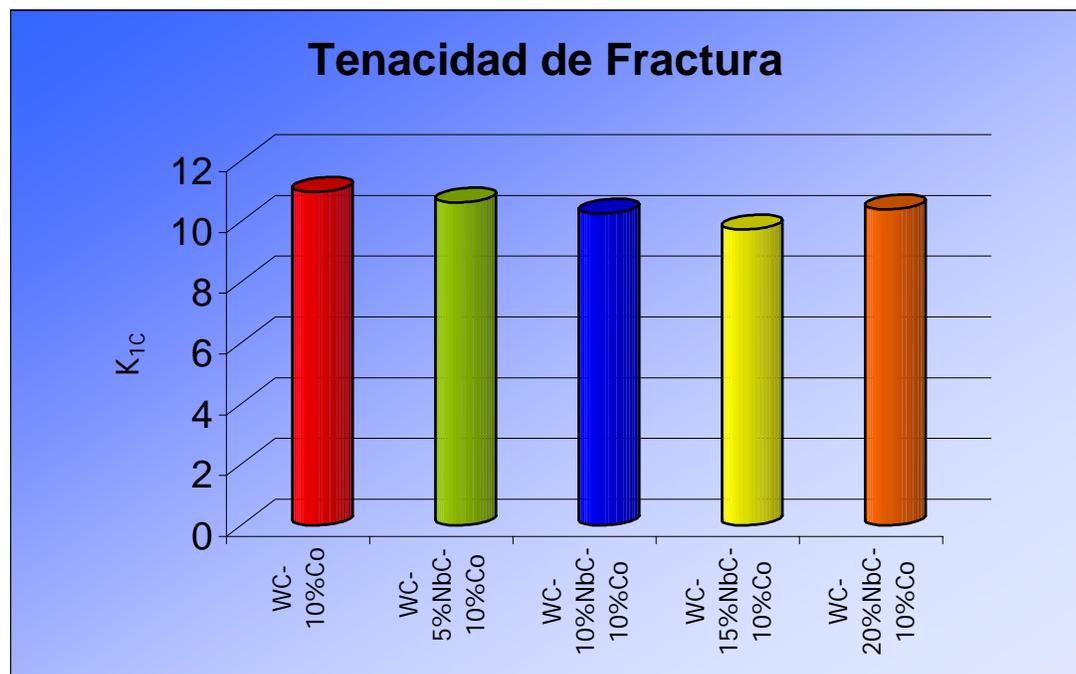


Figura 3.21.- Tenacidad de Fractura.

## Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1.- Conclusiones

La microestructura de las muestras sinterizadas básicamente presentaron tres fases, una fase clara probablemente de carburo de tungsteno (WC) de morfología angular, una fase de color gris probablemente de carburo de niobio (NbC) con una morfología irregular, y otra fase oscura de cobalto (Co) la cual actuó como cementante.

Se pudo determinar que la microdureza aumentó a medida que se incrementó el porcentaje de NbC, obteniéndose un incremento del 13% para la de 5%NbC, 17% para la de 10%NbC, 21% para la de 15%NbC, y 15% para la de 20%NbC. Esto es probablemente debido a que el NbC actúa como un inhibidor del crecimiento de grano del WC, lo cual indujo a un aumento de la dureza de las muestras sinterizadas.

El mejor comportamiento ante el desgaste erosivo para los ángulos de 30° y 60° lo presentó la muestra base (WC-10%Co) sin adición de NbC, Sin embargo, esta misma muestra fue la mas desfavorable a la erosión por choque (90°). Esto es probablemente debido a que las partículas de WC están bien adheridas a la fase cementante y no son fácilmente removidas por la acción de las partículas proyectadas en ángulos menores a 60°. No obstante, cuando el ángulo de impacto es mayor las partículas son removidas debido al mecanismo de fractura.

Los resultados del ensayo de erosión también mostraron que la muestra con un contenido de 5%NbC, fue la mas desfavorable a la erosión de 30°. Lo cual puede deberse a que el bajo contenido de carburo de niobio no logra una buena cohesión con las partículas de WC ni con la fase cementante permitiendo el desprendimiento de los carburos de la muestra. Sin embargo, para un ángulo de 90° la muestra con un contenido de 20%NbC presentó la menor tasa de erosión lo cual indica que a

medida que aumenta el contenido de carburo de niobio se mejora la resistencia a la erosión de la aleación WC-10%Co para ángulos mayores a 60°

Los resultados de microscopía electrónica realizados sobre la superficie erodada indicaron que el modo probable de desgaste fue la deformación plástica o aplastamiento de la fase cementante (Co) y un desprendimiento de la fase de NbC, la cual dejó expuesta las partículas de WC, facilitando su fractura debido al impacto sucesivo de las partículas erodantes y posterior remoción.

La composición de 15% NbC es la que muestra un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia al desgaste abrasivo se refiere, pero en general todas las composiciones que contienen NbC tuvieron un comportamiento frente al desgaste abrasivo muy similar, con excepción de la de 10% NbC, que presentó un desgaste mucho mayor para un tiempo de 30 min. Por otra parte la composición que tuvo el mayor desgaste para todos los tiempos (5,10 y 30) min, fue la que no contiene NbC en su composición.

La superficie de desgaste producida durante el ensayo de abrasión se caracterizó por la presencia de surcos y cráteres, evidenciando pérdidas de partículas de NbC, y fracturas de granos de WC que finalmente terminan por desprenderse de la fase cementante.

Los resultados de la tasa de desgaste bajo condiciones de erosión y abrasión permiten considerar a los materiales manufacturados y ensayados para aplicaciones donde se requiera alta resistencia al desgaste.

La tenacidad de fractura presentó un comportamiento inversamente proporcional a la dureza, es decir que a medida que aumentó la dureza disminuyó la tenacidad de fractura.

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

El mantenimiento y vigilancia del banco de ensayos de erosión, ya que el mismo presenta deterioro en varios de sus componentes.

La reubicación del banco de ensayo de abrasión debido a la problemática para su uso durante el periodo de clases.

Realizar mediciones de dureza antes y después de los ensayos abrasivos y erosivos para verificar si hay un aumento de la dureza por deformación.

La reparación y mantenimiento de la fresa de control numérico, ya que esta es indispensable para realizar el rectificado de las muestras.

## Referencias Bibliográficas

- [1]. Andrievski R.A; (2001). Int. J. of Ref. Met. & Hard Mat, (19), 447-452.
- [2]. Santhanam A, Tierney P y Hunt L.; (1990). Cemented Carbides Vol. 2 Tenth Edition.
- [3]. Reshetnyak H, Kubarsepp J; (1997). "Structure sensitivity of wear resistance of hardmetal. International Journal of Refractory Metal & Hard Material. Gran Bretaña.
- [4]. Brookes K; (1998). "Hardmetals and Other Hard Materials". 3rd. ed. UK: Internacional Carbide Data.
- [5]. Rodríguez, E; (2000). "Evolución del comportamiento Tribológico del Carburos Cementados con Intermetálicos de Co". Trabajo Especial de Grado. IUT. Departamento de Tecnología de Materiales.
- [6]. Exner H; (1979). "Physical and chemical nature of cemented carbides". International Metal Reviews, N° 4, Germany.
- [7]. Ettmayer P, Kolaska H, lengauer W and Dreyer K; (1995). Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. (13), 343-351.
- [8]. Rodríguez E; (2000). "Producción Pulvimetalurgica de Metales Duros de WC con Intermetalicos de Cobalto". Trabajo Especial de Grado. IUT. RC. Departamento de Tecnología de Materiales. 15-20.
- [9]. Centeno O, Arenas F, Saez A and Acchar W; (2002). "Microestructural Analysis of WC-10%Co Reinforced With NbC": Preliminary Work.

- [10]. Prakash L.; (1995). "Physical and chemical nature of cemented carbides". International Metal Reviews, Germany.
- [11]. Matos M., Asdrúbal J. y Ruiz S., Ernesto J.; (1999). "Estudio de la resistencia al desgaste de una serie de aleaciones de WC-Co modificados". Trabajo Especial de grado I.U.T. Departamento de Tecnología de los Materiales.
- [12]. Anddren H.O., Rolander U. Lindahl P; (1993-1994). "Phases Composition in Cemented Carbides and Cermets". Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. (12), 107-113.
- [13]. Vitte T., Bolognini S., Cutard T., Feusier G., Mari D and Benit W; (1999). Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. (17), 79-89.
- [14]. García Euro V. y Redden, Emmett E.; (1998). "La influencia del método de deposición sobre la resistencia a la erosión de acero 1020 termorociado con una aleación base níquel por la técnica H.V.O.F." Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [15]. Vargas E; (2001). "La Tribología y su Desarrollo en el Proceso Industrial de Bolivia". [www.mantenimientomundial.com](http://www.mantenimientomundial.com).
- [16]. Hong J. and Garland J; (1981). "A Study of the Fracture Process of WC-Co Alloys". Science of Hard Materials, 649-669.
- [17]. Fischer T.E., Jia K; (1997). "Sliding Wear of Conventional and Nanostructure Cemented Carbides". Wear 203-204. 310-318.
- [18]. Malaver V., Iginio R. y Barbera S., Luis J.; (1995). "Evaluación de la resistencia al desgaste por erosión de recubrimientos termo-rociados". Trabajo Especial de

Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

- [19]. Díaz S., Franco A; (2002). “Análisis Comparativo de la Resistencia al Desgaste de Piezas Sinterizadas y Piezas Recubiertas por Rociado Termico HVOF”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [20]. Arenas F; (2001). “Influencia del Diseño de Microestructura Sobre la Resistencia al Desgaste en Materiales Duros de Carburos Cementados”. IUT. Departamento de Tecnología de Materiales.
- [21]. American Society for Metals; (1995). “Failure Análisis and Prevention”. Ohio, A.S.M. Commitee on analysis of wear faulures.
- [22]. Pinto M., Nicola y Rangel C., 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. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [23]. Bavaresco R., Luis A. y Klisans F., Jorge A.; (2000). “Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos rociados mediante la técnica alta velocidad oxígeno combustible (HVOF)”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [24]. Bangueses, Ana M. 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. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

- [25]. Hutchings, I. M. "Mechanical and Metallurgical Aspects of the Erosion of Metals". Cambridge, s.p.i.
- [26]. "Standard Terminology Relating to Fracture Testing". E616, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM.
- [27]. Quinton Bowles C. (1996); "Fracture and Estructure". A.S.M. Handbook, Volumen 19, Fatigue and Fracture. A.S.M. Internatinale. U.S.A.
- [28]. Meza, J. (2001) "Tenacidad a la Fractura en Cerámicos". Trabajo Dirigido de Grado. Sede Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- [29]. Orlovskava N., et al; (2000). "Mechanical Properties of LaCoO<sub>3</sub> Based Ceramics". J. Eur. Ceram. Soc. (20), 51-56.
- [30]. Pardo. L, y colaboradores; (1991). "Caracterización Mecánica de Cerámicas de PbTiO<sub>3</sub> Modificados con Ca y Vidrios de Boro Para la Preparación de Composites Piezoeléctricos". Bol. Soc. Ceram. Vidr., 30, (5), 352-57.
- [31]. Arenas F.J, Matos A, Cabeza M, Di Rauso C, Grigorescu C; (2001). "Densification Mechanical Properties and Wear Behavior of WC-VC-Co-Al Hardmetals". (19), 381-387.
- [32]. Shetty D.K, Wright I.G, Mincer P.N, Clauer A.H; (1985). "Indentation fracture of WC-Co cermets". Journal of Material Science, N° 20, Ohio, USA.
- [33]. ASTM G76-95. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests By Solid Particle Impingement Using Gas Jets.
- [34]. ASTM G 65 – 00. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.

- [35]. ASTM B 311 – 93. Test Method for Density Determination for Powder Metallurgy (P/M) Materials Containing Less Than Two Percent Porosity.
- [36]. ASTM E 384 – 99. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
- [37]. Schubert W.D, Bock A and Lux B; (1995). Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. (13), 281-296.
- [38]. Seung I. Cha, Soon H. Hong, Gook H. Ha\* and Byung K. Kim; (2001); "Microstructure And Mechanical Properties Of Nanocrystalline WC-10Co Cemented Carbides"; Pergamon scripta mater (44) 1535–1539.
- [39]. B. K. Kim, G. H. Ha, and D. W. Lee; (1997) Journal. Mater. Process Technologies; (63) 317 .

## Anexo 6.1.

### Procedimiento para la realización de los ensayos de erosión

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 hizo la medición del peso a cada muestra y luego se colocaron en el porta probetas con la orientación del ángulo de estudio a una distancia de 9 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 min, y luego se abrió la cámara, para así retirar la muestra del porta-probetas.

Se le realizó una limpieza a la probeta ensayada.

Se le realizaron mediciones de peso en la balanza analítica.

Se ensayaron todas las probetas restantes, para luego finalmente poder calcular la Tasa de Erosión (RE).

## Anexo 6.2.

Procedimiento para la realización de los ensayos de abrasión.

Se colocaron las muestras a ensayar en el porta probetas y luego fueron aseguradas.

Se ajustaron los parámetros del ensayo según el procedimiento seleccionado.

Se abre el flujo de arena, el cual se encuentra entre 300 y 400 gr/min .

Se enciende el motor e inmediatamente se baja la palanca cuidadosamente para permitir que la probeta contacte con el disco de goma.

Cuando el ensayo ha finalizado, se separa la probeta de la rueda y se detiene el flujo de arena y la rotación de la rueda.

Se ensayaron todas las probetas restantes.

Luego de culminar los ensayos se procedió a la limpieza de las probetas para posteriormente pesarlas en la balanza.

Por último se calcula la pérdida de masa de las probetas ensayadas.

### Anexos 6.3.

#### CÁLCULOS TIPO

*Determinación de la Densidad:*

$$D = \left( \frac{A \times E}{A - B} \right)$$

D = 13,53 g/cm<sup>3</sup> para una muestra de WC-10%Co.

Promedio para cada una de las densidades:

Aleación	Densidades (g/cm <sup>3</sup> )
WC-10%Co	13,5
WC-5%NbC-10%Co	12,62
WC-10%NbC-10%Co	13,98
WC-15%NbC-10%Co	13,44
WC-20%NbC-10%Co	12,67

#### Cálculos de Abrasión

*Diferencia de peso:*

Pérdida de peso = Masa Inicial – Masa Final

$$PP_{WC-10\%Co} = 21,026 - 21,02 \quad \Rightarrow \quad PP_{WC-10\%Co} = 0,006 \text{ g}$$

*Pérdida Volumétrica:*

$$PV = \frac{PMasa(g)}{Densidad(g/cm^3)} \times 1000$$

$$PV_{WC-10\%C} = \frac{0,005467}{13,5} \times 1000 \quad \Rightarrow \quad PV_{WC-10\%Co} = 0,404963mm^3$$

*Ajuste de Pérdida Volumétrica:*

$$APV = PV \times \frac{\Phi_{originalrueda}(228,6mm)}{\Phi_{final}}$$

$$APV_{WC-10\%Co} = 0,404963 \times \frac{228,6}{225,8} \quad \Rightarrow \quad APV_{WC-10\%Co} = 0,409985 mm^3$$

### Cálculos de Erosión

Angulo 30°, 3 min

Masa del Abrasivo = 1115,7 g

*Pérdida de peso:*

$PP_{WC-10\%Co} = \text{Masa Inicial (g)} - \text{Masa Final (g)}$ .

$PP_{WC-10\%Co} = 21,9067 - 21,9064$

$PP_{WC-10\%Co} = 0,0013 g$

Tasa de Erosión:

$$T.E(RE) = \frac{PERDIDAPESO(PP)}{M.EROSIVO \times DENSIDAD}$$

$$T.E(RE) = \frac{0,00128}{1115,7 \times 0.0135}$$

$$T.E(RE)_{WC-10\%Co} = 0,00008498$$

### Cálculos de Tenacidad de Fractura $K_{IC}$

$$K_{IC} = A\sqrt{H} \sqrt{\frac{P}{\sum L}}$$

$$K_{IC} = 0,0028\sqrt{HV \times 9,8} \sqrt{\frac{P \times 9,8}{4L_{prom}}}$$

HV = Dureza Vickers.

P = Carga de Indentación Kg.

L = Longitud de grietas promedio.

$K_{IC}$  Para WC-10%Co:

$$K_{IC} = 0,0028\sqrt{1518,7 \times 9,8} \sqrt{\frac{30 \times 9,8}{4 \times 0,07129}} \Rightarrow K_{IC} = 10,9682 \text{Mpa.m}^{1/2}$$

**Anexo 6.4.****Valores de pérdida de peso en gramos para el ensayo de abrasión.**

Muestra 0% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3
5 min	0,0046	0,006	0,0058
10 min	0,0121	0,0205	0,0165
30 min	0,0333	0,0478	0,0392

Muestra 5% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3
5 min	0,004	0,005	0,0045
10 min	0,0069	0,0071	0,0054
30 min	0,0172	0,024	0,019

Muestra 10% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3
5 min	0,0031	0,005	0,004
10 min	0,007	0,0068	0,0065
30 min	0,0481	0,0257	0,0272

Muestra 15% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3
5 min	0,0038	0,004	0,0035
10 min	0,005	0,0128	0,0085

30 min	0,0222	0,0158	0,0196
--------	--------	--------	--------

Muestra 20% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3
5 min	0,006	0,0053	0,0059
10 min	0,0095	0,0043	0,0054
30 min	0,0108	0,0291	0,0148

**Anexo 6.5.****Valores de pérdida de peso en gramos para el ensayo de erosión.**

Muestra 0% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3	Ensayo # 4	Ensayo # 5
30°	0,0013	0,0013	0,0016	0,0012	0,001
60°	0,0016	0,0013	0,001	0,002	0,0015
90°	0,0023	0,0014	0,0018	0,0015	0,0021

Muestra 5% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3	Ensayo # 4	Ensayo # 5
30°	0,0044	0,0033	0,0054	0,0032	0,0042
60°	0,002	0,0008	0,0014	0,0017	0,001
90°	0,0008	0,0026	0,0024	0,0012	0,0018

Muestra 10% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3	Ensayo # 4	Ensayo # 5
30°	0,0056	0,002	0,0049	0,0035	0,0026
60°	0,002	0,0021	0,0025	0,0017	0,0015
90°	0,0056	0,002	0,0049	0,0035	0,0026

Muestra 15% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3	Ensayo # 4	Ensayo # 5
30°	0,0028	0,0009	0,0016	0,0011	0,0023
60°	0,0015	0,0047	0,0043	0,0034	0,0022
90°	0,0005	0,0029	0,0027	0,0015	0,0012

Muestra 20% NbC	Ensayo # 1	Ensayo # 2	Ensayo # 3	Ensayo # 4	Ensayo # 5
30°	0,0018	0,002	0,0014	0,0026	0,0018
60°	0,0033	0,0024	0,0042	0,0039	0,0027
90°	0,0011	0,0015	0,0019	0,001	0,0015