

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE PIEZAS A BASE CARBURO DE
TUNGSTENO OBTENIDAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE
CONSOLIDACIÓN RÁPIDA.**

**Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br: Ibrahim Jesús Torres Rodríguez
para optar al título de Ingeniero Mecánico**

Caracas, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE PIEZAS A BASE CARBURO DE
TUNGSTENO OBTENIDAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE
CONSOLIDACIÓN RÁPIDA.**

Tutor académico: Prof. Mariana H. Staia

**Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br: Ibrahim Jesús Torres Rodríguez
para optar al título de Ingeniero Mecánico**

Caracas, 2003

VEREDICTO

Los suscritos miembros del jurado examinador designado por el consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller **TORRES R. IBRAHIM J C.I: 13.139.012** el cual lleva por título

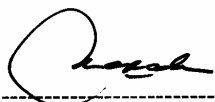
“ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE PIEZAS A BASE DE CARBURO DE TUNGSTENO OBTENIDAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CONSOLIDACIÓN RÁPIDA”

Decidimos conferirle una **MENCION HONORÍFICA** como premio al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de esta tesis de grado. El trabajo constituye un aporte importante e inédito al estudio de **PIEZAS A BASE DE CARBURO DE TUNGSTENO PARA APLICACIONES TRIBOLÓGICAS**, el mismo se caracteriza por un diseño y metodología experimental rigurosa.

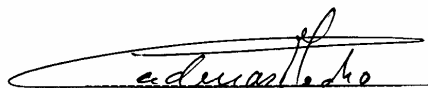
En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en Caracas, a los veinte días del mes de octubre de dos mil tres, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como coordinador del jurado examinador la Prof. Mariana H. Staia.



Prof. Mariana H. Staia
Tutor académico



Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado



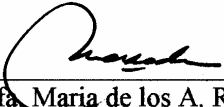
Prof. Pedro Cadenas
Jurado

Caracas, Octubre de 2003

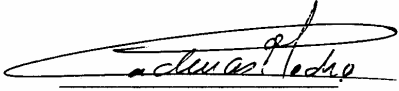
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Ibrahim J. Torres R., Titulado:

“ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE PIEZAS A BASE DE CARBURO DE TUNGSTENO OBTENIDAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CONSOLIDACIÓN RÁPIDA”

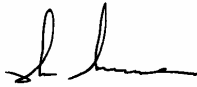
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor.



Prof. Maria de los A. Rodriguez
Jurado



Prof. Pedro Cadena
Jurado



Profa. Mariana Staia
Tutor Académico

DEDICATORIA

A mis padres: por haber diseñado una buena familia, construido un hogar y producir un amor infinito hacia sus hijos, optimizando todos los recursos y obteniendo los mejores resultados...

... que mejores ingenieros que Hilario y Beatriz!

A mis hermanas Hibet e Iris Torres, para que nunca abandonen sus sueños y logren todas las metas que se planteen en la vida.

A mis amigas Betssy Torres y Lizbethe Saade, por haber compartido tantos años. Por ser las mejores profesoras de convivencia, compañerismo y amistad.

A mi amigo Alejandro Nunes y todos mis compañeros de clases que aun no han terminado sus estudios de pregrado, para que este trabajo les sirva de ejemplo y de guía.

A el amor de mi vida...

... por que eres mi todo D!

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a Dios y la Virgen, por ser esa fuerza que nos da la vida y la energía para enfrentar nuestro día a día.

Agradezco a mis padres Beatriz e Hilario, a mi abuela Cristina y a mis hermanas Hibet e Iris; ya que cada uno a su manera me ha brindado el apoyo, comprensión y la ayuda que he necesitado. ¡Los quiero muchísimo!

También deseo agradecer a Decio Gomes, mi mejor amigo y siempre compañero. Gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas, gracias por tus palabras y silencios. ¡Gracias por tu compañía y amistad!

Por otra parte, quiero agradecer a la Profesora Mariana Staia por su excelencia y al Profesor Crisanto Villalobos por su colaboración y dedicación. Además de la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales.

RESUMEN

Torres Rodríguez, Ibrahim J. Tutor: Prof. Mariana H. Staia. Tesis: “ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE PIEZAS A BASE CARBURO DE TUNGSTENO OBTENIDAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CONSOLIDACIÓN RÁPIDA”. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2003, 120 Páginas.

Carburo de Tungsteno, Desgaste, Tenacidad de Fractura, Tribología, Plasma Pressure Compaction.

Este trabajo involucró la evaluación de la dureza, tenacidad de fractura K_{IC} y desgaste deslizante en muestras de carburos de tungsteno, consolidadas a través de la técnica P²C (*Plasma Pressure Compaction*). Para la realización de las pruebas, las muestras fueron pulidas para obtener una superficie uniforme. Los ensayos de desgaste acelerado se llevaron a cabo en un tribómetro de configuración bola sobre disco (*Pin on Disk*) y a temperatura ambiente, (temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ y humedad relativa de 54% a 64%). Las huellas de desgaste producidas por la bola (*pin*) en la superficie del disco, se caracterizaron mediante perfilometría óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB). Las observaciones se dirigieron a la evaluación de los mecanismos de desgaste presentes, los cuales resultaron de tipo adhesivo y abrasivo mayormente. El desgaste de la muestra fue leve y con poco volumen gastado, arrojando un coeficiente de fricción promedio de $\mu \sim 0,29$. La dureza del material se evaluó primeramente con un microindentador Vickers, realizando un barrido de cargas de 10, 25, 50, 100, 200 y 300 gramos-fuerza. Posteriormente se realizaron improntas con un durómetro universal e indentador Vickers a una carga de 30 Kgf para el cálculo de la tenacidad de fractura. Los materiales bajo el estudio eran seis tipos diferentes de WC consolidados con diferentes parámetros de conformado (temperatura y condición de corriente) y tamaños de polvo entre $0,2 \mu\text{m}$ y $12 \mu\text{m}$. De los resultados obtenidos del estudio experimental, las observaciones siguientes fueron concluyentes: La tenacidad de fractura depende de los parámetros de conformado de las muestras; Las muestras sinterizadas con la condición de corriente pulsada, presentan mejores propiedades mecánicas que sus homologas en tamaño de polvo; el desgaste de las muestras de WC contra Alumina es leve, con transferencia de material de la muestra a la bola (*pin*).

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
MOTIVACIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
MARCO TEÓRICO	4
CARBUROS CEMENTADOS.....	4
MICROESTRUCTURA	5
PROPIEDADES DE LOS CARBUROS CEMENTADOS.....	7
TENACIDAD DE FRACTURA	9
<i>Ensayo de tenacidad de fractura.....</i>	<i>10</i>
<i>Modelos de grietas de indentación Vickers para tenacidad de fractura.....</i>	<i>11</i>
DESGASTE.....	13
<i>Caracterización del desgaste</i>	<i>14</i>
<i>Ensayo de Desgaste</i>	<i>15</i>
LEYES DE HERTZ.....	15
DESGASTE DE CARBUROS CEMENTADOS.....	18
PROCESO DE FABRICACIÓN TRADICIONAL DE CARBUROS CEMENTADOS	23
ANTECEDENTES AL PROCESO ACTUAL DE OBTENCIÓN DE WC.....	25
COMPACTACIÓN POR PLASMA (<i>PLASMA PRESSURE COMPACTION, P²C</i>).....	27
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	31
MATERIALES	31
PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	32
MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD.....	33
MEDICIÓN DE LA DUREZA.....	33
ENSAYOS DE TENACIDAD DE FRACTURA	34
ENSAYO DE DESGASTE.....	37

CARACTERIZACIÓN DE LOS PARES TRIBOLÓGICOS	38
PERFILOMETRÍA	39
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
RUGOSIDAD DE LAS MUESTRAS.....	40
PERFILOMETRÍA 3D.....	42
DUREZA DE LAS MUESTRAS	46
TENACIDAD DE FRACTURA DE LAS MUESTRAS.....	53
DESGASTE DE LAS MUESTRAS.....	59
CARACTERIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE EN LAS MUESTRAS	73
MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO	83
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	98
ANEXO 1 : DUREZAS DE LAS MUESTRAS	99
ANEXO 2: TENACIDAD DE FRACTURA; INDENTACIONES A 30 K _{GF}	108
ANEXO 3: INDENTACIONES A 40 K _{GF}	112
ANEXO 4: VOLÚMENES GASTADOS POR LAS MUESTRA	114
ANEXO 5: GRAFICAS DE DESGASTE DE LAS MUESTRA.....	117

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Resistencia a la ruptura transversal en función del contenido de cobalto. [1]	7
Figura 2. Variación de la dureza en función del tamaño de grano. [1].....	8
Figura 3. Esquema de las grietas formadas por la indentación Vickers: (1) Apariencia de la superficie indentada, (2) Vista particular de grietas tipo Media radial y (3) Grietas de Palmqvist. [9]	12
Figura 4. Esquema del ensayo bola sobre disco (pin-on-disk).....	15
Figura 5. Distribución de la presión en el área contacto	16
Figura 6. Distribución de presiones en el caso de un contacto plano.....	18
Figura 7. Diagrama de equilibrio del W-C (izquierda) y WC-Co (derecha).....	25
Figura 8. Ilustración de la máquina de sinterizado en P ² C.....	29
Figura 9. Dimensiones de la probeta bajo estudio.	31
Figura 10. Equipo Buehler semiautomático ECOMET 5.	32
Figura 11. Perfilómetro de interferometría óptica marca ZYGO modelo New View 200.....	33
Figura 12. Durómetro marca LECO modelo AMH3000.	34
Figura 13. Durómetro universal marca WOLPERT.....	35
Figura 14. Microscopio óptico marca Olympus, modelo PMG3; acoplado a un analizador de imágenes marca Leco, modelo AI3001	35
Figura 15. Modelo de huella y grietas.....	36
Figura 16. Tribómetro, marca CSEM.....	37
Figura 17. Limpador ultrasónico: marca LECO, modelo UC-50.....	38
Figura 18. Microscopio electrónico XL Series, Modelo XL 30, Marca PHILIPS.....	39
Figura 19. Esquema de la superficie pulida de las muestras.	40
Figura 20. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 148.....	43
Figura 21. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 149.....	43
Figura 22. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 150.....	43
Figura 23. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 151.....	44

Figura 24. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 152.....	44
Figura 25. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 153.....	44
Figura 26. Indentación a 30 kgf: (a) Muestra 148; (b) Muestra 149; (c) Muestra 150; (d) Muestra 151; (e) Muestra 152; (f) Muestra 153.	53
Figura 27. Indentación a 30 kgf. en la muestra 151.	58
Figura 28. Fotomicrografías por microscopía óptica para carga de 30 kgf. luego del desbaste superficial. Muestra 151. (a) 10x; (b) 100x; (c) 200x.....	58
Figura 29. Huella de desgaste de la muestra 148. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.....	66
Figura 30. Huella de desgaste de la muestra 149. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.....	67
Figura 31. Huella de desgaste de la muestra 150. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.....	68
Figura 32. Huella de desgaste de la muestra 151. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.....	69
Figura 33. Huella de desgaste de la muestra 152. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.....	70
Figura 34. Huella de desgaste de la muestra 153. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.....	71
Figura 35. Huella de desgaste de la muestra 148. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundarios.	74
Figura 36. Huella de desgaste de la muestra 149. (a) MEB a 200x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.	74

Figura 37. Huella de desgaste de la muestra 149. (a) MEB a 1000x en Backscatiered; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.....	75
Figura 38. Huella de desgaste de la muestra 149; MEB a 150x en electrones secundario.....	75
Figura 39. Análisis puntual (EDX), Huella de desgaste de la muestra 149.	76
Figura 40. Huella de desgaste de la muestra 150. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.	79
Figura 41. Huella de desgaste de la muestra 150. (a) MEB a 3000x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.	79
Figura 42. Huella de desgaste de la muestra 151. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.	80
Figura 43. Huella de desgaste de la muestra 151. (a) MEB a 1000x en Backscatiered; (b) MEB a 3000x en Backscatiered.	80
Figura 44. Huella de desgaste de la muestra 152. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 150x en electrones secundario.	81
Figura 45. Huella de desgaste de la muestra 152. (a) MEB a 1000x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en Backscatiered.	81
Figura 46. Huella de desgaste de la muestra 153. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.	82
Figura 47. Fotomicrografía a 200X; (a) muestra 148; (b) muestra 149; (c) muestra 150; (d) muestra 151; (e) muestra 152; (f) muestra 153.	84
Imagenes de la indentación a 40Kgf. (a) Indentación inicial; (b) Indentación luego del desbaste superficial (se evidencia las zonas de desprendimiento de granos); (c) huella observada en la lupa.	113

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y TABLAS

Tabla I. Identificación y Parámetros del proceso de obtención de las muestras.....	31
Tabla II. Rugosidad Ra.....	41
Tabla III. Rugosidad r.m.s.....	41
Tabla IV. Durezas promedio para las muestra.....	47
Gráfica 1. Carga Vs. Dureza	49
Tabla V. Comparación entre las condiciones de conformado y las durezas obtenidas para 100, 200 y 300 gr. de carga	50
Tabla N° VI. Comparación entre las condiciones de conformado y las durezas obtenidas para 30 kgr. de carga	50
Gráfica 2. Comparación de valores de HV @ 30Kgf.....	52
Tabla VII. Comparación entre los valores de tenacidad de fractura.....	55
Gráfica 3. Comparación de valores de K _{IC}	56
Gráfica 4. Distancia Vs. μ para las muestras.....	59
Tabla VIII. Condiciones del ensayo de desgaste deslizante bajo la configuración de bola sobre disco	61
Tabla IX. Resultados del ensayo de desgaste bajo la configuración.....	63
Bola sobre disco	63
Tabla X. Contacto elástico de Hertz.....	63
Tabla XI. Promedio del volumen gastado por muestra.....	64
Gráfica 5. Volumen promedio gastado por muestra.....	64
Tabla XII. Tamaños de Granos.....	86
Tabla A.1 Barrido de carga a 50 gf.....	100
Tabla A.2 Barrido de carga a 100 gf.....	102
Tabla A.3 Barrido de carga a 200 gf.....	104
Tabla A.4 Barrido de carga a 300 gf.....	106
Tabla B.1 Barrido de carga a 30K gf. Para determinar K _{IC}	109
Tabla C.1 Área de la sección transversal de la huella de desgaste y volumen gastado en cada ensayo pin on disk.....	115

Tabla C.2 Volumen de WC gastado en cada ensayo pin on disk.	116
Gráfico C.1 Volumen de WC gastado por muestra.....	116
Gráfica D.1 Distancia Vs. μ_2 para la muestra 148.	118
Gráfica D.2 Distancia Vs. μ_2 para la muestra 149.	118
Gráfica D.3 Distancia Vs. μ_2 para la muestra 150.	119
Gráfica D.4 Distancia Vs. μ_2 para la muestra 151.	119
Gráfica D.5 Distancia Vs. μ_2 para la muestra 152.	120
Gráfica D.6 Distancia Vs. μ_2 para la muestra 153.	120

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Motivación

En ingeniería, uno de los trabajos esenciales es el diseño; pero cada diseño de máquinas, edificios, plantas industriales y materiales, entre otros, requiere el uso de herramientas y materiales de distintas especies para la construcción del elemento pensado; si no, el diseño es sólo una idea que queda en el papel o la mente del diseñador.

La fricción y el desgaste implican una gran cantidad de mecanismos de ingeniería y de la propia naturaleza: desde la contribución a la polución ambiental debido al desgaste de las cubiertas de caucho de todo tipo de vehículos, hasta las pérdidas económicas en energía debido al rozamiento en ejes, bujes, cilindros de motores, álabes de turbinas y contactos eléctricos, pasado por la vida útil de las articulaciones anatómicas y sus reemplazos.

En la actualidad, y con el avance de la tecnología, se requiere que todos los procesos de fabricación sean más eficientes, siendo el tiempo y los costos de manufactura unas de las variables más importantes. A raíz de esto, se han diseñado nuevos métodos de conformado de materiales, que resultan mejores y satisfacen las necesidades requeridas.

Los carburos cementados son una clase de materiales duros para herramientas formulados a base de carburo de tungsteno (WC) y manufacturados con técnicas de metalurgia de polvos, en las que se utiliza el cobalto (Co) como aglutinante.

Es importante destacar que con las nuevas técnicas de conformado de materiales, una de las cuales es la compactación por plasma (*Plasma Pressure Compaction*, P²C), no se hace necesaria la utilización de aglutinante para formar una matriz que contenga al material. En este proceso, las piezas se pueden conformar utilizando solamente el carburo en estado de pureza.

Por lo anterior, se hace necesario caracterizar y a dar a conocer las propiedades del carburo de tungsteno, ya que en la actualidad hay muy poca información sobre las propiedades y características de materiales como los citados, conformados con tecnologías de vanguardia. Es por ello que en este trabajo se llevará a cabo el estudio tribológico de probetas de carburo de tungsteno conformadas por P²C.

Además, se realizará una comparación entre las propiedades que presenta este material y el material conformado en forma tradicional, cuyas propiedades han sido registradas en la literatura de especialidad.

Planteamiento del problema

Caracterizar el material conformado por P²C, para comparar y verificar que dicho material tiene iguales o mejores propiedades mecánicas de resistencia al desgaste deslizante, en comparación con los WC conformados por métodos tradicionales que requieren más tiempo y energía para su conformado.

Objetivo general

Realizar la caracterización tribológica de probetas de carburo de tungsteno (WC) conformadas a través del proceso de compactación por plasma (*Plasma Pressure Compaction*, P²C), bajo distintos parámetros de operación.

Objetivos específicos

- Recolectar información relacionada con las características del material y la conformación de piezas a través del proceso de compactación por plasma (*Plasma Pressure Compaction*, P²C) y el método tradicional de obtención de carburos cementados.
- Realizar ensayos de desgaste acelerado a las muestras de WC mediante un tribómetro bajo la configuración bola sobre disco.
- Caracterizar las muestras a ensayar por medio de las técnicas de perfilometría óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Determinar la tenacidad de fractura (K_{IC}) de las muestras.
- Evaluar el efecto de la temperatura y tamaño de grano (polvo) del proceso de conformado P²C sobre el comportamiento al desgaste deslizante.
- Comparar los resultados obtenidos con estudios de materiales conformados de forma tradicional.

Este proyecto de investigación se realiza dentro de las instalaciones que a continuación se listan:

- Biblioteca Central de la Universidad Central de Venezuela.
- Biblioteca de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela.
- Biblioteca de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela.
- Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V. adscritos al CENMACOR (Laboratorio de Nuevos Materiales y Laboratorio de Tribología), CME (Laboratorio de Microscopía Electrónica) y CITALA (Laboratorio de Aluminio).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Carburos cementados

Los carburos cementados son una clase de materiales muy duros y resistentes al desgaste producidos por un proceso de compactación y subsecuente sinterización en fase líquida. Los primeros carburos cementados fueron desarrollados para responder a la demanda de un material suficientemente resistente para fabricar matrices de trefilado usadas en la producción de filamentos de tungsteno. Estos materiales resultaron igualmente adecuados para operaciones de mecanizado, ya que poseían una dureza y resistencia al desgaste superiores, incluso a elevadas temperaturas, a las de los aceros. Actualmente, los carburos cementados se utilizan especialmente para el corte y conformado de metales, en la industria minera, así como para la fabricación de algunos componentes susceptibles de padecer desgaste excesivo.

Los carburos cementados se clasifican, según su contenido en aglutinante o cementante metálico y según el tipo de partículas de carburo presentes en el compuesto. El aglutinante o cementante suele ser cobalto, cuyo contenido puede variar de 3 a 13% en peso, en el caso de las herramientas de corte, pudiendo llegar hasta 30% en peso para algunos componentes resistentes al desgaste. El tamaño medio de las partículas de carburo varía desde menos de 1 μm hasta 8 μm . Típicamente, se habla de grano de carburo extra-fino (0.8 μm), fino (1.2 μm), medio (2.5 μm), medio grueso (4.0 μm), grueso (6 μm)

y basto (8.0 μm). Las densidades de estos materiales oscilan entre 14 gr/cm^3 y 15 gr/cm^3 , y sus durezas van desde 1930 HV_{30} a 770 HV_{30} . [1-2]

Microestructura

El carburo cementado está constituido por dos fases: una cerámica (fase α), formada por partículas de carburo de tungsteno (WC) y otra fase metálica, generalmente cobalto (fase β). La fase cerámica es la que soporta las cargas a las cuales se somete el material. La fase metálica, por su parte, aporta tenacidad al conjunto y, en realidad, se trata de una solución sólida entre cobalto, tungsteno y carbono. Esta aleación puede existir fundamentalmente en dos formas alotrópicas: *hcp* y *fcc*. El carbono y el tungsteno estabilizan la fase *fcc*, correspondiente a altas temperaturas, ya que disminuyen la temperatura de transformación martensítica. El cobalto se encuentra normalmente en forma *fcc*, aunque bajo cargas puede adquirir una simetría hexagonal. [2]

En general, los parámetros más utilizados para describir la microestructura de los carburos cementados son: la fracción en volumen de cobalto (V_{Co}), el tamaño de las partículas de WC, la contigüidad (C) y el camino libre medio. [3]

Fracción en volumen de cobalto: se determinó que al aumentar la fracción en volumen de cobalto, como se trata de un material mucho más dúctil que el carburo de tungsteno, aumentará la tenacidad del material, disminuyendo a la vez su dureza.

El tamaño de grano de carburo de tungsteno: influye notablemente en las propiedades mecánicas del conjunto. Un tamaño de grano pequeño confiere mayor dureza, pero al mismo tiempo disminuye la tenacidad.

La contigüidad (C): se define como la fracción de área específica superficial de WC compartida por partículas de la misma fase. Representa una medida de la conectividad entre los granos de WC.

Su medición se hace linealmente a partir de micrografías del material y se expresa como la relación:

$$C = \frac{2N_{WC/WC}}{2N_{WC/WC} + N_{WC/Co}} \quad (1)$$

Donde $N_{WC/WC}$ es el número de intercaras WC/WC interceptadas y la razón $N_{WC/Co}$ representa el número de intercaras WC/Co interceptadas. Así, una fase completamente coherente posee un factor de contigüidad igual a 1, mientras que una fase con granos aislados entre ellos dará un factor de contigüidad igual a 0.

El camino libre medio: es un parámetro que relaciona la microestructura con las propiedades del material y, como indica su nombre, es la media de todas las distancias entre carburos presentes en una micrografía. Debido a que se trata de un parámetro de dimensiones inferiores a una micra, a menudo se mide a partir del tamaño de los granos de carburo, en vez de medirlo directamente. En los materiales cuyas fases están distribuidas uniformemente, la ecuación que relaciona el tamaño de la fase de cobalto con el tamaño de grano de WC es:

$$\frac{d_{Co}}{V_{Co}} = \frac{d_{WC}}{V_{WC}} \quad (2a)$$

Donde d_{Co} es el camino libre medio de la fase Co, d_{WC} el tamaño medio de los carburos, V_{Co} la fracción en volumen de cobalto, y V_{WC} la fracción en volumen de la fase WC. Sin embargo, en los casos en que las partículas de una fase predominan sobre las de otra y poseen un valor de contigüidad C, el camino libre medio viene dado por:

$$l = d_{Co} = \frac{1}{1-C} * \frac{V_{Co}}{V_{WC}} * d_{WC} \quad (2b)$$

Propiedades de los carburos cementados

Resistencia a la ruptura transversal: debido a su extrema dureza, este tipo de materiales no responde bien frente a esfuerzos tensiles, de modo que para determinar su resistencia mecánica se utiliza el ensayo de ruptura transversal. Su resistencia en este caso estará influenciada por el contenido en cobalto y el tamaño de grano, según se puede observar en la Figura 1.

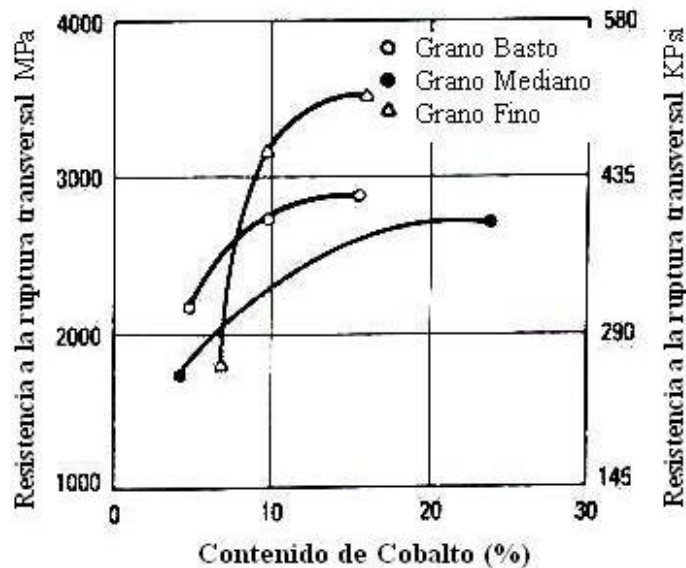


Figura 1. Resistencia a la ruptura transversal en función del contenido de cobalto. [1]

Dureza: aumentando el contenido en cobalto de estos compuestos, así como el tamaño de las partículas de carburo, se reduce la dureza, mejorándose la resistencia al impacto mecánico. Este es un resultado esperado, puesto que la dureza del cobalto es menor que la del carburo. Por lo tanto, al añadirlo, la

dureza del compuesto disminuirá. En la Figura 2 se puede ver la variación de la dureza Rockwell en función del tamaño de grano para diferentes grados de carburos cementados.

La dureza de las partículas de carburo de tungsteno no se ve afectada por el aumento de la temperatura verificado durante operaciones de mecanizado corrientes. Una disminución crítica de la dureza del compuesto aparece cuando el cobalto absorbe suficiente energía como para pasar a un estado plástico, produciéndose su deformación.

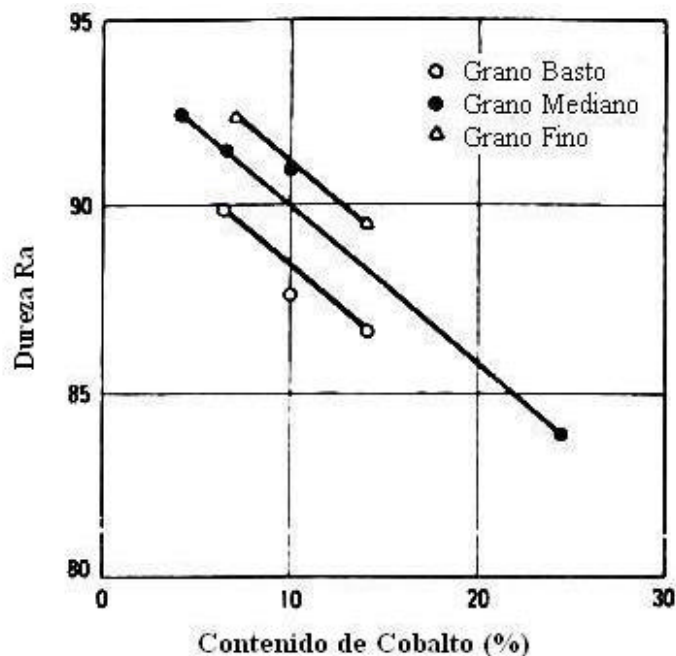


Figura 2. Variación de la dureza en función del tamaño de grano. [1]

Resistencia al impacto: se incrementa cuanto mayor es el contenido en cobalto y el tamaño del grano. El mismo efecto se observa con la resistencia al choque térmico.

Resistencia a la corrosión: el componente cerámico (carburo de tungsteno) no se ve afectado por un medio corrosivo, pero la fase aglutinante sí

se ve afectada, dejando expuestos a la corrosión los granos angulares de carburo. Para aumentar esta resistencia a la corrosión se debería disminuir el contenido en cobalto, así como el tamaño del grano de carburo, de modo que menos fase aglutinante o cementante estaría expuesta al medio corrosivo.

Resistencia al desgaste abrasivo: Está directamente relacionada con la dureza del compuesto, de modo que cuanto menor sea el contenido en cobalto y los granos de carburo sean más finos, más resistente al desgaste abrasivo será el compuesto.

Tenacidad de fractura

La tenacidad de fractura es una medida de la habilidad que tiene un material de resistir el crecimiento de una grieta o falla pre-existente. Este parámetro es ampliamente utilizado para diseñar estructuras que permanezcan seguras ante las fallas. 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. [3]

La tenacidad de fractura de un material puede ser función de la velocidad (la proporción de tensión) y de la temperatura. Las cargas cíclicas pueden causar la extensión de la grieta y pueden aumentarse por la presencia de un ambiente agresivo. Por consiguiente, la aplicación de tenacidad de fractura en el diseño de componentes de servicio debe hacerse con un conocimiento de las diferencias que pueden existir entre las pruebas del laboratorio y las condiciones del campo. [4]

La tenacidad de fractura (K_{IC}) de un material se define por la energía por unidad de área necesaria para crear las nuevas superficies de la grieta y, por ende, lograr la propagación de una grieta a través del material. Este valor es conocido como el factor de intensidad de tensión crítico y se determina en el momento de extensión de la grieta.

El modo en el cual normalmente fractura el material es el K_{IC} , y depende a su vez de la orientación y dirección de propagación de la grieta y la anisotropía del material, en las direcciones principales de funcionamiento mecánico o flujo de grano.

Los valores de tenacidad de fractura obtenidos a través del método de indentación Vickers y reportados para los carburos de tungsteno cementados y no cementados, varían entre 6 y 10 MPavm. Esta variación obedece a la utilización de las diferentes ecuaciones reportadas por distintos autores. En la actualidad, se estudia cuál es el modelo más adecuado a utilizar tomando en cuenta los valores de carga y las distintas propiedades de cada material. Además, la observación de los modelos de grieta convierte la selección de las ecuaciones en un factor de suma importancia. [3-6]

Ensayo de tenacidad de fractura

El método de indentación Vickers se ha usado ampliamente para caracterizar la dureza de materiales frágiles. Este método presenta muchas ventajas, comparado con métodos de evaluación de dureza convencionales tales como la viga de fuerza con entalla (ISB), viga de muesca de cheurón (CNB), la viga del modillón doble (DCB) y la sola viga de muesca de borde (SENB). [7]

En primer lugar es su proceso experimental más simple. En efecto, el método de indentación Vickers sólo requiere una superficie plana pulida y un sistema para la aplicación de carga. El principio del método es aplicar el indentador bajo una carga dada (P) y para medir la longitud de la grieta correspondiente (c ó l). El cálculo de la dureza es basado en la pareja P, c ó l ; y depende de la forma de la huella de indentación.

Cuando la grieta sólo se desarrolla en las esquinas de la huella de indentación, el modelo de grieta es llamado Palmqvist (tipo P), y las relaciones

corresponden a la carga aplicada, la media diagonal de la huella de indentación (a) y la longitud de la grieta medida desde la esquina de la huella de indentación (l).

Cuando la indentación genera grieta bajo la huella, las relaciones expresan la proporción entre la carga aplicada y la longitud de la grieta medidas del centro de la huella de indentación (c). En ambos casos, es importante caracterizar la forma de la huella.

Desde un punto de vista general, el modelo de grieta media radial se aplica para los materiales de baja dureza, mientras los materiales de alta dureza muestran el sistema de grieta tipo Palmqvist. De hecho, la mayoría de los materiales exhibirá ambos sistemas de grieta dependiendo de la cantidad de carga. Para distinguir estos dos sistemas de grietas, se puede pulir una capa de la superficie. El sistema de grieta medio radial siempre permanecerá conectado a la esquina de la huella de indentación, mientras que la grieta de Palmqvist se destacará de la esquina de huella. Para determinar la carga umbral, se ha propuesto un criterio formal que se basa en que la longitud de grieta desde el centro de la huella es proporcional a la media diagonal (c/a). [8]

Modelos de grietas de indentación Vickers para tenacidad de fractura

Desde un punto de vista general, las grietas generadas bajo la indentación Vickers siguen las direcciones de la diagonal de la impresión sobre la superficie indentada. Bajo el indentador afilado, se encuentran dos tipos distintos de grietas en perpendicular que permiten a su vez clasificar las grietas en dos grupos. El primer grupo, consiste en los modelos de grietas formados por la indentación Vickers, donde se desarrollan con la forma media radial. En el segundo grupo, se generan las grietas de Palmqvist bajo las grietas y no bajo la indentación. [8-11]

Se muestran los dos tipos de grietas esquemáticamente en Figura 3.

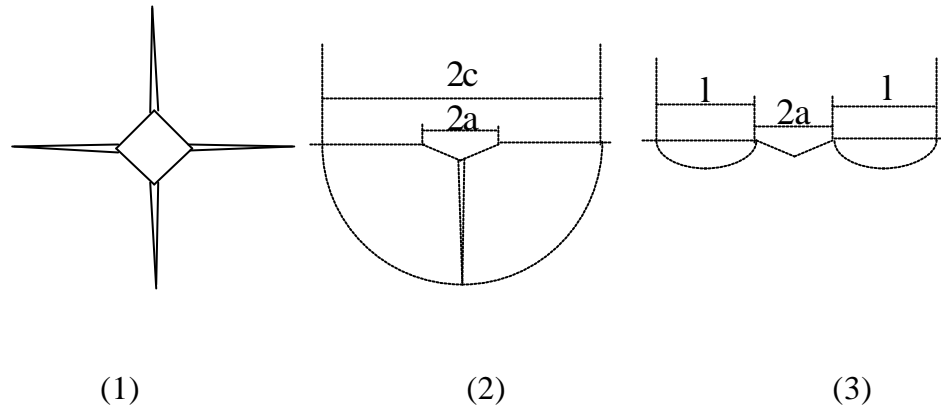


Figura 3. Esquema de las grietas formadas por la indentación Vickers: (1) Apariencia de la superficie indentada, (2) Vista particular de grietas tipo Media radial y (3) Grietas de Palmqvist. [9]

Para determinar la tenacidad de fractura K_{IC} , se han desarrollado varias relaciones entre K_{IC} , carga aplicada (P), media diagonal de la huella de indentación (a), longitud de la grieta desde el centro de la huella de indentación (c) o de la esquina de la huella de indentación (l), el módulo Young (E), número de dureza Vickers (HV) y coeficientes (α , β) que dependen de las hipótesis. Para los dos tipos de modos de grietas considerados, se proponen dos relaciones generales de formulas a continuación:

$$K_{ICM} = \alpha \left(\frac{E}{HV} \right)^q \cdot \frac{P}{c^{3/2}} \quad \text{con} \quad c = a + l \quad \text{para Media Radial} \quad (3)$$

$$K_{ICP} = \beta \left(\frac{E}{HV} \right)^r \cdot \frac{P}{al^{1/2}} \quad \text{para Palmqvist} \quad (4)$$

Donde los coeficientes a , β y los exponentes q y r toman los valores diferentes según el autor. [12-17]

Los valores de q y r están considerados nulos en estudios donde se evita la introducción del módulo Young. Estas relaciones corresponden a Evans y de Shetty respectivamente para los modos de Media Radial y Palmqvist:

$$K_{ICM} = 0.0824 \frac{P}{c^{3/2}} \quad (5)$$

$$K_{ICP} = 0.0319 \frac{P}{a^{1/2}} \quad (6)$$

Para tener en cuenta una relación armoniosa para el cálculo de tenacidad, debe hacerse la determinación de la forma de grietas. Una práctica experimental es posible puliendo la superficie indentada consecutivamente. Las conexiones de la grieta a la huella de indentación dan la información sobre el tipo de modo de grieta que otorga el nivel de carga. Cuando las grietas permanecen unidas a la huella de indentación, las grietas son del tipo Media Radial (y al contrario para Palmqvist). Sin embargo, se ha observado que la mayoría de los materiales exhibirá ambos sistemas de grietas dependiendo de la cantidad de carga.

Desgaste

Es el daño ocasionado a una superficie como resultado del movimiento relativo entre dos superficies y puede verse en forma de pérdida de material debido a la formación de microgrietas o como consecuencia de la deformación plástica. En general, las tres variables más relevantes que afectan al desgaste son el área de contacto, la fuerza de unión interfacial y la dinámica de los

materiales. Uno de los primeros intentos de correlacionar estos factores se debe a Archard (ecuación 7):

$$V = k \cdot S \cdot L / H \quad (7)$$

Donde V es el volumen de material desgastado, S la distancia recorrida, L la carga aplicada, H la dureza de la muestra y k una constante de proporcionalidad. [18]

Caracterización del desgaste

Ninguna de las caracterizaciones del desgaste describe completamente los mecanismos y fenómenos que ocurren en los materiales bajo estudio. Generalmente, la información sobre el desgaste de varios sistemas se presenta en forma de gráficos del tipo:

- a) Variación del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento, de la carga normal o de la velocidad de deslizamiento.
- b) Variación de la pérdida de masa en función de la distancia de deslizamiento, de la carga normal o de la velocidad de deslizamiento.
- c) Mapas de desgaste en función de la presión de contacto y velocidad normalizada como coordenadas.

También suelen reportarse resultados mediante imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía óptica, que pueden indicar la intensidad o modo del desgaste.

Los diferentes modos de desgaste como la adhesión, abrasión de dos y tres cuerpos, corrosión, delaminación, descamación, fatiga superficial, contacto térmico, contacto eléctrico, triboquímico, picado, vibraciones (fretting), generación de surcos, desgaste por impacto y tribopulido entre otros, han sido ampliamente descritos en la literatura. [18-19]

Ensayo de Desgaste

Ensayo bajo configuración de bola sobre disco: un tipo de ensayo para caracterizar el desgaste en caso de deslizamiento, consiste en un cilindro con la punta redondeada o bola (*pin*) presionado contra la superficie plana de un disco en rotación. Se suele medir el desgaste tanto en la punta de la bola como en el disco. En este tipo de ensayos es posible medir continuamente la fuerza de fricción en cada momento mediante, por ejemplo, galgas extensométricas. Algunos de los parámetros que se pueden hacer variar son la carga aplicada, distancia recorrida, temperatura, par tribológico (bola y disco), velocidad de rotación, lubricación, dimensiones de la bola y del disco, etc. [20-21]

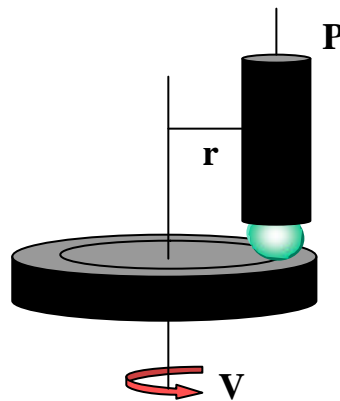


Figura 4. Esquema del ensayo bola sobre disco (pin-on-disk).

Leyes de Hertz

La teoría de Hertz sobre el contacto elástico entre dos sólidos de revolución supone que cada uno de ellos puede ser considerado como un semiespacio elástico cargado a lo largo de una pequeña región elíptica de su superficie plana. Esta simplificación es justificable sólo si se cumplen las siguientes condiciones: las dimensiones del área de contacto deben ser pequeñas comparadas con las dimensiones de los dos sólidos, y también deben

ser pequeñas comparadas con el radio de curvatura relativo de las dos superficies.

La primera condición es necesaria para asegurar que el campo de tensiones calculado no se vea afectado por las superficies libres de la probeta. La segunda condición garantiza que el análisis de resultados pueda realizarse dentro de lo que comúnmente se denomina deformación infinitesimal.

Siguiendo estas premisas, si se considera el caso de un sólido de revolución de radio R_1 (bola) y un semiplano de radio R_2 (disco), existe una distribución de la presión aplicada a lo largo de la superficie de contacto. La presión máxima ejercida en esta área de contacto se encuentra justo en su centro (Figura 5) y viene dada por la ecuación 8.

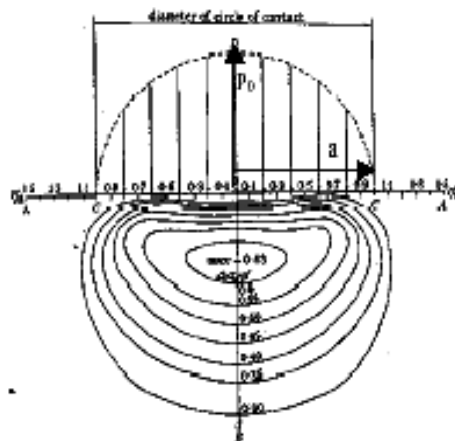


Figura 5. Distribución de la presión en el área contacto

$$P_o = \left(\frac{6PE^{*2}}{p^3 R^2} \right)^{1/3} = \frac{3P}{2pa^2} \quad (8)$$

Donde P es la carga aplicada, R el radio equivalente (ver ecuación 11), a el radio circular (ecuación 10) y E* es el módulo de Young equivalente según:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (9)$$

Puesto que se trabajó con pares bola sobre disco de diferente material, los módulos E_1 y E_2 de la bola y el disco respectivamente son distintos, y por lo tanto, el módulo de Young equivalente es dado por la ecuación 9.

El radio de contacto circular (a) se expresa como:

$$a = \left\{ \frac{3PR}{4E^*} \right\}^{1/3} \quad (10)$$

El radio equivalente puede calcularse según la ecuación 11, donde sí se considera que el radio del disco (R_2) es infinito, la ecuación queda simplificada de la siguiente manera:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} \quad (11)$$

Es importante hacer notar que, como resultado de la distribución de presiones de contacto, se genera una distribución de tensiones compleja debajo de la superficie del disco (ver Figura 5). La distribución de esfuerzos presentada en esta figura representa a la tensión de Von Mises, estando su máximo valor situado debajo de la zona de contacto, y en concreto a una distancia de 0,48 veces el radio del área de contacto (a).

La Figura 5 representa el caso de un contacto entre dos sólidos de revolución. Por el contrario, si la bola (*pin*) actúa como un punzón plano sobre

el disco, se sabe que la presión en el límite del área de contacto tiende a infinito (ver Figura 6).

Éste es el caso sujeto a estudio, ya que las bolas (*pins*) inicialmente esféricas evolucionan gradualmente hacia la geometría de un punzón plano en el transcurso del ensayo. Es importante considerar que a medida que se desgasta la bola (*pin*), los extremos del área en contacto se van redondeando hasta poder considerar que la distribución de presiones, P , es una constante para todo $r < a$, igual a P/A_c , donde A_c es el área de contacto. [21]

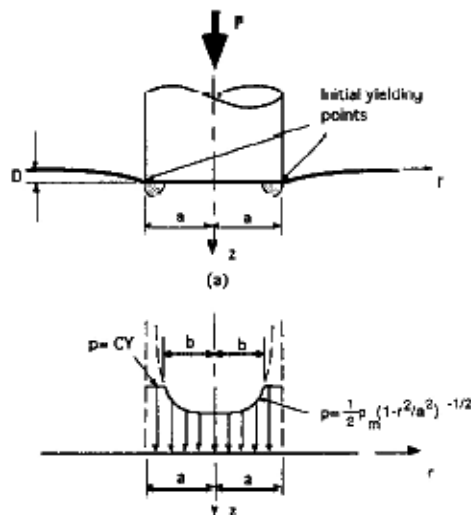


Figura 6. Distribución de presiones en el caso de un contacto plano.

Desgaste de carburos cementados

Los principales estudios realizados sobre el desgaste en carburos cementados han relacionado la resistencia al desgaste con las características microestructurales y el porcentaje de la fase metálica existente.

Se ha encontrado que la propagación de grietas 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. Cuanto mayor es el

contenido en cobalto como el tamaño de los granos de carburo de tungsteno, más disminuye la velocidad de propagación, pero también mayor es el número de grietas nucleadas por fatiga térmica, que se inician en la superficie. [22]

En la década de los '80 se defendía la idea de que inicialmente la fase metálica es removida en la superficie, de modo que los granos de carburo quedan libres de la fase que los mantiene unidos, facilitando así su posterior remoción. Las grietas se propagan inicialmente en dirección perpendicular a la superficie de la herramienta. [23]

K. Jia y T.E. Fischer, [24] demostraron que la resistencia al desgaste de estos carburos cementados, cuando se ensayaban contra discos de nitruro 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 cizalladura en forma de delgadas placas.

En 1979, Colin M. Perrott, [25] propuso un nuevo mecanismo de desgaste a partir de la observación de superficies desgastadas de herramientas para la minería. Perrott observó que las superficies de desgaste mostraban zonas generalmente llanas, mezcladas con regiones constituidas por pequeños cráteres formados por fractura intergranular. Esta fractura se producía en la fase metálica, de modo que los granos de carburo de tungsteno podían ser fácilmente arrancados. También se indica que el fenómeno de la fatiga térmica empieza cuando se forman pequeñas grietas ortogonales a la dirección de deslizamiento, por efecto de los cambios de volumen sufridos por la microestructura. Estas grietas son intergranulares y están asociadas a una superficie brillante. La formación inicial de estas grietas ocurre cerca de la superficie, después de la creación de una fina capa de cobalto que cubre zonas deficientes en fase aglutinante o cementante. Se supone que la nucleación de

estas grietas se da preferiblemente en las cavidades producidas por la decohesión de la interfase.

Kindermann y colaboradores, [26] estudiaron la fatiga térmica, relacionando diferentes modos de fractura con la temperatura de trabajo. Se diferencian tres zonas: a temperatura ambiente, cuando las amplitudes de esfuerzo son superiores al 40% del límite a flexión, se produce un cambio alotrópico del cobalto de una estructura *fcc* (cúbica centrada en las caras) a una *hcp* (hexagonal compacta). A temperaturas mayores, se producen grietas en la fase aglutinante o cementante debido a su oxidación a lo largo de grietas, lo cual ocurre a unas 30 micras de la interfase óxido-sustrato. Por último, a altas temperaturas, se da una transición frágil-dúctil de la fase *g* en el caso del metal duro P4M (86.5% en peso de WC, 2.5% de TiC, 5% de (Ta, Nb)C, 6% de Co) y en los granos de Ti(C, N) en el cermet HT7 (13% en peso de WC, 5% de TiN, 53% de Ti(C, N), 8% de (Ta, Nb)C, 3% de Mo₂C, 12% de Co, 6% de Ni).

En los trabajos publicados no suelen utilizarse pares del mismo material, sobretodo pares del mismo tipo de carburo cementado. Dichos ensayos son de una importancia especial en la industria actual, puesto que es común encontrar componentes en contacto hechos de un mismo material que trabajan a fricción, como por ejemplo, sellos de fricción en tuberías.

En un estudio mas reciente, Freddy Arenas, [27] estudió las características tribológicas de carburos cementados de base WC-10 % en peso de Co, modificados con los 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 estudiados, WC-TiC-Co y WC-VC-Co, 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 del sistema. Los coeficientes de desgaste obtenidos se encuentran en el orden de $1.2-6.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y el coeficiente de fricción promedio en las composiciones con VC fue de 0,2.

Anna Di Prinzi, [28] caracterizó los carburos cementados producidos en Venezuela, con diferentes composiciones. Para ello, estudió algunas propiedades mecánicas y de corrosión que se relacionan con la estructura y los componentes aleantes de los sistemas estudiados. Se determinaron las propiedades mecánicas de dureza y tenacidad de fractura, a través del ensayo de indentación, encontrándose que el contenido de Co y el tamaño de grano de WC aumentan la tenacidad de fractura del material, pero reducen la dureza del mismo. Por otra parte, el estudio de la resistencia a la corrosión en diferentes medios (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl y NaCl) arrojó buen comportamiento de las aleaciones en todas las soluciones, excepto en HNO_3 , siendo más pronunciado el daño en aquellas muestras que contienen TiC. Estas pruebas también evidenciaron la fuerte influencia del tamaño de grano de WC sobre la resistencia a la corrosión.

Eduwin Carrasquero, [29] estudió las propiedades microestructurales y tribológicas de un recubrimiento industrial de carburo de tungsteno y cobalto ($\text{WC}+17\%\text{Co}$) obtenido mediante un proceso de termorrociado HVOF. En este estudio se realizó el análisis microestructural de las muestras recubiertas empleando las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (MEB) y distribución por área de los elementos constituyentes de las distintas fases identificadas (*mapping*) mediante espectroscopía de microanálisis (EPMA). Determinó que la microestructura del recubrimiento está compuesta por una matriz uniforme de carburo de tungsteno y cobalto en la cual se encuentra embebida una fase compuesta por cromo y hierro. El

análisis por difracción de rayos X reportó que el recubrimiento está compuesto por WC y una fase γ de W_3Co_3C . Adicionalmente, se determinó por análisis de imágenes que la porosidad del recubrimiento es de 3,47%. El comportamiento tribológico de este recubrimiento se estudió en base a pruebas de desgaste acelerado sin lubricante, bajo la configuración bola sobre disco, utilizando los pares tribológicos WC+6%Co Vs. WC+17%Co y acero AISI 1018 Vs. WC+17%Co. Todas las muestras ensayadas fueron rectificadas como paso posterior al termorrociado, obteniéndose una rugosidad superficial uniforme (Ra) de 0,230 μ m. El estudio morfológico, posterior al ensayo de desgaste de los pares tribológicos empleados, se realizó utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) la cual permitió determinar los mecanismos de desgaste presentes, que resultaron ser de tipo adhesivo, abrasivo y por fatiga, encontrándose para todos los casos estudiados que la transferencia de material fue de la bola hacia el recubrimiento. El coeficiente de fricción promedio reportado fue de 0,465 y 0,248 para los pares tribológicos de acero AISI 1086/WC+17%Co y WC+6%CO/WC+17%Co, respectivamente.

Marta Cardellach, [30] trabajó en la evaluación de carburos consolidados en cámara de altas temperaturas. Las pruebas tribológicas se llevaron a cabo bajo la configuración de punta sobre anillo, donde se aplica la fuerza normal a un anillo de material y la fuerza resultante medida es tangencial. Las pruebas se efectuaron a temperatura ambiente, 100°C y 400°C. Los materiales bajo el estudio eran cuatro tipos diferentes de WC-Co, en este caso carburos consolidados a distintos volúmenes de contenido de Co que variaron entre 6 y 18% en peso de Co, y tamaños de grano de WC de 0.8 a 2.5 micras. La huella superficial producida en los anillos por las puntas o pines de composición idéntica se midió a través de un perfilómetro. Las observaciones se dirigieron a la evaluación de los mecanismos de desgaste presentes en las

muestras. En este estudio, se analizó la tasa de desgaste en función de la presión de contacto y la carga, teniéndose en cuenta que los materiales que son capaces de soportar las cantidades más grandes de deformación inelástica también son menos susceptibles al desgaste. Estos materiales resultaron ser los carburos cementados consolidados con gran contenido de cobalto y tamaños de grano más pequeños. Se encontró además que, con el aumento de temperatura, disminuyó de la tasa de desgaste. Esto está relacionado con la reducción de tensiones residuales cuya ocurrencia se espera con el aumento de la temperatura.

La mayoría de los estudios citados se realizan a carga constante para todos los materiales ensayados, de manera que el material más blando siempre resulta más desgastado que el resto del material de mayor dureza. Por otro lado, no existen estudios exhaustivos dedicados a la observación del comportamiento frente al desgaste de estos materiales. Los estudios más numerosos se han hecho con pares de diferentes materiales, como por ejemplo, carburo cementado contra alúmina. Existe, en general, un interés industrial en el área, ya que a menudo estos materiales se encuentran en contacto con fluidos corrosivos, o en ambientes donde se trabaja en condiciones que producen gran desgaste en el material.

Proceso de fabricación tradicional de carburos cementados

El proceso de producción de los carburos cementados comienza por la mezcla de polvos y su posterior molienda en molino de bolas. Para asegurar la obtención de un material con resistencia mecánica adecuada y libre de poros, los polvos de carburo deben sinterizarse junto con un aglutinante metálico (generalmente cobalto) que se añade a la mezcla en forma de polvo fino. Generalmente, la proporción de este aglutinante oscila entre 4 y 20% en peso. Los dos materiales son molidos durante horas (o en algunos casos durante días)

en un líquido orgánico, como el hexano, con el fin de obtener una mezcla homogénea. La molienda sirve también para refinar el tamaño de las partículas. Seguidamente, la mezcla de tungsteno y carbono es cargada en un horno de inducción al vacío y calentada aproximadamente hasta 1550°C para carburizar el tungsteno y el carbono en forma de monocarburo de tungsteno, así como para secar la mezcla.

La mezcla molida se consolida mediante un proceso de prensado en frío, llevado a cabo en matrices que tienen la forma del producto final deseado. Durante este paso debe tenerse en cuenta el efecto de disminución del volumen que ocurre durante el último nivel de la sinterización y que puede llegar a ser del 40% en volumen.

Un método alternativo para la compactación del polvo es el prensado en caliente, que se realiza en matrices de grafito y se practica cuando el componente a fabricar es demasiado grande como para utilizar el prensado en frío.

Otro método difundido es el prensado isostático, en el cual la mezcla de polvos se carga en un molde cerrado y flexible, que está suspendido en un líquido, dentro de un recipiente a presión.

Un último método de compactación puede ser la extrusión, en la cual los carburos cementados son mezclados con un agente plastificante.

El pre-sinterizado es un tratamiento térmico a baja temperatura, llevado a cabo en hidrógeno o al vacío para extraer el lubricante de la matriz y dar la suficiente resistencia al compactado que permita un preformado, si así fuera requerido. A pesar de las altas presiones utilizadas durante la compactación de los polvos, el porcentaje en volumen de porosidad que se obtiene al final del proceso suele ser elevado. Sólo durante la temperatura de sinterización se da una densificación hasta casi el máximo teórico, eliminando así prácticamente toda la porosidad. El sinterizado de los compactos de carburo de

tungsteno-cobalto se lleva a cabo con el cobalto aglutinante o cementante en fase líquida. El compacto se calienta en atmósfera de hidrógeno o en vacío a una temperatura que varía entre 1350°C y 1600°C, dependiendo de la composición del sistema.

Durante el tratamiento por calor, el WC se disuelve gradualmente dentro de la fase β del cobalto, y su punto de fusión se reduce, de tal forma que finalmente el metal funde (ver Figura 7). [31-34]

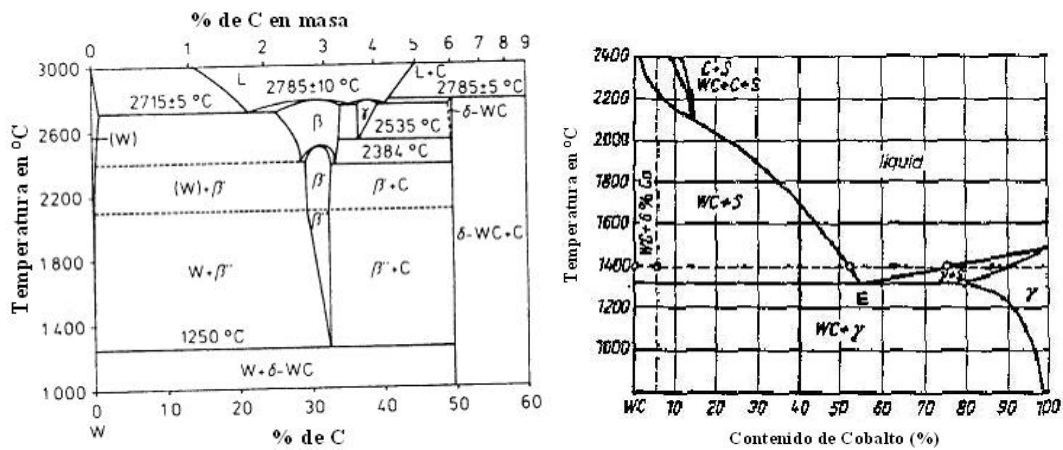


Figura 7. Diagrama de equilibrio del W-C (izquierda) y WC-Co (derecha). [2-30]

Antecedentes al proceso actual de obtención de WC

La mayoría de los carburos cementados fueron diseñados en Alemania durante la primera guerra mundial. La demanda de un material resistente al desgaste, sustitutivo del diamante generalmente utilizado en la mecanización de filamentos para lámparas incandescentes de tungsteno, conllevó a su desarrollo.

El primer carburo de tungsteno fue sinterizado por el químico francés Henri Moissan en 1890. Sin embargo, sólo se logró obtener un producto

completamente consolidado en 1923, cuando Schröter mezcló polvos de WC con pequeñas cantidades de diferentes tipos de polvos metálicos (Co, Ni o Fe), los compactó y los sinterizó a una temperatura de aproximadamente 1300°C.

Durante años subsiguientes (1926-1939), se producen desarrollos tecnológicos considerables. Los carburos cementados WC-Co se extendieron a otras combinaciones resistentes al desgaste. Por ejemplo, el desarrollo de carburos de aleaciones múltiples, basados en mezcla de WC-TiC con adiciones de Ta y Nb, hizo posible el maquinado de aceros a alta velocidad.

Sin embargo, en 1939 su aceptación industrial se limita a aplicaciones aisladas. [32-34]

Durante la segunda guerra mundial, debido a insuficiencias de tungsteno, se comenzó a sustituir el WC con carburo de titanio (TiC) como principal componente. Las aleaciones TiC-Ni, con adiciones de Mo₂C, fueron y siguen siendo las más utilizadas. Este acontecimiento, junto con el potencial mostrado por los carburos cementados para el corte a altas velocidades, produjo el mayor incremento en la productividad de armamento y, por ende, un auge creciente en la industria de metales duros.

Al término de la segunda guerra mundial se sinterizaban en Alemania grandes bloques de carburo que se dieron a conocer en la industria con el nombre de Widia (tomado del alemán WieDiamants, “similar al diamante”).

A finales de 1950, la mayor producción en masa de aceros y fundiciones se realiza con herramientas de carburo cementado. Su expansión en la industria automotriz fue inmediata.

El desarrollo de nuevas aplicaciones tecnológicas, especialmente en minería y en herramientas aplicables al corte de metales, es importante durante el período 1950-1960. Sin embargo, el desarrollo metalúrgico en general sufre un severo estancamiento. [31-35]

En la década de los setenta, se realizan estudios sobre la metalurgia física básica, propiedades mecánicas, físicas, de desgaste y de otros mecanismos de operación y sobre el desarrollo de nuevas aplicaciones y diseños en todo el campo de carburos cementados, mientras que en los años recientes el desarrollo se dirige principalmente a la tecnología de recubrimientos.

Más recientemente, se ha profundizado en un nuevo camino orientado básicamente al desarrollo o investigación experimental sobre procesos de conformado y obtención de carburos cementados y nuevos materiales con propiedades mejoradas, todo ello a costos menores. [36]

Uno de los métodos más recientes de consolidación de polvos finos de WC ha sido presentado por Cantado H. Yoo [37-38] y el mismo se basa en la densificación rápida de polvo de varios tamaños en un proceso que dura 15 minutos. Previo al proceso de compactación y sinterización, los polvos de WC se someten a un proceso de eliminación de óxidos y de contaminantes existentes en la superficie de los granos. Para lograrlo, se trabaja en una matriz de grafito que permite el paso de la corriente eléctrica para la formación de plasma, empleando una corriente DC y voltaje pulsante de 50 ms on, 50 ms off, 0-1500 Amp, 0-4 V, respectivamente, y 3 minutos de duración. Una vez realizado este proceso, se lleva a cabo la compactación, empleando una presión de 50 Mpa, y se hace la sinterización a una temperatura que alcanza 2000°C. Cabe destacar que los dos procesos se llevan a cabo simultáneamente y duran igualmente 3 minutos.

Compactación por plasma (*Plasma Pressure Compaction, P²C*)

Materials Modification Inc., ha desarrollado y patentado una nueva técnica de consolidación de polvos. Este proceso es el resultado de alrededor de cuatro años de investigación en esta área, principalmente a nivel de

submicrones y nanomateriales. Las ventajas de la técnica P²C (*Plasma Pressure Compaction*) son:

- Reduce las temperaturas del proceso.
- Reduce significativamente del tiempo de consolidación (minutos contra horas).
- Disminuye la presencia del oxígeno en la parte final de sinterizado.
- Produce un material con una densidad mayor.
- No necesita el proceso de pre-compactación o el uso de otros dispositivos.
- Ausencia de aditivos de ayuda al sinterizado.

El proceso de P²C puede aplicarse a todos los tipos de metales, intermetálicos y cuasicerámicos. La fabricación de las máquinas de P²C está basada en el tamaño y forma de la muestra que se desea, así como en el tipo de material. También se puede obtener la consolidación de un material a base de polvos, libre de metal o cerámico cementante.

Además, la máquina de P²C (Figura 8) puede usarse repetidamente para sinterizar un material con una forma y luego un material distinto con otras características morfológicas.

Las formas típicas que pueden producirse usando esta máquina pueden ir desde cilindros para ahuecar tubos hasta platos redondos. También se pueden generar formas de chapas en un intervalo de diferentes tamaños.



Figura 8. Ilustración de la máquina de sinterizado en P²C.

Esta máquina puede aplicar hasta 100 toneladas de carga y aporta una proporción calorífica rápida de 2200°C en 5 minutos. Puede además consolidar polvos cerámicos y metálicos con un tamaño de grano cuyo orden de magnitud varía entre submicrones y micrones. Una muestra de 1 pulgada de diámetro y 1 pulgada de largo, por ejemplo, puede ser consolidada hasta alcanzar una densidad mayor al 95% de la densidad teórica en menos de 5 minutos.

T.S. Srivatsan y colaboradores, [39] trabajaron en la determinación de microestructura y dureza de polvos de cobre consolidados a través de la técnica P²C. Los especímenes se obtuvieron consolidando las partículas de polvo bajo las condiciones de pulso eléctrico-on y condiciones de pulso eléctrico-off y dos temperaturas diferentes. Los resultados revelaron que, pulsando en la consolidación de los polvos, se generan en el material valores de microdureza más altos que en las muestras obtenidas por consolidación de partículas de polvo bajo ningún pulso. La nanodureza y microdureza se incrementaron con el aumento de la temperatura de consolidación. Las muestras consolidadas a la temperatura más alta revelaron, por su parte, evidencia de granos recrecidos.

Con base en los resultados obtenidos del estudio experimental (y apuntado a entender la influencia de condiciones del proceso en la estructura y microdureza de las muestras) se generaron las siguientes observaciones:

- Los polvos de cobre fueron consolidados con éxito por la técnica de consolidación por plasma P²C.
- La consolidación a alta temperatura y la aplicación de una corriente DC en condición de pulsos, tienen un efecto notable sobre la dureza (nanoindentación y microdureza) y la porosidad residual de la muestra. Por ejemplo, la porosidad residual más alta produce un valor más bajo de dureza en la muestra de cobre.
- Las condiciones del proceso tienen una influencia pequeña en el módulo elástico de las muestras.
- Las observaciones visuales y las ampliaciones, revelaron el crecimiento de grano en las muestras consolidadas a las temperaturas más altas.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

Para el presente estudio se utilizaron muestras cilíndricas de carburo de tungsteno sin aglutinante, producidas empleando seis condiciones diferentes del proceso de compactación por plasma (*Plasma Pressure Compaction, P²C*). Las muestras han sido suministradas por la compañía Materials Modification Inc. de Estados Unidos y sus dimensiones fueron: diámetro de 25,4 mm y altura aproximada de 6 mm (Figura 9).

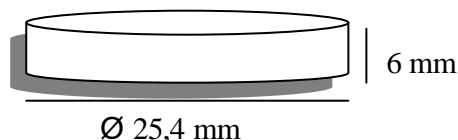


Figura 9. Dimensiones de la probeta bajo estudio.

Las variables del proceso para la obtención de las muestras, así como la nomenclatura de identificación de éstas se presentan en la Tabla I.

Tabla I. Identificación y Parámetros del proceso de obtención de las muestras.

Material Inicial		Condiciones de las Pulsaciones				
Identificación	Polvo	Frecuencia	Ciclos	Corriente	Presión	Tiempo
PP151	12 µm	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.
PP149	12 µm	SIN PULSACIÓN				
PP150	0.8 µm	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.
PP148	0.8 µm	SIN PULSACIÓN				
PP153	0.2 µm	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.
PP152	0.2 µm	SIN PULSACIÓN				

Tabla I. (Continuación) Identificación y Parámetros del proceso de obtención de las muestras.

Material Inicial		Condiciones de Consolidación			
Identificación	Polvo	Temperatura	Presión	Tiempo	Densidad
PP151	12 μm	1650°C	35 MPa	1 min.	99%
PP149	12 μm	1750°C	35 MPa	1 min.	99%
PP150	0,8 μm	1600°C	35 MPa	1 min.	99%
PP148	0,8 μm	1700°C	35 MPa	1 min.	99%
PP153	0,2 μm	1600°C	35 MPa	1 min.	99%
PP152	0,2 μm	1700°C	35 MPa	1 min.	99%

Preparación de las Muestras

Con el fin de obtener una superficie pulida y de baja rugosidad, se procedió en primer lugar al desbaste de las muestras, empleando para ello discos abrasivos de diamante con tamaños de partícula de 15 y 9 μm . Posteriormente, las probetas se pulieron mecánicamente con paños de nylon y pasta de diamante, esta última en tamaños de 15 μm hasta 1 μm . El pulido se realizó empleando un equipo semiautomático marca Buehler modelo ECOMET 5 (Figura 10), ubicado en el Laboratorio de Aluminio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.



Figura 10. Equipo Buehler semiautomático ECOMET 5.

Medición de la rugosidad

Los valores de rugosidad promedio (Ra) de las muestras de carburo de tungsteno, fueron obtenidos en un perfilómetro de interferometría óptica marca ZYGO, modelo NewView 200. Ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.

Se realizaron en todas las muestras cuatro mediciones de rugosidad en zonas diferentes de ambas caras. Igualmente, se obtuvieron imágenes en tres dimensiones (3D) que ilustran la topografía de las muestras.



Figura 11. Perfilómetro de interferometría óptica marca ZYGO modelo New View 200.

Medición de la dureza

La determinación de la dureza de las muestras se realizó en un microindentador Vickers, ello con el fin de obtener valores que permitieran establecer comparaciones entre los distintos comportamientos debido a las características propias de cada muestra.

Por otro lado, se realizó un barrido de cargas para la obtención de durezas utilizando una rejilla de ocho improntas por carga, las cuales fueron: 10, 25, 50, 100, 200 y 300 g. con un tiempo de aplicación de 15 s. El equipo

empleado para realizar estas mediciones fue un durómetro marca LECO, modelo AMH3000 con platina motorizada (Figura 12). Ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.

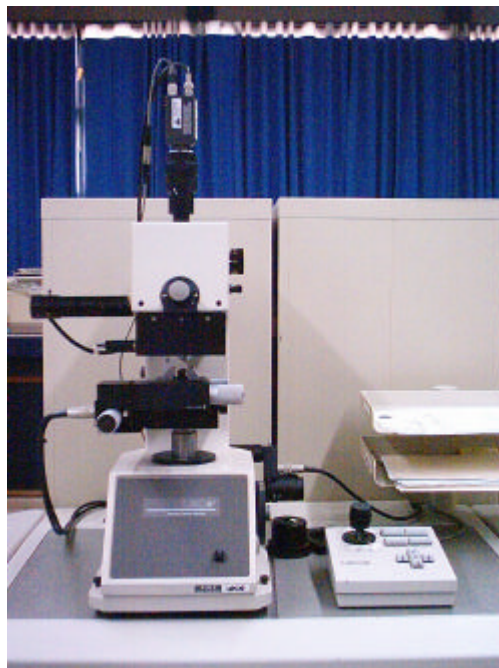


Figura 12. Durómetro marca LECO modelo AMH3000.

Ensayos de tenacidad de fractura

La tenacidad de las muestras en estudio se midió mediante el método de indentación. Para ello se utilizó un durómetro universal con penetrador Vickers (Figura 13) bajo una carga de 30 Kgf (294.20 N) y un tiempo nominal de indentación de 15 s. El ensayo se realizó en las muestras totalmente pulidas, tomándose como mínimo ocho mediciones por muestra

Posteriormente, con la ayuda de un microscopio óptico marca Olympus, modelo PMG3; acoplado a un analizador de imágenes marca Leco, modelo AI3001 (Figura 14); ambos equipos ubicados en el Laboratorio de Nuevos

Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela. Se determinó la longitud de la diagonal de la huella y la longitud de la grieta promedio, generada sobre la superficie de la muestra debido a la indentación. Lo anterior se muestra en la Figura 15, donde las líneas rojas representan las diagonales y la línea negra mide la grieta.



Figura 13. Durómetro universal marca WOLPERT.



Figura 14. Microscopio óptico marca Olympus, modelo PMG3; acoplado a un analizador de imágenes marca Leco, modelo AI3001

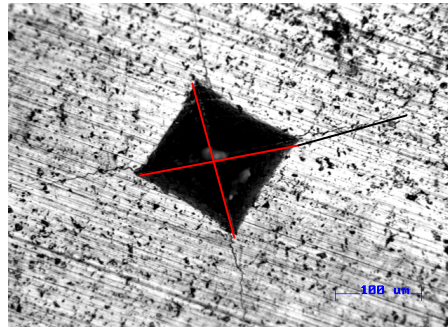


Figura 15. Modelo de huella y grietas

Para determinar con exactitud el modelo de grieta que se presentó en las muestras estudiadas, se procedió a desbastar las superficies de las mismas. Este desbaste se realizó hasta llegar a una profundidad cercana al centro de las huellas de indentación, observándose la existencia de las grietas conectadas a dicho centro. Ello indicó que el modelo de grieta es de tipo Media Radial.

Para el cálculo de la tenacidad se aplicaron tres ecuaciones, representativas del modelo de grieta media radial, estas son las ecuaciones de Evans [9]; Antis y colaboradores [16-28-40] y Evans y Davis [13-16] respectivamente:

$$K_{ICM} = 0.0824 \frac{P}{c^{3/2}} \quad \text{de Evans} \quad (5)$$

$$K_{ICM} = 0.016 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{c^{3/2}} \quad \text{de Antis y colaboradores} \quad (12)$$

$$K_{IC} = 0.4636 \left(\frac{P}{a^{3/2}} \right) \left(\frac{E}{H_v} \right)^{2/5} \times (10^F) \quad \text{de Evans y Davis} \quad (13)$$

Donde $F = -1.59 - 0.34B - 2.02B^2 + 11.23B^3 - 24.97B^4 + 16.32B^5$ y $B = \log(c/a)$.

Ensayo de Desgaste

El comportamiento tribológico de este material se estudió en base a pruebas de desgaste acelerado sin lubricante, las cuales se realizaron de acuerdo a la norma ASTM G99-90, en un tribómetro marca CSEM, controlado por computadora, bajo la configuración bola sobre disco (Figura 16). Ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.

Se utilizaron bolas de alúmina de 6 mm de diámetro. Cada componente del par tribológico se pesó antes y después del ensayo, registrando estos valores para el cálculo del volumen desgastado.

Los ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ y humedad relativa entre 54 y 64%. La velocidad lineal fijada para las pruebas de desgaste fue de 0,1 m/s y la carga fue de 10 N; todo ello a través de una distancia de desplazamiento de 1000 m.

Para cada muestra se realizaron dos ensayos, ambos con radio constante de 7 mm. La nomenclatura utilizada para la identificación de las muestras de los ensayos corresponde a la misma expuesta en la preparación de las muestras.



Figura 16. Tribómetro, marca CSEM.

Antes de cada ensayo de desgaste, cada bola y disco utilizados fueron cuidadosamente sometidos a limpieza ultrasónica en 2-Propanol (alcohol) durante 10 minutos y en acetona durante 10 minutos adicionales. Ello se realizó en un limpiador ultrasónico marca LECO, modelo UC-50 (Figura 17). Ubicado en el Laboratorio de Tribología de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.



Figura 17. Limpador ultrasónico: marca LECO, modelo UC-50.

Caracterización de los pares tribológicos

La morfología de los mecanismos de desgaste presente durante los ensayos de los pares se estudió mediante la observación de las superficies de desgaste por microscopía electrónica de barrido (MEB). Paralelamente, se realizó sólo a las muestras de WC un análisis químico semi-cuantitativo de las huellas de desgaste en la probeta, para verificar si hubo transferencia de material de la bola a la muestra o viceversa, y para ello se empleó el sistema de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDX) acoplado al microscopio electrónico de barrido. Con este mismo equipo se tomaron fotografías de las microestructuras de los materiales, así como de las superficies de desgaste.

El microscopio electrónico utilizado fue un XL Series, Modelo XL 30, Marca PHILIPS; y el analizador puntual acoplado al microscopio es de la marca EDAX, modelo DX-4 (Figura 18); ambos ubicados en el Instituto Universitario de Tecnología I.U.T. Región Capital, estado Miranda, Venezuela.



Figura 18. Microscopio electrónico XL Series, Modelo XL 30, Marca PHILIPS.

Perfilometría

Las muestras ensayadas se sometieron a estudios de perfilometría, con la finalidad de analizar la profundidad de la huella producida en la superficie de la muestra después del ensayo de desgaste. Se utiliza para ello el perfilómetro de interferometría óptica marca ZYGO, modelo NewView 200, el cual permite, gracias al software instalado, la construcción de gráficos en tres dimensiones (3D).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rugosidad de las muestras

En las Tablas II y III se reportan los valores promedio calculados para las rugosidades Ra y $r.m.s.$, respectivamente, así como las medidas individuales de estas propiedades obtenidas sobre muestra estudiada. El parámetro de rugosidad promedio, Ra , obtenido es igual a $0,0145 \pm 0,0026 \mu\text{m}$, mientras que el valor promedio de $r.m.s.$ es igual a $0,0221 \pm 0,0091 \mu\text{m}$. Puede apreciarse en ambos casos una baja desviación estándar, y ello supone claramente que la rugosidad de las muestras no debe afectar las mediciones hechas durante los ensayos de desgaste y dureza.

El parámetro de rugosidad “ Ra ” viene dado por el promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias de la lineal media al perfil. Debido al rallado uniforme de la superficie de las probetas, (producto de la preparación de las muestras) se reporta el parámetro “ $r.m.s.$ ” definido como la raíz cuadrada del promedio aritmético de los cuadrados de las desviaciones del perfil desde la línea media. Éste parámetro nos proporciona información adicional sobre la condición superficial de las muestras en estudio.

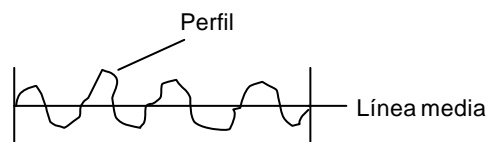


Figura 19. Esquema de la superficie pulida de las muestras.

Un fenómeno importante observado durante el desbaste de las muestras en lijas de carburo de silicio, consistió en el desprendimiento de granos de WC. La mala compactación de las muestras ha podido ser la causa de ello. En tal sentido, de no ser adecuados parámetros como el tiempo, la temperatura o la presión de compactación durante el proceso de sinterizado, es de esperarse una compactación deficiente y por ende el desprendimiento de material (en este caso WC) ante la operación de desbaste. Este desprendimiento de granos se evidenció con mayor claridad en las muestras de mayor tamaño de grano y en ambas caras de las probetas.

Tabla II. Rugosidad Ra.

Material Inicial			Rugosidad Ra (μm)					Desv. Stand
Identificación	Polvo	Cara de la Probeta	a	b	c	d	Promedio	
PP151	WC (12 μm)	-	0,011	0,012	0,012	0,010	0,011	0,0010
		i	0,010	0,009	0,010	0,010	0,010	0,0005
PP149	WC (12 μm)	-	0,014	0,013	0,013	0,017	0,014	0,0019
		i	0,014	0,009	0,013	0,013	0,012	0,0022
PP150	WC (0,8 μm)	-	0,017	0,016	0,015	0,016	0,016	0,0008
		i	0,016	0,017	0,018	0,016	0,017	0,0010
PP148	WC (0,8 μm)	-	0,014	0,018	0,017	0,015	0,016	0,0018
		i	0,016	0,017	0,016	0,015	0,016	0,0008
PP153	WC (0,2 μm)	-	0,018	0,014	0,015	0,018	0,016	0,0021
		i	0,018	0,017	0,015	0,017	0,017	0,0013
PP152	WC (0,2 μm)	-	0,017	0,017	0,017	0,013	0,016	0,0020
		i	0,013	0,014	0,013	0,013	0,013	0,0005

Tabla III. Rugosidad r.m.s.

Material Inicial			Rugosidad Rms (μm)					Desv. Stand
Identificación	Polvo	Cara de la Probeta	a	b	c	d	Promedio	
PP151	WC (12 μm)	-	0,015	0,015	0,015	0,013	0,015	0,0010
		i	0,013	0,012	0,013	0,013	0,013	0,0005
PP149	WC (12 μm)	-	0,019	0,018	0,017	0,022	0,019	0,0022
		i	0,018	0,011	0,019	0,016	0,016	0,0036

(Continúa)

Tabla III. (Continuación) Rugosidad r.m.s.

Material Inicial		Cara de la Probeta	Rugosidad Rms (μm)				Promedio	Desv. Stand
Identificación	Polvo		a	b	c	d		
PP150	WC (0,8 μm)	-	0,021	0,024	0,020	0,040	0,026	0,0093
		i	0,023	0,021	0,023	0,020	0,022	0,0015
PP148	WC (0,8 μm)	-	0,020	0,055	0,036	0,030	0,035	0,0147
		i	0,025	0,023	0,024	0,024	0,024	0,0008
PP153	WC (0,2 μm)	-	0,024	0,020	0,020	0,023	0,022	0,0021
		i	0,024	0,023	0,030	0,021	0,025	0,0039
PP152	WC (0,2 μm)	-	0,022	0,022	0,022	0,017	0,021	0,0025
		i	0,022	0,037	0,033	0,023	0,029	0,0074

En ambas tablas, las columnas indicadas como a, b, c y d corresponden a cuatro medidas en diferentes zonas de la muestra. La fila “i” corresponde al lado inverso de la muestra.

Perfilometría 3D

A continuación se presentan, en las Figuras 20 a 25, perfiles en tres dimensiones (3D) correspondientes a las superficies de las caras de las muestras estudiadas. Estos perfiles muestran la topografía de cada zona específica de la muestra. Adicionalmente, los perfiles 3D se acompañan con una fotomicrografía de la probeta respectiva, tomada sobre la zona estudiada. En estas fotomicrografías (Figuras 20, 22, 24, 25) puede evidenciarse que las probetas de mayor tamaño de grano (identificadas como 148, 150, 152 y 153) presentan una cantidad más apreciable de poros, habiéndose mencionado ya que ello se debe a desprendimiento de granos de la superficie de las probetas, ocurrido durante la etapa de preparación.

De la misma manera, es posible apreciar en todas las figuras rayas superficiales paralelas producto del mecanizado o desbaste.

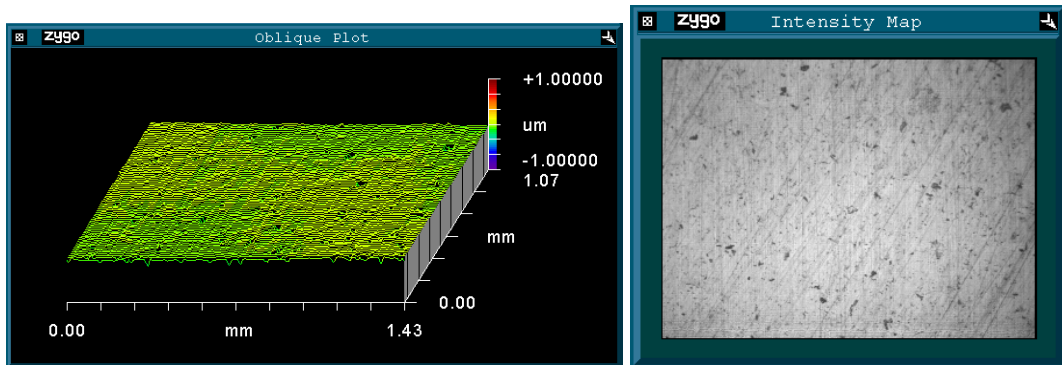


Figura 20. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 148.

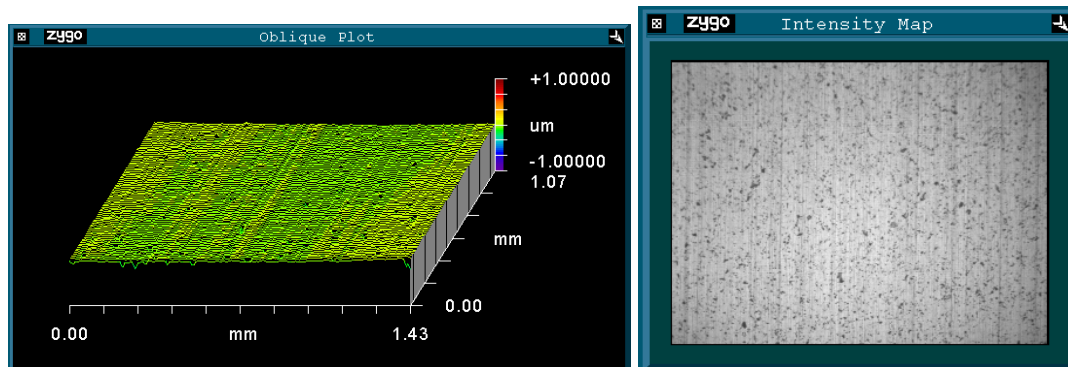


Figura 21. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 149.

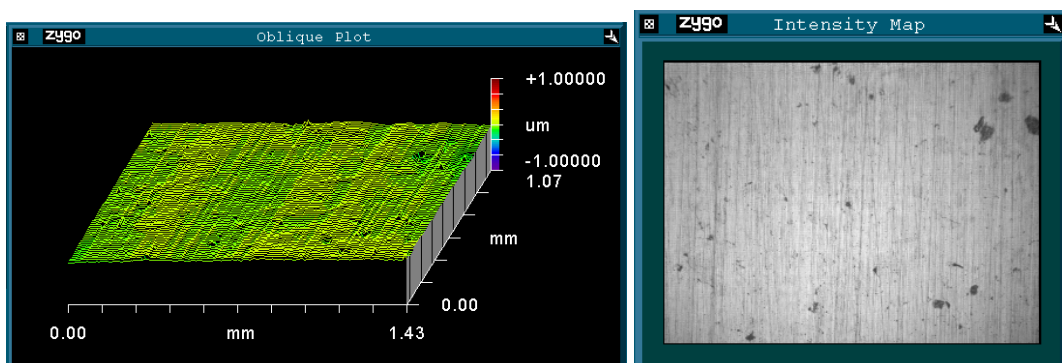


Figura 22. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 150.

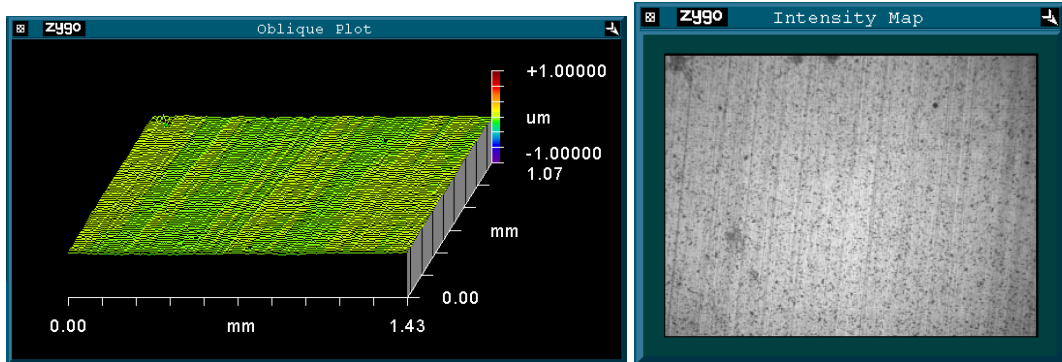


Figura 23. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 151.

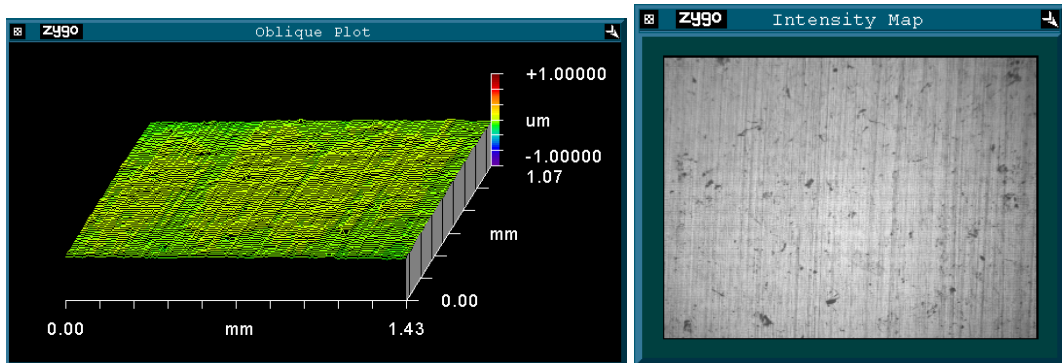


Figura 24. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 152.

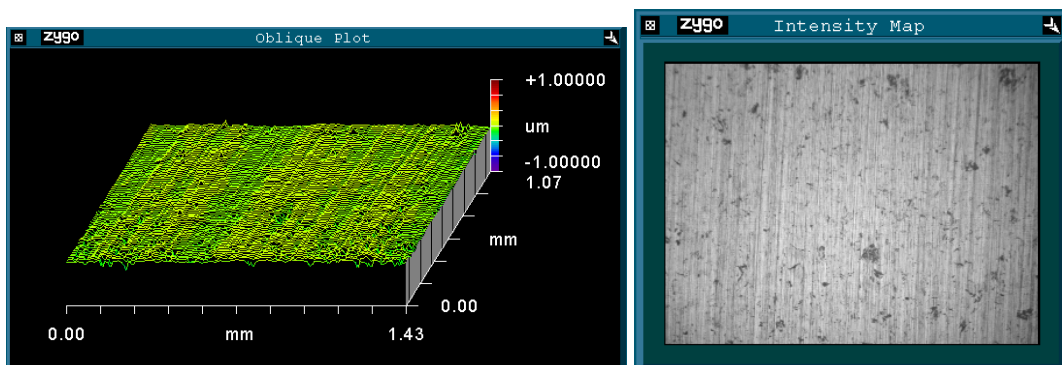


Figura 25. Imagen en 3D y foto de la superficie pulida de la muestra 153.

En general, todas las muestras presentan rugosidades muy similares, pero la porosidad generada, como consecuencia del desbaste superficial y el desprendimiento de granos, obedece al recrecimiento de grano que se genera durante la compactación de los polvos de WC en el proceso de sinterización; y como se evidencia en las fotomicrografías (Figuras 20, 22, 24, 25) este fenómeno ocurre en las muestras de menor tamaño de polvo (0,2 y 0,8 μm).

Dureza de las muestras

Los valores de dureza reportados en la Tabla IV, corresponden a las cargas de 100, 200, y 300 gr. así como 30 kgr. Conviene señalar que las improntas producidas por las cargas de 10, 25 y 50 gr. no pudieron ser observadas con exactitud, debido a la porosidad de las muestras, aunque igualmente lo bajo de tales cargas impidió generar huellas representativas sobre las zonas superficiales menos porosas de las muestras. Para cargas muy bajas, por otro lado, suelen aumentar tanto el intervalo de incertidumbre de las medidas como los factores de relajación elástica de la deformación penetrante, y ambos aspectos afectan la medida de durezas a bajas cargas.

Una característica importante observada en la mayoría de las improntas realizadas, consiste en el desmoronamiento de las muestras en zonas adyacentes a las huellas de indentación, lo cual dificulta la medida de las huellas. Este comportamiento de desprendimiento de las partículas se acentúa a medida que se incrementa la carga.

Los efectos anteriormente descritos suponen en todo caso que la compactación de las muestras no ha sido efectiva, pudiendo ser importante, como ya se dijo, verificar la influencia de los parámetros del proceso de producción de las probetas sobre el grado de compactación obtenido. El desmoronamiento de zonas superficiales tras la aplicación de cargas altas desdice de la utilidad de este material para diseño de componentes sometidos a condiciones extremas.

Tabla IV. Durezas promedio para las muestra.

148	Dureza Kgrf/mm ² (durometro)		Hv Kgrf/mm ²		Dureza GPa		
	Carga Kgf	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
	0,05	1965,24	363,12	1846,35	330,52	18,11	3,24
	0,10	1810,46	278,88	2071,41	343,13	20,32	3,37
	0,20	1751,58	115,65	2044,51	145,45	20,06	1,43
	0,30	1305,18	145,13	1442,96	169,24	14,16	1,66
	30,00			1239,70	84,30	12,16	0,83
149	Dureza Kgrf/mm ² (durometro)		Hv Kgrf/mm ²		Dureza GPa		
	Carga Kgf	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
	0,05	2110,24	196,75	1979,05	178,62	19,41	1,75
	0,10	1724,07	106,64	1964,33	129,55	19,27	1,27
	0,20	1428,64	180,60	1642,91	220,93	16,12	2,17
	0,30	1269,94	79,67	1401,68	92,19	13,75	0,90
	30,00			1454,38	40,90	14,27	0,40
150	Dureza Kgrf/mm ² (durometro)		Hv Kgrf/mm ²		Dureza GPa		
	Carga Kgf	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
	0,05	2437,80	370,69	2274,75	334,87	22,32	3,29
	0,10	1892,90	291,60	2172,71	357,15	21,31	3,50
	0,20	1768,46	176,52	2066,51	222,57	20,27	2,18
	0,30	1349,99	144,90	1495,12	168,99	14,67	1,66
	30,00			1473,98	61,18	14,46	0,60
151	Dureza Kgrf/mm ² (durometro)		Hv Kgrf/mm ²		Dureza GPa		
	Carga Kgf	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
	0,05	1847,41	182,87	1739,64	166,80	17,07	1,64
	0,10	1717,66	262,85	1958,25	320,97	19,21	3,15
	0,20	1774,67	258,31	2075,63	328,18	20,36	3,22
	0,30	1413,43	121,55	1568,91	141,79	15,39	1,39
	30,00			1511,34	26,83	14,83	0,26

(Continúa)

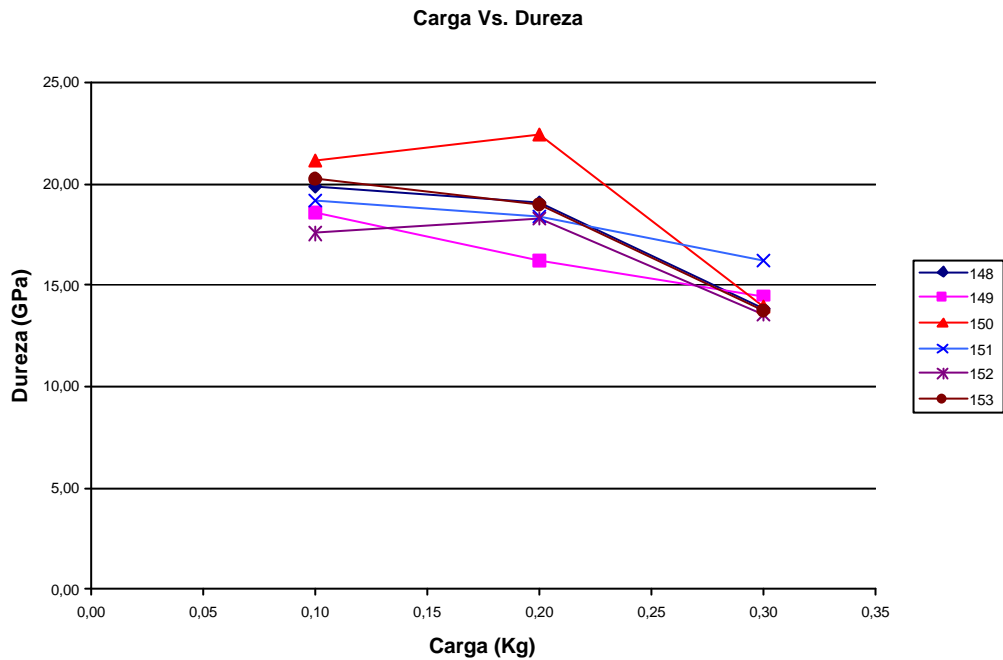
Tabla N° IV. (Continuación) Durezas promedio para las muestras.

152	Dureza Kgrf/mm ² (durometro)		Hv Kgrf/mm ²		Dureza GPa		
	Carga Kgf	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
	0,05	1989,97	299,89	1869,19	273,04	18,34	2,68
	0,10	1804,84	222,03	2063,84	273,58	20,25	2,68
	0,20	1642,43	133,17	1907,65	166,64	18,71	1,63
	0,30	1281,46	136,55	1415,39	158,95	13,88	1,56
	30,00			1447,44	40,33	14,20	0,40
153	Dureza Kgrf/mm ² (durometro)		Hv Kgrf/mm ²		Dureza GPa		
	Carga Kgf	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
	0,05	2016,29	206,68	1893,60	187,65	18,58	1,84
	0,10	1675,17	221,84	1906,16	267,44	18,70	2,62
	0,20	1455,16	182,27	1675,64	223,10	16,44	2,19
	0,30	1346,61	114,62	1490,92	133,90	14,63	1,31
	30,00			1475,30	53,18	14,47	0,52

Para las muestras de mayor tamaño de polvo, se obtienen valores de dureza superiores en comparación a las muestras de menor tamaño de polvo, aunque esta variación es mínima, ya que al observar la desviación estándar de los valores de dureza (Tabla IV), es claro que no existe un intervalo de variación muy amplio entre los valores de durezas.

En la Gráfica 1, mostrada a continuación, se puede observar claramente el comportamiento de cada una de las muestras en relación con su dureza, como función de la carga aplicada. Para la carga de 300 gr. la muestra que presenta mayor dureza es la conformada con condición de corriente pulsada y consolidada a 1650 °C (muestra 151), seguida de la muestra conformada con la condición de corriente sin pulsar y consolidada a 1750 °C (muestra 149). La aproximación de magnitud de la dureza entre estas muestras era de esperarse, ya ambas poseen el mismo tamaño de polvo (12 µm), y la diferencia entre los

valores de estas dos muestras puede estar relacionada al proceso de sinterizado al que fue sometida cada una: la 151 a corriente pulsada y la 149 sin ningún tipo de pulso en la corriente.



Gráfica 1. Carga Vs. Dureza

En términos generales se puede decir que la dureza decrece al aumentar la carga, pero el comportamiento de las muestras no presenta ningún tipo de orden en relación al tamaño de polvo, lo cual puede ser una consideración importante desde el punto de vista de diseño de piezas a través del proceso P²C. Por otro lado, es importante señalar que las muestras sinterizadas sin pulsación en la corriente durante el proceso de conformado presentan valores de dureza inferiores a los reportados por sus homólogas en tamaño de polvo. De acuerdo a ello, si se parte de muestras con igual tamaño de polvo, el

proceso de compactación con corriente pulsada conferirá una dureza mayor, en comparación con las muestras compactadas sin pulsación en la corriente.

En las tablas presentadas a continuación, se establece una comparación entre las condiciones de pulsado de la corriente y las durezas Vickers obtenidas para cargas de 100, 200 y 300 gr. (Tabla V) y 30 kgf. (Tabla VI). En estas tablas se evidencia el comportamiento descrito previamente.

Tabla V. Comparación entre las condiciones de conformado y las durezas obtenidas para 100, 200 y 300 gr. de carga

Material Inicial		Condiciones de las Pulsaciones					Dureza (GPa)		
Muestra	Polvo	Frecuencia	Ciclos	Corriente	Presión	Tiempo	Hv @ 100 gr.	Hv @ 200 gr.	Hv @ 300 gr.
151	(12 µm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	19,17	18,41	16,24
149	(12 µm)	SIN PULSACIÓN					18,57	16,24	14,46
150	(0,8 µm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	21,13	22,44	13,94
148	(0,8 µm)	SIN PULSACIÓN					19,85	19,07	13,86
153	(0,2 µm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	20,21	19,00	13,77
152	(0,2 µm)	SIN PULSACIÓN					17,54	18,25	13,52

Tabla N° VI. Comparación entre las condiciones de conformado y las durezas obtenidas para 30 kgr. de carga

Material Inicial		Condiciones de las Pulsaciones					Dureza (GPa)
Muestra	Polvo	Frecuencia	Ciclos	Corriente	Presión	Tiempo	Hv @ 30 Kgr.
151	(12 µm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	14,95
149	(12 µm)	SIN PULSACIÓN					14,12
150	(0,8 µm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	14,43
148	(0,8 µm)	SIN PULSACIÓN					12,15
153	(0,2 µm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	14,10
152	(0,2 µm)	SIN PULSACIÓN					10,69

Los valores de dureza obtenidos se encuentran muy cercanos a los reportados por diferentes autores [1-6,22,27-28] que se han dedicado al estudio de sistemas WC y WC-Co. Sin embargo, existen diferencias respecto al hecho que en tales estudios, a mayor tamaño de grano, la dureza es menor, mientras

que en el presente estudio, para mayor tamaño de polvo, la dureza resultó mayor, en términos generales y con variaciones poco apreciables. De acuerdo a la literatura publicada, para los sistemas WC-Co la dureza dependerá del contenido de cobalto presente en el espécimen, ya que el aumento del contenido de ese elemento aporta mayor tenacidad, mientras que un tamaño de grano menor confiere mayor dureza.

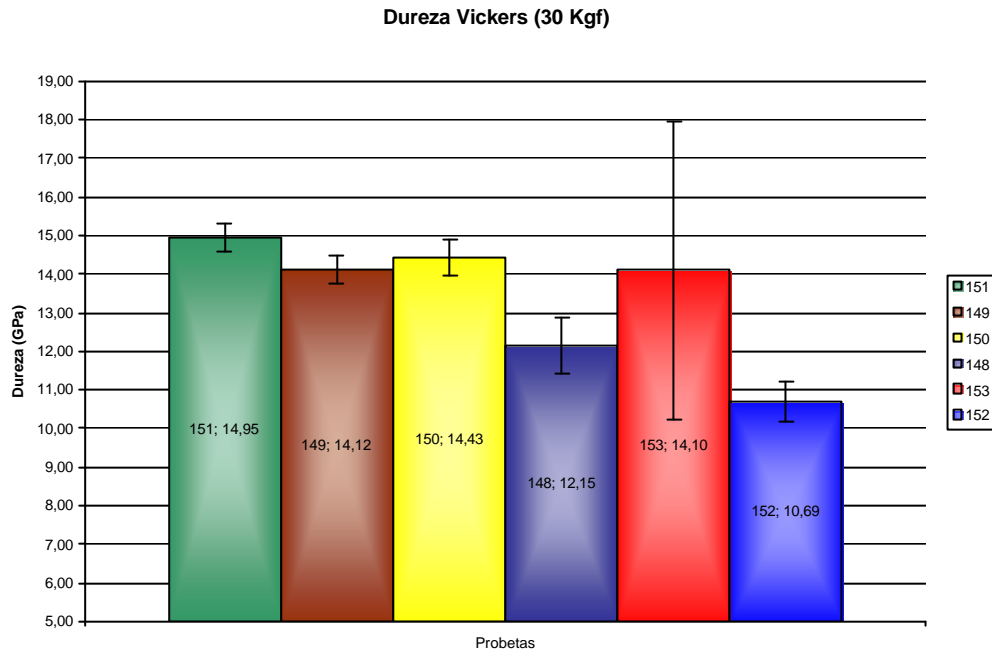
Luego de la medición de tamaños de granos en las muestras (que se expone mas adelante), se observó un recrecimiento de los granos durante la compactación de los mismo [39]. En otras palabras, en las muestras de tamaños de polvo igual a 0,2 y 0,8 μm se encontraron tamaños de granos de 14 a 30 μm ; Permitiendo inferir que la compactación de los polvos, genera granos de mayor tamaño, y estos a su vez dan las propiedades a las muestras en estudio; donde efectivamente al tomar en consideración los tamaños de granos recrecidos, se evidencia que la dureza decrece.

Seguidamente, La Gráfica 2 muestra una comparación entre los valores de dureza obtenidos para las mediciones hechas con una carga de 30 kgr. Donde se observa que la muestra que presenta mayor dureza es la conformada con condición de corriente pulsada y consolidada a 1650°C (muestra 151), este comportamiento es concordante con los trabajos publicados con anterioridad, ya que esta muestra presentó un tamaño de grano (luego de la compactación) igual a 8,33 μm , siendo el valor más bajo de tamaños de granos de todas las muestras.

Las muestras con mayor tamaño de grano resultaron ser la conformada a 1600°C y en condición de corriente pulsada (muestra 153) y la muestra conformada a 1700°C y en condición de corriente sin pulsación (muestra 152); ambas con tamaño de polvo igual a 0,2 μm .

Tomando en consideración que los valores de dureza para la muestra 153 presentan una elevada desviación estándar (ver tabla IV y grafica 2), se

puede decir que las probetas 152 y 153 presentan bajos valores de dureza. Confirmando que la dureza depende del tamaño de grano, donde a mayor tamaño de grano, la dureza es menor.



Gráfica 2. Comparación de valores de HV @ 30Kgf.

Tenacidad de fractura de las muestras

En la Figura 26, se presentan las imágenes correspondientes a las huellas de indentación y las respectivas grietas a partir de las cuales se calcula el K_{IC} .

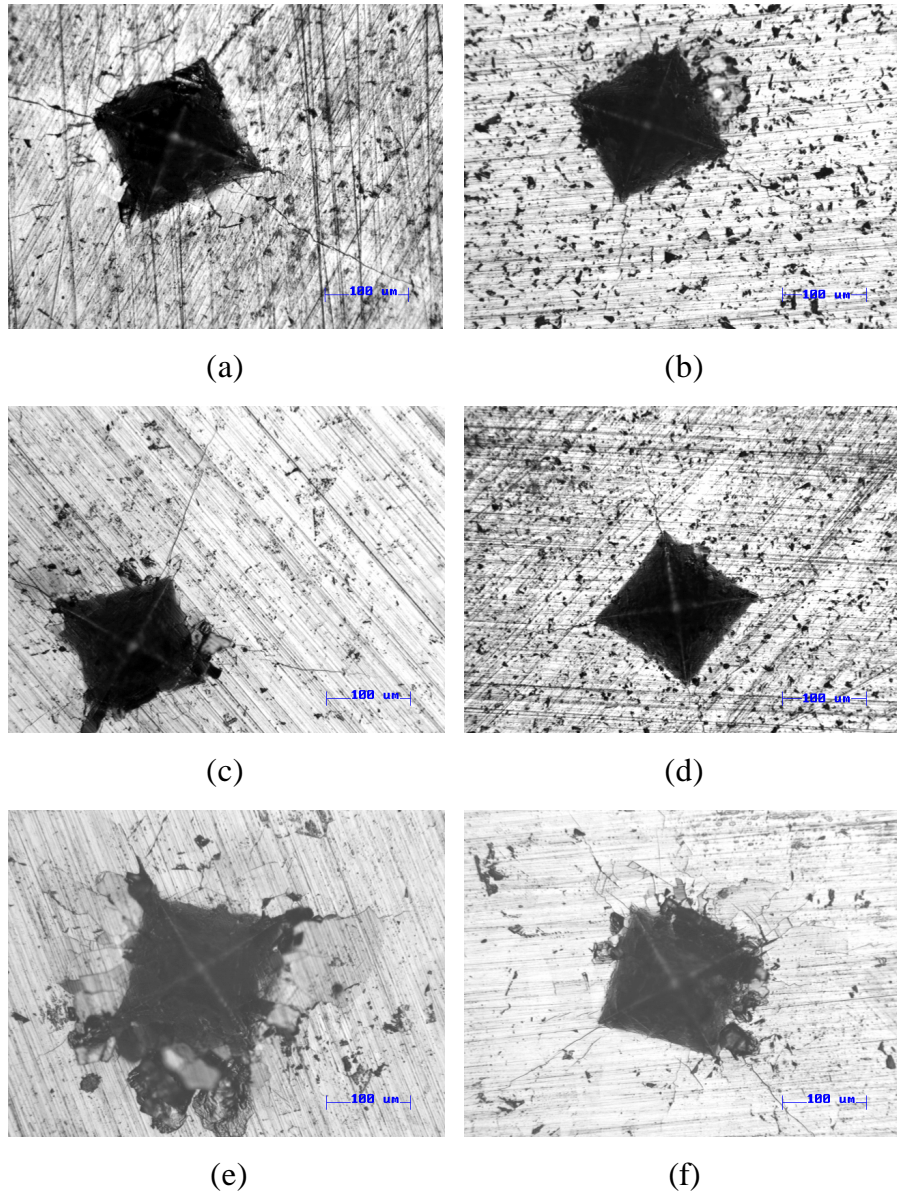


Figura 26. Indentación a 30 kgf: (a) Muestra 148; (b) Muestra 149; (c) Muestra 150; (d) Muestra 151; (e) Muestra 152; (f) Muestra 153.

Luego de las indentaciones y la medición de las diagonales y grietas generadas en las huellas de indentación, se pudo observar desmoronamiento de algunas muestras alrededor de la huella, evidenciándose ello en las probetas de menor tamaño de polvo de WC (muestras 152 y 153). Este comportamiento puede apreciarse claramente en las figuras 26 (e) y (f). Durante el barrido de cargas, el desprendimiento de granos o desmoronamiento se acentuó a medida que fue aumentándose la carga aplicada. En los anexos 3 correspondientes a la indentación a 40 kgr. se presentan imágenes representativas de este fenómeno.

Éste comportamiento, en el cual hay desprendimiento de granos, puede consistir en un desplazamiento de los mismos, a lo largo de sus límites, en dirección de la carga aplicada en la indentación y podría deberse a una compactación deficiente durante el proceso de sinterizado.

Una característica importante determinada del análisis de las huellas es que las muestras de mayor tamaño de polvo de WC (probetas 150 y 151 con 0,8 μm y 12 μm respectivamente) presentaron un modelo de grietas perfectamente en cruz, pero las muestras conformadas a partir del menor tamaño de polvo de WC (152 y 153 con 0,2 μm) presentaron grietas en las aristas de las huellas de indentación, correspondiéndose ello al comportamiento reportado por López Cantera [17], donde algunas grietas crecen desde los lados de la huella de indentación y no desde las esquinas de la misma. (Figuras 26 (e) y (f))

En la Tabla VII se presentan los valores de tenacidad de fractura, K_{IC} , obtenidos a partir de las ecuaciones 5, 12 y 13 (ver Capítulo III). Evidentemente, los resultados reportados tras el uso de cada ecuación son diferentes entre sí, pero se observa una tendencia particular presentada por los valores de K_{IC} obtenidos para todas las muestras; donde el comportamiento es similar para las tres ecuaciones utilizadas en la evaluación de la tenacidad de fractura.

Tabla VII. Comparación entre los valores de tenacidad de fractura.

	Evans y col. [29] Ecuación: (5)	Antis y col. [16; 28; 40] Ecuación: (12)	Evan y Davis [13; 16] Ecuación: (13)
Probeta	K _{IC} (MPa/vm)	K _{IC} (MPa/vm)	K _{IC} (MPa/vm)
151	6,60	8,74	11,12
149	6,03	8,22	10,59
150	5,10	6,88	9,38
148	4,75	7,07	9,20
153	4,84	6,61	8,94
152	5,33	8,35	9,92
Promedio	5,44	7,64	9,86
Desv. Std	0,73	0,90	0,85

Se observa una variación significativa entre los valores de K_{IC} para una misma muestra, usando diferentes ecuaciones. Sin embargo, para todas las muestras se obtiene uniformidad de valores viendo los resultados por ecuación, lo cual se traduce en una desviación estándar muy baja.

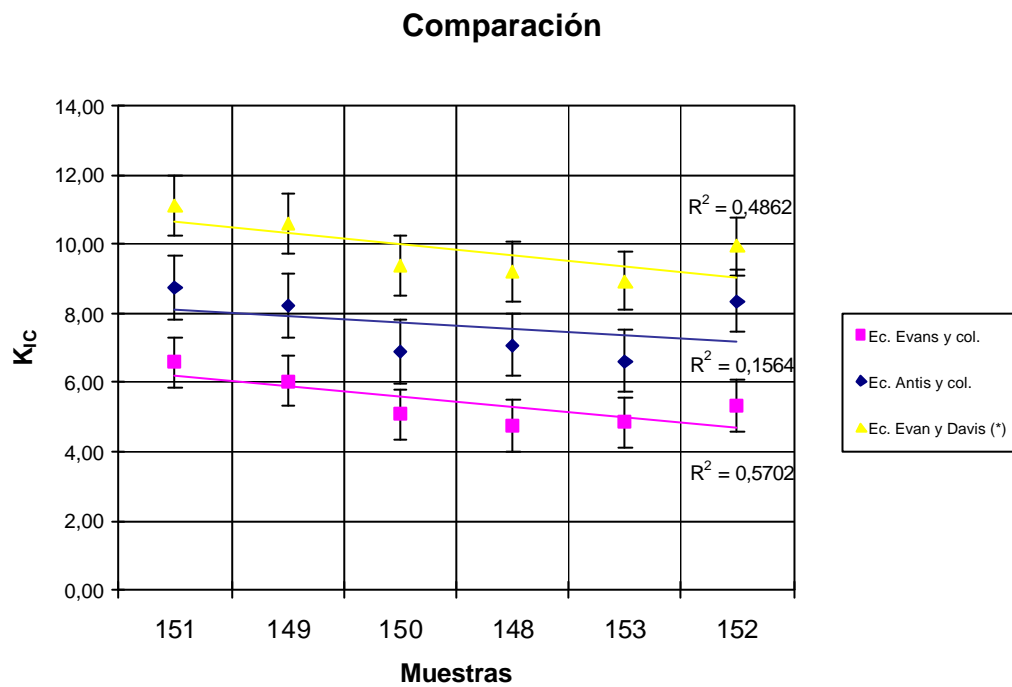
En la Gráfica 3, en la cual se comparan los valores de K_{IC} obtenidos por las distintas ecuaciones, se observa una tendencia lineal decreciente de los valores de K_{IC} respecto a las probetas estudiadas, y se obtiene la varianza de factores comunes (R²) [41], la cual es considerable. Lo anterior, nos indica que existe correlación negativa entre las características de las muestras bajo estudio y los valores de tenacidad de fractura para una misma ecuación. Es decir, la tenacidad de fractura de este sólido es dependiente de las condiciones y parámetros de consolidación de las muestras.

De forma similar, se observa un patrón de comportamiento en función del tamaño de polvo y las condiciones de la corriente durante la compactación, de acuerdo a la identificación de las probetas.

Las muestras 151 y 149 con tamaño de polvo igual a 12 μm (y menor tamaño de grano) presentan valores de tenacidad de mayor magnitud que las muestras con tamaños de polvo igual a 0,8 y 0,2 μm (y mayor tamaño de grano). Además las muestras 151 y 150, ambas consolidadas en condición de

corriente pulsada, presentan valores de tenacidad mayores a sus homólogos en tamaño de polvo (muestras 149 y 148 respectivamente).

Por otra parte, las probetas presentan un comportamiento uniforme en relación a su tenacidad de fractura, ya que los valores están dentro un mismo orden de magnitud y la desviación estándar es mínima para cada ecuación aplicada.



Gráfica 3. Comparación de valores de K_{IC}

La uniformidad de valores de K_{IC} , pudiera estar relacionada con el avance de las grietas producto de la indentación y los granos generados durante la compactación de los polvos de WC, es decir, La compactación de los polvos de WC durante el proceso de sinterización genera granos de mayor tamaño y estos a su vez son compactados para dar forma a las muestras en

estudio; por otra parte el avance de las grietas producidas por la indentación, se puede dar intergranularmente (separando los granos recocidos), y de esta forma afectar las condiciones para la aplicación del método de indentación Vickers para evaluación de tenacidad de fractura.

El avance de las grietas en forma intergranular también podría explicar el desprendimiento de algunos granos durante las indentaciones. Donde puede inferirse, tal vez, que las deficiencias de compactación en las muestras desvirtúan las medidas que permiten estimar el K_{IC} .

Por otra parte, los valores medidos calculados de acuerdo con la ecuación de Antis y colaboradores [16;28;40] se encuentran en el intervalo de valores que reportan los diferentes autores [1-15,22,27-28] para este de material (WC).

A continuación, en la Figura 27 se presenta la imagen de la huella de indentación a 30 kgf. en la muestra 151, donde se observa que las grietas crecen desde las esquinas y diagonales de la impronta y el modelo de grietas es en forma de cruz.

Seguidamente, en la Figura 28 se presentan las imágenes de las fotomicrografías por microscopía óptica luego del desbaste superficial de la muestra 151, donde se observa que el sistema de grietas generado es de tipo Media Radial. En la figura 28 (a) y (b) se puede apreciar claramente que las grietas continúan unidas a las esquinas de la huella de indentación, condición que permite verificar el sistema de grieta presente en la muestra en estudio. En la figura 28 (c) a un aumento mayor (200X), se evidencia el desprendimiento de granos en el centro de la impronta.

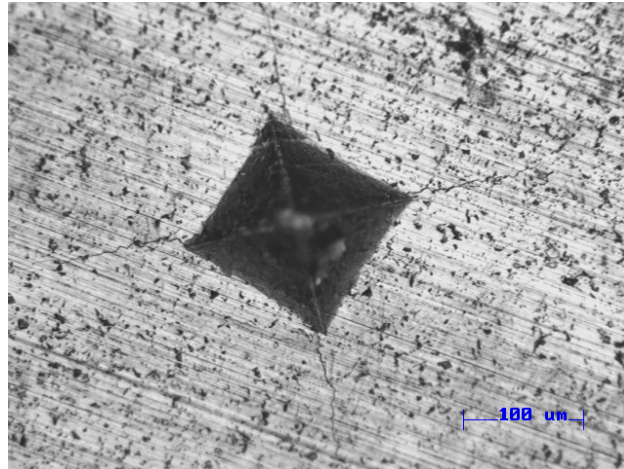


Figura 27. Indentación a 30 kgf. en la muestra 151.

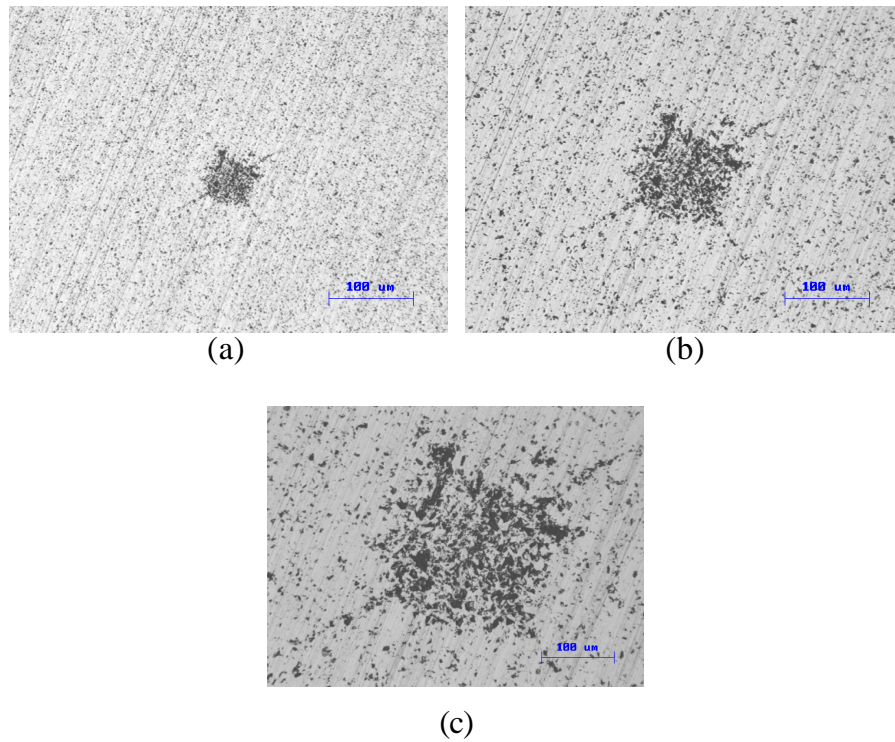
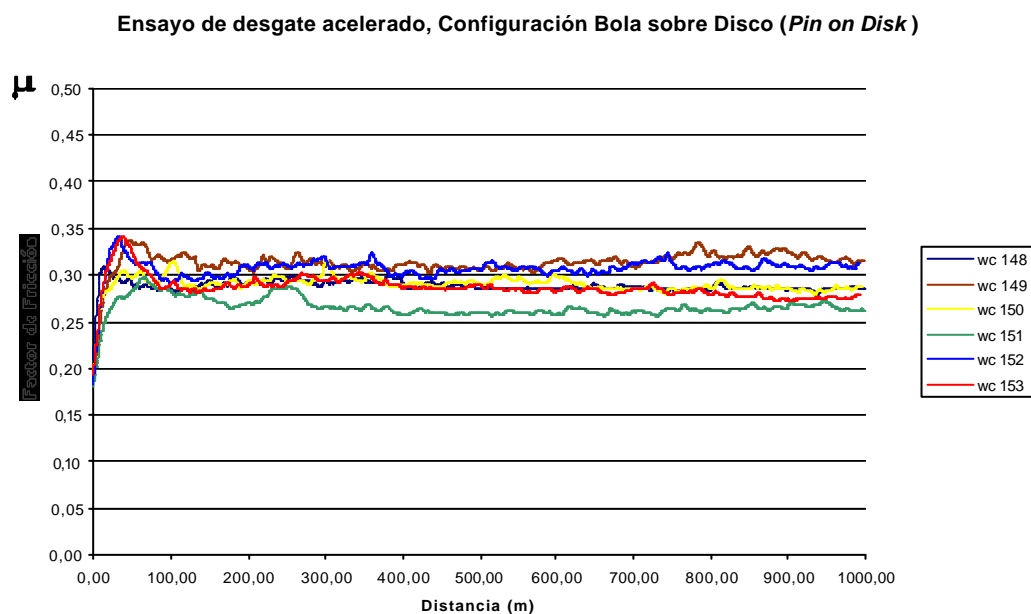


Figura 28. Fotomicrografías por microscopía óptica para carga de 30 kgf. luego del desbaste superficial. Muestra 151. (a) 10x; (b) 100x; (c) 200x.

Desgaste de las muestras

Al realizar los ensayos se obtuvo directamente el coeficiente de fricción dinámico en función de la distancia recorrida en cada momento. Por otro lado, se estimó la pérdida de volumen en cada ensayo, observando el área de la huella producida en el disco por perfilometría y analizando por MEB el radio de la huella dejada en la muestra.

La Gráfica 4 muestra el comportamiento instantáneo del coeficiente de fricción respecto a la distancia de deslizamiento, en todas las muestras ensayadas. Puede verificarse un aumento del coeficiente de fricción al comienzo de todos los ensayos, al cual sigue un ligero descenso. Finalmente, el coeficiente de fricción va acercándose a un valor aproximadamente constante, durante el transcurso del ensayo y hasta su final. El aumento inicial del coeficiente de fricción se debe al desgaste inicial que sufren los materiales en contacto, si bien la superficie de las probetas presentaba buen acabado ($R_a = 0.0145$ aproximadamente).



Gráfica 4. Distancia Vs. μ para las muestras.

Al observar la gráfica, se evidencia que las muestras no presentan un comportamiento ante el desgaste deslizante que evidencie las distintas condiciones de conformado. De hecho, el comportamiento es similar para todas las muestras y no puede establecerse por ello relación alguna entre el tamaño de grano de las muestras y los coeficientes de fricción. Tampoco pueden relacionarse estos coeficientes con la temperatura de conformado. Sin embargo, es posible afirmar que debido a una variación muy pequeña del coeficiente de fricción, las muestras conformadas bajo la condición de corriente no pulsada, presentan un coeficiente mayor al de las muestras con igual tamaño de polvo, pero conformadas con corriente pulsada. Dicha variación se puede observar en la gráfica ubicando cada muestra con su respectivo color en la leyenda y recordando las condiciones de conformado de la tabla I; Esto a su vez, permite afirmar que la condición de corriente pulsada, al conferir una dureza mas alta, permite un desgaste más leve en el material, expresando este comportamiento con un menor coeficiente de fricción.

Las condiciones de operación para cada ensayo de desgaste deslizante se muestran en la Tabla VIII.

Por otro lado, las muestras 149 y 151, de tamaño de polvo mayor (12 μm), presentan de acuerdo con la Gráfica 4 los mayores valores de coeficientes de fricción promedio: para la muestra 149 se obtiene $\mu \approx 0,31$; mientras que para la muestra 151 se obtiene $\mu \approx 0,28$.

Para las muestras con tamaño de polvo igual a 0,8 μm (150 y 148), los resultados son muy uniformes y sus correspondientes curvas en la Gráfica 4 se solapan. Ello puede complementarse con la Tabla VIII, pudiendo decirse que el coeficiente de fricción para estas muestras es de 0,29. En este caso, no se puede diferenciar ningún comportamiento en relación a las condiciones de conformado de las muestras (corriente y/o temperatura).

Tabla VIII. Condiciones del ensayo de desgaste deslizante bajo la configuración de bola sobre disco

Condiciones del Ensayo								
Muestra	Probeta	Pin	Cara	Humedad Relativa	Temperatura Atmosférica	Factor de Fricción (μ) Promedio	Desv. Estándar	Factor de Fricción (μ) INICIAL
	Peso (gr)	Peso (gr)						
151	32,5982	0,4402	-	60%	25°C	0,2511	0,0122	0,2810
	32,6011	-						
	32,6011	0,4393	i	60%	25°C	0,2796	0,0152	0,2062
	32,6005	0,4392						
149	27,8832	0,4400	-	56%	25°C	0,2874	0,0140	0,2201
	27,8848	-						
	27,8848	0,4407	i	60%	24°C	0,3395	0,0168	0,2632
	27,8836	0,4395						
150	28,9145	0,4400	-	54%	24°C	0,3011	0,0125	0,2552
	28,9175	-						
	28,9175	0,4415	i	60%	24°C	0,2801	0,0110	0,2942
	28,9170	0,4389						
148	28,0551	0,4405	-	64%	26 °C	0,2802	0,0123	0,2632
	28,0570	-						
	28,0570	0,4401	i	60%	25°C	0,2968	0,0109	0,2432
	28,0542	0,4397						
153	28,6863	0,4409	-	58%	25°C	0,2912	0,0176	0,2139
	28,6854	-						
	28,6854	0,4411	i	58%	24°C	0,2818	0,0122	0,2136
	28,6844	0,4405						
152	33,6102	0,4392	-	56%	25°C	0,3329	0,0176	0,2262
	33,6139	-						
	33,6139	0,4398	i	60%	25°C	0,2815	0,0091	0,2211
	33,6139	0,4395						

Conviene señalar que las muestras de mayor dureza presentaron coeficientes de fricción menores. Esto se evidencia en la muestra 151, la cual presentó las mayores durezas a las cargas de 300 gr. y 30 kgr. y, de acuerdo

con la Gráfica 4, presenta igualmente el menor coeficiente de fricción durante toda la distancia recorrida durante el ensayo. Es importante resaltar, desde el punto de vista del diseño de componentes, que una muestra que tenga un coeficiente de fricción más bajo que todas las demás, se traduce en una buena resistencia al desgaste. Sin embargo, en términos generales el resto de las muestras no presenta este comportamiento.

Para las muestras con tamaño de polvo igual a 0,2 μm (152 y 153), el comportamiento es similar a las 149 y 151. La muestra 152 presenta un mayor coeficiente de fricción durante toda la distancia de recorrido del ensayo. De la Tabla VIII notamos que para la muestra 152 $\mu_f \approx 0,305$; mientras que para la muestra 153 se tiene $\mu_f \approx 0,285$.

Tanto para las muestras con tamaño de polvo igual a 12 μm (149, 151) y las muestras con tamaño de polvo igual a 0,2 μm (152, 153) se puede afirmar que la condición de aplicación de la corriente (pulsada o no pulsada) durante el proceso de conformado, genera en el material propiedades mecánicas diferentes que afectan la dureza y la resistencia al desgaste de las probetas.

Por otra parte se puede decir que el coeficiente de fricción promedio $\mu_f \approx 0,29$ para todas las muestras, entra en el intervalo de valores típicos reportados por los diferentes autores para el WC. [7,9-10]

En la Tabla IX y XI se reportan los volúmenes gastados por muestra una vez hechos los ensayos de desgaste deslizante. En esta tabla es posible verificar que la muestra 151 presenta el menor volumen desgastado, $2,88 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$, lo cual se corresponde con el valor del coeficiente de fricción calculado previamente para esta muestra, que es igualmente el menor de todo el conjunto estudiado. Es importante señalar que esta muestra presenta el menor tamaño de grano, pudiendo este parámetro asociarse con su mayor resistencia al desgaste.

Tabla IX. Resultados del ensayo de desgaste bajo la configuración Bola sobre disco

Muestra	Factor de Fricción (μ) Promedio	Volumen Gastado Promedio por Muestra (mm³)	Tasa de Desgaste en el Disco (K)
151	0,265	2,88E-04	2,88E-08
149	0,313	3,42E-04	3,42E-08
150	0,291	4,88E-04	4,88E-08
148	0,289	4,65E-04	4,65E-08
153	0,287	3,42E-04	3,42E-08
152	0,307	3,25E-04	3,25E-08

A continuación, la tabla X presenta los resultados correspondientes a las presiones de contacto elástico de Hertz, donde se evidencian grandes esfuerzos cortantes y presiones de contacto elevadas, esto se debe a que las zona de contacto son muy pequeñas, aclarando que las huellas producidas en las bolas (*pinos*) son de forma irregular y no en forma circular (ver capítulo II)

Tabla X. Contacto elástico de Hertz.

E* (MPa)	R (mm)	a (mm)	Po (MPa)	Pm (Mpa)	t (Mpa)	z (mm)
270806,7	3	0,044	2507,61	1671,74	777,36	0,021
E* (GPa)	R (mm)	a (mm)	Po (GPa)	Pm (Gpa)	t (Gpa)	z (mm)
270,81	3000,00	43,64	2,51	1,67	0,78	20,95

Donde:

Po = Presión máxima de contacto.

Pm = Presión promedio de contacto » $Pm = 2/3 Po$

t = Esfuerzo cortante máximo » $t = 0.31Po$ a $x = 0$; $z = 0.48^a$

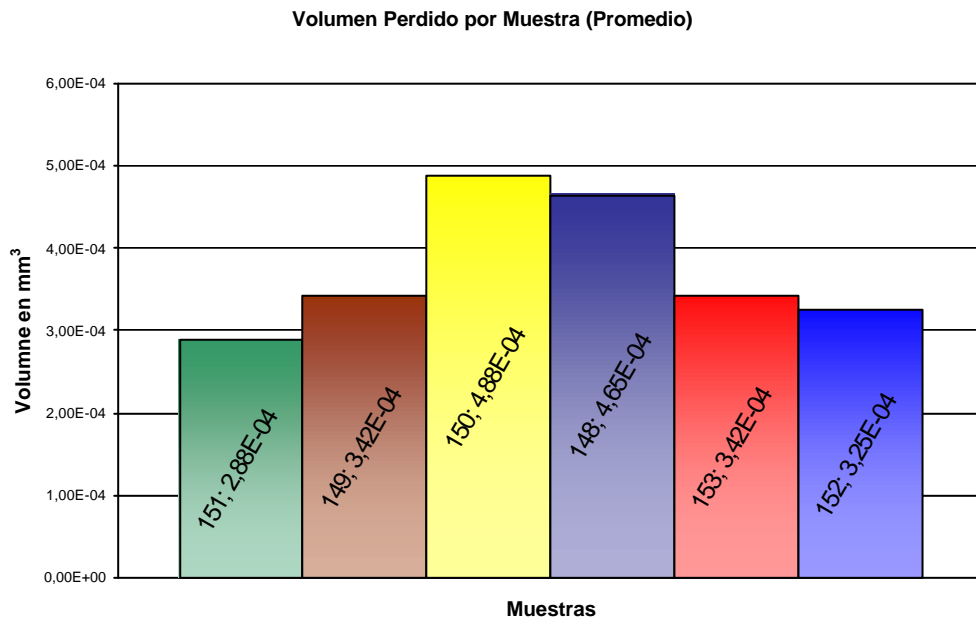
Los valores correspondientes al contacto elástico de Hertz, son idénticos para todas las muestras, ya que estos cálculos se realizaron con valores teóricos

del modulo de Young ($E_{wc} = 695 \text{ GPa}$; $E_{\text{alúmina}} = 400 \text{ GPa}$) y la relación de Poisson ($\nu = 0,25$) para WC y alúmina. [42]

La tabla XI muestra los valores correspondientes al volumen promedio gastado por muestra. Aquí se evidencia poca pérdida de material de las muestras en general.

Tabla XI. Promedio del volumen gastado por muestra.

Muestra	Promedio (mm ³)	Des. Estándar (mm ³)
151	2,88E-04	5,96E-05
149	3,42E-04	2,33E-06
150	4,88E-04	2,93E-04
148	4,65E-04	3,19E-06
153	3,42E-04	1,31E-05
152	3,25E-04	4,32E-05



Gráfica 5. Volumen promedio gastado por muestra.

Es evidente de la Tabla XI y de la Gráfica 5, que las muestras que poseen igual tamaño de polvo, presentan un volumen desgastado muy similar.

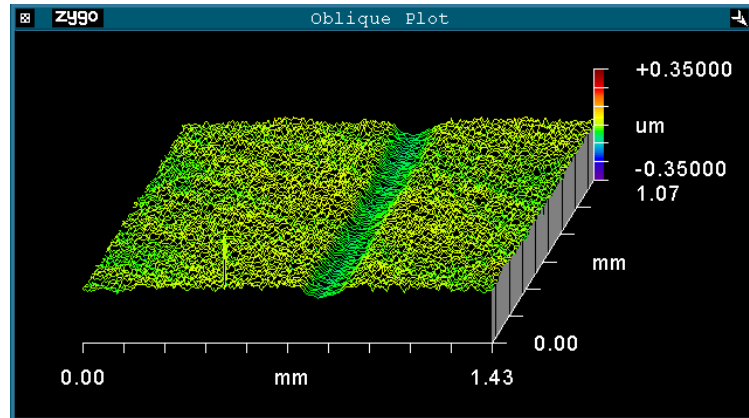
Para las muestras 148 y 150 el desgaste es alrededor de $4,75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$, presentando una pequeña desviación Standard; estas muestras presentan el mayor volumen gastado en comparación al resto de las muestras. Siempre recordando que el tamaño de polvo de estas probetas corresponde a $0,8 \mu\text{m}$, se evidencia un comportamiento inesperado, ya que el resto de las muestras poseen tamaños de polvos de WC mayores y menores a estas, ubicando a las muestras 148 y 150 en un lugar intermedio, y donde se esperaría un volumen gastado de valor intermedio.

Ya que las muestras 148 y 150 están consolidadas a las mismas condiciones de presión y temperatura que el resto de las muestras, podemos decir que este comportamiento no registra un patrón en función del tamaño de polvo, la temperatura de sinterización o la condición de corriente.

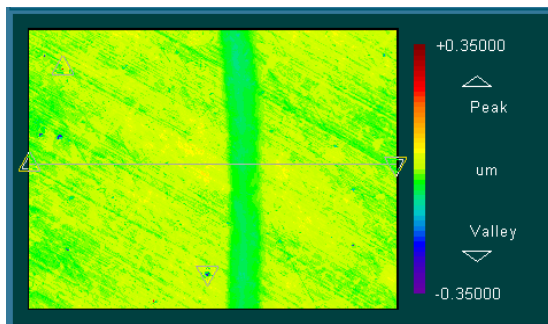
Para las muestras 149, 151, 152 y 153 el volumen gastado es muy similar, sin embargo para las muestras 152 y 153, con tamaño de polvo de $0,2 \mu\text{m}$, muestran la menor desviación estándar, generando casi la misma cantidad de volumen perdido.

En termino generales, el comportamiento de las muestras de estudio, en relación al volumen desgastado no presentan ninguna relación de acuerdo a los parámetros de conformado. Sin embargo, es importante destacar que la muestra 151, ha sido la que presenta las mejores propiedades mecánicas, es decir, para la muestra 151 se registra la mayor dureza ($H_v 30 \text{ Kgf} = 14,95 \text{ GPa}$), generando el menor coeficiente de fricción ($\mu = 0,26$ aproximadamente) y presentando el menor volumen gastado ($2,88 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$) en comparación con todas las muestras estudiadas.

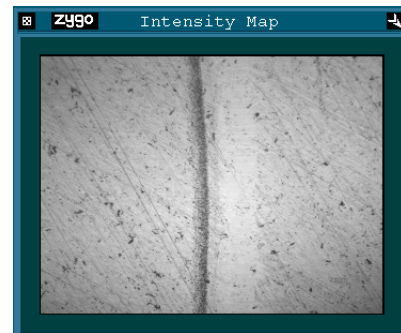
En las figuras 29 a 34 presentadas a continuación se observan las imágenes de las perfilometrias ópticas de la huellas de desgaste:



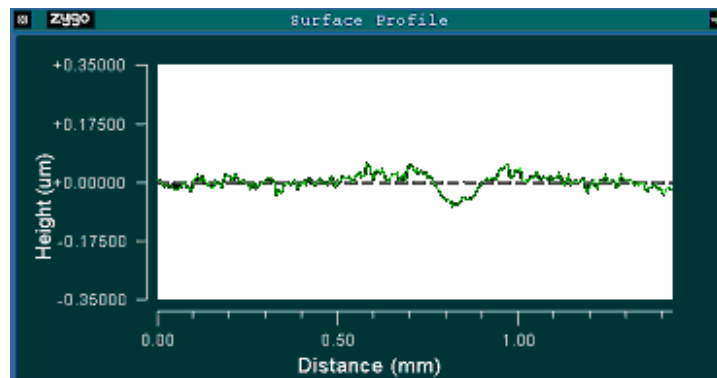
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 29. Huella de desgaste de la muestra 148. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.

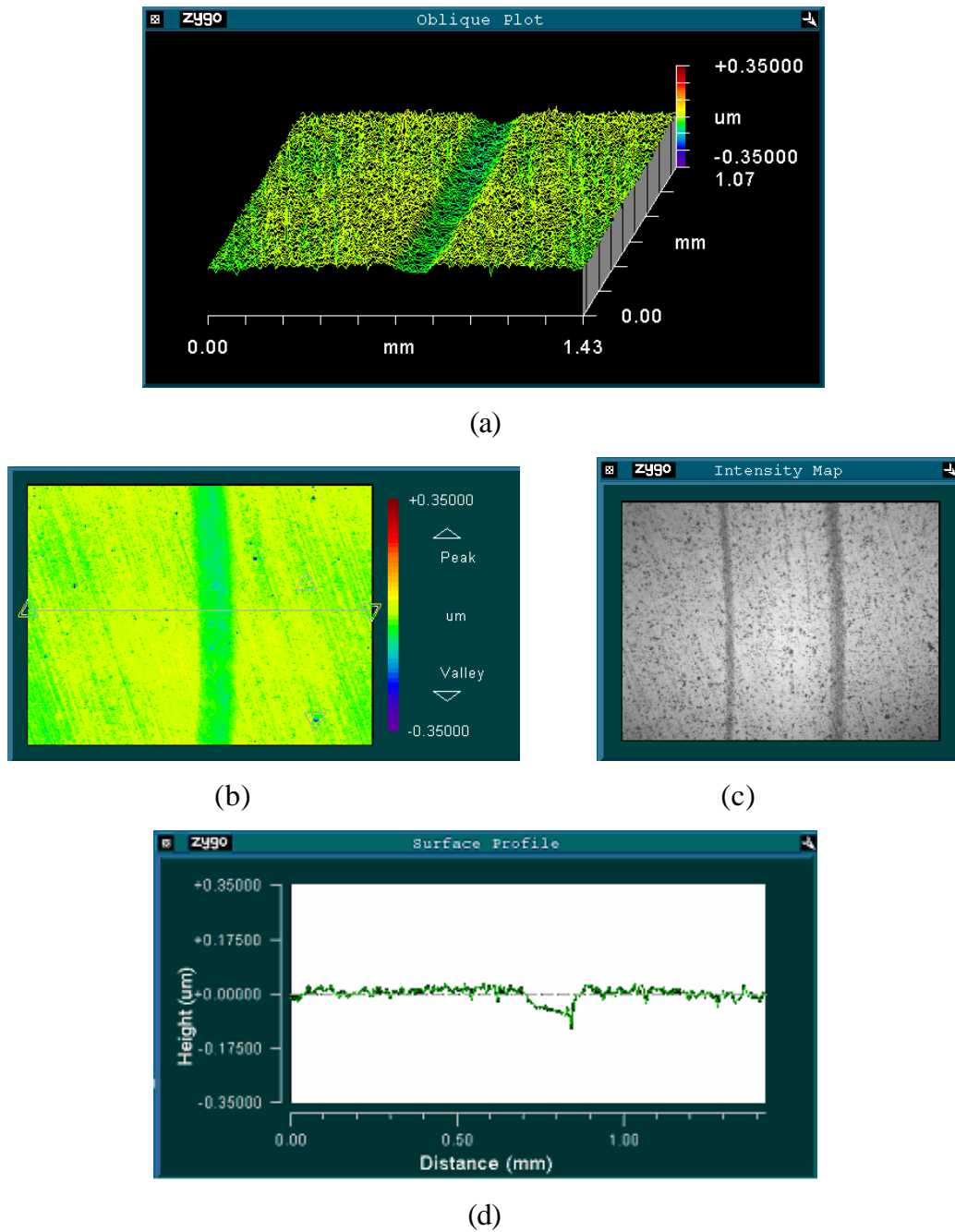
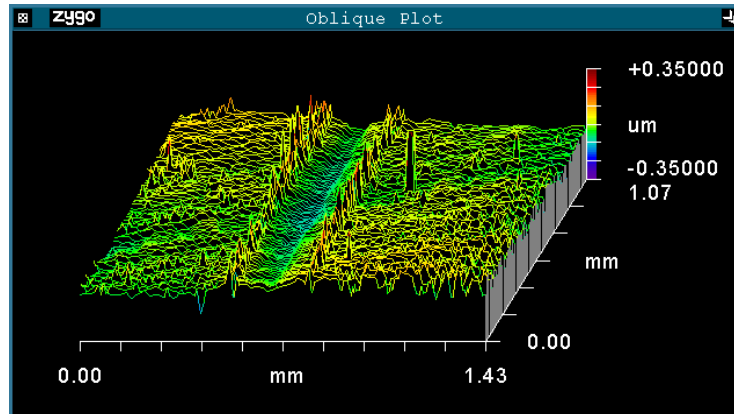
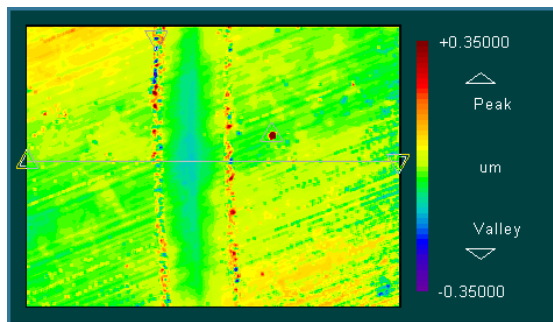


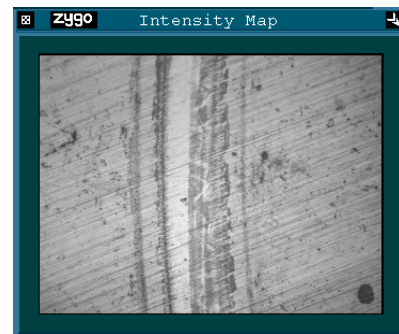
Figura 30. Huella de desgaste de la muestra 149. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.



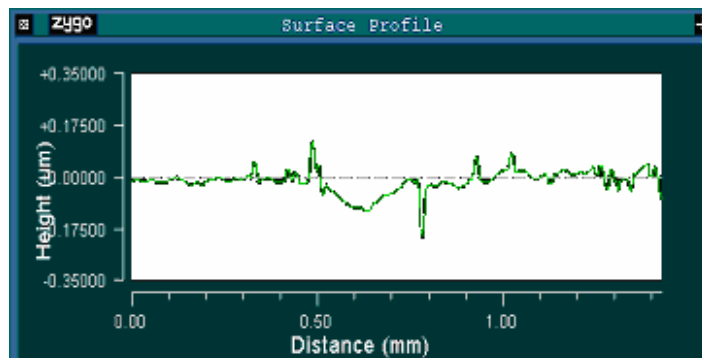
(a)



(b)

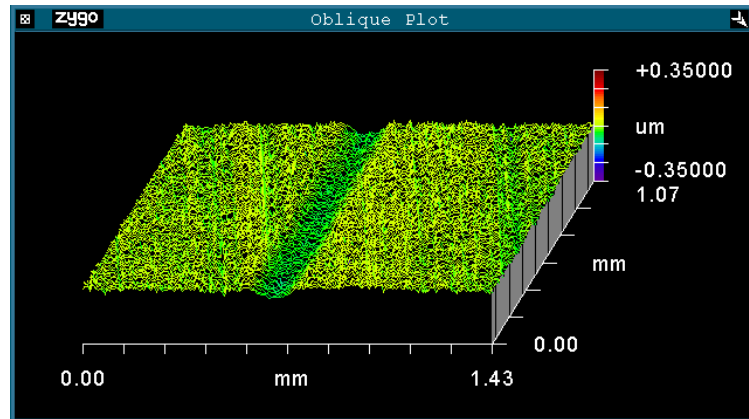


(c)

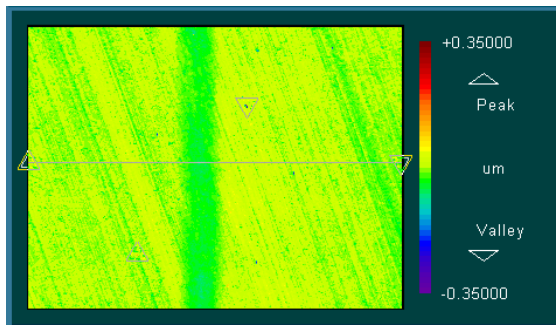


(d)

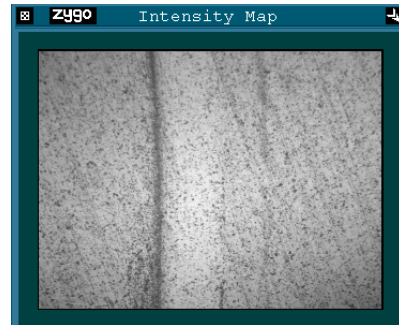
Figura 31. Huella de desgaste de la muestra 150. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.



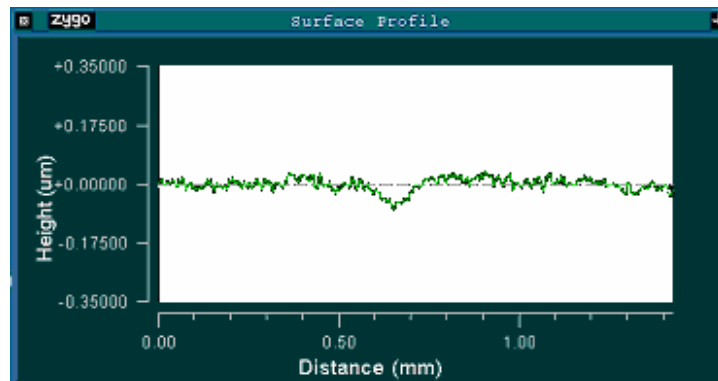
(a)



(b)

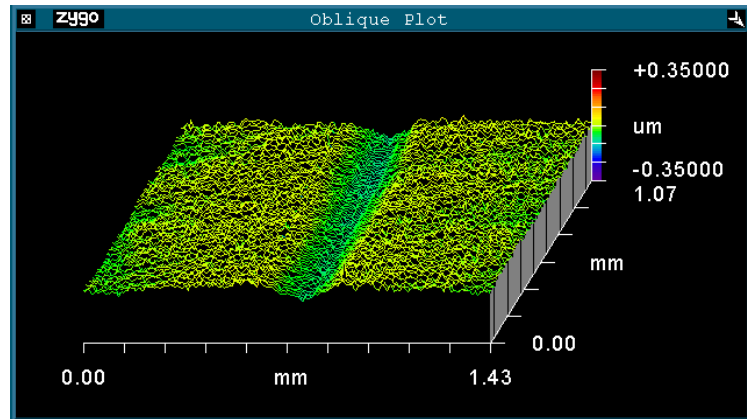


(c)

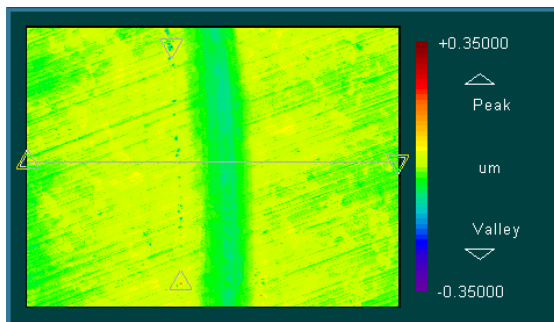


(d)

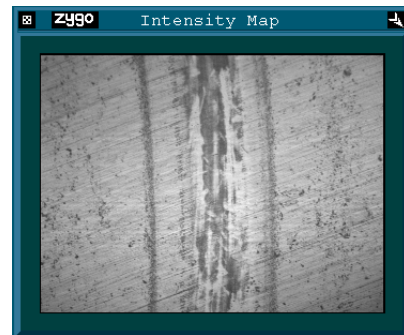
Figura 32. Huella de desgaste de la muestra 151. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.



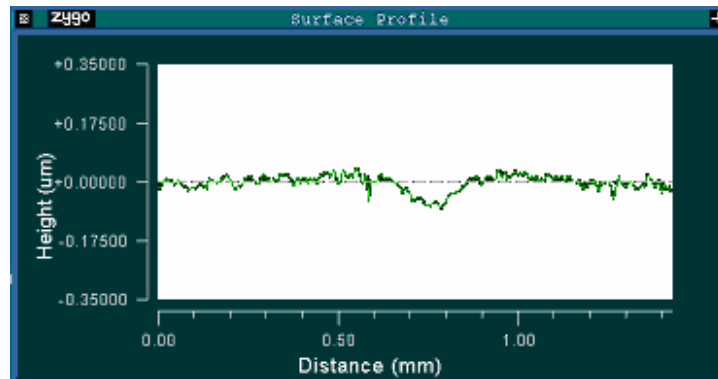
(a)



(b)

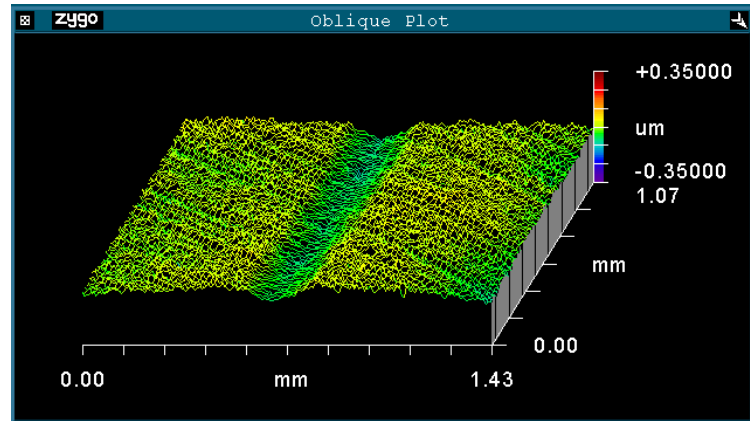


(c)

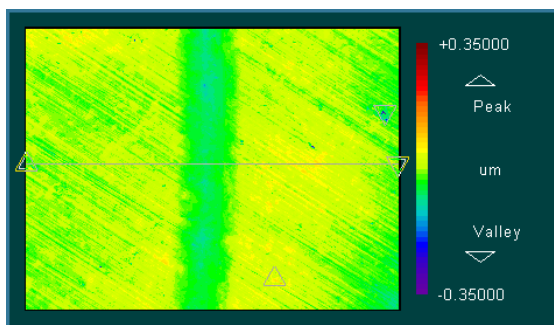


(d)

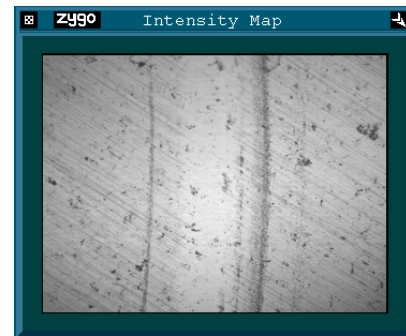
Figura 33. Huella de desgaste de la muestra 152. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.



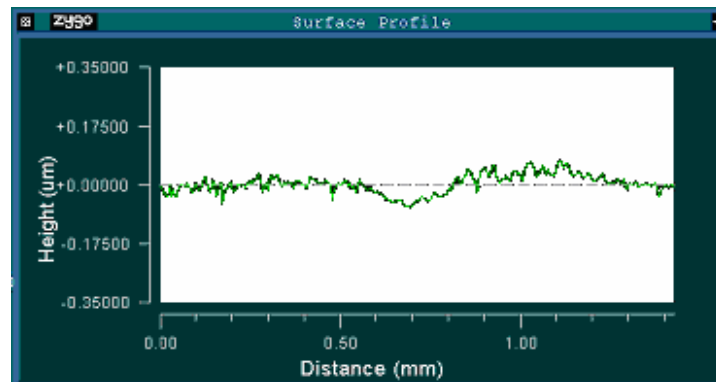
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 34. Huella de desgaste de la muestra 153. (a) Topografía de la Huella de Pin on Disk; (b) superficie de la huella; (c) fotografía de la Huella de Pin on Disk; (d) perfil de la sección transversal de la Huella de Pin on Disk.

Observando las imágenes correspondientes a las perfilometrias ópticas de las huellas de desgaste del ensayo *Pin on Disk*, se evidencia que el desgaste en las muestras es muy leve, el volumen gastado es muy poco y la huella generada no posee una forma geométrica regular (se podría esperar una huella de desgaste con sección transversal de forma semicircular debido a que la Alumina posee mayor dureza que el WC).

De las imágenes correspondientes a la topografía en 3D de la huella generada por la bola (*pin*) sobre la muestra, es claro que la profundidad de la misma, no es muy significativa y en consecuencia genera una pérdida leve de volumen de la probeta.

Comparando las imágenes del perfil de la sección transversal de la huella generada en el ensayo *Pin on Disk*, se evidencia que para cada una de las muestras, el desgaste producido es diferente en términos de forma geométrica. Esto se ratifica si observamos con detenimiento las imágenes correspondientes a las fotos de las huellas, donde se aprecian zonas de color oscuras a los lados de las huellas y en algunos casos también dentro de las huellas de desgaste, estas manchas corresponden a los diferentes mecanismos de desgaste cuál y fenómenos analizados más adelante mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

Las imágenes correspondientes a la superficie de la huella de desgaste, muestran que el ancho de las huellas no es igual para las muestras, por el contrario, se observó que una misma muestra y en diferentes zonas de la huella de desgaste, el ancho de la misma varía, permitiéndonos decir que el desgaste no es totalmente regular a lo largo de dichas huellas.

Por otra parte la observación de las bolas en la lupa estereográfica y el sistema analizador de imágenes, mostraron desgaste irregular en las mismas, es decir, la huella de desgaste en los pines no se presentó de forma circular, sino que se observó una raspadura y rayado en la zona de contacto con la muestra

durante el ensayo de desgaste. Ello permite inferir que el mecanismo de desgaste en las bolas fue principalmente de tipo abrasivo

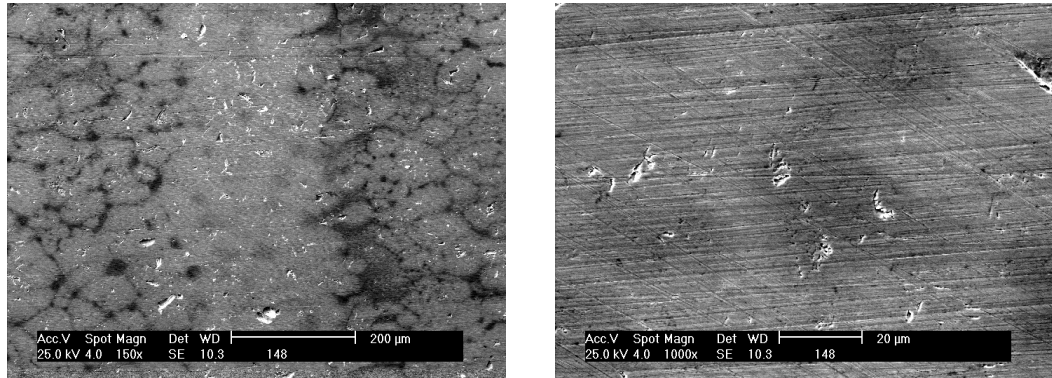
Caracterización de los Mecanismos de desgaste en las muestras

En el presente análisis se trata separadamente el caso de la bola (*pin*) y el del disco, ya que ambos componentes se encuentran sometidos a diferentes condiciones de esfuerzos. Por una parte, la bola (*pin*) se ve sometida a un esfuerzo continuado, que varía solamente a medida que el área de contacto con la superficie del disco va incrementándose. Así mismo, la temperatura a la cual está sometido es más o menos constante, una vez alcanzadas las condiciones estacionarias del ensayo. En cambio, el disco se encuentra en otras condiciones muy diferentes. Si se toma un punto de la superficie del disco en contacto con la bola (*pin*) en concreto, existe un esfuerzo máximo cada vez que este punto entra en contacto con la bola (*pin*). De esta manera aparecerá una componente de fatiga mecánica debido a los cambios de tensión aplicada en ese punto.

Hay que tener en cuenta también el efecto cizallante que la bola (*pin*) ejerce sobre el disco. Debido a la presión ejercida por la bola (*pin*) sobre el disco en condiciones de deslizamiento, existe un esfuerzo que tiende a ocasionar la nucleación y propagación de grietas en la región dejada detrás de sí en el disco tras el avance de la bola (*pin*). Este mecanismo corresponde al usualmente denominado desgaste adhesivo.

Debido a que el estado de tensiones en el disco y en la bola (*pin*) es diferente, la observación mediante MEB de las superficies del disco reveló diferentes mecanismos de desgaste.

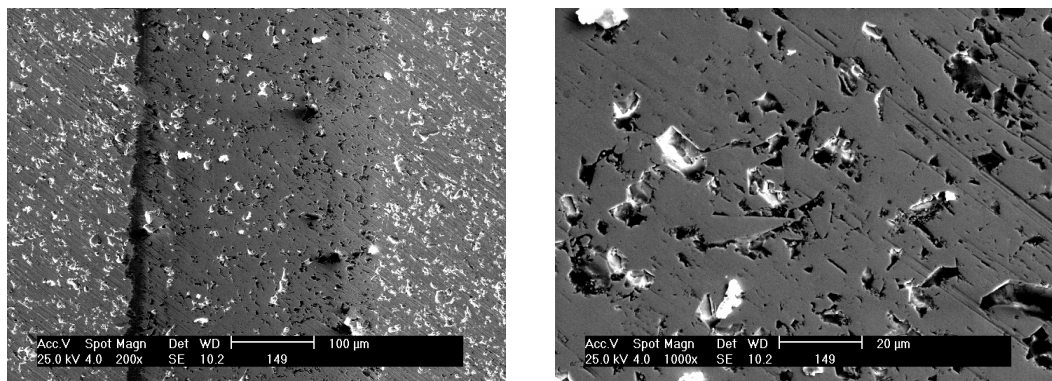
A continuación, se presentan las imágenes de MEB de las muestras 148 y 149 donde se evidencia el desgaste de tipo adhesivo y abrasivo principalmente.



(a)

(b)

Figura 35. Huella de desgaste de la muestra 148. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundarios.



(a)

(b)

Figura 36. Huella de desgaste de la muestra 149. (a) MEB a 200x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.

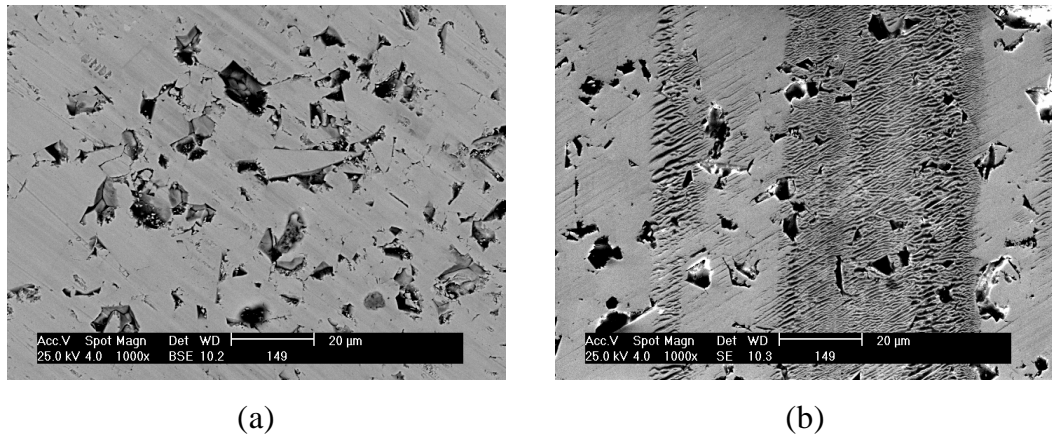


Figura 37. Huella de desgaste de la muestra 149. (a) MEB a 1000x en Backscattered; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.

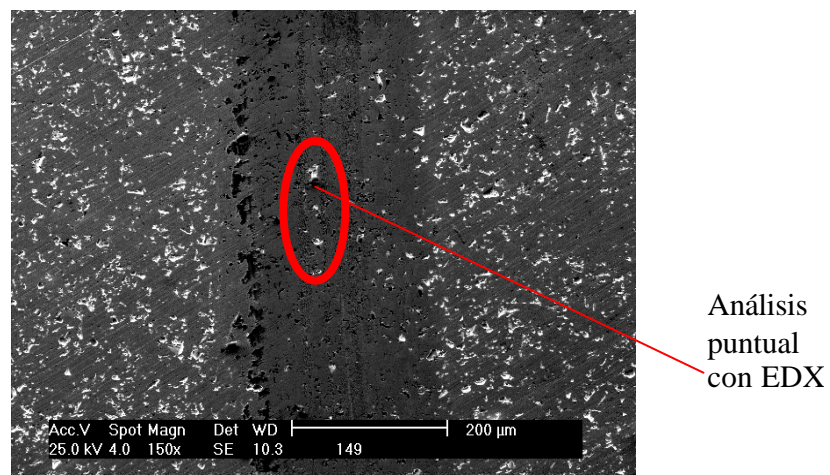
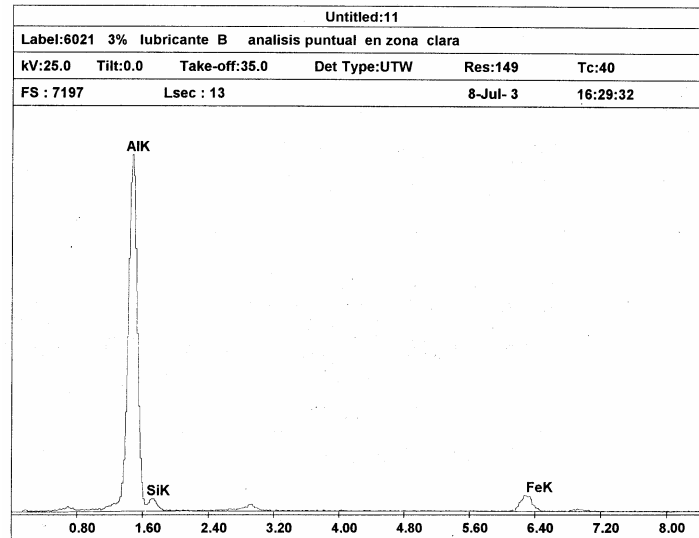
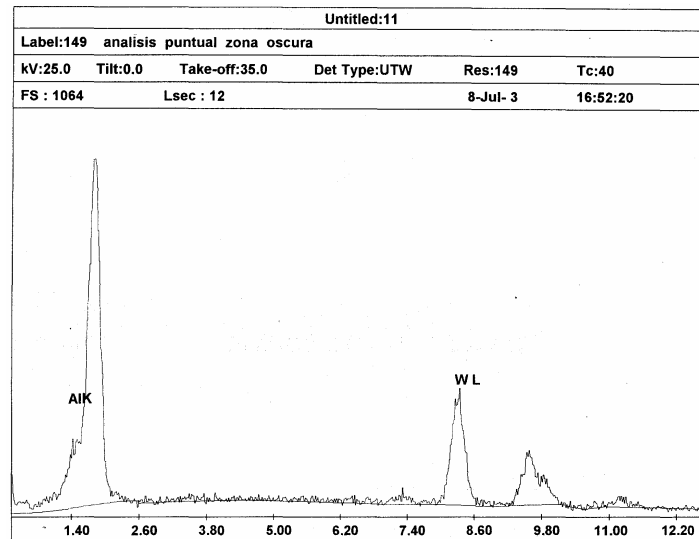


Figura 38. Huella de desgaste de la muestra 149; MEB a 150x en electrones secundario.

En la zona dentro del círculo rojo se realizó un análisis puntual mediante EDX, que se muestra a continuación.



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
AlK	83.17	86.32	0.7112	1.0010	0.8523	1.0023
SiK	10.56	10.53	0.0282	1.0307	0.2589	1.0001
FeK	6.28	3.15	0.0565	0.9203	0.9786	1.0000
Total	100.00	100.00				



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
AlK	9.54	41.80	0.0582	1.2114	0.5034	1.0000
W L	90.46	58.20	0.8738	0.9588	1.0075	1.0000
Total	100.00	100.00				

Figura 39. Análisis puntual (EDX), Huella de desgaste de la muestra 149.

Para la muestra de tamaño de polvo igual a 0,8 μm conformada sin pulsación en la corriente y consolidada a 1700 °C (probeta 148), la figura 41 (a) nos muestra el tipo de huella generada. En la imagen correspondiente a la figura 41 (b) se evidencia un desgaste leve, en el cual se aprecia claramente que persisten las marcas del desbaste realizado en la preparación de las muestras, también se puede considerar, el desprendimiento de algunos granos. Para esta muestra el mecanismo predominante de desgaste es de tipo abrasivo. Se puede decir que la bola (*pin*) generó un pulido en el área correspondiente a la huella del ensayo de desgaste acelerado bajo configuración bola sobre disco (*Pin on Disk*).

En la figura 42 (a) se aprecia la huella generada en la muestra de tamaño de polvo igual a 12 μm y condición de corriente sin pulsación, conformada a 1750 °C (probeta 149), la figura 42 (b) y 43 (a), nos muestran un desprendimiento de los granos que forman este sólido, así mismo, se observa las rayas y orientación de las marcas producidas durante la pulitura de la muestra. Es claro que la bola (*pin*) produjo, al igual que en caso anterior (muestra 148) un tipo de pulido de la superficie de la huella de desgaste.

En esta muestra se presentan dos mecanismos de desgaste principales, abrasivo y adhesivo. El desgaste de tipo abrasivo, en principio es de tres cuerpos, ya que los granos desprendidos y las partículas de Alumina liberadas por la bola (*pin*), forman los “*debris*” que a su vez erosionan y producen fatiga mecánica en la muestra. Por otra parte estos “*debris*”, luego de varios metros de recorrido, se adhieren a la muestra, generando un desgaste de tipo adhesivo. Esto es posible, debido a la presión que ejerce la bola (*pin*) sobre la muestra, alcanzándose un valor de presión máxima en el centro de la huella.

La imagen 43 (b), de MEB a 1000x en electrones secundario, nos muestra un fenómeno de desgaste presente en todas las muestras en estudio, este tipo de desgaste que se presenta en la zona central de las huellas, y podría

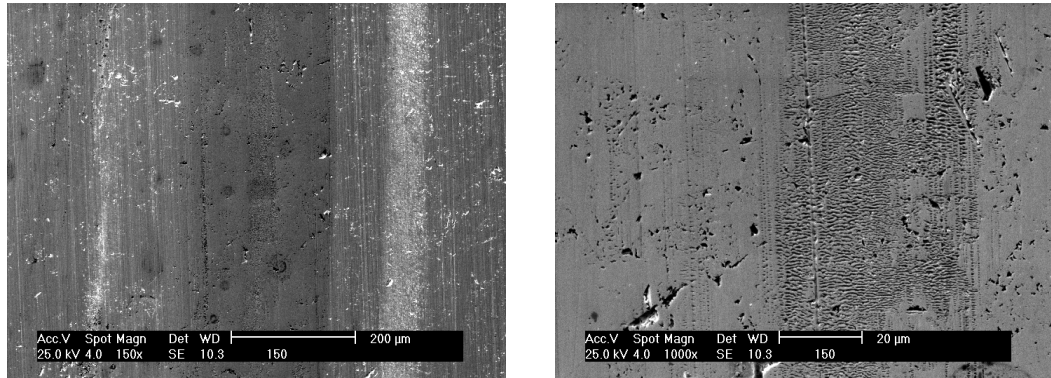
explicarse debido a la presión máxima de contacto. Aquí se observa que a medida que la bola (*pin*) recorre la muestra, se generan micro grietas o separación de los granos que conforman el sólido, a su vez estas microgrietas o granos son empujados en la dirección de avance de la bola (*pin*), produciéndose una especie de aplastamiento y aglomeración de las microgrietas. Esto es lo que se observa en dicha imagen

La figura 44 y 45 nos presentan el análisis puntual evaluado en la huella mediante EDX, el cual nos muestra la presencia de Aluminio en la muestra en estudio. Esto nos permite confirmar que la transferencia de material ocurrió tanto de la muestra a la bola (*pin*), como de la bola (*pin*) a la muestra. Pero es evidente que este último proceso de transferencia de material se efectuó a menor escala que la transferencia de WC al pin.

Es importante destacar, que debido a que la dureza de la Alumina igual a 15 GPa [11], y la mayor dureza reportada para el WC resulto igual a 14,95 GPa; la formación de los “*debris*” es principalmente de WC ya que este es el material mas blando, permitiendo a su vez la transferencia de WC a la bola de Alumina.

Los “*debris*”, causan deformación plástica y remoción de material dejando surcos en la superficie de la muestra, pero luego de algunos metros de recorrido durante el ensayo (aproximadamente después de 300 m) este material se adhiere a la superficie de la bola (*pin*) y la muestra, generando el ya mencionado desgaste adhesivo; es por ello que de la grafica 4 correspondiente al ensayo de desgaste acelerado (*Pin on Disk*), se observa estabilidad y valores casi constantes de coeficiente de roce, ya que una vez transferido WC al pin, las superficies en contacto son prácticamente del mismo material.

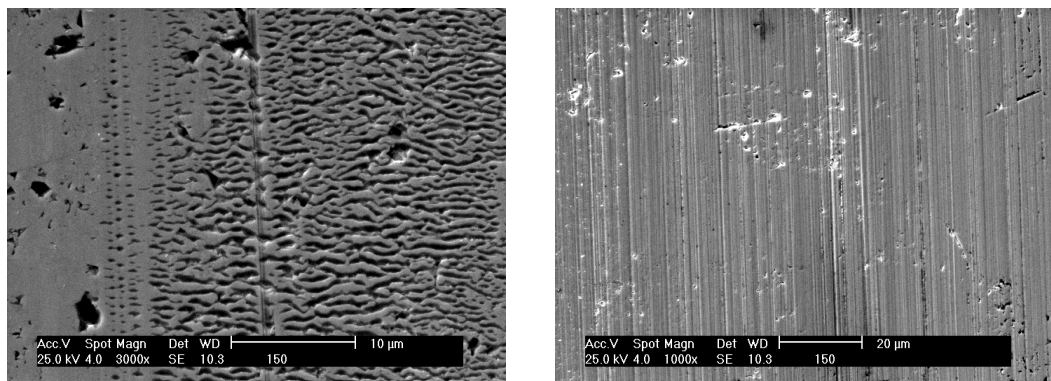
Seguidamente, se muestran las imágenes de MEB de las muestras 150, 151, 152 y 153 donde se evidencia el desgaste de tipo adhesivo y abrasivo principalmente.



(a)

(b)

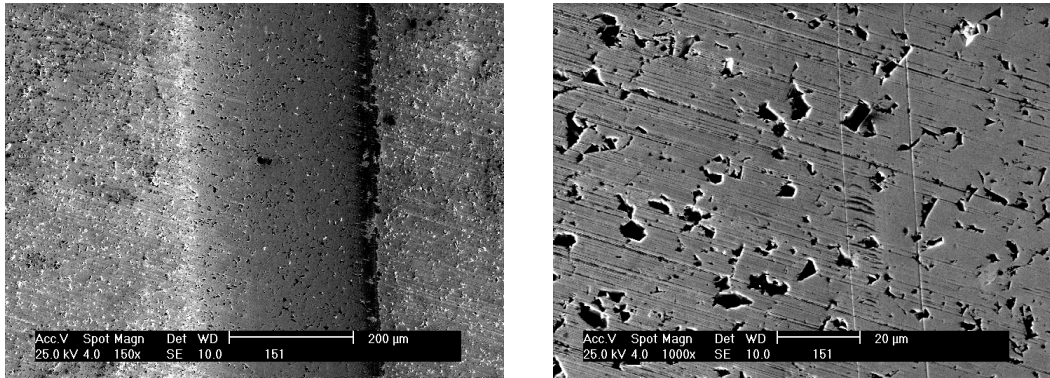
Figura 40. Huella de desgaste de la muestra 150. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.



(a)

(b)

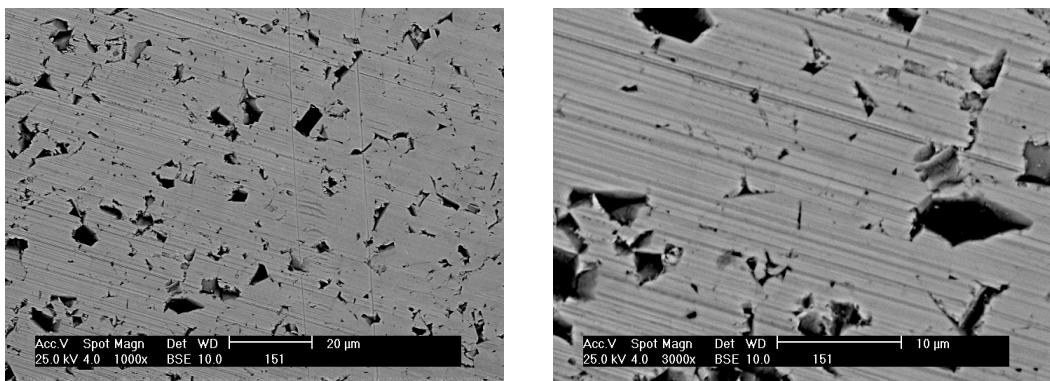
Figura 41. Huella de desgaste de la muestra 150. (a) MEB a 3000x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.



(a)

(b)

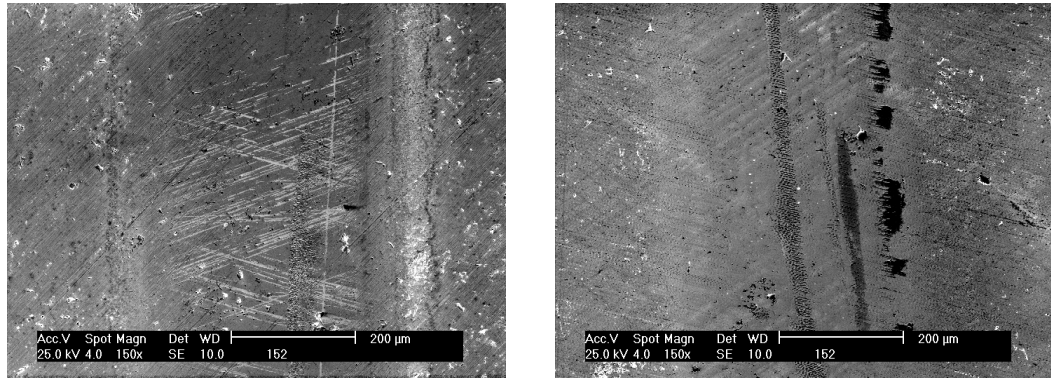
Figura 42. Huella de desgaste de la muestra 151. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.



(a)

(b)

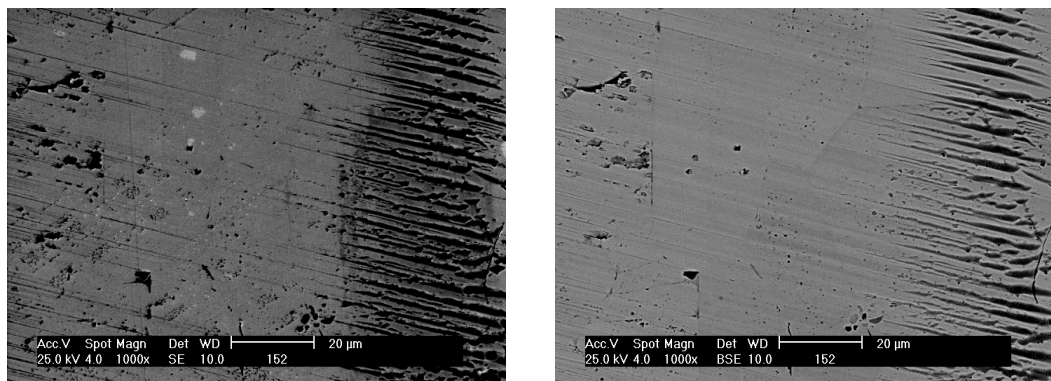
Figura 43. Huella de desgaste de la muestra 151. (a) MEB a 1000x en Backscatiered; (b) MEB a 3000x en Backscatiered.



(a)

(b)

Figura 44. Huella de desgaste de la muestra 152. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 150x en electrones secundario.



(a)

(b)

Figura 45. Huella de desgaste de la muestra 152. (a) MEB a 1000x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en Backscattered.

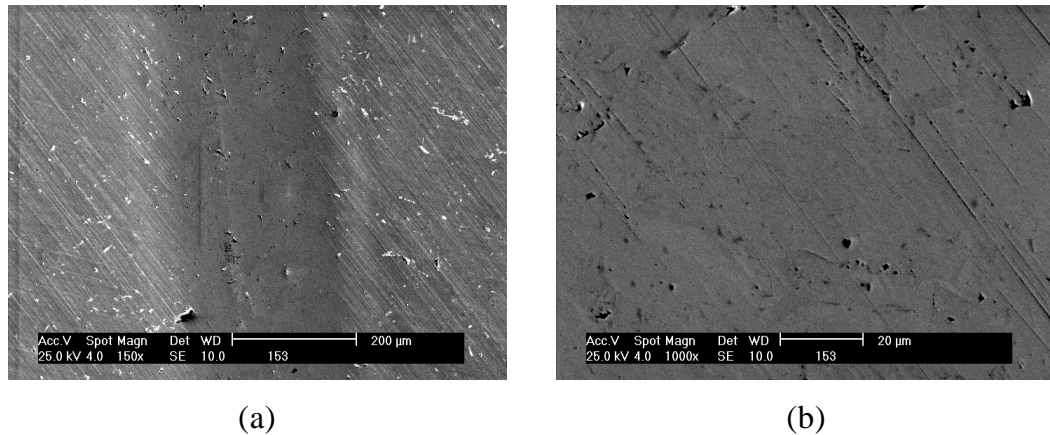


Figura 46. Huella de desgaste de la muestra 153. (a) MEB a 150x en electrones secundarios; (b) MEB a 1000x en electrones secundario.

En el presente estudio se propone que es la nucleación y la propagación de grietas debajo de la superficie, la causante del desprendimiento de partículas de material, de acuerdo a lo propuesto por Hertz en su teoría. Este se da principalmente en el disco, por ser el elemento sujeto a condiciones más extremas (la bola (*pin*) ejerce sobre él una presión que daña su superficie). En el disco, la nucleación de grietas se da en un punto alejado de la superficie (de profundidad igual a 0,48 veces el radio zona de contacto), en el cual la tensión de Von Mises es máxima, como ya se explicó en el Capítulo II (ver Figura 5). Estas grietas van creciendo hasta llegar a la superficie por efecto de la presión ejercida por la bola (*pin*), hasta que se produce el desconche del material (ver Figura 43). [10]

Como se mencionó anteriormente la formación de partículas de desgaste grandes durante el ensayo, puede producir desgaste abrasivo de tres cuerpos. Esto se puede observar en las Figuras 40-46, donde las regiones más claras y lisas corresponden a un desgaste de la superficie por abrasión o arado de las partículas, que causa deformación plástica y remoción de material dejando surcos en la superficie (*ploughing*). [43]

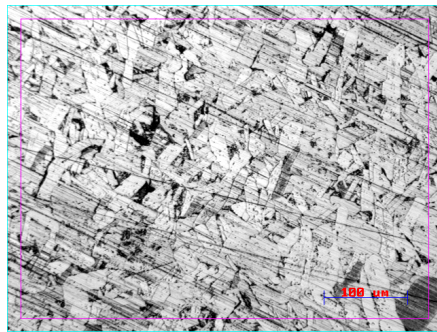
La adhesión y la transferencia de metal seguido por la formación de “*debris*” son los mecanismos que controlan el desgaste, los cuales resultan en un alto desgaste del carburo de tungsteno (WC) durante el contacto con una contraparte de Alumina. Esto se corrobora con las curvas de fricción (gráfica 4), las cuales presentan fluctuaciones en mayor grado en los primeros metros de recorrido del ensayo de desgaste acelerado (*Pin on Disk*), por lo que a medida que se incrementa la distancia de deslizamiento la adhesión aumenta y se controla el desgaste, generando un comportamiento casi constante del factor de fricción μ .

Medición del Tamaño de Grano

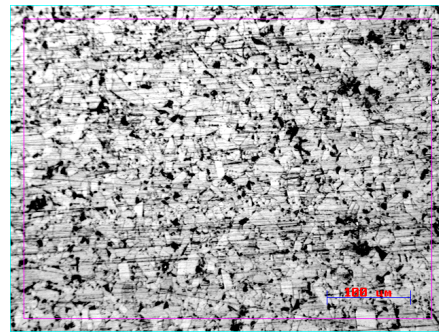
Como ya se ha mencionado, el tamaño de grano promedio de los polvos que conformaron las muestras corresponden a 12; 0,8 y 0,2 μm . Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, se procedió a realizar la caracterización morfológica de las muestras consolidadas. La medición de los tamaños de grano se realizó atacando la superficie de todas las muestras con solución *MURAKAMI* (50 mg de NaHO + 50 mg $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ en 100 ml de agua destilada) que permitió revelar el tamaño de las partículas aglomeradas y su medición empleando la técnica de análisis de imágenes y el método del intercepto lineal.

Es importante aclarar que al hablar de tamaño de grano en este estudio, nos referimos a los polvos o partículas que conforman las muestras y no a las partículas obtenidas por la nucleación y/o cristalización, como consecuencia de una solidificación (como ocurre con los metales en estado líquido).

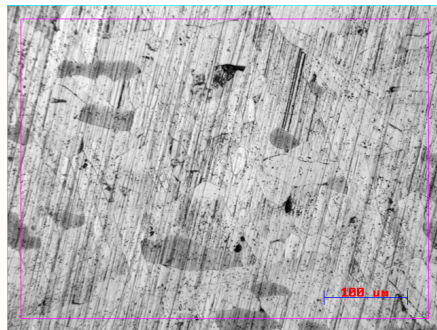
A continuación se presenta las fotomicrografías correspondientes al conteo de granos.



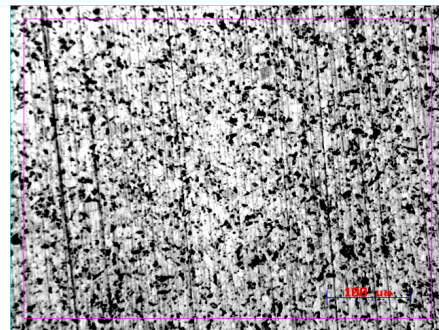
(a)



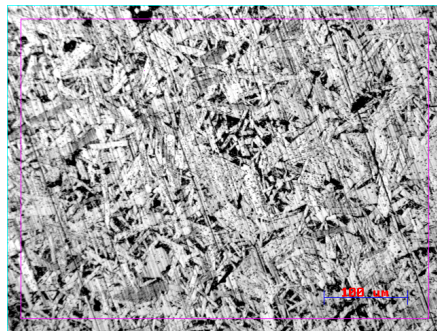
(b)



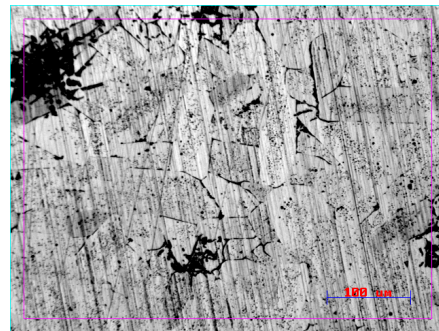
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 47. Fotomicrografía a 200X; (a) muestra 148; (b) muestra 149; (c) muestra 150; (d) muestra 151; (e) muestra 152; (f) muestra 153.

En las imágenes se observa que las partículas, en general, no presentan una geometría regular. Sin embargo, se observa con claridad que no existe una dirección de orientación de dichos granos

En esta investigación se plantea la formación de granos de mayor tamaño durante el proceso de sinterización; constituidos o formados a partir de los polvos de menor tamaño originalmente; es decir, las muestras conformadas con tamaño de polvo de WC igual a 0,2 y 0,8 μm ; presentan granos de tamaño mayor que varían de 14 a 30 μm . Las observaciones visuales y las ampliaciones, revelaron mayor crecimiento de grano en las muestras consolidadas en condición de corriente pulsada. [39]

Este proceso de formación de granos grandes a partir de los polvos más finos, pudiera estar relacionado con el hecho de que los polvos mas finos poseen un área de contacto mayor, la compactación de los polvos durante la aplicación de presión en el proceso de sinterización, genera una fuerte cohesión de un conjunto de estos granos finos (esto puede estar relacionado a las fuerzas de tensión superficial), formando los granos de mayor tamaño y estos a su vez conforman las muestras en estudio.

En las muestras con tamaño de polvo o grano igual a 12 μm , el comportamiento es distinto; aquí se observa una disminución del tamaño de grano, siendo una causa posible la presión ejercida durante la compactación la causante de esta reducción del tamaño de grano o polvo.

Una observación importante es el hecho de que las muestras de tamaños de granos finos correspondientes a 0,2 y 0,8 μm y sinterizados con la condición de corriente pulsada generan granos más grandes que las muestras que se consolidaron con los mismos polvos pero sin la aplicación de la corriente pulsada.

Este comportamiento se puede analizar mejor en la Tabla que se presenta a continuación:

Tabla XII. Tamaños de Granos.

Material Inicial		Condiciones de las Pulsaciones					Tamaño de grano	
Muestra	Polvo	Frecuencia	Ciclos	Corriente	Presión	Tiempo	Promedio (μm)	Desv. Std.
PP151	(12 μm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	8,33	0,01
PP149	(12 μm)	SIN PULSACIÓN					10,17	0,01
PP150	(0,8 μm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	22,22	0,01
PP148	(0,8 μm)	SIN PULSACIÓN					14,63	0,01
PP153	(0,2 μm)	60 Hz	50	1000A	10 MPa	3 min.	30,00	0,01
PP152	(0,2 μm)	SIN PULSACIÓN					14,36	0,02

Como se puede observar, en el caso de las muestras de tamaño de polvo igual a 12 μm, el patrón de comportamiento cambia. Se piensa que la condición de corriente pulsada genera una leve reducción del tamaño de las partículas aglomeradas, con mayor proporción para la condición de corriente pulsada. Este comportamiento pudiese estar relacionado con el aumento de la presión y de la temperatura durante la generación del plasma en la condición de corriente pulsada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- La Consolidación a alta temperatura y aplicación de una corriente DC en condición de pulsos influye muy poco en el valor de la dureza del material.
- En términos generales se puede decir que la dureza decrece al aumentar la carga, pero el comportamiento de las muestras no presenta ningún tipo de orden en relación al tamaño de polvo.
- Para las muestras de igual tamaño de polvo, la compactación con corriente pulsada les confiere una dureza mayor en comparación a las muestras compactadas sin pulsación en la corriente.
- La tenacidad de fractura de este sólido, es dependiente de las condiciones y parámetros de consolidación de las muestras.
- Se encontró que las condiciones del proceso de conformado, tienen una influencia pequeña en el desgaste de las muestras.

- Las muestras conformadas con tamaño de polvo de WC igual a 0,2 y 0,8 μm presentan granos de tamaño mayor que varían de 14 a 30 μm . Las observaciones por microscopía óptica revelaron mayor crecimiento de grano en las muestras consolidadas en condición de corriente.
- El coeficiente de fricción promedio reportado para los ensayos de los pares tribológicos de WC y Alumina varía en un intervalo de 0,2801-0,3395.
- Las muestras de WC ensayadas con bolas de Alumina, presentaron una resistencia al desgaste baja, con valores de constante de desgaste en el orden de $10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.
- Los mecanismos de desgaste observados para las muestras de WC frente a contrapartes de Alumina fueron de tipo abrasivo y adhesivo, con transferencia de material mayormente de la muestra hacia las bolas.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Evaluar el comportamiento ante la corrosión de las muestras.
- Evaluar mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), las bolas (*pines*) utilizadas para cada uno de los ensayos de desgaste deslizante “*Pin on Disk*”, para obtener imágenes de los mecanismos de desgastes presentes en el mismo
- Estudiar el comportamiento tribológico en las mismas condiciones de ensayo de muestras de WC con bolas (*pines*) de Si₃N₄.
- Realizar estudios de distribución por área de los elementos constituyentes “mapping” mediante espectroscopía de microanálisis (EPMA), para determinar la existencia o no de oxígeno.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

1. SANTHANAM, A.T; TIERNEY, P; HUNT J.L. (1990). “Cemented carbides”. A.S.M. HANDBOOK, Volume 2, Properties and selection: nonferrous alloys and special propose materials. A.S.M. International. U.S.A. pp 950-977.
2. YAO, ZHENGUI; STIGLICH JACOB J. and SUDARSHAN, T. S. “Nano-grained Tungsten Carbide-Cobalt (WC/Co)”. Materials Modification, Inc. 2929 Eskridge Road, P-1 Fairfax, VA 22031.
3. QUINTON BOWLES C. (1996). “Fracture and Structure”. A.S.M. HANDBOOK, Volume 19, Fatigue and fracture. A.S.M. International. U.S.A.
4. ALMOD, E.A. (1981). “Deformation characteristics and mechanical properties of hard metals”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 517-562.
5. ALMOD, E.A. and ROEBUCK, B. (1981). “Extending the use of indentation tests”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 597-614.

6. BOUAOUADJA, N; HAMIDOUICHE, M; OSMANI H; FANTOZZI G. “Fracture toughness of WC-Co cemented carbides at room temperature”. Journal of materials science letters. Vol. 28. N° 13. (1994). pp 17-19.
7. LANDES, John D. (1996). “Fracture toughness testing”. A.S.M. HANDBOOK, Volume 19, Fatigue and fracture. A.S.M. International. U.S.A. pp 393-409.
8. BROOKES, C.A. (1981) “Hardness measurements in the evaluation of hard materials”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 181-199.
9. CHICOT D., PERTUZ A., ROUDET F., STAIA M.H. AND LESAGE J. (2003). “Crack profiles and fracture toughness determination by Vickers indentation”. Laboratoire de Mécanique de Lille, CNRS UMR 8107, U.S.T. Lille, IUT A GMP, Rue de la Recherche – 59 653 Villeneuve d’Ascq, France.
10. MCLAREN, T. and LAMBERT, J.B. (1981). “Fracture toughness as an aid to alloy development”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 689-707.
11. OSTERSTOCK, F. and CHERMANT J.L. (1981) “Some aspects of the fracture of WC-Co composites”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 615-629.

12. ROWCLIFFE, D.J. (1981) “Indentation damage in tungsten carbide and tungsten-titanium carbide”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwddham R.K. pp 155-168.
13. SAKAI M. And BRADT R.C. “Fracture toughness testing of brittle materials”. International Materials Reviews. (1993). Vol 38. N° 2, pp 53-78.
14. WARREN and MATZKE H. (1981). “Indentation testing of broad range of cemented carbides”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwddham R.K. pp 563-582.
15. WARREN P.D. “Determining the fracture toughness of brittle materials by Hertzian indentation”. J. Euro. Ceram Soc. (1995). Vol. 15. N° 15, pp 385-394.
16. RAY K.K. and DUTTA A.K. “Comparative study on indentation fracture toughness evaluations of soda-lime-silica glass”. British Ceramic Transactions, (1999). Vol. 98, N° 4. pp 165-171.
17. LOPEZ CANTERA E; MELLOR B.G. “Fracture toughness and crack morphologies in eroded WC-Co-Cr thermally sprayed coatings”. Materials Letters, (1998). Vol. 92, N° 37, pp 201-210.
18. FORLERER, Elena. (2001). “Tribología y Recubrimientos”. Curso latinoamericano de procesamiento de materiales por plasma CNEA-JICA. Buenos Aires, pp. 275-293.

19. WILLIAMS, J.A. (1994) “Engineering tribology”. Oxford, Science Publications. E.E.U.U. N.Y.
20. SCUSSEL, Henry J; VALENTIE, GTE. (1992). “Friction and wear of cemented carbides”. A.S.M. HANDBOOK, Volume 18, Friction, lubrication and wear technology. A.S.M. International. U.S.A. pp 795-811.
21. KENNETH, Holmberg; ALLAN, Matthews. (1994) “Coatings tribology. Properties, techniques and applications in surface engineering”. Elsevier Science B.V. Amsterdam. Editor: Dowson D.
22. HONG, J. and GARLAND J. (1981). “A study of the fracture process of WC-Co alloys”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 649-669.
23. LARSEN-BASSE. (1981). “Resistance of cemented carbides to sliding abrasion”. Science of Hard Materials, Edition: Viswanwdham R.K. pp 797-813.
24. FISCHER, T.E; Jia, K. (1997). “Sliding wear of conventional and nanostructure cemented carbides”, Wear 203-204, pp 310-318.
25. PERROTT, C.M. (1979). “Tool materials for drilling and milling”
26. KINDERMANN, SCHLUND, SOCKEL, HERR, HEINRICH, GÖRTING, SCHLEINKOFER. (1998). “High temperature fatigue of

cemented carbides under cyclic loads”. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1998; pp.55-68.

27. ARENAS, Freddy. “Influencia del diseño de microestructura sobre la resistencia al desgaste en materiales duros de carburos cementados”. Caracas. Instituto Universitario de Tecnología. Departamento de Tecnología de materiales. (S. F.)
28. DI PRINZIO, Ana. (1994). Trabajo de Ascenso, “Caracterización de diversos carburos cementados de producción nacional”, Caracas. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales.
29. CARRASQUERO, Edwuin. (1999). “Caracterización microestructural y tribológica de un revestimiento industrial de WC-Co obtenido por deposición vía HVOF”. Trabajo especial de grado. Caracas. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales.
30. CARDELLACH, Marta. “Desgaste de Carburos Cementados” Bachelor in Materials Science" from the Universitat Politècnica de Catalunya in Barcelona. Universidad Politecnica de Catalunya ETSEIB, Departamento de Ciencia de los Materiales Avda. Diagonal 647 E-08028 Barcelona, España.
31. ELLIS, John L. (1990). “Cermets”. A.S.M. HANDBOOK, Volume 2, Properties and selection: nonferrous alloys and special propose materials. A.S.M. International. U.S.A. p-978.

32. MOLERA, P. (1977). “Introducción a la Pulvimetría”, Ediciones Bellaterra S.A. Barcelona España.
33. ROMANOVA, N; CHEKULAEV, P; DUSEV, V; LIFSHITZ, T; KURDOV M. (1972). “Sintered Metal Carbides”. Mir Publishers. Moscow.
34. SKAUPY, Franz. (1960). “Cerámica de los Materiales”, Barcelona (España), Editorial Reverte S.A.
35. GROOVER, M. (1997). “Fundamentos de Manufactura Moderna”, Editorial Prentice Hall, México.
36. CONAWAY, Robert M. “Isostatic Forging”. Advanced Materials & Processes. Vol. 6, N° 6. (1989). pp 35-39.
37. YOO SANG H; SUDARSHAN, T.S; SETHURAM, Krupa; SUBHASH, Ghatu; DOWDING, R.J; “Dynamic compression behavior of tungsten powers consolidated by plasma pressure compaction (P²CTM)”.
38. YOO SANG H; SUDARSHAN, T.S; SETHURAM, Krupa; SUBHASH, Ghatu; DOWDING, R.J; “Consolidation and high strain rate mechanical behavior of nanocrystalline tantalium power”.
39. SRIVATSAN T.S; RAVI, B.G; NARUKA A.S; RIESTER L; YOO S; SUDARSHAN T.S. (2001). “Microstructure and harness of copper

powers consolidated by plasma pressure compaction”, Journal of materials engineering and performance, volume 10, Agosto 2001, pp 449-455.

40. BESHISH, G.K; FLOREY C.W; WORZALA F.J; LENLING W.J. “Fracture toughness of thermal spray ceramic coatings determined by the indentation technique”. Journal of thermal spray technology. Volume 2, N° 1, (1993). pp 35-28.
41. HERNANDEZ SAMPERI, Roberto. (1998). “Metodología de la Investigación”, Mc Graw Hill. México.
42. SUNDGREN, J.E. (1986). “A review o the present state of art in hard coating grown from the vapor phase”. Vacuum Science & Technology. A4; P 2260.
43. SANTANA M, Yucelys Y. (2002). “Comportamiento ante el desgaste deslizante de la aleación de aluminio 7075-t6 con y sin recubrimiento duro de tin0.65” Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 121 Páginas
44. TABORGA, H. (1982). “Como hacer una Tesis”, México, Editorial Grijalbo.
45. ACOSTA HOYOS, Luis E. (1970). “Manual de Técnicas de Investigación”, Medellín, ediciones ASBIARPI, 158P.

46. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (2002). “Manual de trabajo de grado de especialización y maestría y tesis doctorales”. Caracas. Vicerrectorado de investigación y postgrado.

ANEXOS

ANEXO 1: DUREZAS DE LAS MUESTRAS

Tabla A.1 Barrido de carga a 50 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas							
Carga (Kgrf) = 0,05							
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{50gf} (Durometro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{50gf} (calculada)	Dureza (Gpa) (calculada)
148	1	7,22	7,72	1761,90	7,47	1661,70	16,30
	2	6,50	6,32	2418,80	6,41	2258,69	22,16
	3	7,94	7,72	1598,80	7,83	1512,03	14,83
	4	6,50	6,67	2287,30	6,58	2139,89	20,99
	5	7,58	7,37	1759,40	7,47	1659,46	16,28
	6	7,58	7,37	1759,40	7,47	1659,46	16,28
	7	6,50	7,37	2054,60	6,93	1928,79	18,92
	8	6,86	7,02	2051,50	6,94	1925,99	18,89
149	1	6,50	6,67	2287,30	6,58	2139,89	20,99
	2	6,50	6,32	2418,80	6,41	2258,69	22,16
	3	7,22	7,02	1945,60	7,12	1829,56	17,95
	4	6,50	7,02	2166,20	6,76	2030,25	19,92
	5	7,58	7,02	1847,70	7,30	1740,19	17,07
	6	7,22	7,37	1850,30	7,29	1742,60	17,09
	7	7,58	6,67	1942,70	7,12	1826,94	17,92
	8	7,58	6,67	1942,70	7,12	1826,94	17,92
150	1	5,78	6,32	2727,60	6,05	2536,47	24,88
	2	6,50	5,96	2561,90	6,23	2387,67	23,42
	3	6,50	6,32	2418,80	6,41	2258,69	22,16
	4	5,42	6,32	2904,70	5,87	2694,98	26,44
	5	6,14	6,32	2566,20	6,23	2391,54	23,46
	6	6,86	6,32	2283,60	6,59	2136,61	20,96
	7	6,86	7,02	2051,50	6,94	1925,99	18,89
	8	6,86	6,67	2162,90	6,76	2027,19	19,89
151	1	7,58	7,37	1759,40	7,47	1659,46	16,28
	2	7,22	7,72	1761,90	7,47	1661,70	16,30
	3	7,58	7,72	1677,40	7,65	1584,22	15,54
	4	7,58	7,37	1759,40	7,47	1659,46	16,28
	5	7,58	7,37	1759,40	7,47	1659,46	16,28
	6	6,50	6,67	2287,30	6,58	2139,89	20,99
	7	7,58	7,72	1677,40	7,65	1584,22	15,54
	8	7,58	8,42	1529,60	8,00	1448,31	14,21

(Continúa)

Tabla A.1 (continuación) Barrido de carga a 50 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas							
Carga (Kgrf) = 0,05							
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{50gf} (Durometro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{50gf} (calculada)	Dureza (Gpa) (calculada)
152	1	5,78	5,61	3088,10	5,70	2858,66	28,04
	2	5,78	7,02	2426,70	6,40	2265,86	22,23
	3	7,22	7,02	1945,60	7,12	1829,56	17,95
	4	6,14	6,67	2422,70	6,40	2262,25	22,19
	5	6,86	6,67	2162,90	6,76	2027,19	19,89
	6	7,94	6,67	1845,00	7,30	1737,76	17,05
	7	6,86	6,32	2283,60	6,59	2136,61	20,96
	8	5,78	7,37	2294,60	6,57	2146,50	21,06
153	1	7,22	6,67	2048,40	6,94	1923,16	18,87
	2	6,86	6,67	2162,90	6,76	2027,19	19,89
	3	6,86	7,37	1948,40	7,11	1832,16	17,97
	4	6,14	6,67	2422,70	6,40	2262,25	22,19
	5	6,14	6,67	2422,70	6,40	2262,25	22,19
	6	6,86	6,67	2162,90	6,76	2027,19	19,89
	7	6,50	7,72	1951,30	7,11	1834,76	18,00
	8	7,22	7,72	1761,90	7,47	1661,70	16,30

Tabla A.2 Barrido de carga a 100 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas						
Carga (Kgrf) = 0,1						
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv 100gf (Durómetro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv 100gf (calculada)
148	1	10,47	10,18	1539,10	10,32	1740,48
	2	8,66	10,53	1765,30	9,60	2014,15
	3	9,39	10,18	1703,10	9,78	1938,48
	4	9,03	10,18	1763,50	9,60	2012,05
	5	8,30	8,42	2281,30	8,36	2651,89
	6	9,39	9,47	1823,60	9,43	2085,32
	7	9,39	10,88	1594,00	10,13	1806,49
	8	9,39	10,18	1703,10	9,78	1938,48
149	1	11,19	9,12	1586,60	10,16	1797,52
	2	8,66	10,18	1827,30	9,42	2089,90
	3	8,66	10,18	1827,30	9,42	2089,90
	4	9,03	10,53	1704,70	9,78	1940,46
	5	9,03	9,82	1825,50	9,42	2087,55
	6	11,19	11,23	1317,50	11,21	1475,79
	7	10,83	10,88	1400,30	10,85	1574,19
	8	9,39	9,47	1823,60	9,43	2085,32
150	1	9,39	9,82	1761,80	9,61	2009,84
	2	9,03	9,47	1890,70	9,25	2167,50
	3	8,66	9,82	1892,70	9,24	2169,87
	4	7,94	8,77	2283,80	8,36	2655,15
	5	7,94	9,12	2197,40	8,53	2547,08
	6	10,47	11,23	1401,50	10,85	1575,64
	7	9,03	10,53	1704,70	9,78	1940,46
	8	9,39	9,12	1888,80	9,25	2165,14
151	1	8,66	8,42	2192,60	8,54	2541,01
	2	9,39	9,82	1761,80	9,61	2009,84
	3	10,11	10,53	1540,60	10,32	1742,16
	4	10,83	10,53	1444,00	10,68	1626,36
	5	10,47	10,53	1491,10	10,50	1682,77
	6	10,47	10,53	1491,10	10,50	1682,77
	7	8,30	8,77	2195,00	8,54	2544,04
	8	9,39	10,88	1594,00	10,13	1806,49

(Continúa)

Tabla A.2 (continuación) Barrido de carga a 100 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas						
Carga (Kgrf) = 0,1						
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{200gf} (Durómetro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{200gf} (calculada)
152	1	9,03	10,18	1763,50	9,60	2012,05
	2	9,39	9,12	1888,80	9,25	2165,14
	3	10,47	10,18	1539,10	10,32	1740,48
	4	10,83	10,18	1489,70	10,50	1681,17
	5	10,83	10,18	1489,70	10,50	1681,17
	6	10,11	11,23	1446,50	10,67	1629,41
	7	10,83	11,23	1358,50	11,03	1524,49
	8	9,39	10,53	1647,20	9,96	1870,74
153	1	9,75	9,82	1701,40	9,79	1936,38
	2	9,75	9,47	1760,10	9,61	2007,72
	3	9,03	9,47	1890,70	9,25	2167,50
	4	10,11	9,47	1699,70	9,79	1934,44
	5	9,39	9,47	1823,60	9,43	2085,32
	6	8,66	10,18	1827,30	9,42	2089,90
	7	8,30	10,18	1894,60	9,24	2172,36
	8	9,39	9,47	1823,60	9,43	2085,32

Tabla A.3 Barrido de carga a 200 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas						
Carga (Kgrf) = 0,2						
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv 200gf (Durómetro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv 200gf (calculada)
148	1	13,36	12,63	1872,00	12,99	2196,38
	2	14,08	12,63	1779,50	13,36	2079,24
	3	14,44	14,04	1580,40	14,24	1829,61
	4	12,64	13,68	1828,80	13,16	2141,64
	5	13,72	13,68	1697,20	13,70	1975,70
	6	14,44	15,44	1445,00	14,94	1661,70
	7	13,72	14,74	1582,50	14,23	1832,18
	8	13,36	15,09	1583,60	14,22	1833,47
149	1	15,88	15,44	1323,00	15,66	1512,03
	2	17,69	17,19	1081,00	17,44	1219,15
	3	15,88	14,39	1410,30	15,14	1619,05
	4	14,44	14,39	1544,80	14,41	1785,32
	5	15,16	14,39	1475,30	14,77	1699,14
	6	15,16	14,39	1475,30	14,77	1699,14
	7	15,52	13,33	1541,80	14,43	1781,61
	8	13,72	14,04	1657,60	13,88	1926,04
150	1	14,08	14,39	1581,50	14,23	1830,90
	2	13,00	13,68	1783,30	13,34	2084,08
	3	13,00	12,63	1920,90	12,81	2258,69
	4	12,27	13,33	1923,70	12,80	2262,40
	5	13,00	12,28	1970,40	12,64	2321,85
	6	11,55	12,98	2081,50	12,27	2464,62
	7	11,55	12,98	2081,50	12,27	2464,62
	8	11,55	12,28	2195,40	11,92	2611,73
151	1	12,64	15,44	1622,70	14,04	1882,25
	2	14,08	15,09	1511,40	14,58	1743,82
	3	14,44	13,68	1617,30	14,06	1875,56
	4	13,72	13,68	1697,20	13,70	1975,70
	5	13,72	13,68	1697,20	13,70	1975,70
	6	13,72	13,68	1697,20	13,70	1975,70
	7	14,08	13,68	1656,50	13,88	1924,66
	8	15,16	14,74	1443,20	14,95	1659,48

(Continúa)

Tabla A.3 (continuación) Barrido de carga a 200 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas						
Carga (Kgrf) = 0,2						
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{200gf} (Durómetro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{200gf} (calculada)
152	1	13,00	13,68	1783,30	13,34	2084,08
	2	13,00	14,39	1699,60	13,69	1978,59
	3	14,44	14,39	1544,80	14,41	1785,32
	4	14,08	14,04	1618,30	14,06	1876,90
	5	14,08	14,04	1618,30	14,06	1876,90
	6	14,08	14,04	1618,30	14,06	1876,90
	7	14,08	15,09	1511,40	14,58	1743,82
	8	14,80	15,09	1444,10	14,94	1660,59
153	1	14,80	14,04	1543,80	14,42	1784,09
	2	13,36	15,44	1547,90	14,40	1789,05
	3	11,91	14,04	1877,40	12,97	2203,32
	4	13,00	14,74	1659,90	13,87	1928,82
	5	15,16	14,74	1443,20	14,95	1659,48
	6	12,64	12,63	1971,80	12,63	2323,69
	7	14,44	14,04	1580,40	14,24	1829,61
	8	14,44	12,98	1694,90	13,71	1972,82

Tabla A.4 Barrido de carga a 300 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas						
Carga (Kgrf) = 0,3						
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv 300gf (Durómetro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv 300gf (calculada)
148	1	21,30	18,60	1266,90	19,95	1398,04
	2	19,86	20,70	1227,90	20,28	1352,77
	3	19,13	20,00	1314,30	19,57	1453,01
	4	19,50	22,11	1169,90	20,80	1285,85
	5	16,97	18,95	1546,90	17,96	1725,14
	6	20,22	19,65	1268,80	19,93	1400,14
	7	23,47	18,95	1127,40	21,21	1237,03
	8	18,77	20,35	1315,00	19,56	1453,75
149	1	19,13	21,40	1229,00	20,27	1354,11
	2	19,50	19,65	1313,70	19,57	1452,27
	3	18,41	20,70	1315,60	19,56	1454,50
	4	19,86	20,70	1227,90	20,28	1352,77
	5	18,77	19,65	1361,00	19,21	1507,36
	6	18,41	19,65	1385,70	19,03	1536,09
	7	18,05	17,54	1573,40	17,80	1756,30
	8	19,50	20,70	1249,00	20,10	1377,18
150	1	20,58	19,30	1268,20	19,94	1399,44
	2	18,77	18,95	1409,50	18,86	1563,99
	3	19,86	19,65	1290,90	19,75	1425,85
	4	19,86	21,75	1169,30	20,81	1285,23
	5	17,69	18,95	1489,60	18,32	1657,82
	6	19,13	22,46	1170,40	20,80	1286,47
	7	19,86	20,00	1269,40	19,93	1400,84
	8	20,22	20,35	1227,30	20,28	1352,10
151	1	16,97	19,30	1518,70	18,13	1691,91
	2	18,05	18,25	1516,30	18,15	1689,02
	3	18,41	18,95	1435,50	18,68	1594,36
	4	19,50	18,25	1408,10	18,87	1562,25
	5	16,97	19,30	1518,70	18,13	1691,91
	6	16,61	18,95	1576,80	17,78	1760,45
	7	17,69	18,95	1489,60	18,32	1657,82
	8	18,05	19,30	1436,20	18,67	1595,21

(Continúa)

Tabla A.4 (continuación) Barrido de carga a 300 gf.

Durezas Vickers: Barrido de cargas						
Carga (Kgrf) = 0,3						
Probeta	#	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{300gf} (Durómetro)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{300gf} (calculada)
152	1	20,58	21,75	1131,60	21,17	1241,77
	2	19,86	21,05	1207,90	20,45	1329,66
	3	19,86	18,25	1382,90	19,05	1532,79
	4	18,05	21,40	1294,10	19,73	1429,46
	5	17,69	21,75	1294,70	19,72	1430,26
	6	20,94	20,00	1206,20	20,47	1327,71
	7	19,86	20,70	1227,90	20,28	1352,77
	8	18,77	21,40	1250,20	20,09	1378,55
153	1	20,22	21,40	1168,80	20,81	1284,55
	2	20,58	20,00	1226,70	20,29	1351,44
	3	18,77	20,70	1292,80	19,74	1428,02
	4	19,13	22,11	1189,50	20,62	1308,46
	5	19,86	22,46	1132,60	21,16	1242,94
	6	19,13	19,30	1360,30	19,22	1506,58
	7	17,69	18,95	1489,60	18,32	1657,82
	8	21,66	17,54	1309,80	19,60	1447,75

**ANEXO 2: TENACIDAD DE FRACTURA; INDENTACIONES A 30
Kgf.**

Tabla B.1 Barrido de carga a 30K gf. Para determinar K_{IC}

Ensayo Vickers a 30 Kgf, para la determinación del K_{IC} (Tenacidad de Fractura)											
N°	148										
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{30Kgf}	Media Diagonal (a) (μm)	Grieta (l) (μm)	c = l+a	Relación l/a	Relación c/a	c/a > 1.3	0.25 < l/a < 2.5
1	209,38	212,50	210,94	1250,29	106,25	167,90	274,15	1,58	2,58	ok	VERDADERO
2	-	-	-	-	-	397,70	-	-	-	-	-
3	206,25	200,00	203,13	1348,31	100,00	277,20	377,20	2,77	3,77	ok	FALSO
4	215,63	225,00	220,31	1146,14	112,50	195,00	307,50	1,73	2,73	ok	VERDADERO
5	212,50	215,63	214,06	1214,05	107,81	273,50	381,31	2,54	3,54	ok	FALSO
6	206,25	218,75	212,50	1231,97	109,38	197,90	307,28	1,81	2,81	ok	VERDADERO
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N°	149										
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{30Kgf}	Media Diagonal (a) (μm)	Grieta (l) (μm)	c = l+a	Relación l/a	Relación c/a	c/a > 1.3	0.25 < l/a < 2.5
1	193,75	193,75	193,75	1481,95	96,88	150,40	247,28	1,55	2,55	ok	VERDADERO
2	193,75	193,75	193,75	1481,95	96,88	154,80	251,68	1,60	2,60	ok	VERDADERO
3	193,75	200,00	196,88	1435,28	96,88	115,70	212,58	1,19	2,19	ok	VERDADERO
4	200,00	200,00	200,00	1390,78	100,00	156,70	256,70	1,57	2,57	ok	VERDADERO
5	193,75	193,75	193,75	1481,95	96,88	183,60	280,48	1,90	2,90	ok	VERDADERO
6	193,75	203,13	198,44	1412,76	101,56	196,90	298,46	1,94	2,94	ok	VERDADERO
7	200,00	193,75	196,88	1435,28	96,88	143,00	239,88	1,48	2,48	ok	VERDADERO
8	206,25	193,75	200,00	1390,78	100,00	135,90	235,90	1,36	2,36	ok	VERDADERO

(Continúa)

Tabla B.1 (continuación) Barrido de carga a 30K gf. Para determinar K_{IC}

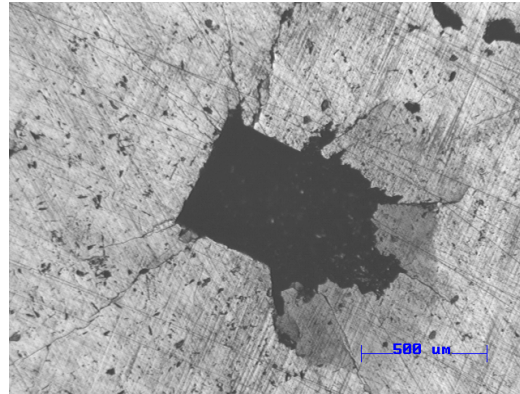
Ensayo Vickers a 30 Kgf, para la determinación del K_{IC} (Tenacidad de Fractura)											
N°	150										
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{30Kgf}	Media Diagonal (a) (μm)	Grieta (l) (μm)	c = l+a	Relación l/a	Relación c/a	c/a > 1.3	0.25 < l/a < 2.5
1	187,50	193,75	190,63	1530,94	96,88	177,40	274,28	1,83	2,83	ok	VERDADERO
2	187,50	193,75	190,63	1530,94	93,75	179,40	273,15	1,91	2,91	ok	VERDADERO
3	193,75	193,75	193,75	1481,95	96,88	142,90	239,78	1,48	2,48	ok	VERDADERO
4	193,75	206,25	200,00	1390,78	103,13	184,50	287,63	1,79	2,79	ok	VERDADERO
5	193,75	200,00	196,88	1435,28	100,00	169,90	269,90	1,70	2,70	ok	VERDADERO
6	200,00	187,50	193,75	1481,95	93,75	216,00	309,75	2,30	3,30	ok	VERDADERO
7	193,75	200,00	196,88	1435,28	100,00	241,60	341,60	2,42	3,42	ok	VERDADERO
8	193,75	193,75	193,75	1481,95	96,88	167,80	264,68	1,73	2,73	ok	VERDADERO
N°	151										
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{30Kgf}	Media Diagonal (a) (μm)	Grieta (l) (μm)	c = l+a	Relación l/a	Relación c/a	c/a > 1.3	0.25 < l/a < 2.5
1	187,50	200,00	193,75	1481,95	93,75	142,40	236,15	1,52	2,52	ok	VERDADERO
2	187,50	193,75	190,63	1530,94	93,75	139,10	232,85	1,48	2,48	ok	VERDADERO
3	190,63	196,88	193,75	1481,95	95,31	122,10	217,41	1,28	2,28	ok	VERDADERO
4	187,50	193,75	190,63	1530,94	93,75	118,80	212,55	1,27	2,27	ok	VERDADERO
5	187,50	193,75	190,63	1530,94	96,88	175,00	271,88	1,81	2,81	ok	VERDADERO
6	187,50	193,75	190,63	1530,94	96,88	162,40	259,28	1,68	2,68	ok	VERDADERO
7	181,25	193,75	187,50	1582,39	96,88	140,20	237,08	1,45	2,45	ok	VERDADERO
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(Continúa)

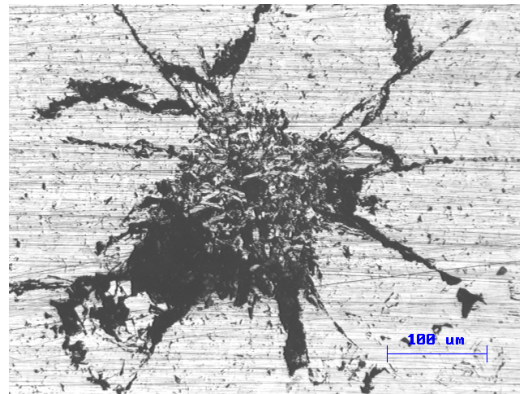
Tabla B.1 (continuación) Barrido de carga a 30K gf. Para determinar K_{IC}

Ensayo Vickers a 30 Kgf, para la determinación del K_{IC} (Tenacidad de Fractura)											
N°	152										
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{30Kgf}	Media Diagonal (a) (μm)	Grieta (l) (μm)	c = l+a	Relación l/a	Relación c/a	c/a > 1.3	0.25 < l/a < 2.5
1	212,50	231,25	221,88	1130,06	115,63	168,50	284,13	1,46	2,46	ok	VERDADERO
2	228,13	234,38	231,25	1040,29	117,19	140,70	257,89	1,20	2,20	ok	VERDADERO
3	231,25	218,75	225,00	1098,88	109,38	115,30	224,68	1,05	2,05	ok	VERDADERO
4	225,00	218,75	221,88	1130,06	112,50	193,10	305,60	1,72	2,72	ok	VERDADERO
5	212,50	237,50	225,00	1098,88	118,75	146,80	265,55	1,24	2,24	ok	VERDADERO
6	218,75	225,00	221,88	1130,06	112,50	192,50	305,00	1,71	2,71	ok	VERDADERO
7	228,13	243,75	235,94	999,36	121,88	158,00	279,88	1,30	2,30	ok	VERDADERO
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N°	153										
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	Dureza (Kgf/mm ²) Hv _{30Kgf}	Media Diagonal (a) (μm)	Grieta (l) (μm)	c = l+a	Relación l/a	Relación c/a	c/a > 1.3	0.25 < l/a < 2.5
1	215,63	206,25	210,94	1250,29	103,13	199,20	302,33	1,93	2,93	ok	VERDADERO
2	215,63	200,00	207,81	1288,17	100,00	147,80	247,80	1,48	2,48	ok	VERDADERO
3	212,50	212,50	212,50	1231,97	106,25	133,20	239,45	1,25	2,25	ok	VERDADERO
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	206,25	212,50	209,38	1269,02	103,13	196,70	299,83	1,91	2,91	ok	VERDADERO
6	206,25	206,25	206,25	1307,76	103,13	228,30	331,43	2,21	3,21	ok	VERDADERO
7	200,00	109,38	154,69	2324,91	100,00	211,90	311,90	2,12	3,12	ok	VERDADERO
8	203,13	196,88	200,00	1390,78	101,56	214,40	315,96	2,11	3,11	ok	VERDADERO

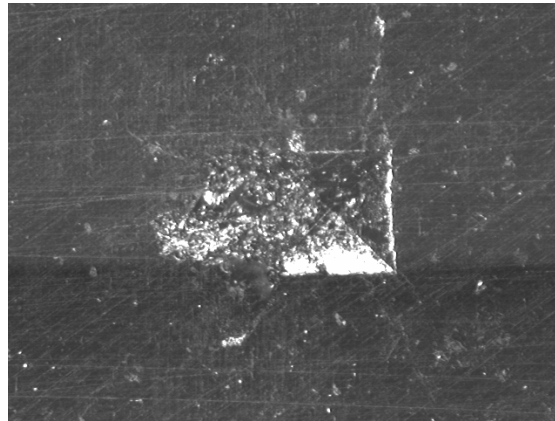
ANEXO 3: INDENTACIONES A 40 Kgf.



(a)



(b)



(c)

Imágenes de la indentación a 40Kgf. (a) Indentación inicial; (b) Indentación luego del desbaste superficial (se evidencia las zonas de desprendimiento de granos); (c) huella observada en la lupa.

ANEXO 4: VOLÚMENES GASTADOS POR LAS MUESTRA

Tabla C.1 Área de la sección transversal de la huella de desgaste y volumen gastado en cada ensayo pin on disk.

Áreas Promedio						
	a	b	c	d	Promedio (mm²)	Des. Estándar (mm²)
148	20,64	11,09	4,35	6,39	10,62	7,25
148i	10,42	6,98	9,20	15,46	10,52	3,59
149	9,07	8,08	9,50	4,61	7,82	2,22
149i	8,52	8,80	6,98	6,66	7,74	1,08
150	10,15	16,38	14,89	21,81	15,81	4,80
150i	6,09	6,79	8,32	4,29	6,37	1,67
151	5,10	6,29	5,55	5,42	5,59	0,50
151i	6,38	8,04	8,06	7,55	7,51	0,79
152	6,36	9,30	8,44	8,21	8,08	1,24
152i	7,84	7,61	6,66	4,64	6,69	1,46
153	7,93	9,67	9,02	5,30	7,98	1,93
153i	6,81	9,10	7,13	7,20	7,56	1,04
Volumen Promedio (mm³)						
	a	b	c	d	Promedio (mm³)	Des. Estándar (mm³)
148	9,08E+05	4,88E+05	1,91E+05	2,81E+05	4,67E+05	3,19E+05
148i	4,58E+05	3,07E+05	4,05E+05	6,80E+05	4,62E+05	1,58E+05
149	3,99E+05	3,55E+05	4,18E+05	2,03E+05	3,44E+05	9,75E+04
149i	3,75E+05	3,87E+05	3,07E+05	2,93E+05	3,40E+05	4,73E+04
150	4,46E+05	7,20E+05	6,55E+05	9,59E+05	6,95E+05	2,11E+05
150i	2,68E+05	2,99E+05	3,66E+05	1,89E+05	2,80E+05	7,35E+04
151	2,24E+05	2,77E+05	2,44E+05	2,38E+05	2,46E+05	2,21E+04
151i	2,81E+05	3,54E+05	3,54E+05	3,32E+05	3,30E+05	3,46E+04
152	2,80E+05	4,09E+05	3,71E+05	3,61E+05	3,55E+05	5,44E+04
152i	3,45E+05	3,35E+05	2,93E+05	2,04E+05	2,94E+05	6,41E+04
153	3,49E+05	4,25E+05	3,97E+05	2,33E+05	3,51E+05	8,47E+04
153i	3,00E+05	4,00E+05	3,14E+05	3,17E+05	3,33E+05	4,58E+04

NOTA: las columnas a, b, c, d; corresponden a cuatro zonas diferentes en una misma muestra.

Tabla C.2 Volumen de WC gastado en cada ensayo pin on disk.

	Volumen Promedio (mm ³)				Promedio (mm ³)	Des. Estándar (mm ³)
	a	b	c	d		
148	9,08E-04	4,88E-04	1,91E-04	2,81E-04	4,67E-04	3,19E-04
148i	4,58E-04	3,07E-04	4,05E-04	6,80E-04	4,62E-04	1,58E-04
149	3,99E-04	3,55E-04	4,18E-04	2,03E-04	3,44E-04	9,75E-05
149i	3,75E-04	3,87E-04	3,07E-04	2,93E-04	3,40E-04	4,73E-05
150	4,46E-04	7,20E-04	6,55E-04	9,59E-04	6,95E-04	2,11E-04
150i	2,68E-04	2,99E-04	3,66E-04	1,89E-04	2,80E-04	7,35E-05
151	2,24E-04	2,77E-04	2,44E-04	2,38E-04	2,46E-04	2,21E-05
151i	2,81E-04	3,54E-04	3,54E-04	3,32E-04	3,30E-04	3,46E-05
152	2,80E-04	4,09E-04	3,71E-04	3,61E-04	3,55E-04	5,44E-05
152i	3,45E-04	3,35E-04	2,93E-04	2,04E-04	2,94E-04	6,41E-05
153	3,49E-04	4,25E-04	3,97E-04	2,33E-04	3,51E-04	8,47E-05
153i	3,00E-04	4,00E-04	3,14E-04	3,17E-04	3,33E-04	4,58E-05

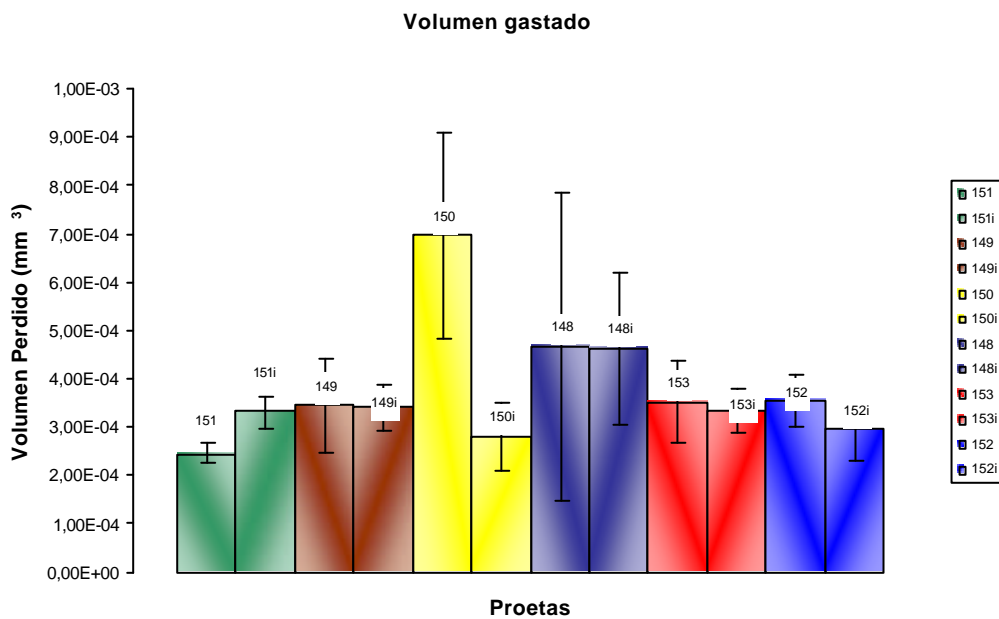
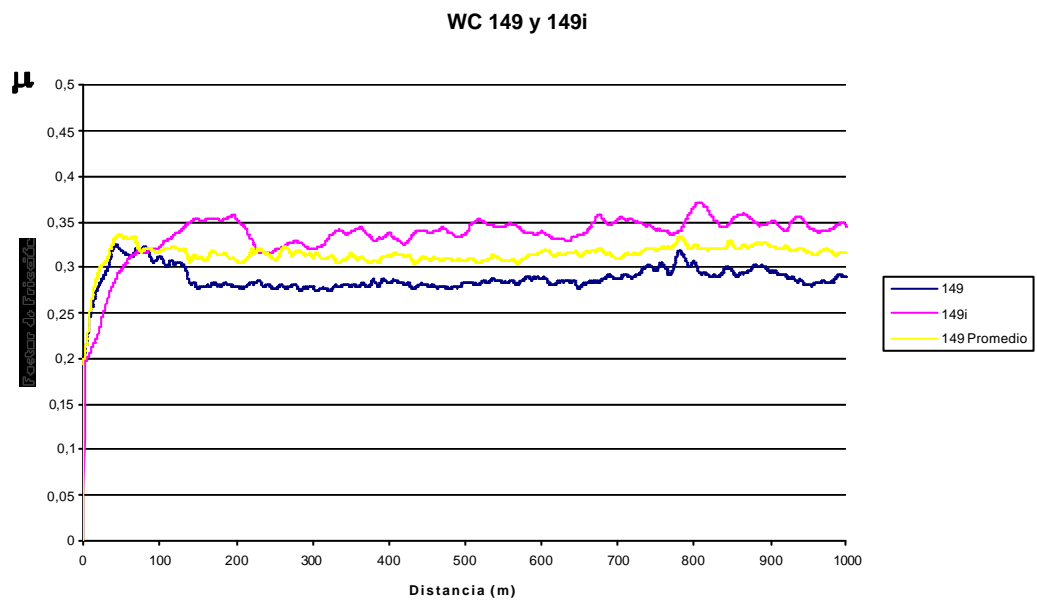
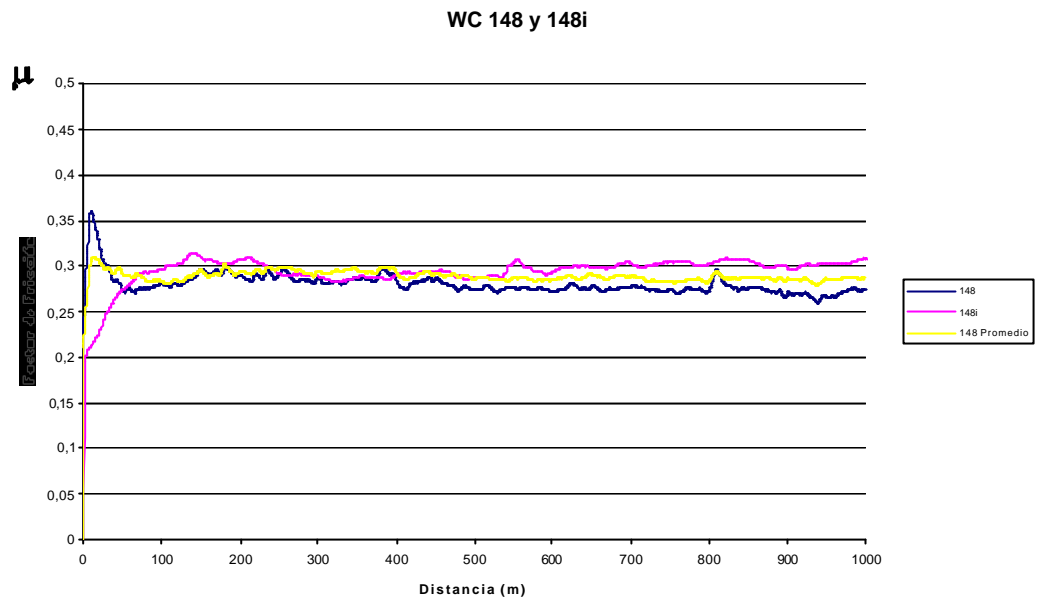
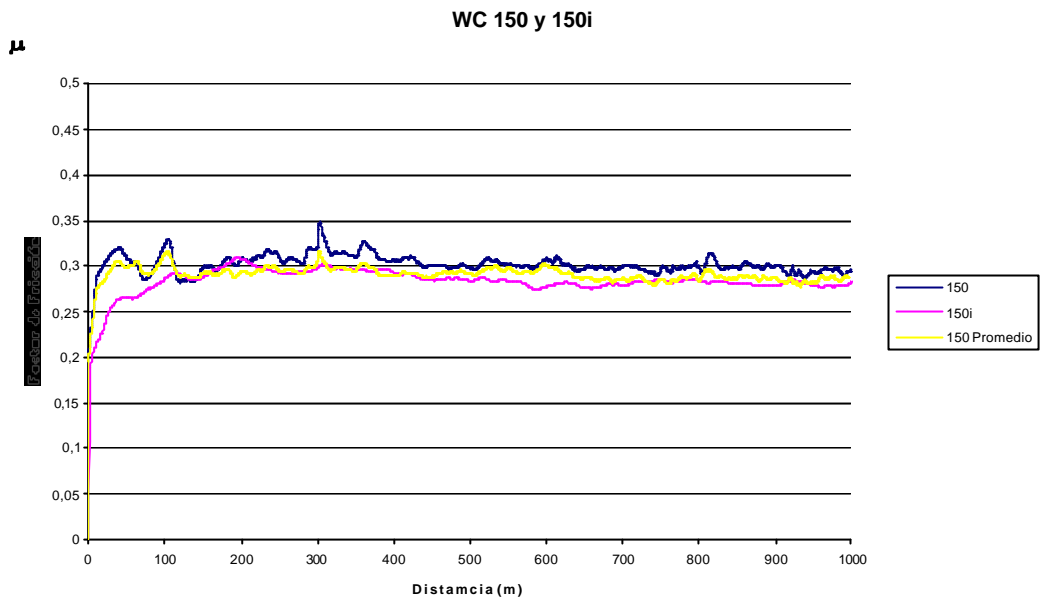


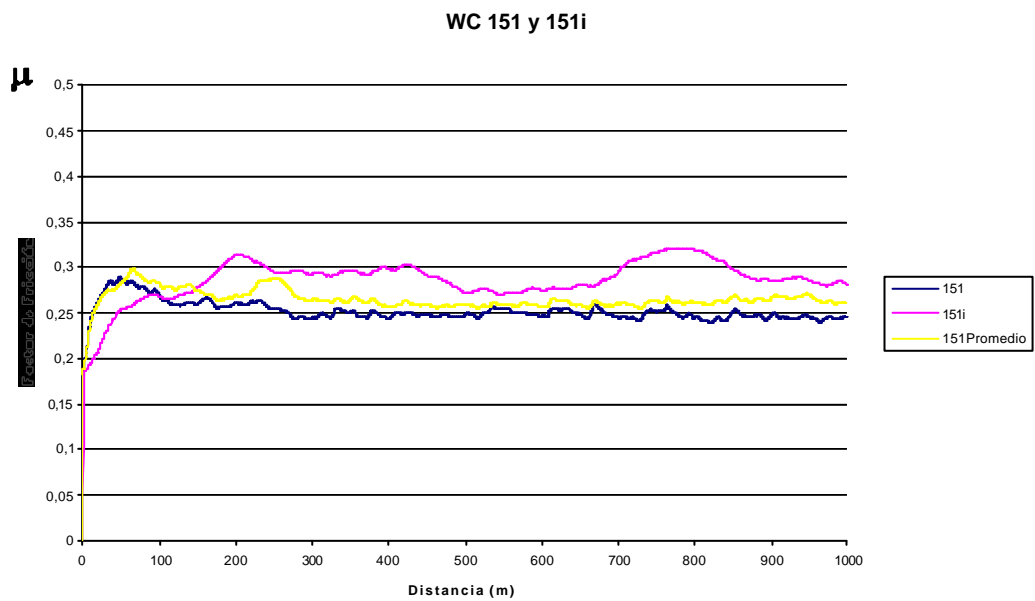
Gráfico C.1 Volumen de WC gastado por muestra.

ANEXO 5: GRAFICAS DE DESGASTE DE LAS MUESTRA
(ENSAYO *PIN ON DISK*)



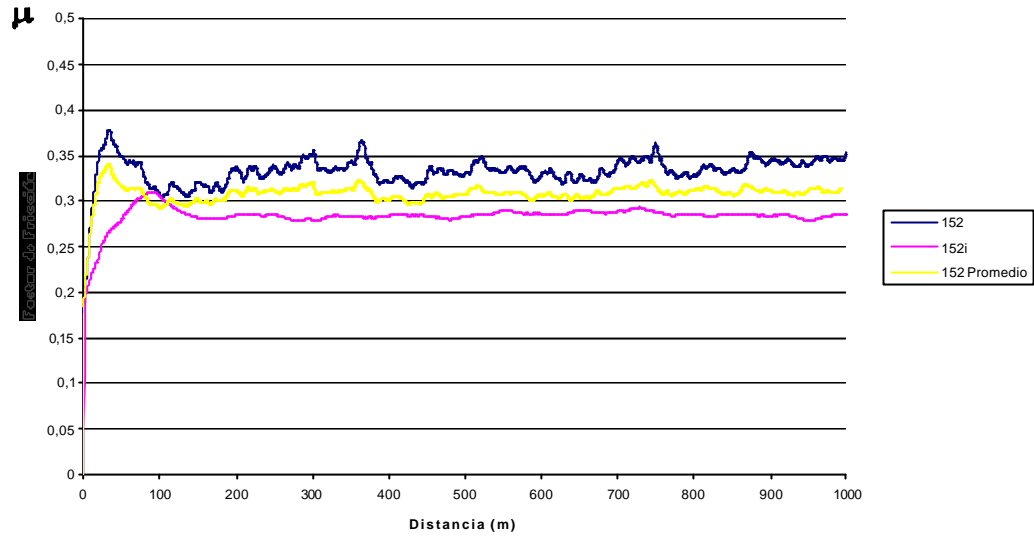


Gráfica D.3 Distancia Vs. μ , para la muestra 150.



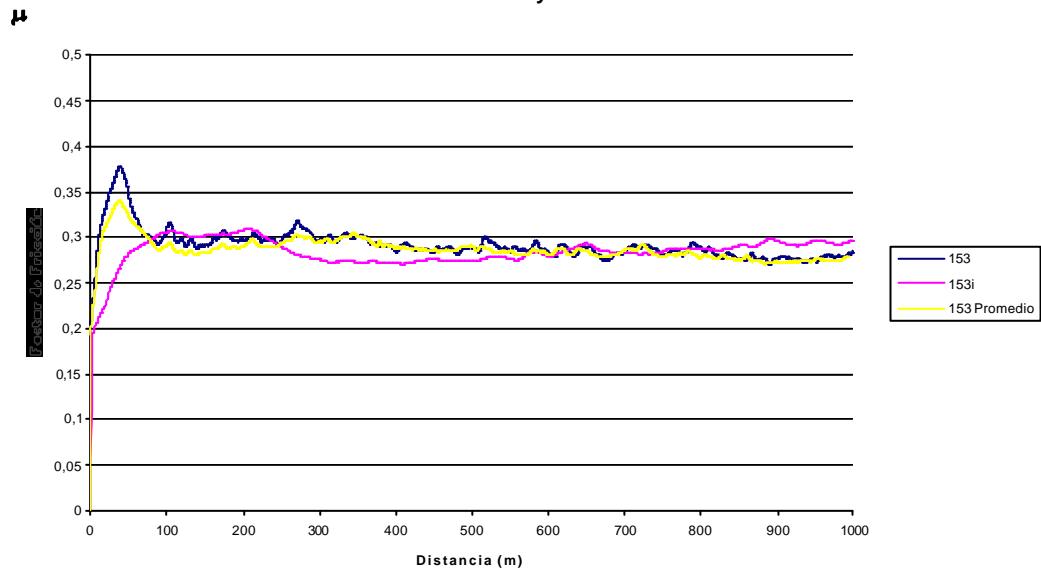
Gráfica D.4 Distancia Vs. μ , para la muestra 151.

WC 152 y 152i



Gráfica D.5 Distancia Vs. μ ? para la muestra 152.

WC 153 y 153i



Gráfica D.6 Distancia Vs. μ ? para la muestra 153.