

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



INGENIERÍA INDUSTRIAL SUPERIOR  
DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DE  
MATERIALES E INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS EN EL SISTEMA Fe-TiCN**

AUTOR: Francisco de Asís Fernández García-Obledo

TUTORA: Paula Alvaredo Olmos

Elena Gordo Oderiz

Leganés, Julio 2014



## AGRADECIMIENTOS

Antes de presentar el proyecto quisiera dedicar estas líneas para agradecer a todos los que han hecho posible este proyecto, que representa el final de mi vida universitaria.

En primer lugar mi agradecimiento al Departamento de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid y más en concreto al Departamento de Tecnología de Polvos. Gracias a todos los que en algún momento me ayudaron de cualquier manera, enseñándome a usar alguna máquina, dejándome la llave del laboratorio cuando a Paula se le olvidaba o simplemente preguntándome qué tal estaba cuando me veían por la mañana. Gracias porque me han hecho sentir un ambiente agradable y bueno, idóneo para trabajar.

Agradecer a todos y cada uno de mis compañeros que durante estos años han compartido clases, exámenes, risas y demás. Juanky, Santi, Stalrrich, Juan Gabriel, Víctor, Armero, Moreno, Arantxa, Roci, Leal, Encabo, Maxi, Armando, David, Martín, Pablo.... Podría poner una lista larguísima, a todos, gracias.

A mi familia, que me han apoyado siempre, incluso cuando pintaban bastos. Gracias por el ejemplo de sacrificio y entrega que ha sido el foco bajo el que he estudiado esta carrera.

Al Núcleo Duro, gracias por darme alicientes a la hora de trabajar y motivación para intentar superarme a mí mismo.

A Sara, gracias por animarme y por tu esfuerzo en dibujarme una sonrisa cuando me preocupaba, entre otras cosas, por el proyecto. Hay que decir que siempre conseguías sacármela. Gracias Sara.

A Paula, por ser una excelente tutora, capaz de explicar cosas difíciles con palabras como 'plasta' o 'guarrería' para que yo lo entendiera. Gracias por haber sido siempre amable y cercana conmigo que para mí era lo más importante y lo que más miedo me daba del proyecto, la relación con el tutor. Si a todo eso le sumamos lo trabajadora que es y lo bien que explica tenemos a una grandísima profesora y a una mejor persona.

Por último a Elena, ver su nombre en la lista de decenas y decenas de proyectos fue crucial para decantarme por este. Gracias por las clases de Materiales II allá en segundo de carrera, me sirvieron a parte de para aprender que es un eutéctico, para conocer a una gran profesional y sospechar que me encontraba ante una magnífica persona, ambas cosas las he confirmado este curso. Lo gracioso es que me suspendió dos veces Materiales II, en una incluso casi me baja la nota cuando la reclamé. Lo que pretendo mostrar con esto, es que a pesar de mi experiencia mala en cuanto a logros académicos con ella, mi experiencia personal fue enorme y eso fue clave para contactar con ella. Por todo ello, gracias.

Gracias a todos y a aquellos que no he llegado a incluir porque si no nunca empezamos.

Gracias.



## **ÍNDICE**

<b>1. INTRODUCCIÓN A LAS HERRAMIENTAS DE CORTE. CERMETS</b>	<b>9</b>
1.1. MATERIALES PARA HERRAMIENTAS DE CORTE	11
1.2. CERMETS	14
1.2.1. Características generales de los cermets	14
1.2.2 Carbonitruro de titanio	15
1.2.3 Microestructura core/rim de los cermets	15
1.3. TRIBOLOGIA	18
1.3.1 Tipos de ensayos de desgaste	18
1.3.2 Mecanismos de desgaste	20
1.3.3. Desgaste por deslizamiento	22
1.3.4. Cuantificación del desgaste	26
1.3.5. Ensayos de desgaste en otras investigaciones	27
<b>2. MOTIVACION Y OBJETIVOS</b>	<b>33</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODO</b>	<b>37</b>
3.1 MATERIALES	39
3.2. PROCESAMIENTO DE LAS PIEZAS	41
3.2.1. Mezcla	41
3.2.2. Compactación	41
3.2.3 Sinterización	41
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PIEZAS ANTES DEL ENSAYO	43
3.3.1. Dureza	43
3.4. ESTUDIO DEL DESGASTE MEDIANTE ENSAYOS DEL TIPO ‘PIN ON DISC’	45
3.4.1. Equipo: Tribómetro ‘pin on disc’	45
3.4.2. Parámetros de ensayo utilizados	45
3.5. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA EVOLUCIÓN Y ESTUDIO DEL DESGASTE	47
3.5.1. Variación de masa	47
3.5.2. Medida del perfil de la pista mediante un rugosímetro de contacto	47
3.5.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis (EDS)	49
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>51</b>

4.1. DUREZA	53
4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE	54
4.2.1. Pérdida de masa	54
4.2.2. Volumen desgastado	54
4.2.3. Ancho de pista	57
4.2.4. Constante de desgaste	58
4.2.5. Coeficiente de fricción (COF)	59
4.3. MECANISMOS DE DESGASTE Y ANÁLISIS DE SUPERFICIE DESGASTADA	63
4.3.1. Cermet M2Ti (C, N) sin adición de C ensayado bajo carga de 5N	63
4.3.2. Cermet M2Ti (C, N) sin adición de C ensayado bajo carga de 10N	67
4.3.3. Cermet M2Ti (C, N) con adición de 0.5%C ensayado bajo carga de 5N	71
4.3.4. Cermet M2Ti (C, N) con adición de 0.5%C ensayado bajo carga de 10N	74
4.3.5. Cermet M2Ti (C, N) con adición de 1%C ensayado bajo carga de 5N	78
4.3.6. Cermet M2Ti (C, N) con adición de 1%C ensayado bajo carga de 10N	81
4.4. COMPARACIÓN CON DISTINTOS MATERIALES UTILIZADOS EN APLICACIONES DE HERRAMIENTAS DE CORTE	84
5. CONCLUSIONES	87
5.1. INFLUENCIA DEL CARBONO EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE	89
5.2. COMPARACIÓN CON DISTINTOS MATERIALES UTILIZADOS EN APLICACIONES DE HERRAMIENTAS DE CORTE	90
<b>6. LÍNEAS FUTURAS</b>	93
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	97



## RESUMEN

El mecanizado es una de las operaciones más extendidas e importantes en la industria. Dentro de las distintas herramientas de corte empleadas para ejecutar el mecanizado están extendidas con mayor diferencia los carburos cementados o metal duro, WC-Co, y los cermets de carbonitruro de titanio, TiCN, con matriz metálica de Ni y/o Co. Ambos materiales presentan en su composición Co ó Ni, materiales tóxicos que se intenta evitar utilizar. Es por ello que se empezaron a realizar estudios para sustituir la matriz metálica de los cermets TiCN por una que no resultara tóxica y que pudiera ser una alternativa competitiva tanto para los carburos cementados como para los cermets TiCN con matriz metálica de Co ó Ni. El Grupo de Tecnología de Polvos de la Universidad Carlos III de Madrid ha sido uno de los grupos de investigación dedicados a investigar ampliamente este tipo de materiales, más en concreto el cambio de matriz metálica por Fe. El hierro y sus compuestos son una opción muy deseable, puesto que el Fe es un material abundante, inocuo, reciclable y puede ser tratado térmicamente cuando lo encontramos junto con el carbono formando acero.

Al ser un material novedoso, cermet TiCN con matriz metálica de Fe, existen pocos resultados, en cuanto a sus principales propiedades y su comportamiento tribológico bajo diversas condiciones, que ayuden a catalogar el cermet dentro del grupo de las herramientas de corte. En esta investigación se ha estudiado influencia del carbono en la resistencia al desgaste de este tipo de cermet, bajo unas condiciones concretas, y se ha comparado este resultado con otros materiales utilizados como herramientas de corte. Además, se ha comprobado en estudios previos, que el Carbono, C, tiene una gran influencia en la microestructura y propiedades de este material, es por esto que resulta de especial interés estudiar la resistencia al desgaste de este cermet con diferentes porcentajes de carbono añadido.

Durante el transcurso de este proyecto, se han realizado diferentes ensayos de desgaste por deslizamiento para conocer la influencia del Carbono en la microestructura, propiedades y composición del cermet.



# *Capítulo 1*

## ***INTRODUCCIÓN A LAS HERRAMIENTAS DE CORTE. CERMETS***





# 1. INTRODUCCIÓN A LAS HERRAMIENTAS DE CORTE. CERMETS

## 1.1. MATERIALES PARA HERRAMIENTAS DE CORTE

El mecanizado tiene una gran importancia en la industria, debido a que es esencial para el desarrollo de numerosas aplicaciones y productos. Dentro del mecanizado, cabe destacar las herramientas de corte como principales instrumentos para su ejecución. La evolución en el desarrollo de los materiales para herramientas de corte a lo largo de los años, sobre todo a partir del siglo XX [1], ha convertido a este tipo de herramientas en unas de las más usadas en el sector industrial. Para realizar las distintas operaciones de mecanizado de forma satisfactoria, estas herramientas deberán poseer ciertas características como son la resistencia al desgaste, la resistencia a rotura, resistencia al calor, alta dureza en caliente, resistencia a la corrosión y resistencia a la oxidación. [2].

Dado que el mecanizado es un proceso muy amplio, con gran variedad de aplicaciones, implica que también existan distintos tipos de herramientas de corte, divididas en los siguientes grupos:

- Aceros de herramientas.
- Materiales cerámicos.
- Nitruro de boro cúbico (CBN).
- Diamante policristalino (PCD).
- Carburo cementado.
- Cermets.

A continuación se explica cada grupo, prestando mayor atención a los carburos cementados y los cermets ya que son los materiales cuyo uso se está extendiendo más y en el caso de los cermets son el motivo de estudio en este proyecto.

### **-Aceros de herramientas**

Es un tipo de acero aleado que fue introducido por Taylor y White en 1898, para conseguir elevadas velocidades de corte, ya que mantienen una considerable dureza a temperaturas a las que el filo del útil se pone al rojo (500-600°C). Su composición es muy variada y pertenecen al grupo de los aceros ledeburíticos, con elevados porcentajes de elementos de aleación y alto contenido en carbono. En todos ellos entran a formar parte: W, Cr y V, y a veces Mo y Co.

En general, el efecto que se persigue con estos elementos es el de aumentar la templabilidad y la resistencia al ablandamiento por revenido, así como formar carburos complejos muy duros, resistentes al desgaste y estables a temperaturas elevadas [3].

### **-Materiales cerámicos**

En su más amplio sentido se comprende bajo esta denominación un grupo de materiales preparados originariamente por moldeo plástico y cocción subsiguiente de la arcilla. Con el desarrollo de la tecnología se ha ido refinando más este tipo de materiales, atendiendo no solo



a sus propiedades mecánicas sino también a otras más específicas como eléctricas, magnéticas, químicas u ópticas [4].

Entre los materiales cerámicos más utilizados se encuentran: alúmina, diamante, sílice, carburo de silicio, nitruro de silicio, dióxido de titanio y zirconia [5].

#### **-Nitruro de boro cúbico policristalino (CBN)**

El nitruro de boro cúbico es un material con excelente resistencia al calor que puede utilizar a velocidades de corte muy altas. Presenta también buena tenacidad y resistencia a los cambios bruscos de temperatura.

Se suelen utilizar en torneado en acabado de aceros templados, en operaciones de desbaste a alta velocidad y operaciones de torneado como el fresado [6].

#### **-Diamante policristalino (PCD)**

Es un compuesto de partículas de diamante sinterizadas junto con un aglutinante metálico. El diamante es el material más duro que existe y, por tanto, el más resistente a la abrasión. Como herramienta de corte, presenta buena resistencia al desgaste pero carece de estabilidad química a alta temperatura y se disuelve con facilidad en hierro.

Su uso está limitado a materiales no férreos, como aluminio de alto contenido de silicio, compuestos de matriz metálica y plásticos reforzados con fibra de carbono [7].

#### **-Carburos cementados**

El carburo cementado o metal duro, es el material más utilizado en el mecanizado de materiales resistentes tales como acero al carbono o acero inoxidable, así como en situaciones en las que otras herramientas flaquean como en grandes series de producción. Normalmente, el carburo realiza un mejor acabado en la pieza y permite el mecanizado más rápido. Su morfología consta básicamente de carburo de wolframio, WC, junto a Co que se utiliza como aglutinante.

Este tipo de material se realiza a partir de la sinterización de una gran cantidad de polvos de carburo y metales en el vacío o en la atmósfera, es decir, se realiza mediante un proceso de pulvimetalurgia. Debido a su alta dureza, resistencia al desgaste y buena resistencia, los carburos cementados, WC-Co, son ampliamente utilizados en mecanizado, herramientas de minería y piezas de desgaste. A pesar de poseer estupendas propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste el Co tiene desventajas que se intentan subsanar sustituyendo la fase metálica por otros metales. Los motivos que llevan a intentar sustituir el Co son el alto precio, baja resistencia a corrosión de (W, Ti) C-Co y el valor comercial del cobalto [8]. El metal que se suele usar para sustituir al Co es el Ni aunque en los últimos años se está investigando con Fe [9], que entre otras ventajas tiene la casi nula contaminación en comparación con el Co y el Ni, además de su gran capacidad de ser endurecido mediante tratamientos térmicos.

A estos carburos cementados se les suele añadir porcentajes de carburos inhibidores para mejorar algunas características. La adición de VC mejora la resistencia a la fatiga, la adición de HfC o ZrC reduce tensiones microestructurales existentes entre las distintas fases y la adición de TiC o TaC mejoran la dureza y resistencia al desgaste [10]. Existen gran variedad de



composiciones de carburos cementados que han ido evolucionando a lo largo del siglo XX y que proporcionan por tanto una gran variedad de propiedades también. En la *Tabla 1.1* se muestran algunas propiedades del carburo cementado en relación a su composición.

*Tabla 1.1. Propiedades de carburos cementados con diferentes composiciones [11]*

Composición (% en peso)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (HV <sub>30</sub> )	Módulo elástico(GPa)	Tenacidad a fractura(MPa m <sup>1/2</sup> )
94WC-6Co	14.9	1580	630	9.6
85,3WC- 2,7OtrosCarburos-12Co	14.2	1290	580	12.7
75WC-25Co	12.9	780	470	14.5
78,5WC- 10OtrosCarburos-11,5Co	13.0	1380	560	10.9
60WC-31OtrosCarburos- 9Co	10.6	1560	520	8.1

Durante la sinterización de estos carburos, se tiene que tener cuidado con el crecimiento de grano, ya que este es el que marcará la mayoría de las propiedades que posea el carburo cementado. Otro aspecto importante a considerar es la densificación que puede producirse durante la sinterización. La densificación es deseable para eliminar poros y obtener unas buenas propiedades, como por ejemplo resistencia, ductilidad, tenacidad, permeabilidad magnética, y resistencia a la fatiga. Pero esta densificación también puede ir acompañada de cambios dimensionales no deseados que alteran la geometría final de la pieza y pueden provocar grietas y defectos [12].



## 1.2. CERMETS

### 1.2.1. Características generales de los cermets

Los cermets son uno de los materiales más utilizados de forma más amplia para la formación de las herramientas de corte junto a los aceros de alta velocidad y los carburos cementados [8]. Los cermets son un material compuesto formado por una matriz metálica, normalmente de Ni y/o Co y una fase cerámica, principalmente de TiC o TiCN. El empleo conjunto de materiales cerámicos y metálicos permite conseguir una combinación óptima de propiedades. La fase cerámica aporta la dureza, resistencia a la oxidación, alta resistencia al desgaste y capacidad de mantener su dureza a altas temperaturas, mientras que la fase metálica aporta, tenacidad, ductilidad y una elevada conductividad térmica y eléctrica, la cual implica un menor gradiente térmico y por lo tanto una menor tensión térmica sufrida por parte del material.

A pesar de poseer unas estupendas propiedades, se suelen añadir ciertos carburos como WC, TaC, NbC, VC ó Mo<sub>2</sub>C para poder mejorar algunas propiedades concretas [13]. Estos carburos mejoran entre otras propiedades la mojabilidad entre la cerámica y la fase líquida, así como mejorar la densidad y la disminución de la tasa de crecimiento de partículas. Esas adiciones son necesarias para superar el pobre procesamiento del cermet con respecto a los carburos cementados, su menor dureza y su peor resistencia al choque térmico [14]. Los cermets utilizados en esta investigación sustituyen la matriz metálica de Ni ó Co por una de Fe, debido a que el Ni y Co son materiales caros de gran toxicidad, mientras que el Fe es abundante, no es tóxico y puede ser endurecido mediante tratamientos térmicos. La desventaja que ofrece es la baja mojabilidad que tiene, a causa de una intercara que aparece de TiN debido a la difusión del carbono hacia la matriz de hierro. Esta desventaja se soluciona con la adición de carburos que impiden la formación de esa intercara.

Hoy en día hay dos tipos de cermets, a saber, cermets basado en TiC o en TiCN. De estos dos tipos en las últimas décadas se ha incrementado el uso de los cermets con fase de carbonitruro de titanio, TiCN, ya que presenta mejores propiedades y por tanto resulta más interesante su estudio es el TiCN [15], como se puede comprobar en la *Tabla 1.2*, ya que este en comparación con el TiC posee mayor dureza a alta temperatura, mayor tenacidad a rotura transversal, mejor resistencia a la oxidación y mucha mayor conductividad térmica [16].

*Tabla 1.2. Comparación de propiedades a alta temperatura entre cermets de base TiC y de base TiCN [17]*

Tipo de base Cermet	Microdureza (1000°C, kg·mm <sup>-2</sup> )	Resistencia a rotura (900°C, MPa)	Ganancia de masa (1000°C, mg·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Conductividad térmica (1000°C, W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
TiC	500	1050	11.8	24.7
TiCN	600	1360	1.6	42.3

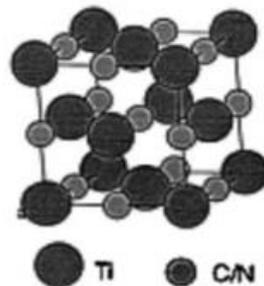


Además, durante el mecanizado de herramientas de corte con cermet basado en TiCN, es mucho más difícil la formación de capas de oxidación en comparación con los cermet de base TiC [16].

Teniendo en cuenta todas estas ventajas herramientas de corte cermet TiCN están muy demandadas en el uso de fresado de alta velocidad, en el acabado y semiacabado de aceros al carbono y aceros inoxidable. Incluso en el corte de algunos materiales de alta dureza y alta resistencia que no pueden ser mecanizados por el corte de herramientas TiC, en estos casos los cermet TiCN pueden realizarlo ofreciendo una excelente suavidad de la superficie. Por consiguiente, los cermet basados en TiCN se han convertido en las herramientas de corte predominantes, sustituyendo gradualmente a los cermet de base TiC en muchas aplicaciones [18].

### 1.2.2. Carbonitruro de titanio

El carbonitruro de titanio es una solución sólida de TiN con TiC. El  $TiC_xN_{1-x}$  es una solución sólida de TiC y TiN con una estructura en que los átomos de C en la red Ti podrían ser ocupados por átomos de N en cualquier proporción. El incremento de nitrógeno en la estructura del TiC debido a la sustitución produce, mayor resistencia a la oxidación, mayor conductividad térmica, mayor dureza en caliente, mayor dureza al choque térmico y mayor resistencia a la ruptura transversal. Además la adición de nitrógeno evita el crecimiento de grano de la fase dura en los cermet. Su estructura es cúbica centrada en las caras, FCC [19].



**Figura 1.1. Estructura FCC del TiCN [19]**

En conclusión, TiCN posee tanto las propiedades de TiC y TiN: alta dureza, alto punto de fusión, resistencia a la corrosión, excelente resistencia al desgaste, buena estabilidad química, térmica y alta conductividad eléctrica [20]. Este conjunto de propiedades hacen que éste sea un material con un gran potencial industrial, por ello, el TiC está siendo reemplazado en los cermet de aplicaciones de herramientas de corte por el TiCN. Las herramientas de corte fabricadas con cermet de TiCN producen un mejor control de precisión la geometría de las piezas de trabajo, un mejor control de la viruta y de la tolerancia, alargan la vida de la herramienta, mejoran el acabado superficial, aumentan el ritmo de alimentación y mantienen constante las dimensiones críticas.

### 1.2.3. Microestructura core/rim de los cermet

Comúnmente la microestructura de los cermet se compone principalmente de tres fases: fase dura, fase aglutinante de metal y las fases circundantes a la fase dura (rim). A veces la rim se compone de dos partes, el borde exterior y el borde interior. La composición del núcleo del cermet, la fase dura, es de  $Ti(C, N)$  o TiC, mientras que la rim, la fase circundante, es una

solución compleja, (Ti, W) (C, N), que tiene una estructura cristalina similar a la del núcleo pero con muchos más átomos de metales pesados que en el núcleo [21].

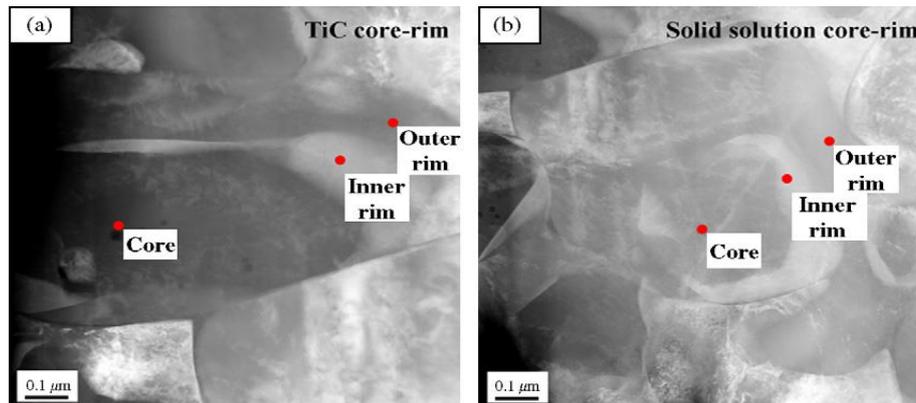


Figura 1.2. a) core-rim de TiC, b) core-rim (Ti, W) C [22]

La microestructura core/rim aparece durante la sinterización en fase líquida, que es necesaria para la formación de los cermets. Este tipo de sinterización se caracteriza por producir unas condiciones en las que coexisten partículas sólidas junto con una fase líquida minoritaria durante alguna parte del ciclo térmico. La presencia de fase líquida durante la sinterización otorga una ventaja sobre los demás tipos de sinterización, pues proporciona tanto una fuerza de capilaridad como un medio de transporte más efectivo, lo que conduce a una rápida consolidación y sinterizado. La fuerza de capilaridad debida al mojado del líquido proporciona una rápida y compacta densificación sin la necesidad de una fuerza externa, y dado que el material de partida está en forma de polvo, la fabricación de los componentes es posible sin tener que alcanzar una fusión completa del material.

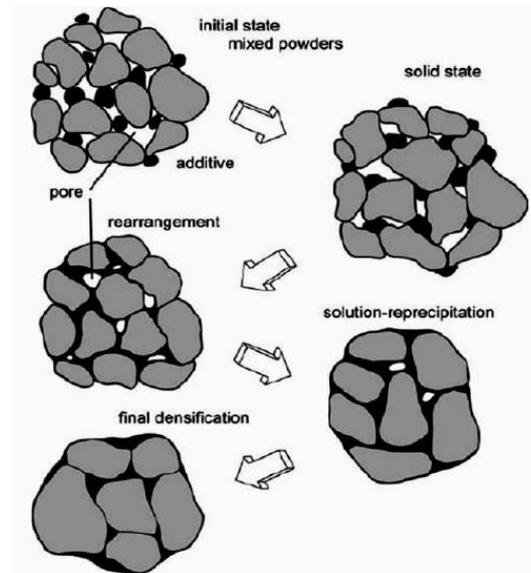
La sinterización en fase líquida comprende tres etapas que son, reapilamiento, disolución/reprecipitación y densificación final (coalescencia) [23]. Estas etapas son generales en la sinterización en fase líquida y se explican brevemente a continuación:

**-Reapilamiento:** el elemento con menor punto de fusión, matriz metálica del cermet, debido a las altas temperaturas forma la fase líquida. Mediante procesos de capilaridad, el material sólido se reordena mientras que la fase líquida se extiende.

**-Disolución/Reprecipitación:** Este es un proceso de gran importancia para la formación de la microestructura core-rim. Ambos procesos disolución y precipitación ocurren al mismo tiempo. En esta etapa algunos de los elementos de aleación más pesados como Mo, W, Ta y Nb quedan disueltos en la matriz, junto con pequeñas partículas cerámicas de refuerzo que también han logrado disolverse, estos elementos disueltos forman carburos y nitruros ((Ti, W, Mo)(C,N)) que precipitan alrededor de los materiales cerámicos no disueltos (core) formando el rim o anillo. Este anillo (rim), que está separando la fase dura no disuelta de la fase líquida en la sinterización, impide el crecimiento del grano de la fase dura por disolución y precipitación [17] mejorando así sus propiedades mecánicas.

**-Densificación final:** en esta etapa, la densificación es más lenta debido a la existencia de una estructura sólida dentro del material que limita la evolución de la fase líquida e impide

nuevos reapilamientos, aunque el crecimiento microestructural continúa produciéndose mediante difusión, disminuyendo la porosidad.



**Figura 1.3. Fases de la sinterización en fase líquida [24]**

### 1.3. TRIBOLOGIA

El estudio y evaluación del desgaste de los cermetos formados por un acero rápido como matriz metálica, aglomerando partículas de Ti(C, N) (M<sub>2</sub>TiCN) es el principal objetivo de este trabajo. Es por tanto importante definir qué se entiende por desgaste, que se encuadra dentro de la tribología. La tribología es la ciencia que estudia cómo interactúan dos o más superficies en contacto y en movimiento relativo. El estudio de esta interacción comprende la fricción, el desgaste y la lubricación.

Se debe tener en cuenta que cuando se produce esta interacción entre dos superficies que se ponen en contacto se puede definir un área aparente de contacto y un área real de contacto.

Tal y como se muestra en la *Figura 1.4*, el área real de contacto está formada por la suma de todos aquellos puntos discretos donde las dos superficies están en contacto a distancias atómicas. Y la aparente es aquella que sólo tiene en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto. Por tanto, la superficie de contacto entre las dos superficies no es lisa del todo, existen asperezas en ambas superficies, es decir, el contacto y transmisión de presión debido a la carga no se realiza en todo el área aparente de contacto sino en el área real. Es por esta razón que el área real de contacto es función de la rugosidad, propiedades interfaciales del material (elasticidad y plasticidad) y las condiciones de carga aplicadas.



**Figura 1.4. Contacto entre superficies [25]**

Dentro del estudio tribológico se detalla más en profundidad el desgaste, ya que es quien va a marcar la línea de trabajo de los ensayos. Para la realización de los ensayos de desgaste y su posterior estudio se utilizan tribómetros, que son los encargados de medir el desgaste producido [26].

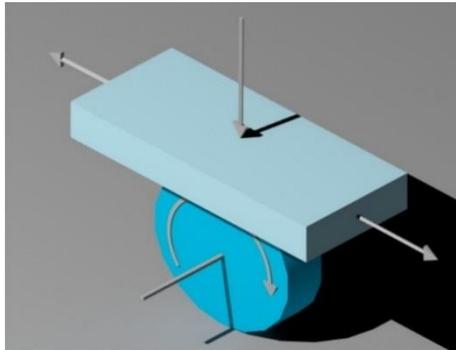
#### 1.3.1. Tipos de ensayos de desgaste

El tribómetro es el instrumento utilizado para realizar los ensayos y poder medir su desgaste. En este proyecto se utiliza el tipo 'pin on disc', no siendo el único modelo que existe para poder caracterizar los ensayos de desgaste. El uso de un tipo u otro de tribómetro depende de varios factores, como son las condiciones en las que se realiza el ensayo tanto de velocidad, carga y distancia de deslizamiento principalmente, también dependiendo del material al que se le realizará el ensayo. Dentro de las distintas configuraciones de tribómetros los más extendidos para su uso se detallan a continuación, no siendo los únicos, pero sí los más importantes:

##### **-Block on ring**

El sistema consta de un bloque utilizado como contracuerpo que se presiona con una fuerza constante contra un anillo giratorio a 90° del eje del anillo. La fricción entre las superficies de

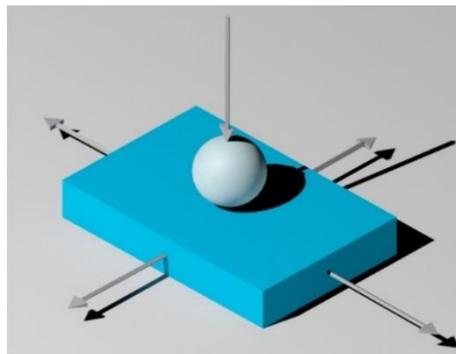
deslizamiento del bloque con el anillo genera la pérdida de material de ambas piezas. Este sistema está regulado bajo el estándar ASTM G77-93 [27].



**Figura 1.5. Tribómetro block on ring**

#### **-Ball on flat**

Este método utiliza un bloque plano sobre el que desliza una bola. Estos cuerpos se mueven uno respecto al otro en un movimiento lineal, de ida y vuelta de deslizamiento bajo un conjunto de condiciones en cuanto a carga y distancia de deslizamiento principalmente. Este sistema está regulado bajo el estándar ASTM G133-95 [27].

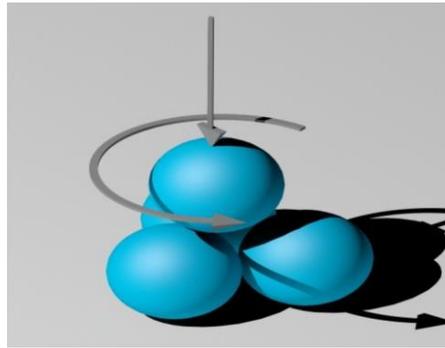


**Figura 1.6. Tribómetro ball on flat**

#### **-Four ball test**

Test de desgaste ampliamente utilizado. El tribómetro consta de cuatro bolas, una superior que se mantiene estacionaria y presiona hacia abajo bajo una carga normal fija. Bajo esta bola superior se encuentran tres bolas que están rotando juntas a la misma velocidad sobre un portabolas.

Las bolas normalmente son rodamientos de acero estandarizados y el sistema está regulado bajo el estándar ASTM D2596 [27].

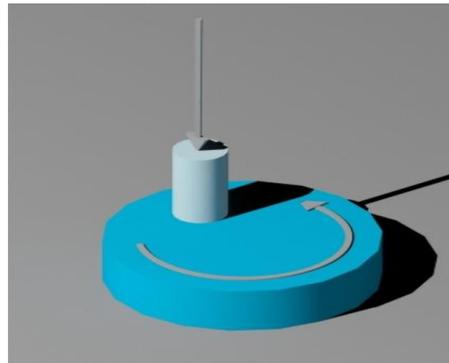


**Figura 1.7. Tribómetro four ball test**

#### **-Pin on disc**

La estructura pin on disc es un tribómetro, que se compone de un pin estacionario bajo una carga aplicada en contacto con un disco giratorio. El pasador puede tener cualquier forma para simular un contacto específico, en este caso se utilizan puntas esféricas para simplificar la geometría de contacto, contacto más homogéneo. El coeficiente de fricción se determina por la relación de la fuerza de fricción con la fuerza de carga ejercida sobre el pasador.

Este sistema está regulado bajo el estándar ASTM G99-95<sup>a</sup> [27].



**Figura 1.8. Tribómetro pin on disc**

### **1.3.2. Mecanismos de desgaste**

Se define desgaste como el proceso de remoción de material debido al movimiento relativo entre dos superficies en contacto. En dicho proceso el material puede ser removido de la superficie y expulsado fuera de la región de contacto. También puede ser transferido a la otra superficie y quedarse adherido a ella o romperse y generar debris o residuos de desgaste, que pueden quedar, en parte, atrapados en el contacto. En el caso de que se produzca una transferencia de material la pérdida de masa neta de la interfase es cero, siendo una o ambas superficies desgastadas.

La naturaleza compleja del desgaste ha retardado su estudio y lo ha encaminado hacia mecanismos o procesos específicos de desgaste, mostrados en la *Figura 1.9*, entre los que destaca el desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo que a continuación se detallan.

### -Desgaste adhesivo

En el área de contacto real entre dos superficies, puede ocurrir la adhesión entre las asperezas y con el movimiento relativo entre las superficies fracturar las partículas adheridas formando fragmentos adheridos y/o transferidos a la otra superficie, así como desprenderse y formar partículas de debris, esto es lo que se conoce como desgaste adhesivo [28].

### -Desgaste abrasivo.

El desgaste abrasivo ocurre cuando las asperezas de una superficie dura o debris duro deslizan sobre una superficie más blanda produciendo desgaste por deformación plástica y fractura [29].

Estos dos son los principales mecanismos de desgaste, existiendo también el desgaste por fatiga, desgaste por corrosión y el desgaste por deslizamiento.

### -Desgaste por fatiga.

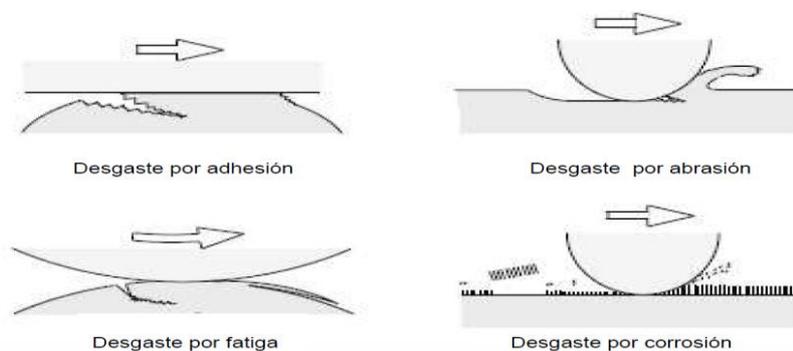
Este tipo de desgaste se produce por la aplicación reiterada de cargas que producen tensiones sobre las capas superficiales, creando fisuras sobre las mismas; cuando estas propagan, se desprende el material [29].

### -Desgaste por corrosión.

La corrosión es la reacción superficial de muchos metales con el medio ambiente, creándose películas superficiales, como por ejemplo óxidos. Usualmente estas películas son muy duras y crean una protección sobre el material; luego, el espesor de las mismas crece excesivamente, volviéndose frágiles y propensas a ser removidas; una vez que se desprenden, dejando expuesto al material, el proceso vuelve a comenzar. A su vez, y como las partículas son duras, se convierten en un tercer cuerpo, por lo que produce desgaste abrasivo [29].

### -Desgaste por deslizamiento.

Este último tipo de desgaste mencionado, por deslizamiento, es el que se va a intentar estudiar y cuantificar en este trabajo y que a continuación se detalla.



**Figura 1.9. Tipos de desgaste más comunes [30]**



### 1.3.3. Desgaste por deslizamiento

Este tipo de desgaste es uno de los que ocurren con mayor frecuencia en la industria, presente en la mayoría de las máquinas. Las piezas desgastadas hacen que se pierda la precisión y merma la eficacia, provocando que se hayan de reemplazar los componentes desgastados con el consecuente coste que esto supone. Son estos motivos principalmente los que hacen que sea interesante e importante estudiar el desgaste y más en concreto el debido al deslizamiento por ser uno de los más presentes en la industria.

Esencialmente, el desgaste por deslizamiento es aquel en el cual hay un movimiento relativo entre dos superficies en contacto con una carga aplicada. Se suele utilizar el término desgaste adhesivo para describir el desgaste por deslizamiento, pero no es correcto del todo. Es verdad que la adhesión es fundamental en el desgaste por deslizamiento, pero otros procesos físicos y químicos envuelven este tipo de desgaste que han de ser considerados también [29].

En el desgaste por deslizamiento, por tanto, están presentes mecanismos de adhesión y crecimiento de grietas sub-superficiales por fatiga y formación de películas superficiales por procesos triboquímicos. Estos distintos mecanismos se basan en las teorías de desgaste de la adhesión, la delaminación y la oxidación, que se proceden a explicar:

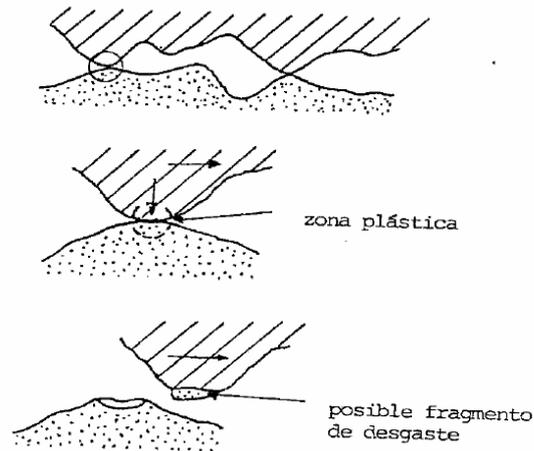
#### -Teoría de la adhesión

La teoría adhesiva de la fricción [29], la cual dio origen a una teoría general del desgaste por adhesión, se basa en que las superficies, aun teniendo el mejor acabado posible y siendo en escala macroscópica en apariencia lisas, en realidad presentan una micro-topografía irregular de asperezas, en forma de crestas y valles. Es así, que cuando dos superficies se colocan una junto a otra bajo la acción de una carga, el contacto solo se produce en las crestas de las asperezas y el área real que soporta la carga es, por esto, mucho más pequeña que el área aparente de contacto.

En las minúsculas regiones donde los dos cuerpos se unen íntimamente, si las dos superficies están limpias, los átomos de ambas se atraen mutuamente y se produce una fuerte adhesión. En el caso que existan contaminantes superficiales tales como óxidos, la adhesión se vería disminuida, pero existiría de todos modos, a causa de las altas presiones que se generan debido al área tan pequeña que soporta la carga. Estas altas presiones romperían las capas contaminantes y permitirían el contacto directo entre ambas superficies.

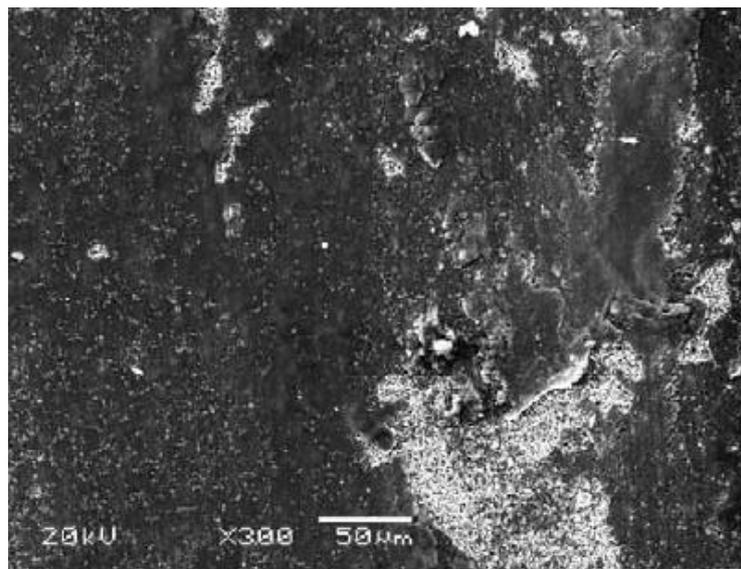
Las minúsculas áreas de contacto, sufren fluencia y alcanzan un cierto grado de deformación plástica. Al producirse el deslizamiento esas zonas pueden ser sometidas a endurecimiento por deformación y el corte puede ocurrir en el material de menor dureza. Esto ocasionaría que se transfieran fragmentos.

En la *Figura 1.10* se muestra esquemáticamente los principales pasos de la teoría de la adhesión.



**Figura 1.10. Esquema de los pasos de la teoría de la adhesión: contacto entre asperezas, deformación plástica y desprendimiento [29]**

Este tipo de teoría suele producir en los materiales una superficie pulida, con zonas fracturadas y se puede observar en numerosos estudios como en el de Meng, Lu, Wang y Yang [31]. En la *Figura 1.11* se muestra los resultados obtenidos a través de SEM de la huella de desgaste de este estudio anteriormente citado.



**Figura 1.11. Pista de desgaste pulida y fraccionada**

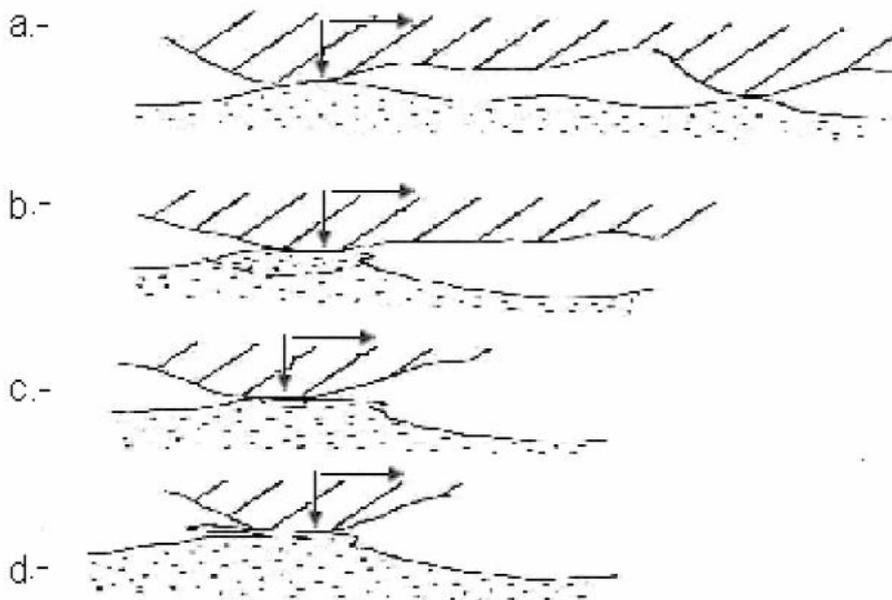
#### **-Teoría de la delaminación**

Esta teoría postulada por Suh, N [32] postula que en el contacto entre dos superficies se transmiten fuerzas normales y tangenciales a través de los puntos de contacto. Las asperezas de la superficie menos dura son fácilmente deformadas y fracturadas por los repetidos ciclos de carga, mientras que las asperezas de la otra superficie también son fracturadas, pero a velocidades menores. Como resultado de este proceso se genera inicialmente una superficie relativamente lisa, en la cual la fuerza tangencial ejercida en los puntos de contacto induce deformaciones plásticas superficiales y sub-superficiales.

Estas deformaciones aumentan con cada ciclo de carga y se van acumulando progresivamente. A medida que la deformación sub-superficial progresa se van nucleando grietas a cierta distancia por debajo de la superficie, fuera de la influencia del estado triaxial de esfuerzos de compresión que existe en las cercanías de la región de contacto (este estado de esfuerzos no permite la formación de grietas). Una vez que se nuclean las grietas las deformaciones subsecuentes causan su propagación y la unión de grietas vecinas. El crecimiento de las grietas tiende a ser paralelo a la superficie, a profundidades que estarían en función de las propiedades del material y del estado de esfuerzos a que está sometido en esa región. Cuando las grietas alcanzan la superficie se produce el desprendimiento del material, en forma de láminas largas y delgadas.

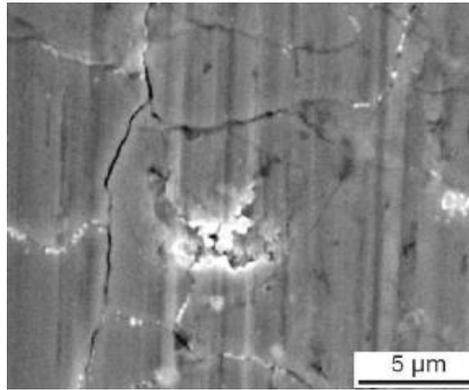
La teoría de la delaminación involucra los siguientes pasos ilustrados en la *Figura 1.12*:

- Fuerzas normales y tangenciales son primeramente transmitidas a través de los contactos de las asperezas, las cuales se deforman alisando la superficie.
- Ocurre deformación plástica en las capas superficiales.
- Se forman grietas paralelas bajo las capas superficiales.
- Estas grietas crecen hasta alcanzar una longitud crítica y el material entre la superficie y la grieta se corta en la parte más débil, para producir una partícula de desgaste.



**Figura 1.12. Esquema de los pasos de la teoría de la delaminación [32]**

La *Figura 1.13* muestra esta teoría y refleja a través de SEM las grietas superficiales características de la delaminación. Esta imagen está captada de los estudios realizados por J.Pirso y M.Viljus [33].



**Figura 1.13. Muestra de TiC-NiMo delaminado**

#### **-Teoría de la oxidación**

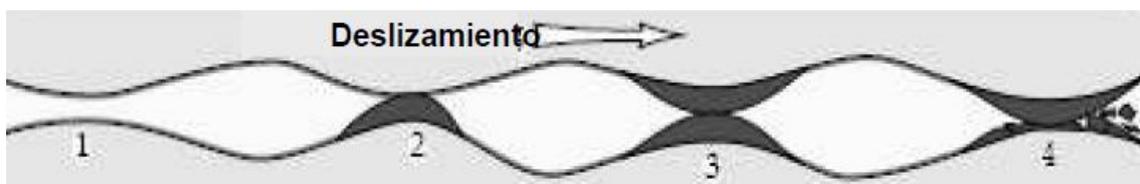
Esta teoría fue estudiada principalmente por Quinn [34], quienes explican la remoción de las películas superficiales oxidadas y la generación de nuevas capas de óxido, debido a la difusión de oxígeno y/o iones metálicos, a las altas temperaturas que normalmente se alcanzan en las áreas reales de contacto. Durante el deslizamiento, el desgaste oxidativo o corrosivo comenzaría una vez que la capa de óxidos alcance un espesor crítico, más allá del cual se hace mecánicamente inestable, no pudiendo aguantar la carga ni las tensiones de cizalla de fricción y la capa desaparece.

A velocidades altas de deslizamiento, las asperezas de la superficie sufren periodos cortos a alta temperatura de oxidación cuando hay contacto con las asperezas de la superficie opuesta. La cinética de oxidación es gobernada por la temperatura que se alcanza en los puntos de contacto. La frecuencia y la duración de estos periodos determinan la tasa de desgaste bajo estas condiciones.

El desgaste a velocidades bajas de deslizamiento forma fácilmente viruta que consiste en la mezcla de óxidos y de metales. Las partículas de desgaste se forman y deforman sucesivamente lo que crea de manera continua una superficie metálica que se puede oxidar en el oxígeno atmosférico.

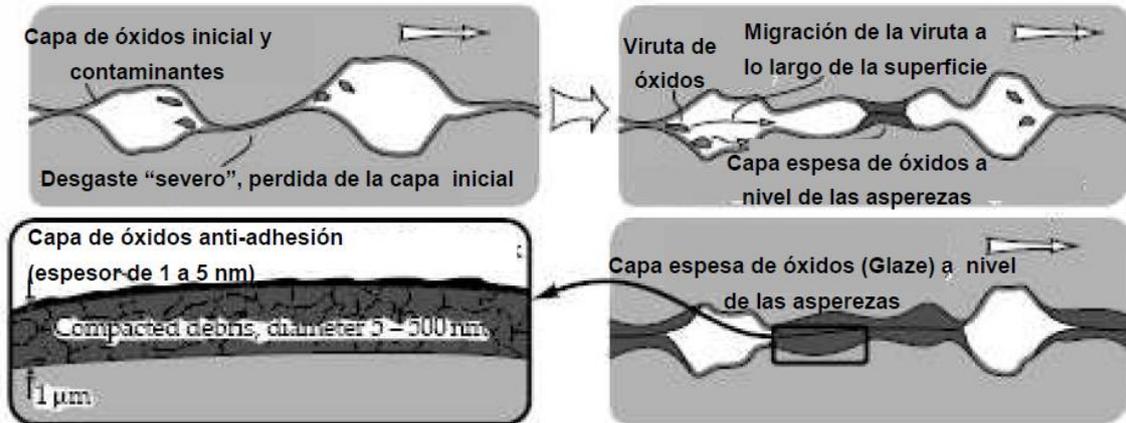
La teoría de la oxidación a velocidades altas involucra los siguientes pasos ilustrados en la *Figura 1.14*:

1. La ausencia de contacto entre asperezas implica la ausencia de formación de una capa.
2. Inicio de la formación de una capa.
3. Capa formada.
4. Ruptura de la capa



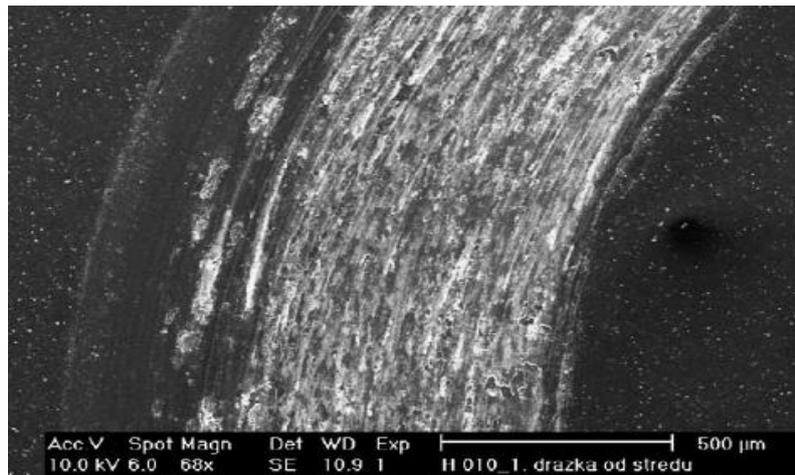
**Figura 1.14. Teoría de la oxidación a velocidades altas [30]**

En cuanto al desgaste por oxidación a bajas velocidades de deslizamiento se muestra esquemáticamente en la *Figura 1.15*.



**Figura 1.15. Desarrollo de la teoría de la oxidación a bajas velocidades [30]**

La *Figura 1.16* muestra esta teoría y refleja a través de SEM la micrografía de la pista de desgaste estudiada por T.Polcar y R.Novák en sus ensayos [35]



**Figura 1.16. Muestra oxidada de recubrimiento de TiCN**

### 1.3.4. Cuantificación del desgaste

No hay una única forma para expresar el grado de desgaste. Depende en muchas ocasiones del tipo de desgaste y de la naturaleza del sistema tribológico en el cual aparece el desgaste [36]. El grado de desgaste puede expresarse como:

1. Volumen de material arrancado por unidad de tiempo, por unidad de distancia de deslizamiento, por revolución de una componente o por oscilación de un cuerpo.
2. Volumen perdido por unidad normal de fuerza, por unidad de distancia de deslizamiento ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ). Esta expresión define la ecuación de Archard para desgaste por deslizamiento y que se muestra en la *Ecuación 1.1*
3. Masa perdida por unidad de tiempo.
4. Cambio de cierta dimensión por unidad de tiempo.
5. Cambio relativo de una dimensión o volumen con respecto a los mismos cambios en otra sustancia o material.



$$K=H \cdot V \text{ (mm}^3\text{)}/F(N) \cdot L \text{ (m)}$$

Ecuación 1.1

Dónde:

K, coeficiente adimensional de desgaste.

H, dureza del material más blando.

V (mm<sup>3</sup>), volumen desgastado.

F(N), carga normal aplicada.

L (m), distancia de deslizamiento.

Como ya se ha definido, cuando dos superficies en contacto deslizan una sobre la otra, una superficie o ambas sufrirán desgaste.

Numerosos estudios fueron realizados para poder cuantificar el desgaste, de entre los que cabe destacar el de Archard, el cual fue capaz de relacionar el volumen de material perdido durante el deslizamiento con la carga normal que se aplica, la distancia de deslizamiento, la dureza del material más blando, H, y una constante adimensional, K, llamada coeficiente de desgaste [37].

El coeficiente de desgaste adimensional K es de fundamental importancia y proporciona un valioso medio de comparación de los procesos de desgaste en diferentes sistemas. Este coeficiente queda expresado en la Ecuación 1 o ecuación de Archard.

Sin embargo, para aplicaciones de ingeniería es más útil usar la expresión K/H, que se representa como *k* llamado coeficiente dimensional de desgaste o constante de desgaste, cuyas unidades son mm<sup>3</sup>(Nm)<sup>-1</sup> y representa el volumen de material perdido debido al desgaste por unidad de distancia deslizada, por unidad normal de carga deslizada.

La ecuación de Archard implica que si K es una constante para un sistema de deslizamiento dado, entonces el volumen(o masa) de material perdido por el desgaste debe ser proporcional a la distancia deslizada, y si se varía la carga normal aplicada, ha de variar entonces la tasa de desgaste en proporción. Experimentalmente, se encuentra además que para muchos sistemas la pérdida de material por desgaste es proporcional a la distancia de deslizamiento.

### 1.3.5. Ensayos de desgaste en otras investigaciones

Este proyecto, donde se estudia y evalúa el desgaste producido en los cermets investigados de TiCN con matriz metálica de Fe en la que hay distintos porcentajes de carbono para estudiar su influencia, no ha sido ejecutado anteriormente, por lo que supone algo novedoso de lo que no se disponen datos previos en cuanto a su desgaste mediante la técnica 'pin on disc'. Sin embargo para otro tipo de materiales utilizados en aplicaciones de herramientas de corte sí que han sido investigados y estudiados exhaustivamente su desgaste mediante diversas técnicas a través de la gran variedad de tribómetros existentes.

A continuación se muestran las condiciones y análisis de diversas investigaciones en las que se ensayan materiales catalogados dentro de las herramientas de corte, mediante ensayos de



desgaste por deslizamiento, prestando mayor interés a los cermets, carburos cementados y materiales cerámicos.

**-TiC-NiMo, cermets:**

El ensayo se realizó en un tribómetro de tipo block on ring, con dimensiones del bloque de (23x14x5) mm. El anillo de fricción es un disco de acero, 0.45%C, de dureza 200HB [33].

Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 4000m.
- Carga: 40N.
- Velocidad de deslizamiento: 2.2 m/s
- Temperatura: 23°C, temperatura ambiente.

Del test de desgaste efectuado, se obtiene que la constante de desgaste se reduce con el aumento de TiC y contenido de Mo en el material compuesto, mientras que aumenta cuanto mayor sea el contenido de Ni. Esto principalmente es debido a que cuanto mayor es el porcentaje en peso de Ni, menor es la dureza del material compuesto siendo esto favorable al desgaste. El coeficiente de fricción oscila alrededor de 0.30, mientras que los valores de dureza están comprendidos entre 1650HV, del TiC-10Ni-10Mo, a 810HV, del TiC-48Ni-12Mo. Estos valores máximos y mínimos de dureza de las distintas composiciones de cermets TiC-NiMo corresponden con los valores mínimos y máximos de la constante de desgaste,  $3.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  para TiC-10Ni-10Mo y  $11.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  para TiC-48Ni-12Mo. Resultado lógico, pues cuanto menor es la constante de desgaste mayor es su resistencia.

**-TiCN-Ni-(WC, NbC, TaC, HfC), cermets :**

Se realiza un ensayo de fricción en un tribómetro de tipo ball on flat, en el que los cermets TiCN se desgastan contra un rodamiento de acero comercial, SAE 52100, de 10mm de diámetro [38].

Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 19.94 m
- Carga: 10N.
- Frecuencia de oscilación: 6Hz
- Temperatura: 550°C

La adición de WC, NbC, TaC o HfC dará una mejora en la resistencia al desgaste de los cermets. El coeficiente de fricción es similar para todas las composiciones, alrededor de 0.40. La mejor composición en cuanto a resistencia a desgaste es TiCN-20Ni-10WC cuyo volumen desgastado ha sido  $3.26 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  y su constante de desgaste ha sido de  $1.63 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ . A pesar de tener mejor resistencia al desgaste, no resulta muy significativa con la composición original, TiCN-20Ni, cuyo volumen desgastado ha sido de  $3.49 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  y su constante de desgaste ha sido de  $1.75 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$

**-TiCN, cermets a altas temperaturas:**

El ensayo se realiza en un tribómetro de tipo ball on disc, de dos distintos cermets de TiCN a altas temperaturas. El contracuerpo que realiza el desgaste es una esfera de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de diámetro 3 mm [31].

Las características del desgaste son:

- Distancia de deslizamiento: 2000m.
- Carga: 5N.
- Velocidad de deslizamiento: 0.5 m/s.
- Temperatura: 25°C, 200°C, 400°C, 600°C.

Los cermets ensayados han sido 90TiCN-7Ni-3Mo y 80TiCN-10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7Ni-3Mo. El cermet con alúmina como aglutinante tiene mejores propiedades ante el desgaste. El ensayo se realiza a varias temperaturas, cuanto mayor es la temperatura posee peor comportamiento a desgaste. A 25°C el coeficiente de fricción oscila alrededor de 1 en ambos cermets mientras que a 600°C el valor es de 0.60. Lo mismo sucede con la constante de desgaste, siendo de  $7 \times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$  a 25°C y de  $1 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  a 600°C, un orden de magnitud mayor.

**-TiC, cermets:**

El ensayo se realiza en un tribómetro de tipo pin on disc, utilizando como contracuerpo un acero rápido de dureza HRC62 y dimensiones 5mm de diámetro y 15mm de longitud [39].

Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 3600m
- Carga: 39.2N.
- Velocidad de deslizamiento: 1m/s.
- Temperatura: 25°C, 300-600°C, 600°C.
- Tiempo: 60min.

Se ensayan tres tipos de cermets que son TiC-18Ni, TiC-13Ni-5Mo y TiC-10WC-18NiMo. En este caso, a diferencia del anterior, a mayor temperatura mejora la tasa de desgaste, siendo hasta diez veces más favorables en los compuestos a los que se les ha añadido Mo o WC. La adición de WC o Mo, mejora la resistencia al desgaste. El coeficiente de fricción en el cermet sin elementos añadidos es de 0.29 a 600°C, 0.47 a 25°C, mientras que si se le añade WC o Mo disminuye a 0.19 a 600°C, 0.45 a 25°C. De igual modo ocurre con la constante de desgaste, siendo para la composición sin elementos añadidos de  $10.6 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  a 600°C, a 25°C ha sido  $19.60 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$ , mientras que si se le añade WC o Mo disminuye a  $1.14 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  a 600°C,  $8.39 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  a 25°C.



**-TiC-TiN cermets:**

El ensayo se realizó en un tribómetro de tipo ball on flat, utilizando como contracuerpo una bola de rubí de un diámetro de 6mm [40]

Las características del ensayo son:

- Tiempo de deslizamiento: 21h.
- Carga: 3N.
- Desgaste de ciclo: 80mm/mN
- Temperatura: 25°C.

Se ensayan cuatro distintas composiciones de cermetes TiC-TiN, que son: 70TiC-10Mo<sub>2</sub>C-20Ni, 60TiC-10TiN-10Mo<sub>2</sub>C-20Ni, 75TiC-10Mo<sub>2</sub>C-15Ni, 65TiC-10TiN-10Mo<sub>2</sub>C-15Ni. La constante de desgaste disminuye de forma significativa cuando el cermet contiene tanto TiC como TiN y disminuye más todavía con la presencia de aglutinante metálico en el compuesto. En el caso del cermet 60TiC-10TiN-10Mo<sub>2</sub>C-20Ni disminuye tanto la tasa de desgaste que es prácticamente nula.

El coeficiente de fricción oscila alrededor de 0.15 para los cuatro cermets mientras que la constante de desgaste tiene como orden de magnitud  $10^{-7}$ mm<sup>3</sup>/Nm, salvo para el caso citado anteriormente que casi ni se aprecia.

**-WC-12%Co, carburo cementado:**

El ensayo se realizó en un tribómetro de tipo ring on plate. El material base es un tipo de acero, JISS400, recubierto de carburo cementado WC-12Co. El espesor del recubrimiento es de 400µm. Se realiza el experimento a partir de tres muestras distintas de recubrimiento, en función de su tamaño de grano, siendo F, fino, M, medio y C, grueso. El material utilizado como contracuerpo es alúmina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [41].

Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 500m
- Carga: 321N
- Velocidad de deslizamiento: 0.2 m/s
- Temperatura: 200°C, 300°C, 400°C.

Cuanto más fino es el grano, mejor resistencia al desgaste posee, siendo de  $8.6 \times 10^{-7}$ mm<sup>3</sup>/Nm a 200°C para el grano fino, mientras que para el grano grueso es de  $20.2 \times 10^{-7}$ mm<sup>3</sup>/Nm. Al aumentar la temperatura, disminuye en un orden de magnitud el valor de la constante de desgaste para todos los casos.

Se observó la aparición de una película, tribofilm, compuesta principalmente por WC, Co y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a medida que aumentábamos la temperatura. Esta película es uno de los factores que favorecen la resistencia al desgaste, aparece en el caso del recubrimiento F a partir de 300°C, oxidando a



WCoO<sub>4</sub>, mientras que en los casos de recubrimiento M y C esta oxidación no se produce hasta los 400°C.

**-Carburo cementado, WC, revestido de carbonitruro de titanio, TiCN:**

El ensayo se realizó en un tribómetro de tipo ball on disc, utilizando como contracuerpo bolas de SiC. Los discos son de WC, de diámetro 30mm y espesor 4mm y están revestidos de TiCN [42].

Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 1000m.
- Carga: 3N.
- Velocidad de deslizamiento: 0.1 m/s, 0.3 m/s.
- Temperatura: 25°C.

El WC revestido de TiCN mejora sus propiedades a desgaste con el aumento de la velocidad de deslizamiento. La constante de desgaste disminuye de un valor de  $20 \times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$  para 0.1m/s a un valor de  $15 \times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$  para 0.3m/s de velocidad de deslizamiento.

Los revestimientos de TiCN proporcionan una alta resistencia al desgaste, es por ello que se han aplicado ampliamente en la industria de herramienta e incluso de instrumentos de alta precisión médica. En esta investigación se apreciaba una ligera capa de TiN entre el TiCN y WC.

**-Acero rápido M3/2HSS, adiciones de NbC, TaC:**

El ensayo se realizó en un tribómetro de tipo pin on disc, utilizando como contracuerpo bolas de alúmina de 6mm de diámetro [43].

Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 1000m.
- Carga: 10N.
- Velocidad de deslizamiento: 0.25 m/s.
- Temperatura: 25°C.

El acero rápido M3/2HSS, tiene la siguiente composición: 1.035C; 6.03Mo; 5.99W; 0.2Mn; 4.25Cr; 0.3Si; 3.08V; Fe. Sin ningún tipo de adición,  $2.7 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  ha sido el valor de la constante de desgaste. La resistencia a desgaste mejora cuando se le adiciona tanto NbC como TaC o ambos. El valor de la constante de desgaste para M3/2+7.5%NbC es de  $1.7 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$ , para M3/2+7.5%TaC es de  $2.5 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  y para M3/2+7.5%NbC+TaC es de  $1 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$ . Para los tres casos de adición el porcentaje es porcentaje en volumen.

**-Acero rápido M3/2HSS, adiciones de TiCN:**

El ensayo se realizó en un tribómetro de tipo pin on disc, utilizando como contracuerpo bolas de alúmina de 6mm de diámetro [44].



Las características del ensayo son:

- Distancia de deslizamiento: 400m.
- Carga: 10N.
- Velocidad de deslizamiento: 0.1 m/s.
- Temperatura: 25°C.

El acero rápido M3/2HSS, tiene la siguiente composición: 1.035C; 6.03Mo; 5.99W; 0.2Mn; 4.25Cr; 0.3Si; 3.08V; Fe. Sin ningún tipo de adición,  $7.2 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$  ha sido el valor de la constante de desgaste. La resistencia a desgaste mejora cuando se le adiciona TiCN. El valor de la constante de desgaste para M3/2+2.5%TiCN es de  $3.8 \times 10^{-5} \text{mm}^3/$

## *Capítulo 2*

# *MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS*





## 2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En la industria del mecanizado, los materiales más usados con gran diferencia para la fabricación de herramientas de corte son los carburos cementados, WC-Co, y los materiales tipo cermet. Los carburos cementados son los materiales más usados en aplicaciones de mecanizado. Sin embargo, en los últimos años ha ido creciendo el interés en la búsqueda de materiales alternativos al carburo cementado convencional, debido al alto y fluctuante precio del Co, que es un reflejo de su baja abundancia, así como su toxicidad [45]. En este sentido, en 2011, WC-Co se incluyó en el duodécimo informe sobre cancerígenos del Departamento de Salud y Servicios Humanos de EEUU, donde se detalla que es una sustancia el Co que puede aumentar el riesgo de cáncer tanto en forma de polvo o como material sinterizado [46]. En esta búsqueda de material alternativo, el cermet es el que más ha ido evolucionando a lo largo de los años, siendo el más común y usado en la actualidad aquel que tiene como matriz metálica Ni ó Co y como refuerzo cerámico carbonitruro de titanio, TiCN, consecuencia de la mezcla de TiC y TiN. Los cermets TiCN presentan ventajas frente al carburo cementado, a pesar de tener menor tenacidad, tales como superior dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la oxidación [47], por lo que se prefiere en algunas aplicaciones. Las ventajas que ofrece el cermet TiCN provocan un aumento en la velocidad de corte, una mejora en la superficie de acabado, un excelente control de la viruta y una gran precisión dimensional en las piezas de trabajo. Además de todas estas ventajas, su menor coste y su menor densidad frente a los carburos cementados impulsan su evolución y desarrollo [48]. Sin embargo, las matrices metálicas utilizadas en cermets TiCN, Ni y/ó Co, muestran un riesgo de toxicidad

Todo ello provoca que se esté investigando en la sustitución de estos metales por materiales alternativos como es el caso del Fe. Uno de los grupos dedicado a esta investigación es el Grupo de Investigación de Tecnología de Polvos del Departamento de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid, donde se ha realizado la presente investigación.

El Fe es un material abundante, no es tóxico y puede ser endurecido mediante tratamiento térmico, lo que significa que se puede mejorar la dureza sin necesidad de incrementar el porcentaje de fase dura y esto supone una reducción del coste del material. Este tipo de cermet, con matriz metálica de Fe, es un material novedoso dentro de la industria, por lo que se poseen pocos resultados en cuanto a sus principales propiedades y su comportamiento tribológico bajo diversas condiciones.

El objetivo de esta investigación por tanto consiste principalmente en estudiar la influencia del carbono en la resistencia al desgaste de este tipo de cermet y compararlo con otros materiales utilizados como herramientas de corte. Además, se ha comprobado en estudios previos, que el Carbono, C, tiene una gran influencia en la microestructura y propiedades de este material, es por esto que resulta de especial interés estudiar la resistencia al desgaste de este cermet con diferentes porcentajes de carbono añadido.

Con la intención de lograr este fin, se realizan diversos ensayos de desgaste variando distintos parámetros del ensayo para poder analizar la microestructura, propiedades y composición de los cermets de carbonitruro de titanio con matriz de acero rápido, M2 con distintos porcentajes de carbono añadido en la composición del acero rápido: 0%C, 0.5%C y 1%C.



## *Capítulo 3*

# ***MATERIALES Y MÉTODO***





### 3. MATERIALES Y MÉTODO

La metodología utilizada en este proyecto consta de cuatro partes que tienen por objetivo estudiar el comportamiento a desgaste y los mecanismos de desgaste que intervienen durante los ensayos tribológicos. Inicialmente, se presenta el material estudiado y su caracterización metalográfica. Seguidamente, se determina la dureza de las probetas de cermet M2TiCN. Luego, se explica el procedimiento utilizado para realizar los ensayos de “pin-on-disc”. Esta metodología concluye con los métodos o técnicas empleadas para estudiar el desgaste y para poder determinar los mecanismos de desgaste que sufren los cermets ensayados.

#### 3.1. MATERIALES

Para realizar el consiguiente trabajo se ha basado en el estudio y ensayo de tres tipos distintos de cermets, cuya diferencia radica en el porcentaje de carbono añadido de cada uno de ellos. Los cermets usados son un material compuesto que han sido fabricados mediante pulvimetalurgia convencional y están constituidos por una matriz de acero de alta velocidad, grado M2, y partículas de carbonitruro de titanio (TiCN) como refuerzo cerámico. El porcentaje en volumen tanto del acero rápido como del TiCN es del 50% en volumen. A continuación, se explica brevemente cada uno de estos polvos que forman el material compuesto.

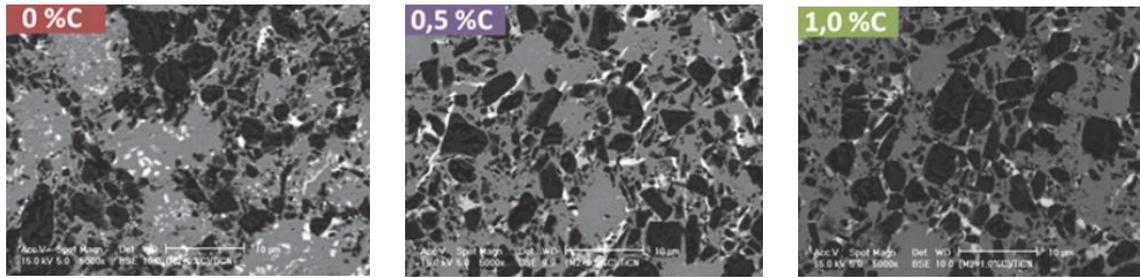
##### **-Acero rápido M2**

El acero rápido, M2, es un acero ferrítico y constituye el 50% en volumen del material compuesto estudiado. Los polvos de matriz metálica M2 cuentan en su composición con los elementos de aleación, 6.2%W, 4.8%Mo, 4.1%Cr y 1.8%V. Estos son polvos prealeados comerciales, suministrados por Osprey, han sido fabricados por atomización en gas y presentan una morfología esférica. Los polvos tienen un tamaño de partícula inferior a  $16\mu\text{m}$  y poseen una densidad de  $8.58\text{g/cm}^3$  [49].

##### **-Carbonitruro de Titanio**

El carbonitruro de titanio constituye el otro 50% en volumen del material compuesto y sus polvos,  $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$  se utilizan como refuerzo cerámico. Los polvos han sido suministrados por H.C. Starck y su morfología es de tipo angular. Los polvos de carbonitruro tienen un tamaño de partícula de  $3.71\mu\text{m}$  y poseen una densidad de  $5.03\text{g/cm}^3$ .

Al material compuesto formado por estos dos tipos de polvos, se le adiciona grafito, en diferente porcentaje, respecto al contenido de M2, para poder estudiar la influencia del contenido de carbono y las características frente al desgaste de los cermets de carbonitruro con matriz de hierro. Los polvos de grafito han sido proveídos por Istam, tienen un tamaño de  $18\mu\text{m}$  y poseen una densidad de  $2.24\text{g/cm}^3$ , mientras que el porcentaje que se añade a estos cermets es de 0%, 0.5% y 1%. En la *Figura 2.1* se muestra la microestructura de los cermets con distinto porcentaje de carbono, donde la fase gris corresponde con la matriz de acero, las partículas oscuras corresponden con el material cerámico de refuerzo, TiCN. Y la fase brillante corresponde con los carburos de los elementos de aleación presentes en la matriz de acero rápido.



**Figura 2.1. Microestructura de los cermets M2-Ti(C, N) sin adición de C y con adición de 0.5%C y 1%C**

## 3.2. PROCESAMIENTO DE LAS PIEZAS

Los cermets son obtenidos mediante pulvimetalurgia convencional, es decir, a partir de tres procesos o etapas diferenciadas que son, mezcla, compactación y sinterización en fase líquida.

### 3.2.1. Mezcla

La etapa de mezcla es la primera dentro de la fabricación de los cermets. En ella se mezclan los polvos de los materiales de partida para obtener el polvo del material compuesto. Esta mezcla, ha sido procesada mediante molienda convencional en Túbula, utilizando una mezcladora agitadora Túbula durante un tiempo de 4 horas. Se utiliza este tipo de mezcla porque presenta ciclos de mezcla cortos y es la vía menos energética, ya que si la mezcla es muy energética puede endurecer el polvo de acero dificultando la etapa de compactación. Tiene como inconveniente que no permite realizar las moliendas con atmósfera y la imposibilidad de poder controlar el parámetro de velocidad.

### 3.2.2. Compactación

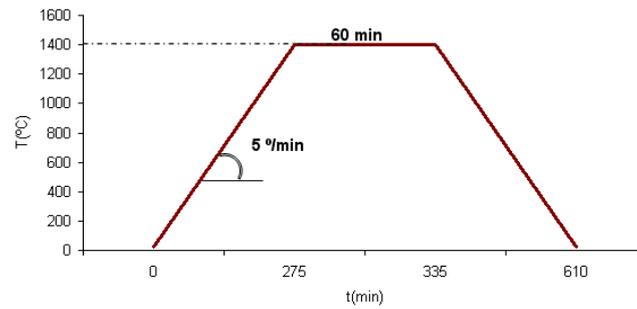
La compactación es uniaxial y consiste en un proceso de conformado de polvos en el que la presión se transmite a la masa de polvos en una única dirección. La compactación de los materiales se realiza en una matriz rectangular de dimensiones 32 mm x 12 mm x 4 mm, en una prensa uniaxial bajo aplicación de 750 MPa de presión.

### 3.2.3. Sinterización

La sinterización es la última etapa en la fabricación de los cermets M2/TiCN. Esta etapa consiste en someter los compactos en verde a un tratamiento térmico, calentamiento, a una temperatura de sinterización determinada, normalmente por debajo de la temperatura de fusión del material, para promover la unión de las partículas de polvo que constituyen el compacto en verde. El objetivo principal de esta etapa es dotar a las piezas de las propiedades físicas y mecánicas necesarias para la aplicación final.

Para alcanzar alta densidad en la pieza final, la sinterización se ha llevado a cabo en presencia de fase líquida. La presencia de la fase líquida durante la sinterización otorga a este proceso una ventaja sobre los demás tipos de sinterización, pues proporciona tanto una fuerza de capilaridad como un medio de transporte más efectivo, lo que conduce a una rápida consolidación y sinterizado. La fuerza de capilaridad debida al mojado del líquido proporciona una compacta y rápida densificación sin la necesidad de una fuerza externa, y dado que el material de partida está en forma de polvo, la fabricación de los componentes es posible sin tener que alcanzar una fusión completa del material.

La sinterización se lleva a cabo en un horno tubular horizontal de alto vacío, a una presión aproximada de  $10^{-5}$  mbar, durante una hora a una temperatura de 1400°C. Esta temperatura de sinterización se escoge en base a estudios previos realizados en el Grupo de Investigación de la Universidad Carlos III de Madrid.



**Figura 2.2. Ciclo de sinterizado en mezcla convencional**

El ciclo de sinterizado para las probetas procesadas mediante mezcla convencional, consta de una etapa de calentamiento a una velocidad de 5°C/min, una segunda etapa de sinterización durante 60 minutos y de una última etapa de enfriamiento hasta temperatura ambiente, *Figura 2.2.*

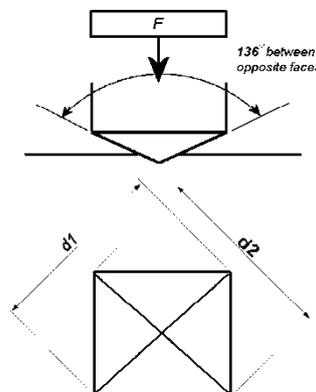
### 3.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS PIEZAS ANTES DEL ENSAYO

#### 3.3.1. Dureza

Dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, entre otras [50]. El término Dureza está definido en la industria como la capacidad que tiene un material a resistir una indentación o una deformación cuando está en contacto con un indentador bajo carga. Un ensayo de dureza consiste en la presión de un indentador de geometría y de propiedades mecánicas conocidas sobre el material a ensayar. Los diferentes tipos de indentador son: esféricos (ensayo Brinell), piramidales (ensayos Vickers y Knoop) o cónicos (ensayo Rockwell). En este proyecto, los indentadores utilizados para obtener los valores de dureza son los de tipo Vickers. En los ensayos de dureza Vickers, el valor de dureza corresponde a la carga soportada por unidad de área de la indentación. El ensayo de dureza es quizás el método más simple y barato para caracterizar mecánicamente un material, dado que no requiere una preparación minuciosa de la muestra y es un ensayo rápido.

Los ensayos de dureza pueden también clasificarse basándose en el valor de la carga de indentación. Se pueden realizar macrodurezas, microdurezas, ensayos de dureza superficial y últimamente ensayos de nanodureza.

En este proyecto, para determinar la dureza de los materiales objeto de estudio se realizan indentaciones con forma piramidal. La punta utilizada ha sido de tipo Vickers, con un peso aplicado de 30 kg (HV30), durante un tiempo de 15 segundos.



**Figura 3.3. Huella del indentador Vickers**

El durómetro utilizado es un modelo 930 de la marca Wilson Wolpert que incluye una pantalla digital que devuelve directamente el valor de la dureza HV tras medir la longitud de las diagonales con el mismo aparato, *Figura 3.3*, aplicando el algoritmo de cálculo de la *Ecuación 3.1*. Es importante que las caras sean lo más planas posibles y estén bien pulidas para facilitar la medición de la huella, cuanto mejor sea esta medida, más exactos los resultados.

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136}{2}}{d^2} \quad HV = \frac{1.854F}{d^2} \quad \text{Ecuación 3.1}$$



Donde  $F$  es la carga de indentación, de valor igual a 30Kp, y  $d$  es el promedio de las dos diagonales medidas. De todas las piezas ensayadas a desgaste se han realizado tres mediciones de dureza.



### 3.4. ESTUDIO DEL DESGASTE MEDIANTE ENSAYOS DE TIPO 'PIN ON DISC'

#### 3.4.1. Equipo: Tribómetro 'Pin on Disc'

En esta parte, se describe el procedimiento que permite determinar el desgaste de los distintos tipos de cermet M2TiCN durante los ensayos de "pin-on-disc", siguiendo el estándar ASTM G99-95a. El tribómetro con el que se efectúa un ensayo de "pin-on-disc", consta principalmente de un pin y un disco. El pin, consiste en un portapin de forma tubular sobre el que encaja un cabezal, ambos de latón, en el que se coloca la bola de alúmina encargada de friccionar y desgastar al cermet. El pin está colocado perpendicularmente al disco. El diámetro de la bola de alúmina utilizado en el proyecto ha sido de 5mm para los ensayos bajo carga de 5N y de 6mm para los de 10N. Esto es debido a que bajo carga de 10N la bola de 5mm era capaz de desplazarse haciendo erróneos los resultados de los ensayos, mientras que con la bola de 6mm esto no ocurría. A pesar de ser bolas de diferente tamaño, este cambio resulta insignificante en los resultados de los ensayos efectuados.

El equipo utilizado para realizar los ensayos es el tribómetro MT/10/SCM fabricado y distribuido por Microtest. Este equipo se utiliza para la investigación y simulación de los procesos de fricción y desgaste por deslizamiento, cuyas variables son la carga, velocidad, radio de giro y distancia de deslizamiento. El tribómetro cuenta además con un sistema de adquisición de datos donde se registra la fuerza aplicada y calcula el coeficiente de fricción a lo largo de todo el ensayo. Todo ello controlado desde un programa desarrollado por la misma casa llamado MT4002

Las piezas ensayadas, en primer lugar han sido desbastadas y pulidas a espejo, operaciones que en este proyecto no han sido ejecutadas ya que anteriormente habían sido realizadas en otra investigación llevada a cabo dentro del Grupo de Investigación de Tecnología de Polvos de la Universidad Carlos III de Madrid. El procedimiento utilizado para realizar los ensayos 'pin on disc' se resume en los siguientes pasos:

Paso 1: Se limpia la superficie de la probeta para eliminar el polvo o las impurezas. Para ello, se lava con jabón, agua y etanol.

Paso 2: El pin y el disco se pesan en la báscula antes y después de cada ensayo. La báscula tiene una sensibilidad de 0,0001 g.

Paso 3: Se montan la probeta y el pin en el tribómetro. La probeta se coloca sobre el disco giratorio y se engancha mediante tornillos para que no se desplace durante el ensayo. El pin se coloca en un portapin fijo teniendo en cuenta el radio de la pista descrita sobre el acero, 4 mm.

Paso 4: Se seleccionan los parámetros del ensayo en el programa MT4002: la carga a aplicar, la velocidad de deslizamiento, el radio de la pista circular y la distancia de deslizamiento.

Paso 5: Se ejecuta el programa.

Paso 6: Se guardan los resultados obtenidos.

#### 3.4.2. Parámetros de ensayo utilizados

El desgaste producido en un ensayo tribológico depende de varios factores como: la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el medio y las propiedades



del material. Los ensayos de “pin-on-disc” se han realizado a temperatura ambiente sin lubricación a una carga de 5N y de 10N en condiciones controladas de temperatura y de humedad, estando la temperatura comprendida entre los 14°C y los 26°C.

Para controlar la humedad se colocaron piedras de sílice que absorben la humedad del entorno del equipo, esta varió entre un 27% y un 60%.

Las distancias recorridas han sido: 500 m, 1000 m, 1500 m y la velocidad seleccionada ha sido de 500rpm, que con un radio de giro de 4mm equivale a una velocidad lineal de 0.21m/s. En la *Tabla 3.1*, se muestran los parámetros utilizados que pueden controlar el tribómetro ‘pin on disc’ para realizar los ensayos de desgaste.

*Tabla 3.1. Parámetros utilizados en los ensayos ejecutados*

Radio de giro	4mm
Velocidad	0.21m/s
Fuerza	5N, 10N
Distancia de deslizamiento	500m, 1000m, 1500m

De estos parámetros se obtienen seis condiciones para cada tipo de cermet, al combinar los distintos tipos de carga estudiada, 5N y 10N, con las distintas distancias de deslizamiento, 500m, 1000m y 1500m. Por lo tanto, al existir seis condiciones por cermet y estudiar tres tipos distintos de cermet, con distinto porcentaje de carbono añadido, se obtienen dieciocho ensayos que son los que se han realizado en este proyecto.

### 3.5. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL DESGASTE

Para poder evaluar y estudiar el comportamiento a desgaste de las piezas ensayadas se han utilizado varias técnicas complementarias que permiten cuantificar el volumen de material eliminado y obtener la constante de desgaste,  $k$ , además de tratar de identificar los distintos mecanismos de desgaste que ocurren durante la ejecución de los ensayos.

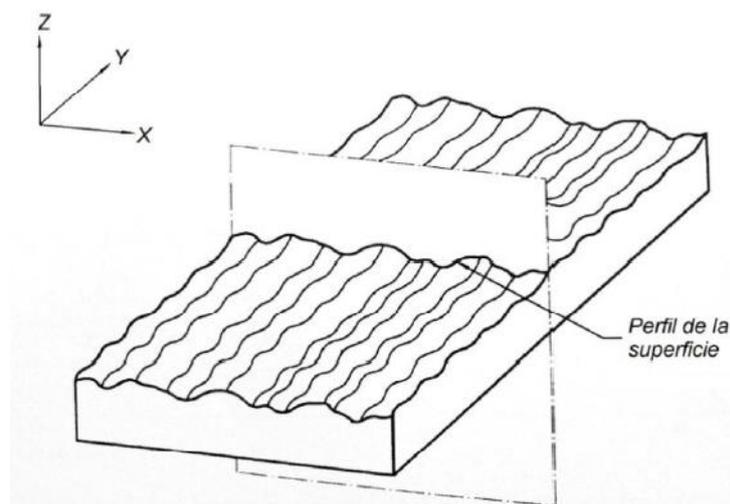
#### 3.5.1. Variación de masa

Las piezas ensayadas son pesadas antes y después de la realización del ensayo mediante una báscula de precisión de 0.0001g. Este dato supone una primera aproximación sobre la eliminación o adhesión de material durante el ensayo.

#### 3.5.2. Medida del perfil de la pista mediante un rugosímetro de contacto

En todas las superficies existen defectos y distorsiones. Se ha demostrado que estas irregularidades microscópicas influyen en la fricción y el desgaste. En el caso de las probetas ensayadas, no se da esta influencia ya que han sido muy bien pulidas, dejando una superficie totalmente lisa cuyas irregularidades son inapreciables en el desarrollo del desgaste. Una vez iniciado el desgaste, en la huella de desgaste y los alrededores de ella, la superficie sí que ha sido modificada, se ha desprendido material y la superficie que antes de ser ensayada era lisa, presenta ahora picos y valles como consecuencia del desgaste producido en el ensayo de 'pin on disc'.

El rugosímetro empleado proporciona en cada medición dos gráficas que corresponden con el perfil de la superficie y el perfil de rugosidad de las zonas donde se ha ejecutado dicha medición. La diferencia entre estos dos perfiles es que el perfil de superficie consiste en el perfil resultante de la intersección de la superficie real con un plano especificado, como se muestra en la *Figura 3.4*, mientras que el perfil de rugosidad se deriva del anterior perfil, siendo más resolutivo ya que filtra las ondulaciones del perfil de la superficie [51].



**Figura 3.4. Perfil de superficie proporcionado por el rugosímetro**

Se realizan dos mediciones con el rugosímetro de la huella de desgaste para conseguir un buen promedio del valor obtenido. Para todas las medidas, la longitud de evaluación ( $l_t$ ) fue de 4,80 mm distribuido en 6 tramos de 0,8 mm ( $l_c$ ). Las gráficas que proporciona el rugosímetro resultan de la aplicación del filtro M1 DIN4777.

Para obtener la topografía de las superficies, se utiliza un procedimiento normalizado de trabajo que nos guía en cuanto a la manera de utilizar el rugosímetro 'Thyssen' que se ve en la *Figura 3.5*. Este rugosímetro tiene una punta palpadora de diamante de forma cónica (90°), con 5µm de diámetro de la punta, de resolución mínima 0,1µm.



**Figura 3.5. Rugosímetro empleado para obtener el perfil de rugosidad de los cermets ensayados**

El procedimiento utilizado se resume en los siguientes pasos:

Paso 1: Encender el rugosímetro y entrar al programa TRW\_E.

Paso 2: Colocar la probeta debajo de la punta del brazo del rugosímetro.

Paso 3: Bajar el rugosímetro hasta que la punta del brazo entre en contacto con la superficie y fijar el cero de la medida.

Paso 4: Realizar la medida.

Paso 5: Guardar los resultados.

Gracias a la medida del perfil de rugosidad podemos calcular el ancho de pista, el volumen desgastado y la constante de desgaste.

#### **-Ancho de pista**

El rugosímetro proporciona una representación de la huella de desgaste. Se mide la distancia horizontal de la huella representada y ese valor es el ancho de pista. El ancho de pista se mide también con el SEM, siendo más exacta esta medida que la del rugosímetro.

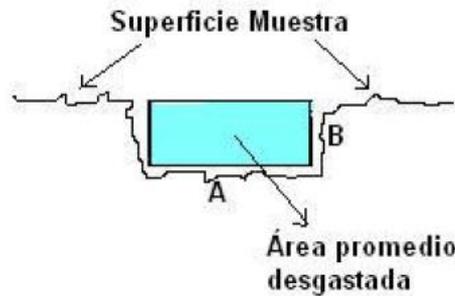
#### **-Volumen desgastado**

El valor del volumen desgastado es un dato esencial en el estudio del desgaste. Para poder medir este volumen, utilizamos la medida que se obtiene del rugosímetro de la profundidad de la

huella y el área promediada de la misma. Con la *Ecuación 3.2* obtenemos el volumen desgastado de la muestra estudiada.

$$\text{Vol}_{\text{des}} = A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde A es el área promedio calculada y r el radio de la huella desgastada, 4mm.



**Figura 3.6. Aproximación área desgastada**

Siendo la *Figura 3.6* la aproximación realizada para calcular el área desgastada de la muestra y el área según la *Ecuación 3.2*.

$$\text{Área} = A \cdot B \quad \text{Ecuación 3.3}$$

El área promedio desgastada no siempre se realiza a través de la *Ecuación 3.3*, ya que en muchas de las muestras, el perfil determinado por el rugosímetro proporciona una huella cuya área desgastada se puede asemejar mejor a un triángulo.

#### **-Constante de desgaste, k**

A partir del del volumen desgastado se calcula el valor de la constante de desgaste, *k*, que también resulta un dato muy importante para poder evaluar el desgaste ocurrido. Este valor se obtiene a partir de la *Ecuación 3.4*, conocida como ecuación de Archard [37].

$$K = H \cdot V \text{ (mm}^3\text{)} / F \text{ (N)} \cdot L \text{ (m)} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde *K* es el coeficiente adimensional de desgaste, *H* es la dureza del material más blando, *V* (mm<sup>3</sup>) es el volumen desgastado, *F* (N) es la carga normal aplicada y *L* (m) es la distancia de deslizamiento.

### **3.5.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis (EDS)**

El microscopio electrónico de barrido (*Scanning electron microscope, SEM*) [52] se emplea para estudiar la estructura de la superficie de una determinada pieza. Para ello utiliza un haz de electrones proveniente de una fuente, usualmente un filamento de Wolframio, dirigido hacia la muestra en estudio. Los electrones son acelerados con una energía usualmente comprendida entre 1 keV y 30 keV y, mediante un conjunto de lentes, este haz es reducido a un diámetro de entre 2 a 10 nm en las proximidades de la superficie de la muestra. El haz de electrones barre la superficie en cuestión, mientras que un detector recibe los electrones secundarios u otro tipo de radiación emitidos por cada punto de la superficie como consecuencia del impacto del haz. Estas emisiones son capturadas y convenientemente interpretadas para obtener una imagen que es presentada en un monitor para su visualización.



Se han empleado dos modos de captura de imágenes: uno mediante la detección de electrones secundarios (SE) y otro mediante la detección de electrones retrodispersados (BSE). Los primeros son detectados mediante un sistema fotomultiplicador conocido como detector Everhart-Thornley. Estos electrones son aquellos que escapan de la muestra con energías por debajo de 50 eV y que, tras ser acelerados, emiten una luz que es transmitida mediante un tubo hasta el fotomultiplicador, el cual convierte los fotones en pulsos de electrones que posteriormente se amplifican y se usan para modular la intensidad del tubo de rayos catódicos. Por el contrario los electrones retrodispersados abandonan la superficie portando una gran parte de la energía incidente. No son tan numerosos como los secundarios, pero se emplean también para difracción y análisis.

Las muestras se examinaron bajo diferentes aumentos capturando imágenes de las zonas más representativas, empleando para ello tanto electrones secundarios como retrodispersados. Se realizó también un análisis semi-cuantitativo de las muestras mediante EDS:

**-Energy-dispersive spectrometre (EDS):**

Este sistema se empleó para realizar un análisis composicional en puntos (*spot analysis*) o áreas significativas de las muestras estudiadas. Con este sistema se puede obtener la mayoría del espectro de rayos X empleando para ello un detector, generalmente de Silicio o Germanio. Se utiliza frecuentemente para la microcaracterización e identificación de materiales. Los rayos X incidentes provocan la excitación de un cierto número de electrones a la banda de conducción del Silicio, dejando el mismo número de cargas positivas (huecos) en las capas más exteriores. El número de pares electrón-hueco generados es proporcional a la energía del fotón que está siendo detectado, posibilitando así su identificación.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) y el microanálisis (EDS) permiten, por tanto, evaluar los mecanismos de desgaste que hayan podido ocurrir durante la ejecución de los ensayos como oxidación, deformación o delaminación entre otros tipos.

Además, proporciona una medida fiable del ancho de pista que se contrasta con la medida del ancho de pista obtenida a través del rugosímetro.

## *Capítulo 4*

# *RESULTADOS Y ANÁLISIS*

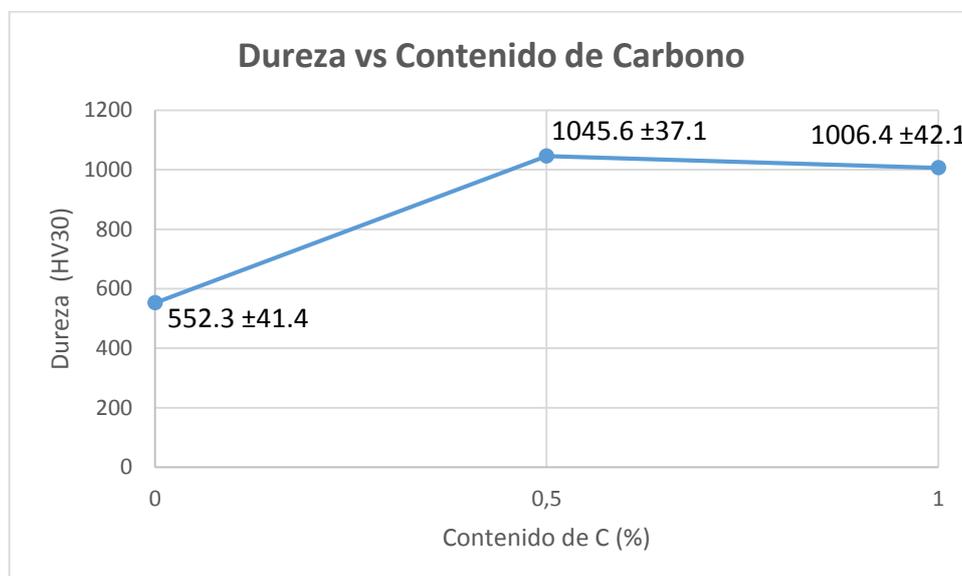


## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de la investigación se obtienen gracias a la tecnología detallada en el *Capítulo 3*, Materiales y Método. Los ensayos se realizan modificando los parámetros de fuerza y distancia de deslizamiento, realizando en total 18 ensayos cuyos resultados se comparan entre sí para ver cómo se comportan tribológicamente los cermets M2TiCN con distintos porcentajes de carbono añadido. Antes de ensayar el material, se mide su dureza y posterior al ensayo se mide su rugosidad, que también es ilustrativo ya que muestra el perfil del desgaste y da un valor del volumen desgastado, tal y como se explica en el anterior capítulo. Por último se analiza la microestructura a través de la microscopía electrónica, SEM.

### 4.1. DUREZA

Cómo se ha precisado en el *Capítulo 3*, antes de realizar los ensayos de desgaste se mide la dureza de las probetas mediante un ensayo Vickers. Esta medición es necesaria para interpretar el comportamiento a desgaste de los materiales, ya que la dureza es uno de los factores que más afectan a dicho comportamiento. Por otra parte, la dureza varía en función del porcentaje de carbono añadido que posea cada cermet e incluso puede variar en los cermets con igual porcentaje de carbono, debido a que la sinterización no haya sido idéntica. En el caso de que la sinterización haya sido ligeramente distinta, la dureza es distinta, lo que se traduce en un distinto comportamiento a desgaste que habría que analizar. En la *Figura 4.1* se representa gráficamente la dureza de los cermets ensayados con distinto porcentaje añadido.



**Figura 4.1. Dureza media de los tres tipos de cermets ensayados con distinto porcentaje de carbono añadido**



## 4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

### 4.2.1. Pérdida de masa

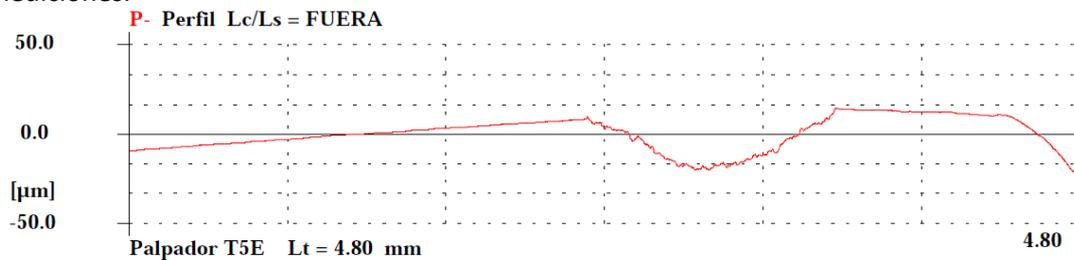
La *Tabla 4.1* muestra la pérdida de masa medida de los cermets ensayados. Esta pérdida de masa resulta el dato más inmediato que se mide, ya que se obtiene nada más finalizar el ensayo. Se observa como para los cermets con algún porcentaje de carbono es prácticamente nula la pérdida de masa, siendo inapreciable bajo carga de 5N. En cuanto a los cermets sin carbono, es sustancialmente mayor en comparación con los otros dos casos

*Tabla 4.1. Pérdida de masa de los cermets ensayados bajo las condiciones de ensayo, g*

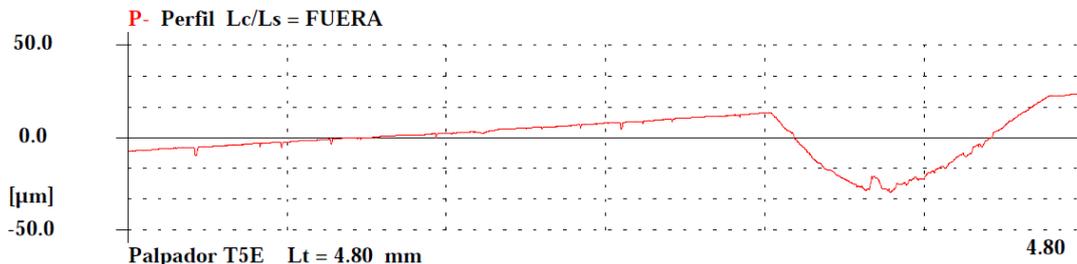
M2TiCN	Carga 5N			Carga 10N		
	500m	1000m	1500m	500m	1000m	1500m
0%C	0.0097	0.0049	0.0049	0.0054	0.0151	0.0073
0.5%C	0.0001	-0.0001	0.0001	0.0000	0.0004	0.0003
1%C	0.0002	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0022	0.0018

### 4.2.2. Volumen desgastado

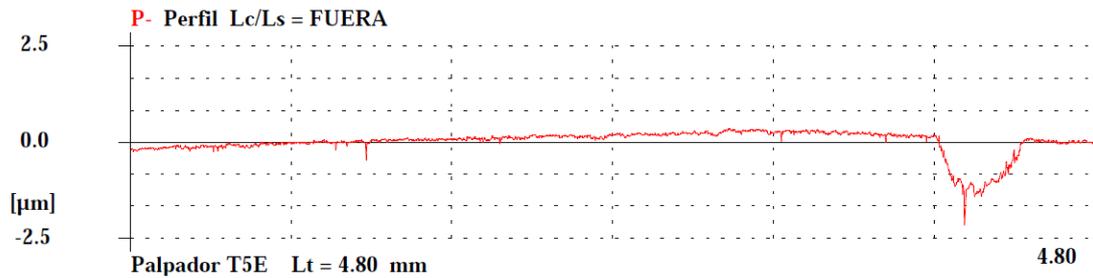
El volumen desgastado se mide gracias a la medida de rugosidad que proporciona el rugosímetro tal y como se indicó en el *Capítulo 3*. En las siguientes figuras se muestran varias de estas mediciones.



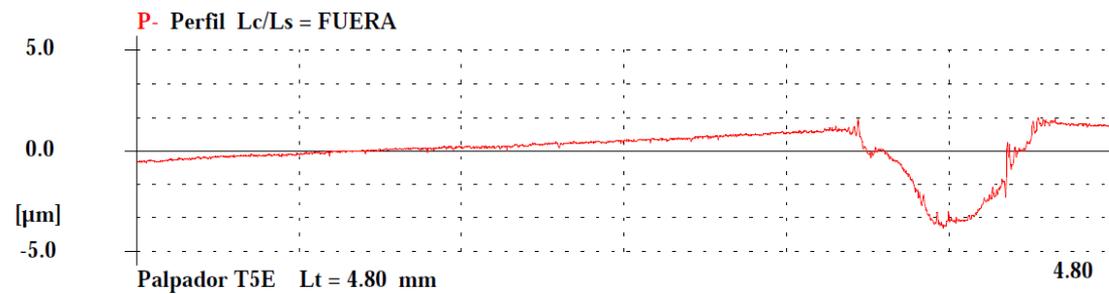
**Figura 4.2. Perfil de rugosidad de cermet con 0%C, bajo carga de 5N y distancia de 1000m**



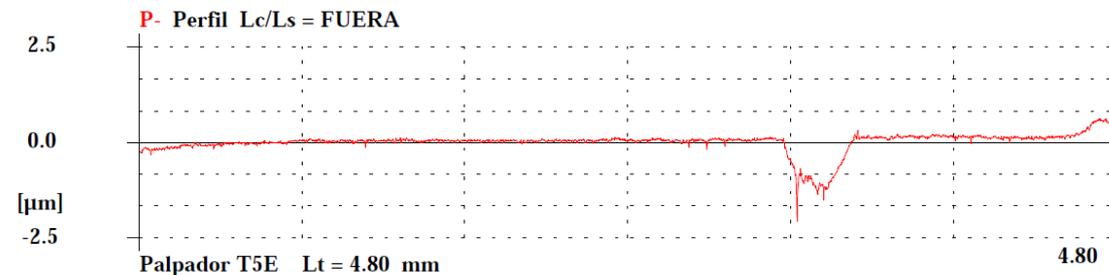
**Figura 4.3. Perfil de rugosidad de cermet con 0%C, bajo carga de 10N y distancia de 1000m**



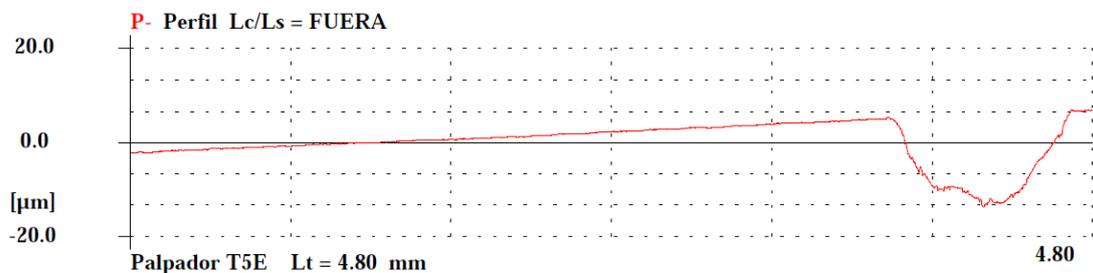
**Figura 4.4. Perfil de rugosidad de cermet con 0.5%C, bajo carga de 5N y distancia de 1000m**



**Figura 4.5. Perfil de rugosidad de cermet con 0.5%C, bajo carga de 10N y distancia de 1000m**



**Figura 4.6. Perfil de rugosidad de cermet con 1%C, bajo carga de 5N y distancia de 1000m**



**Figura 4.7. Perfil de rugosidad de cermet con 1%C, bajo carga de 10N y distancia de 1000m**

De los perfiles proporcionados por el rugosímetro, cabe destacar como en el caso de que el cermet no posea carbono añadido la huella de desgaste que se origina después del ensayo es muy profunda y ancha en comparación con los cermets que si poseen carbono en su composición. Esta mayor profundidad y anchura se traduce en unos valores de volumen desgastado mucho más elevados para este tipo de cermets como se comprueba en la *Tabla 4.2*. Se ve además, que cuando la carga aplicada pasa de 5N a 10N la huella de desgaste se hace más grande aun para los tres tipos de cermets, sobretodo en el caso del cermet sin carbono en su composición.

Estas diferencias que se muestran en el perfil de rugosidad se deben principalmente a la gran desigualdad de dureza que existe entre los distintos tipos de cermets.



Las figuras 8 y 9, representan el logaritmo del volumen desgastado frente a la distancia de deslizamiento para los tres tipos de cermet bajo carga de 5N y 10N. En dichas figuras, se puede observar cómo los diagramas presentan comportamientos diferentes en función del porcentaje de carbono de cada cermet. Así, a medida que aumentamos la distancia de deslizamiento, el volumen desgastado aumenta considerablemente, siendo mucho mayor en los cermets con porcentaje añadido de 0%C, posteriormente en los de 1%C y por último 0,5%C.

Los cermets con 0,5%C y 1%C han tenido un volumen desgastado, reflejado en la *Tabla 4.2*, similar en los ensayos realizados, no así el cermet con 0%C. Esta diferencia, mayor incluso que en un orden de magnitud, es debido principalmente a que la dureza de este cermet es mucho menor que la de los otros dos, oscilando esta alrededor de 600HV, mientras que las de 0,5%C y 1%C oscilan entorno a 1100HV.

Esta diferencia de dureza se debe a que durante la sinterización, al aumentar el porcentaje de carbono disminuye la temperatura de liquidus, provocando que haya mayor cantidad de fase líquida la cual disuelve a los carburos de los elementos de aleación que habían precipitado en el acero durante el calentamiento en la sinterización. Pero además, las partículas de TiCN también se disuelven parcialmente en la fase líquida metálica.

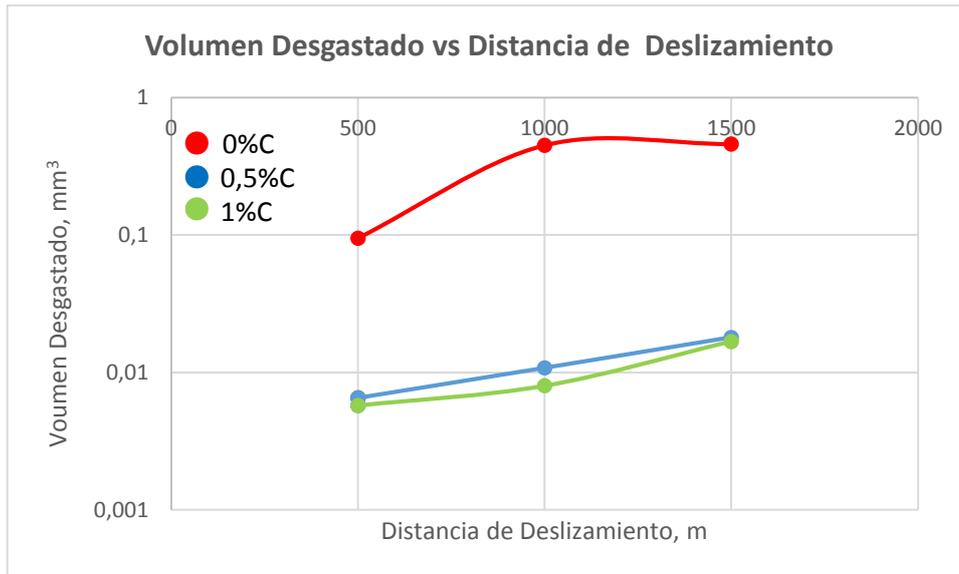
Durante el enfriamiento, las partículas de TiCN que se habían disuelto en la fase líquida reprecipitan enriquecidas en elementos de aleación, utilizando como puntos de nucleación las partículas de TiCN que habían quedado sin disolver formando un anillo de solución sólida (Ti, M)(C, N) alrededor de los núcleos de TiCN.

El crecimiento de este anillo está inhibido por la precipitación de los carburos de los elementos de aleación que también habían sido disueltos en la matriz.

Todo esto se traduce en un aumento de dureza y de densidad en los cermets con porcentaje de carbono añadido [53].

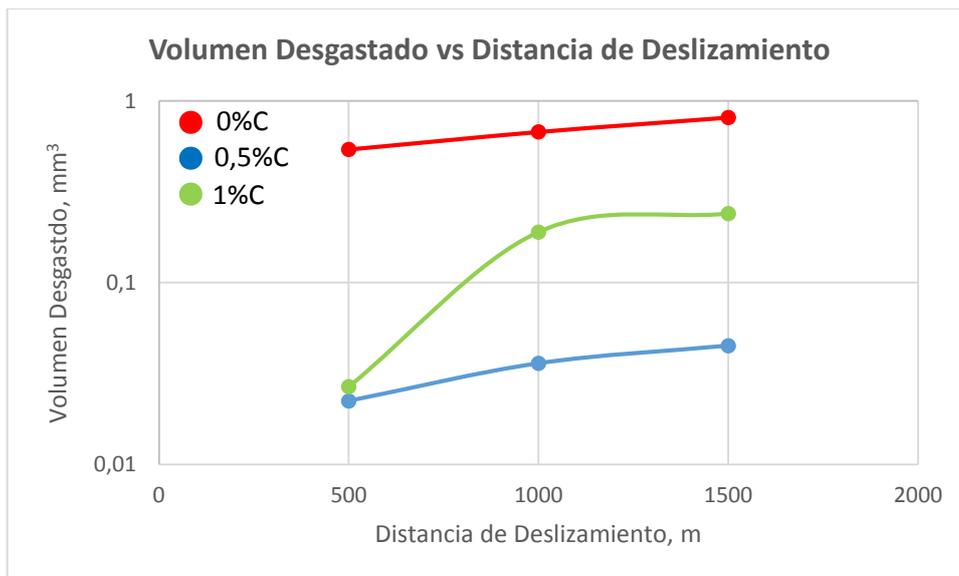
*Tabla 4.2. Volumen desgastado de los cermets ensayados bajo las condiciones de ensayo, mm<sup>3</sup>*

M2TiCN	Carga 5N			Carga 10N		
	500m	1000m	1500m	500m	1000m	1500m
0%C	0.095 ±0.008	0.45 ±0.04	0.46 ±0.04	0.54 ±0.043	0.674 ±0.061	0.809 ±0.073
0.5%C	0.00654 ±0.0006	0.0108 ±0.0013	0.018 ±0.002	0.0224 ±0.0023	0.036 ±0.032	0.045 ±0.0043
1%C	0.00575 ±0.0005	0.008 ±0.0007	0.0168 ±0.002	0.0268 ±0.003	0.19 ±0.02	0.24 ±0.021



**Figura 4.8. Volumen desgastado vs distancia de deslizamiento bajo carga de 5N para los tres tipos de cermets ensayados**

Cuando aumentamos la carga de 5N a 10N, el volumen desgastado aumenta considerablemente.



**Figura 4.9. Volumen desgastado vs distancia de deslizamiento bajo carga de 10N para los tres tipos de cermets ensayados**

#### 4.2.3. Ancho de pista

Una vez obtenido el perfil de rugosidad, con la metodología seguida en el *Capítulo 3* se mide el ancho de pista de cada probeta ensayada. Los resultados de estas mediciones se muestran en la *Tabla 4.3*.



Tabla 4.3. Ancho de pista medio, mm

M2TiCN	Carga 5N			Carga 10N		
	500m	1000m	1500m	500m	1000m	1500m
0%C	0.82±0.075	1.2±0.11	1.6±0.2	1.30±0.12	1.4±0.11	1.6±0.15
0.5%C	0.40±0.033	0.48±0.044	0.64±0.062	0.62±0.053	0.98±0.081	0.96±0.076
1%C	0.36±0.037	0.38±0.040	0.51±0.043	0.68±0.059	0.88±0.078	1.2±0.13

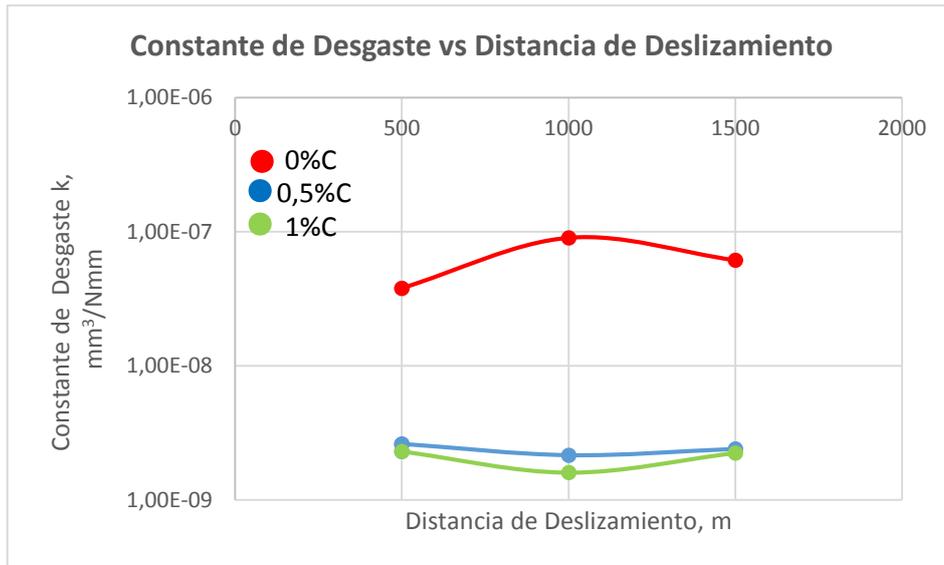
#### 4.2.4. Constante de desgaste

A partir del volumen desgastado y conociendo la carga aplicada y la distancia de deslizamiento se calcula la constante de desgaste  $k$  ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ), utilizando la ecuación de Archard, detallada en el *Capítulo 3*. Este valor de la constante de desgaste se refleja en la *Tabla 4.4*.

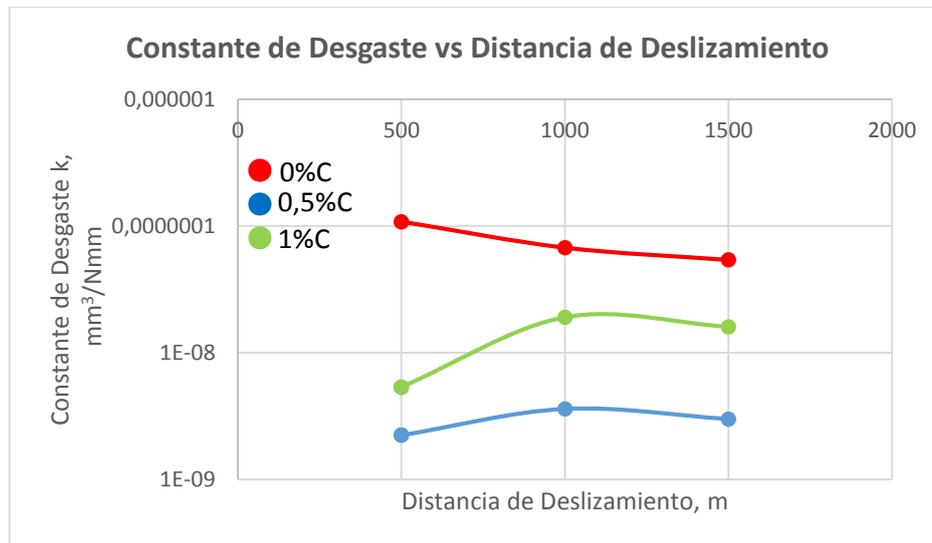
En las figuras 10 y 11, pueden observarse las constantes de desgaste calculadas a partir de la fórmula de Archard. Se ve que la que posee constante de desgaste mayor es la muestra (0%C, 10N, 500m), en cambio la que posee menor constante de desgaste es la muestra (1%C, 5N, 1000m). Lo que se aprecia es que las muestras con carbono añadido es que tienen una constante de desgaste menor que coincide con el menor volumen desgastado y mayor dureza, particularmente las de 0,5%C que todas sus constantes de desgaste son del orden de magnitud  $10^{-6}$ .

Tabla 4.4. Constantes de desgaste de los cermets ensayados bajo las condiciones de ensayo,  $\text{mm}^3/\text{Nm}$ 

M2TiCN	Carga 5N			Carga 10N		
	500m	1000m	1500m	500m	1000m	1500m
0%C	$3.80 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-5}$	$6.13 \times 10^{-6}$	$1.08 \times 10^{-4}$	$6.74 \times 10^{-5}$	$5.393 \times 10^{-5}$
0.5%C	$2.62 \times 10^{-6}$	$2.16 \times 10^{-6}$	$2.40 \times 10^{-6}$	$2.24 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$
1%C	$2.30 \times 10^{-6}$	$1.60 \times 10^{-6}$	$2.24 \times 10^{-6}$	$5.36 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$



**Figura 4.10. Constante de desgaste vs distancia de deslizamiento bajo carga de 5N para los tres tipos de cermets ensayados**



**Figura 4.11. Constante de desgaste vs distancia de deslizamiento bajo carga de 10N para los tres tipos de cermets ensayados**

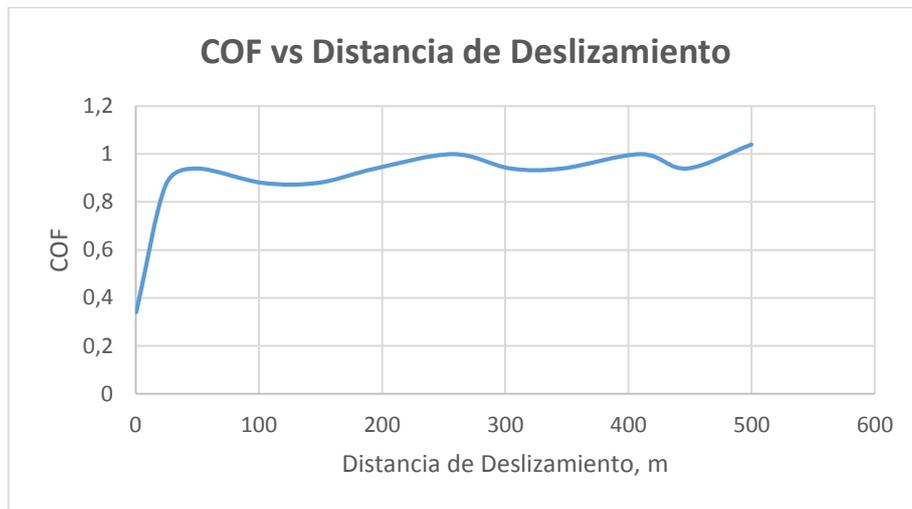
#### 4.2.5. Coeficiente de fricción (COF)

Los ensayos de desgaste realizados han proporcionado unos valores muy acotados y semejantes del coeficiente de fricción,  $\mu$ , con ligeras diferencias entre los tres distintos tipos de cermet. En las siguientes figuras se muestran los resultados del coeficiente de fricción para los distintos tipos de cermet, tanto bajo carga de 5N como de 10N. Estos resultados del COF han sido recogidos a través del programa MT4002.

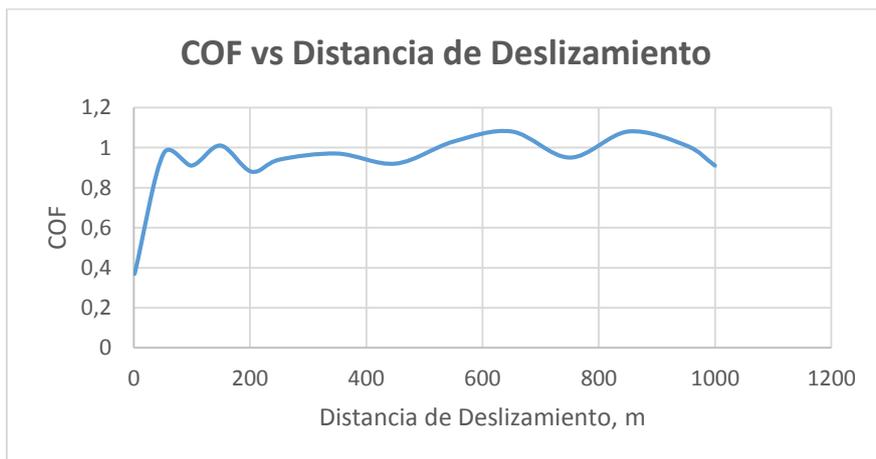
Las figuras presentan la evolución de los coeficientes de fricción  $\mu$  para los cermets con distinto porcentaje de carbono para las condiciones estudiadas, es decir, velocidad de 0.21m/s, bajo carga de 5N y 10N y a velocidades de deslizamiento de 500m, 1000m y 1500m.



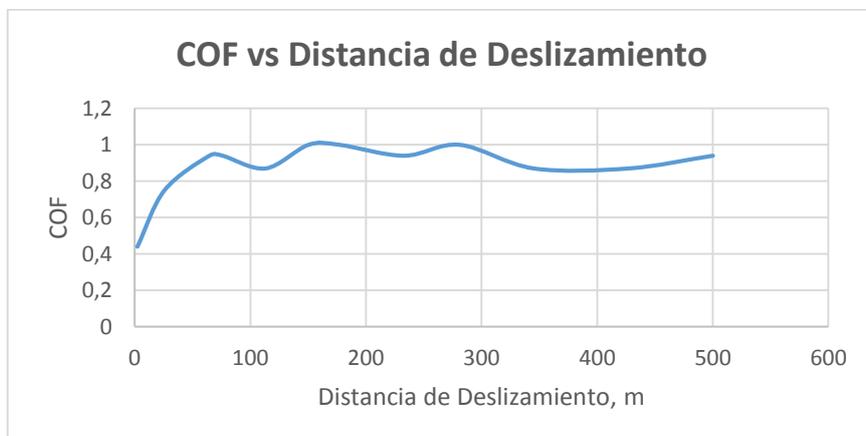
El coeficiente de fricción es similar para los tres tipos de cermets, oscilando en valores en torno al 0,9. Bajo carga de 10N, este valor se acrecienta un poco pero no siendo la diferencia substancial.



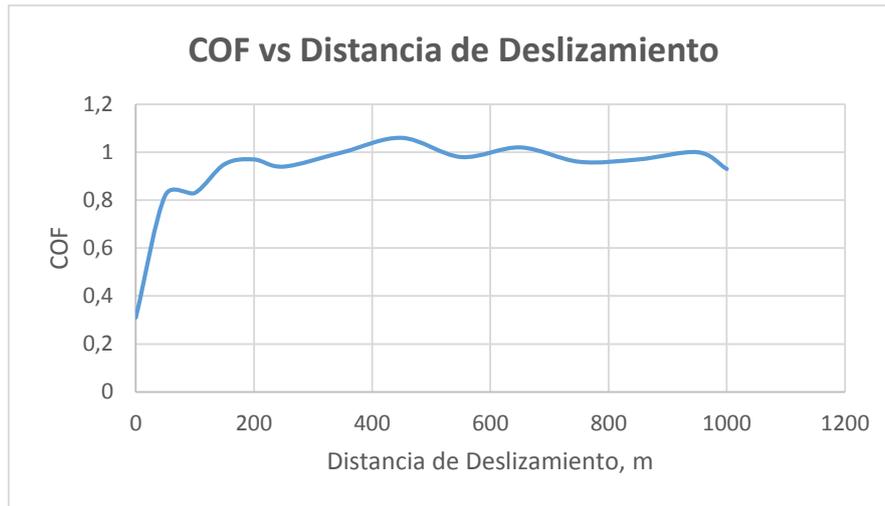
**Figura 4.12. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 0%C bajo carga de 5N y distancia de deslizamiento de 500m**



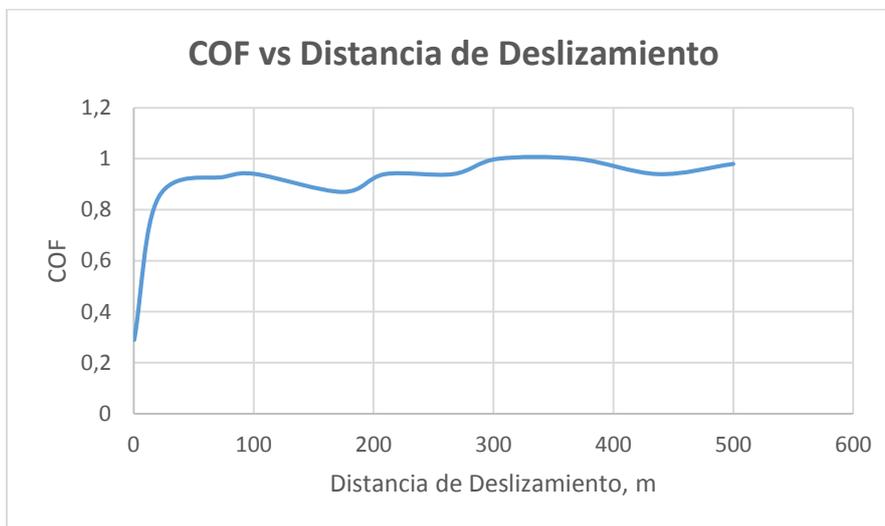
**Figura 4.13. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 0%C bajo carga de 5N y distancia de deslizamiento de 1000m**



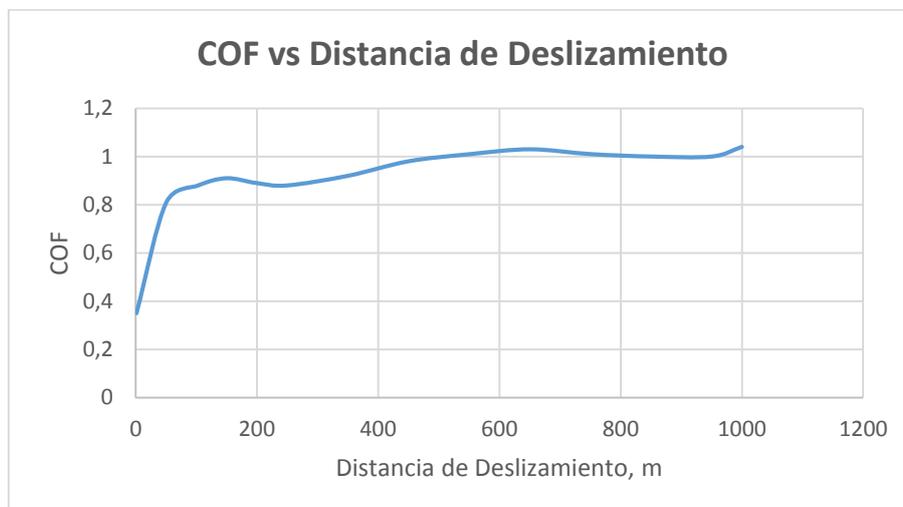
**Figura 4.14. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 0.5%C bajo carga de 5N y distancia de deslizamiento de 500m**



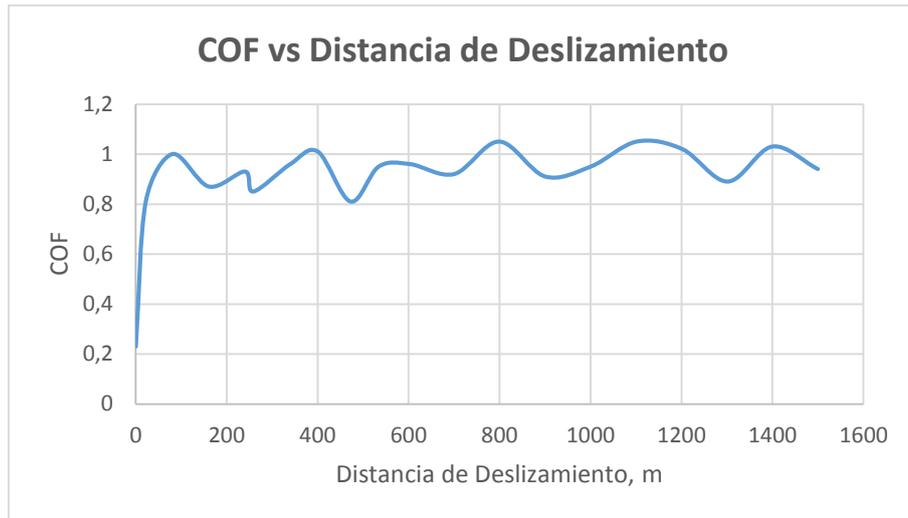
**Figura 4.15. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 0.5%C bajo carga de 5N y distancia de deslizamiento de 1000m**



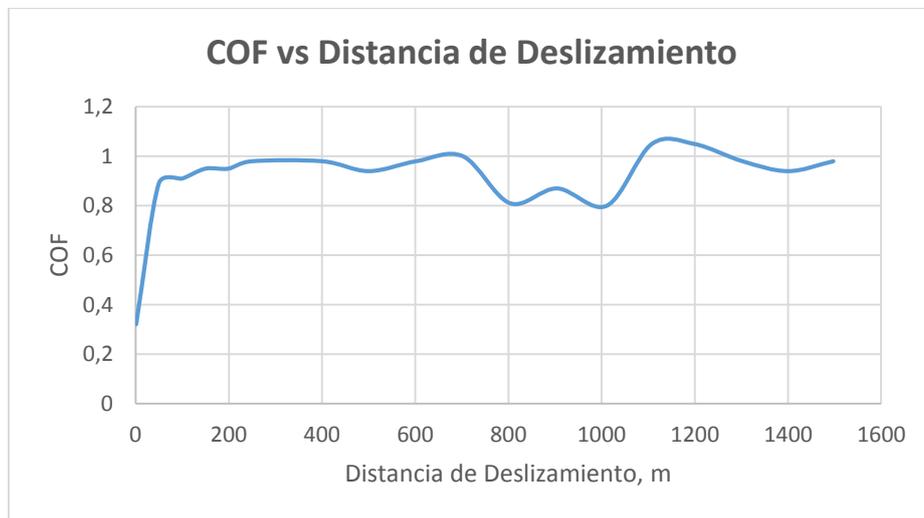
**Figura 4.16. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 1%C bajo carga de 5N y distancia de deslizamiento de 500m**



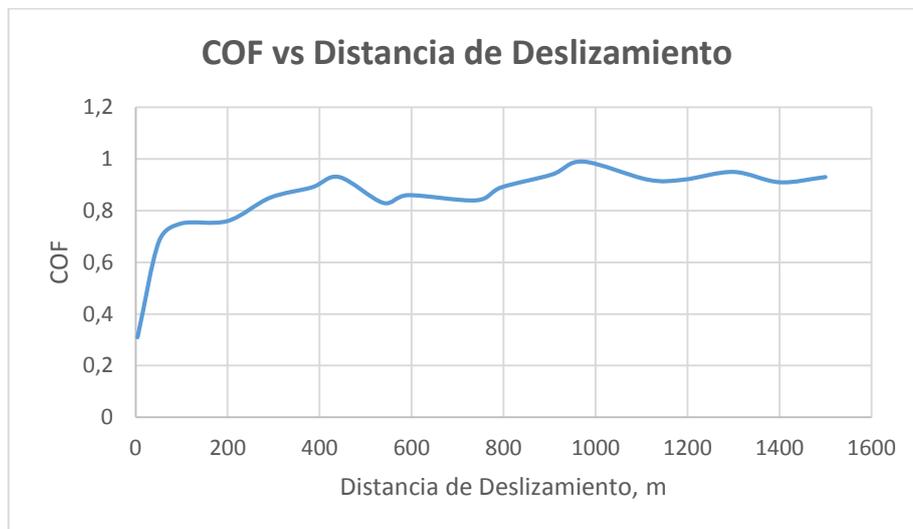
**Figura 4.17. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 1%C bajo carga de 5N y distancia de deslizamiento de 1000m**



**Figura 4.18. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 0%C bajo carga de 10N y distancia de deslizamiento de 1500m**



**Figura 4.19. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 0.5%C bajo carga de 10N y distancia de deslizamiento de 1500m**



**Figura 4.20. COF vs distancia de deslizamiento para cermet con 1%C bajo carga de 10N y distancia de deslizamiento de 1500m**

### 4.3. MECANISMOS DE DESGASTE Y ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE DESGASTADA

La observación microscópica de las superficies mediante SEM permite determinar los mecanismos de desgaste. La primera medida en el SEM es para medir el ancho de pista de la huella de desgaste, *Tabla 4.5*, que da un valor para comparar el desgaste producido entre las distintas probetas ensayadas. Pero la función primordial del SEM es la observación de características que indiquen si ha ocurrido abrasión, adhesión, formación de residuos y su naturaleza, la forma y los lugares de acumulación de los residuos, si ha existido desgaste únicamente del material de estudio o también del contramaterial, etc. A continuación se expondrán algunas de las características encontradas para cada material, mediante imágenes de SEM y se compararán los materiales entre sí.

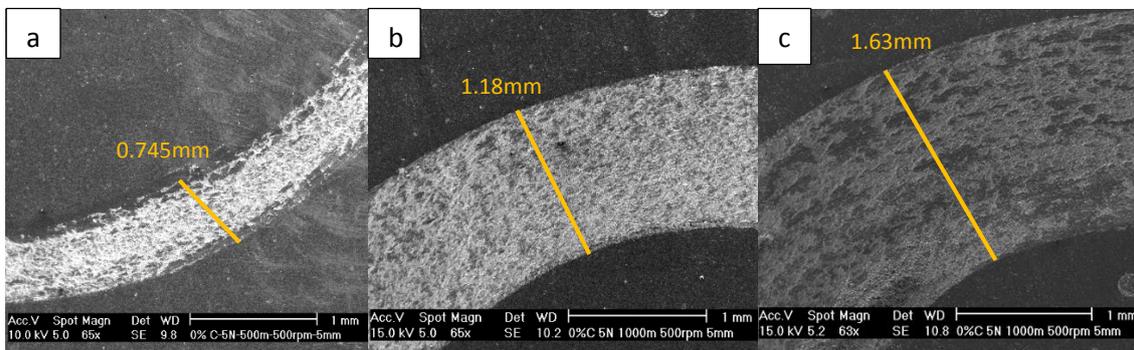
*Tabla 4.5. Ancho de pista medio, mm*

M2TiCN	Carga 5N			Carga 10N		
	500m	1000m	1500m	500m	1000m	1500m
0%C	0.745±0.073	1.18±0.12	1.63±0.15	1.36±0.13	1.59±0.16	1.5±0.13
0.5%C	0.408±0.038	0.489±0.045	0.568±0.053	0.74±0.074	1.06±0.09	1±0.09
1%C	0.35±0.033	0.335±0.031	0.563±0.057	0.75±0.074	0.923±0.093	1.2±0.11

Estas medidas del ancho de pista medio, se comprueba que son prácticamente idénticas a las calculadas a partir del perfil de rugosidad, *Tabla 4.3*. La pequeña diferencia existente se debe a que este método a través del SEM es más resolutivo.

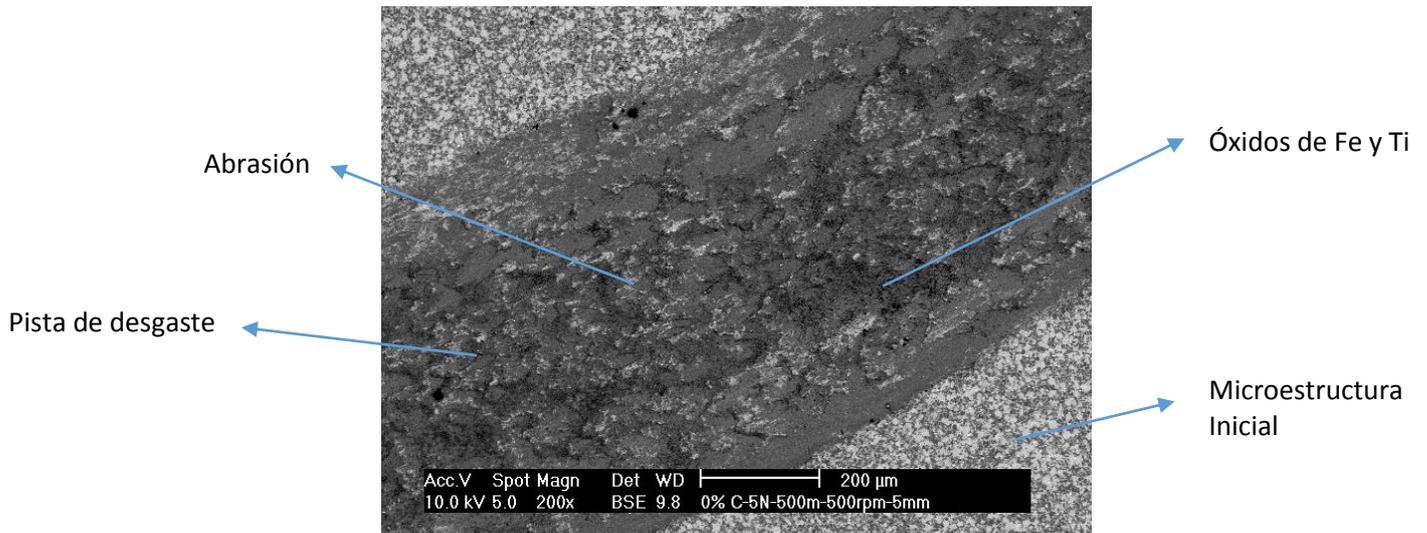
#### 4.3.1. Cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C ensayado bajo carga de 5N

En la *Figura 4.21* se muestra una comparación de las pistas de desgaste, a las tres distancias de deslizamiento ensayadas, proporcionadas para este tipo de cermet bajo carga de 5N. En ella se ve la evolución del ancho de pista medio debido al desgaste sufrido que se analiza a continuación.



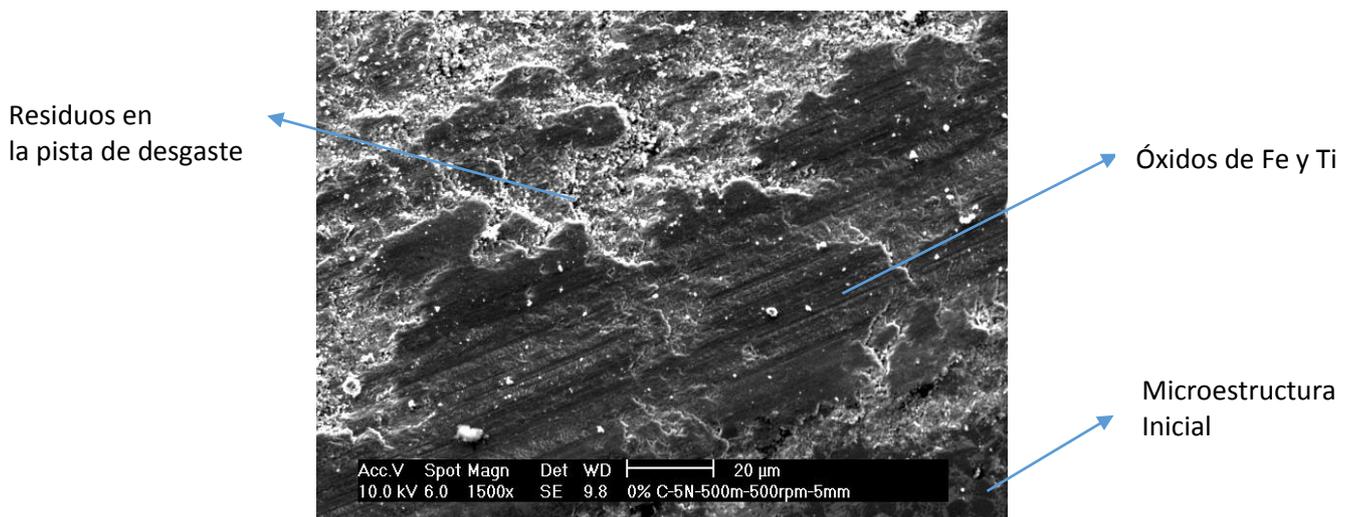
**Figura 4.21. Aspecto general de las pistas de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C bajo carga de 5N. a) 500m; b) 1000m; c) 1500m**

A distancia de 500m, el material ha sido muy desgastado bajo estas condiciones, presentando un ancho de pista medio de 0.745mm, valor muy elevado.



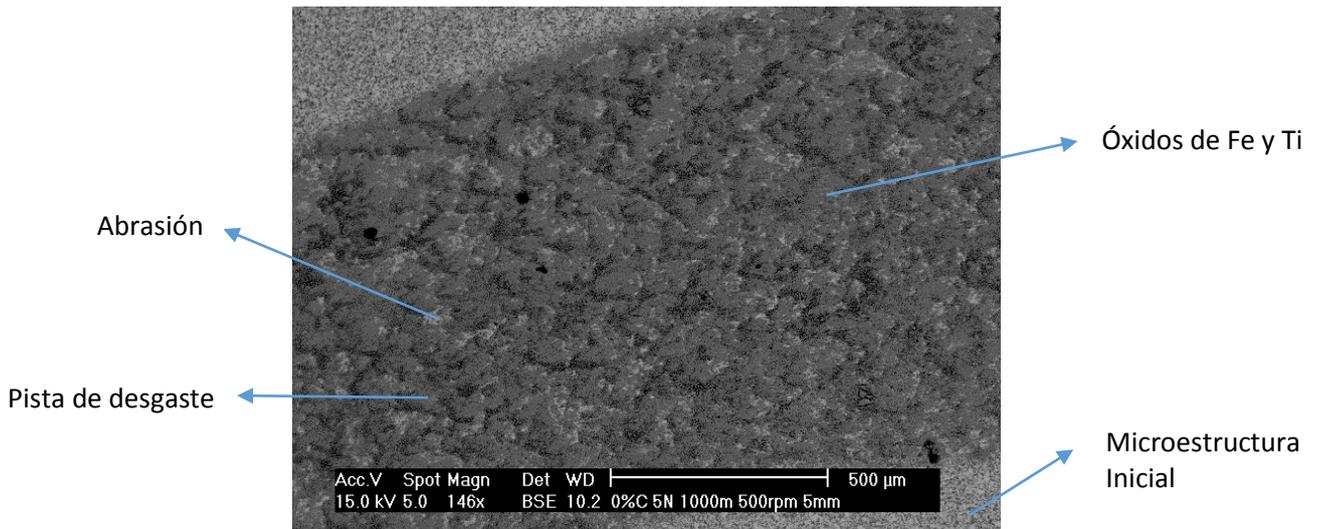
**Figura 4.22. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m**

Se puede observar en la *Figura 4.22* cómo el desgaste ha sido uniforme en toda la pista, en la que se ha producido una gran cantidad de óxidos de Fe y Ti. En primer lugar ocurre una gran abrasión que desprende mucho material, el cual se oxida, formando los citados óxidos de Fe y Ti. Estos óxidos se distribuyen a lo largo de toda la pista, entremezclados con zonas en donde el material ha sido arrancado, dejando al descubierto los carburos presentes en la composición del cermet. En los bordes de la pista, se aprecia cómo el desgaste ha sido distinto al resto, como se ve en la *Figura 4.23*. En dicha figura, se ven una gran cantidad de óxidos y de carburos, pero no así en el borde, donde se ven estos óxidos más aplastados que en el interior.



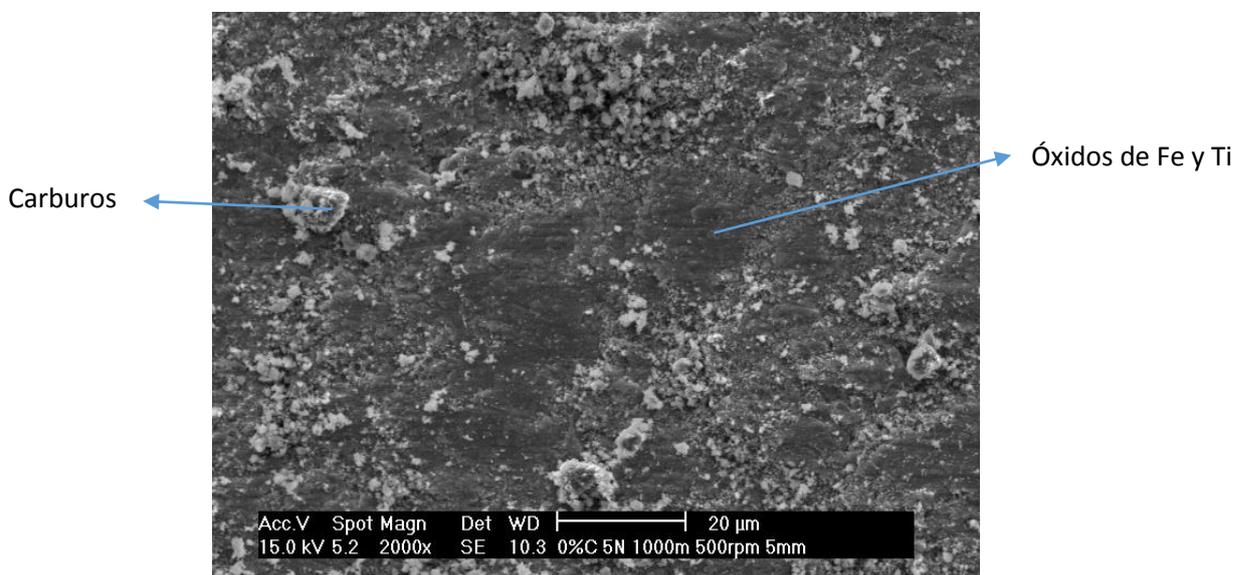
**Figura 4.23. Imagen del borde de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m.**

A distancia de deslizamiento de 1000m, el desgaste ha sido muy similar al caso anterior. Al aumentar la distancia de deslizamiento ha aumentado el desgaste, como demuestra el mayor ancho de pista medio cuyo valor es de 1.18mm.



**Figura 4.24. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 5N, 1000m.**

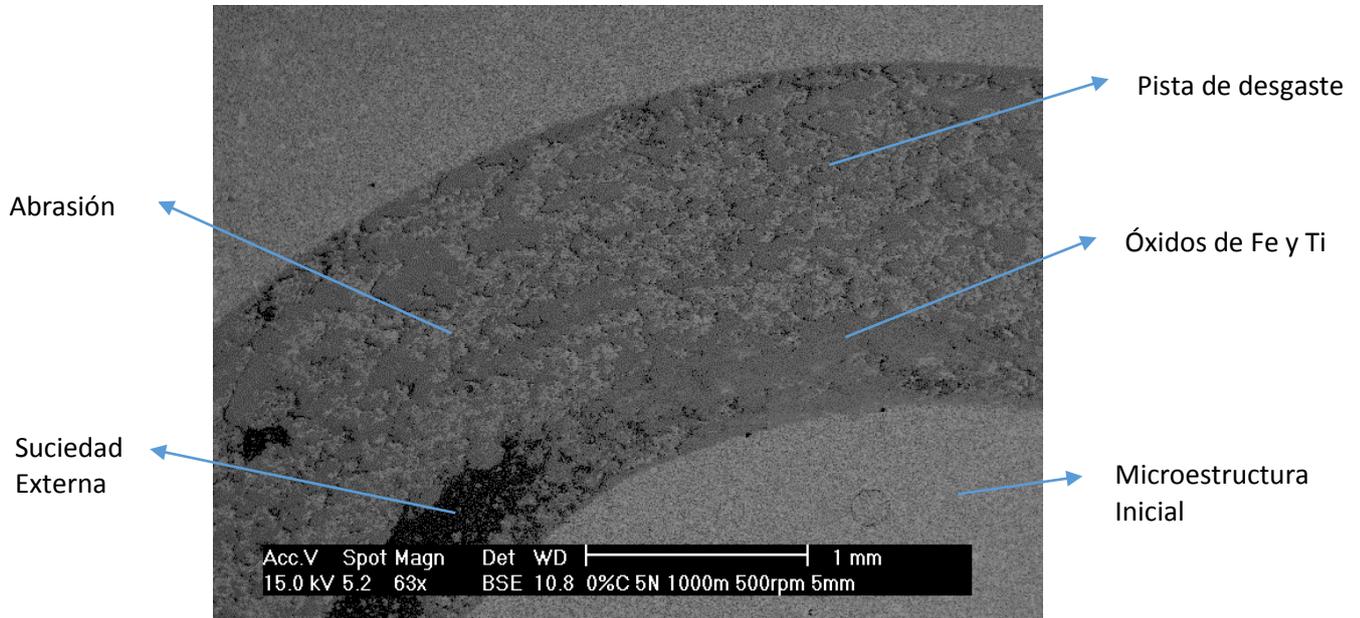
Se puede apreciar que el desgaste ha sido uniforme en toda la pista, *Figura 4.24*, en la que se ha producido una gran cantidad de óxidos, que al igual que en el caso de 500m han sido de Fe y Ti. No hay grandes diferencias con el caso anterior, la pista está llena de óxidos formados a partir del material desprendido durante la abrasión inicial. Los óxidos se distribuyen por toda la pista, tapando las zonas donde el material ha sido arrancado y en donde se han quedado al descubierto los carburos de la composición inicial del cermet cuya morfología es angular. Estos carburos y óxidos presentes dentro de la pista de desgaste se ven de forma muy clara en la *Figura 4.25*.



**Figura 4.25. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 5N, 1000m.**

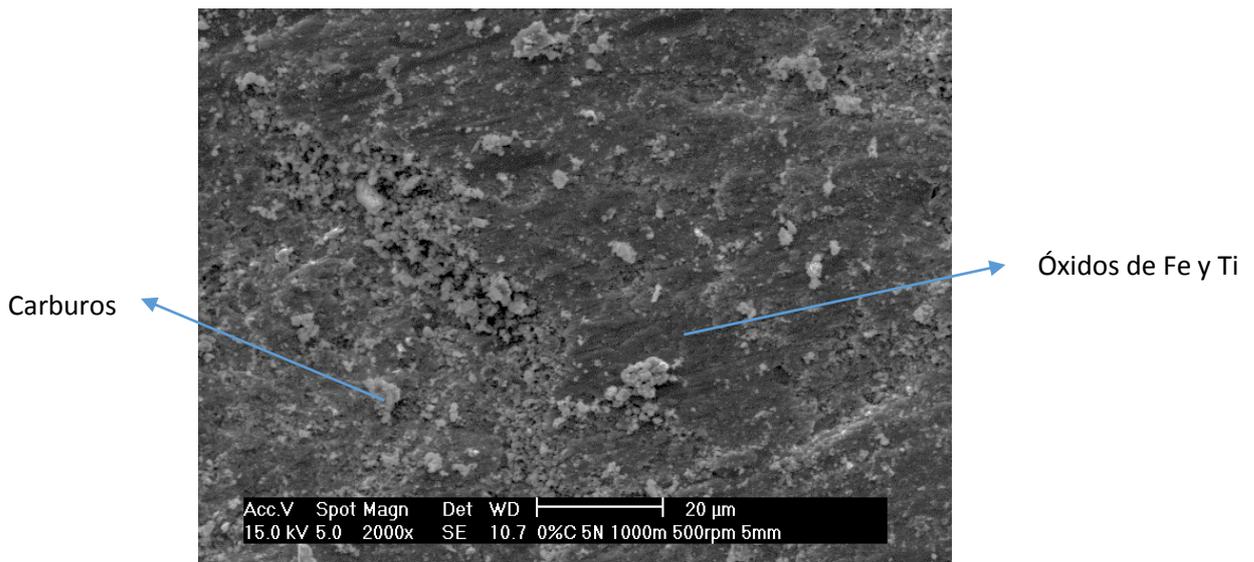
Por último, al aumentar la distancia de deslizamiento a 1500m, el ancho de pista medio aumenta también, siendo de 1.68mm. A pesar de tener tan alto valor de ancho de pista medio, el desgaste se asemeja mucho al producido a las distancias de 500m y 1000m. La pista de desgaste presenta óxidos de Fe y Ti a lo largo de toda ella, además de apreciarse zonas de material arrancado. Los

óxidos se forman a partir del material desprendido durante la abrasión inicial. En la *Figura 4.26* se ve también unas manchas negras, que corresponde a suciedad ajena al ensayo, siendo estas manchas el papel utilizado para limpiar la superficie con etanol y que se ha adherido un poco durante el preparado de la probeta.



**Figura 4.26. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 5N, 1500m**

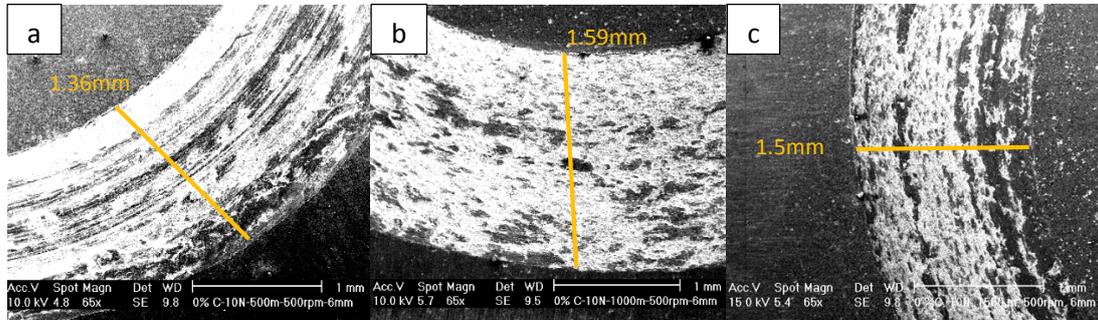
Estos óxidos y material arrancado se ven de forma más clara en la *Figura 4.27*, al igual que en el ensayo a distancia de 1000m, al arrancarse material se deja al descubierto los carburos que pertenecen a la composición del cermet. Los carburos, tienen morfología angular y están distribuidos por toda la pista de desgaste, en las zonas donde ha sido arrancado material de la superficie.



**Figura 4.27. Imagen del borde de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 5N, 1500m.**

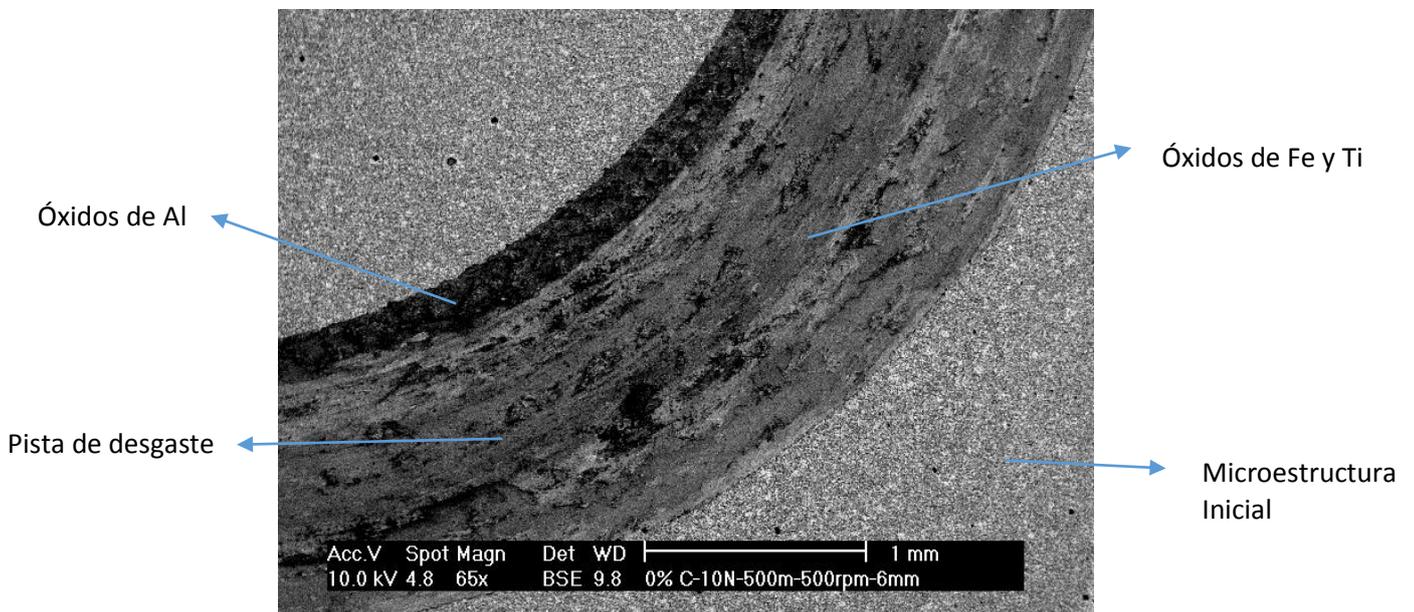
### 4.3.2. Cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C ensayado bajo carga de 10N

El desgaste bajo carga de 10N ha aumentado considerablemente frente al producido bajo carga de 5N. El primer dato que da constancia de ese aumento es el ancho de pista medio, representados en la *Figura 4.28*, donde se muestran los anchos de pista medio a las tres distancias de deslizamiento ensayadas para este tipo de cermet bajo carga de 10N. En ella se ve la evolución del ancho de pista medio debido al desgaste sufrido que se analiza a continuación.



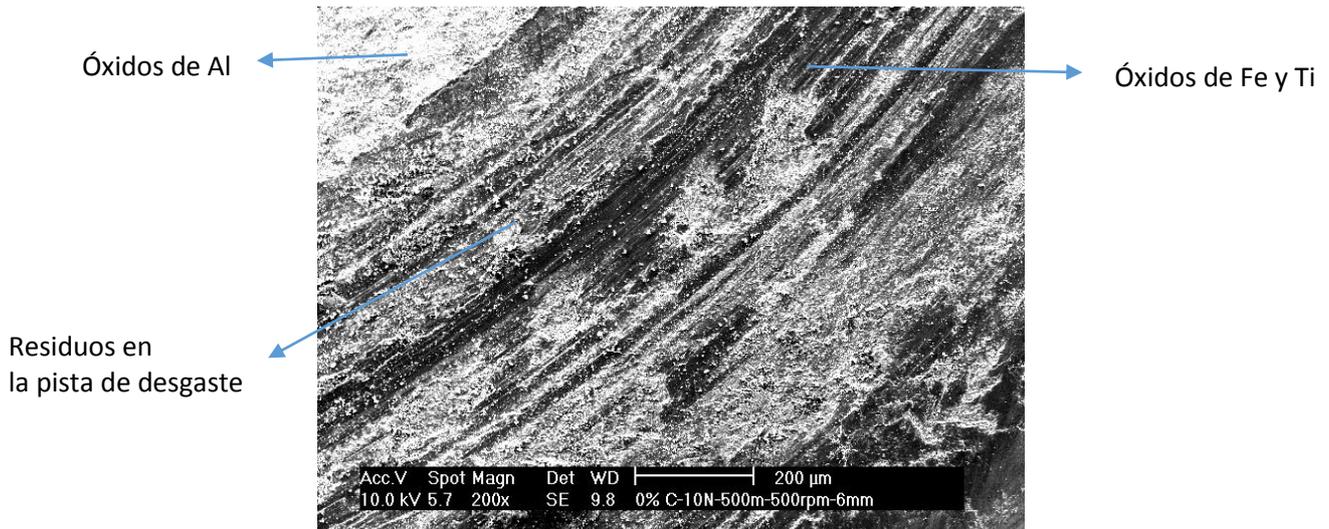
**Figura 4.28. Aspecto general de las pistas de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C bajo carga de 10N. a) 500m; b) 1000m; c) 1500**

A distancia de deslizamiento de 500m, el ancho de pista medio ha sido de 1.36mm, .Como se aprecia en la *Figura 4.29*, en la pista de desgaste ha ocurrido una gran abrasión, además de originarse una gran cantidad de óxidos, muchos de los cuales han sido adheridos a la pista a medida que avanzaba el ensayo.



**Figura 4.29. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 10N, 500m**

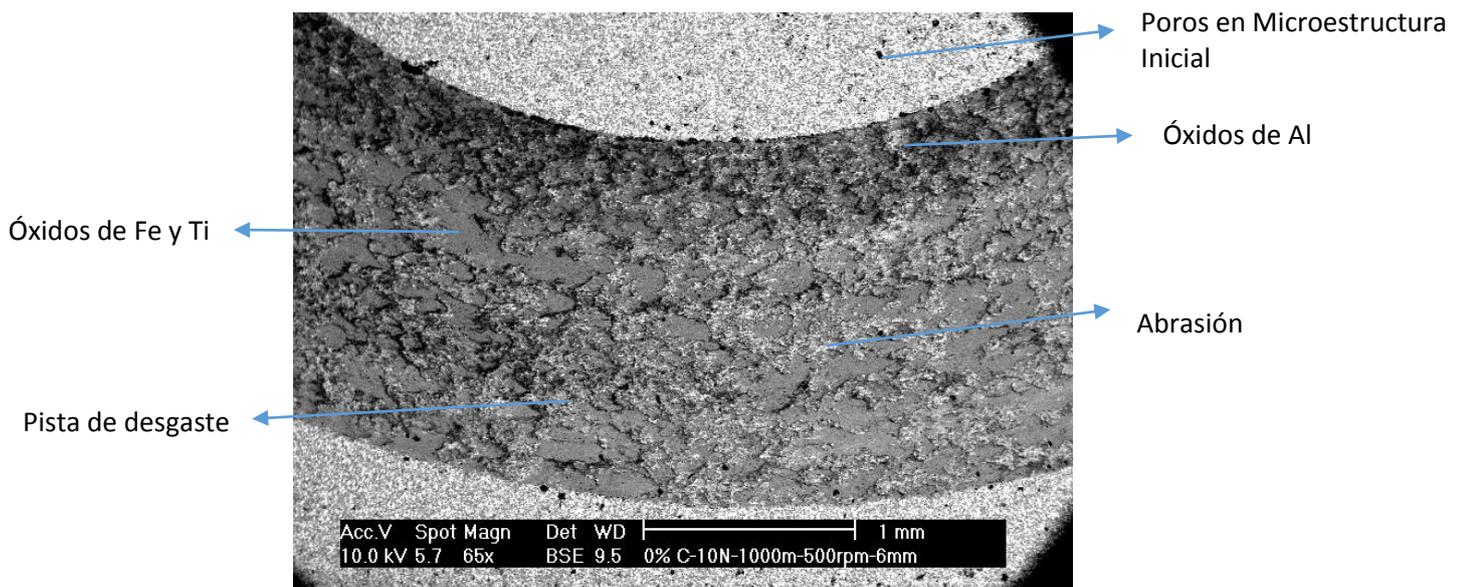
En la *Figura 4.30* se puede ver claramente este desgaste abrasivo, apreciándose con gran nitidez los óxidos y los residuos que aparecen a medida que avanza el ensayo.



**Figura 4.30. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 10N, 500m.**

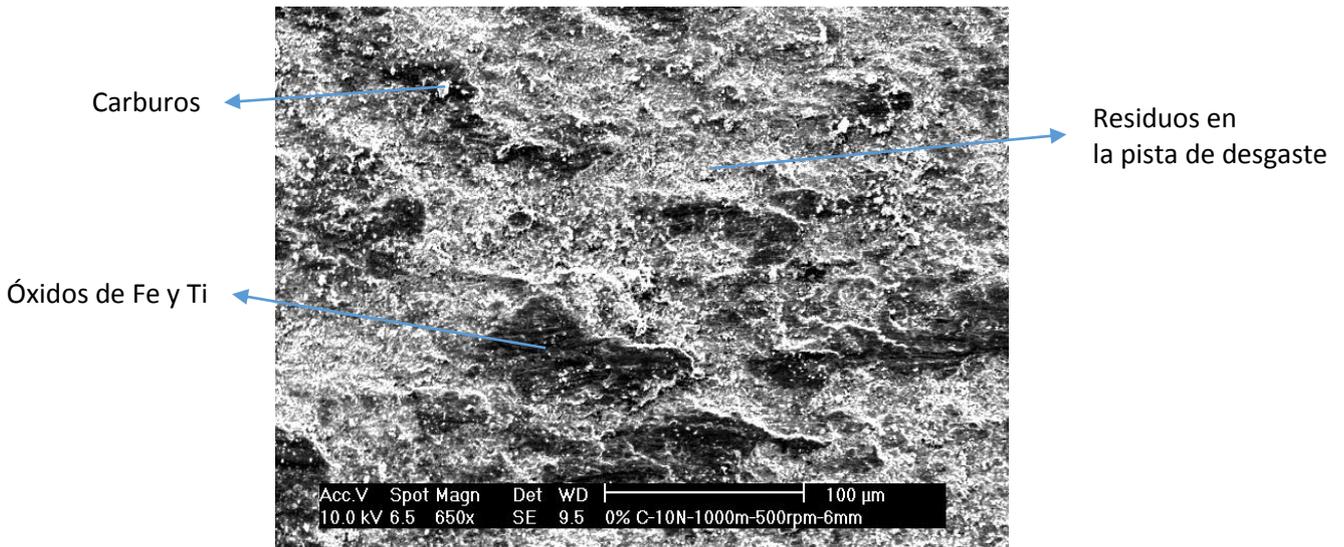
Como se ha dicho, no ha sufrido únicamente abrasión, sino que también ha habido oxidación. Los óxidos formados provienen del material arrancado durante la abrasión y se distribuyen por toda la pista de desgaste, tapando en gran parte las zonas de material arrancado. Se distinguen varios tipos de óxidos. En primer lugar, se forman los óxidos propios del material, es decir, de Fe y Ti. A medida que el ensayo avanza, la bola de alúmina va aplastando estos óxidos, adhiriéndose a la pista creando una capa de óxidos que cubre la superficie. Estos óxidos aplastados se endurecen con el avance del ensayo y llegan a ser capaces de desgastar a la bola de alúmina, por lo que aparecen también óxidos de aluminio que se sitúan en el borde interno de la pista de desgaste, mientras que los óxidos de Fe y Ti se distribuyen por toda la pista.

El desgaste al aumentar la distancia de deslizamiento a 1000m sigue en la línea del anterior ensayo, teniendo en esta ocasión un ancho de pista medio de 1.59mm que no es tan diferente al medido a 500m.



**Figura 4.31. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 10N, 1000m**

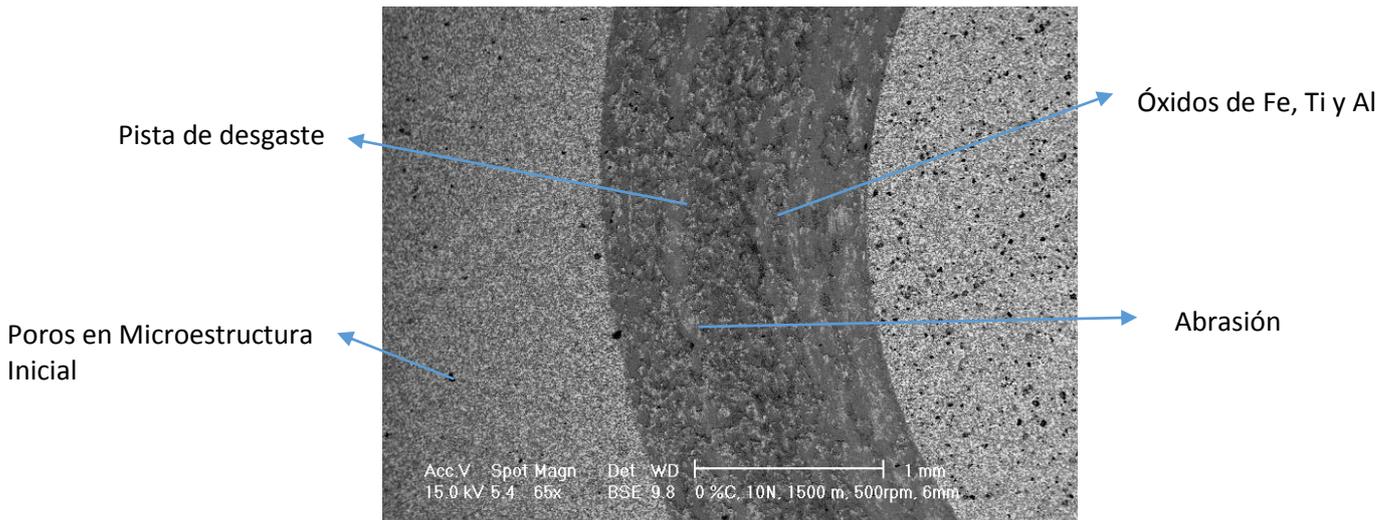
Al igual que a la distancia de 500m, presenta una pista de desgaste muy ancha y de forma idéntica, con una gran abrasión y posterior formación de óxidos. Estos óxidos, son de Fe y Ti, los propios del material, y se encuentran dispersos por toda la pista de desgaste, formando una capa lisa y aplastada por el paso de la bola de alúmina durante el deslizamiento, *Figura 4.31*. Los óxidos tapan las zonas en donde el material ha sido arrancado, aunque en la figura se vislumbran pequeñas partes de la pista donde no ha sido cubierta por los óxidos. En la *Figura 4.32*, se muestra este desgaste abrasivo que ha sufrido la pista de desgaste además de mostrar también los óxidos que se forman durante el ensayo.



**Figura 4.32. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 10N, 1000m.**

Al igual que en el caso de 500m, aparecen además óxidos de Al, debido al desgaste de la bola de alúmina que surge por el endurecimiento de los óxidos de Fe y Ti capaces de desgastar la bola. Los óxidos de Al, se encuentran también muy focalizados en el borde interior de la pista, aunque también hay más distribuidos por toda la pista, pero en bastante menos cantidad. Esta capa de óxidos además evita el contacto directo entre la bola de alúmina y la microestructura inicial, frenando el desgaste sufrido en el cermet. Es por esta razón por la que el ancho de pista a esta distancia de deslizamiento no ha sido tan superior al producido a distancia de deslizamiento de 500m.

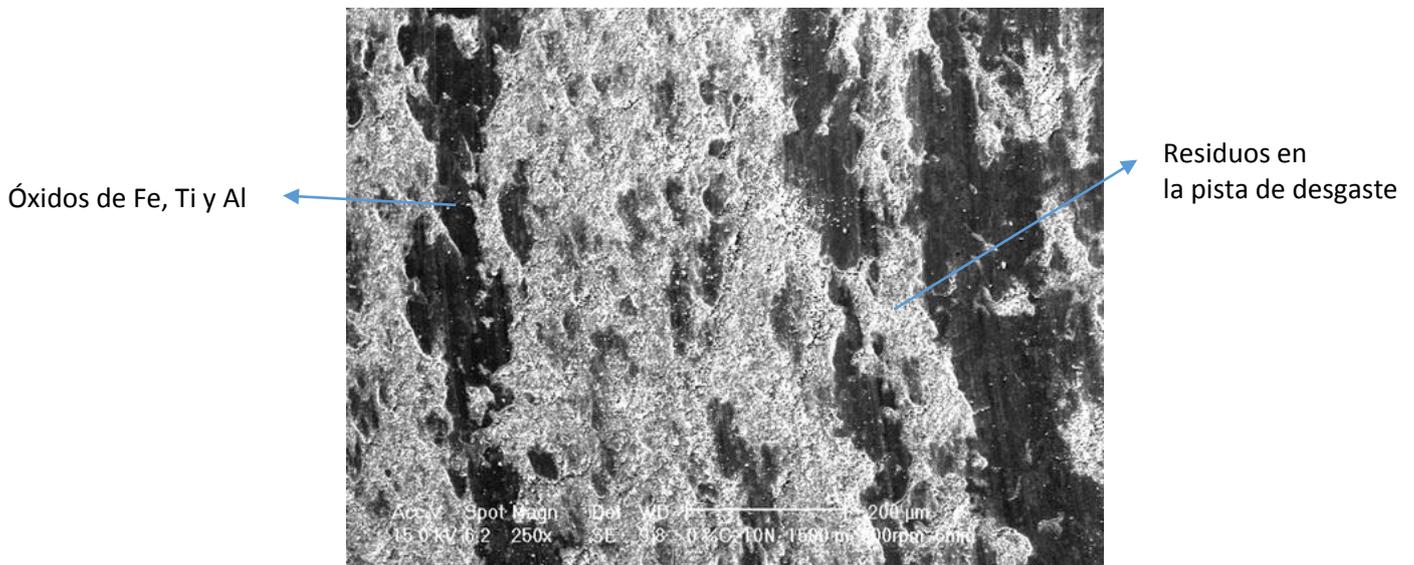
A distancia de 1500m el ancho de pista medio ha sido casi idéntico al anterior caso, siendo de 1.5mm. Esta pieza, posee una gran cantidad de poros en su microestructura debido a una mala sinterización, *Figura 4.33*.



**Figura 4.33. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 10N, 1500m**

El desgaste es igual a los anteriores casos, existe una gran abrasión que arranca material de la probeta, posteriormente se produce la oxidación de estos residuos arrancados que ocupan casi toda la pista de desgaste. Estos óxidos son de Fe y Ti en su mayoría, habiendo también pero en menor cantidad óxidos de Al, provenientes de la bola de alúmina que ha sido desgastada por los óxidos endurecidos de Fe y Ti, *Figura 4.34*. A diferencia de los casos anteriores, los óxidos de Al no se encuentran focalizados en una única zona, si no que aparecen dispersos por la pista.

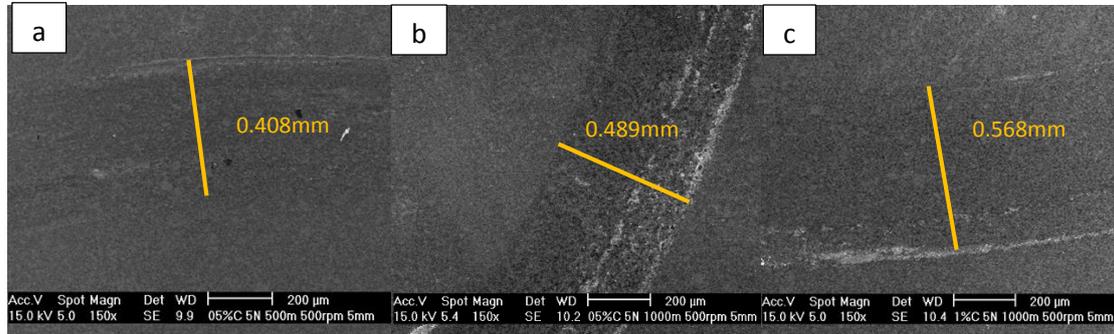
Al igual que en el caso de 500m y 1000m, para este ensayo, la capa de óxidos formada durante el deslizamiento impide el contacto directo entre la bola de alúmina y la microestructura inicial, frenando el sufrido por el cermet.



**Figura 4.34. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) sin adición de C. Condiciones de ensayo: 10N, 1500m.**

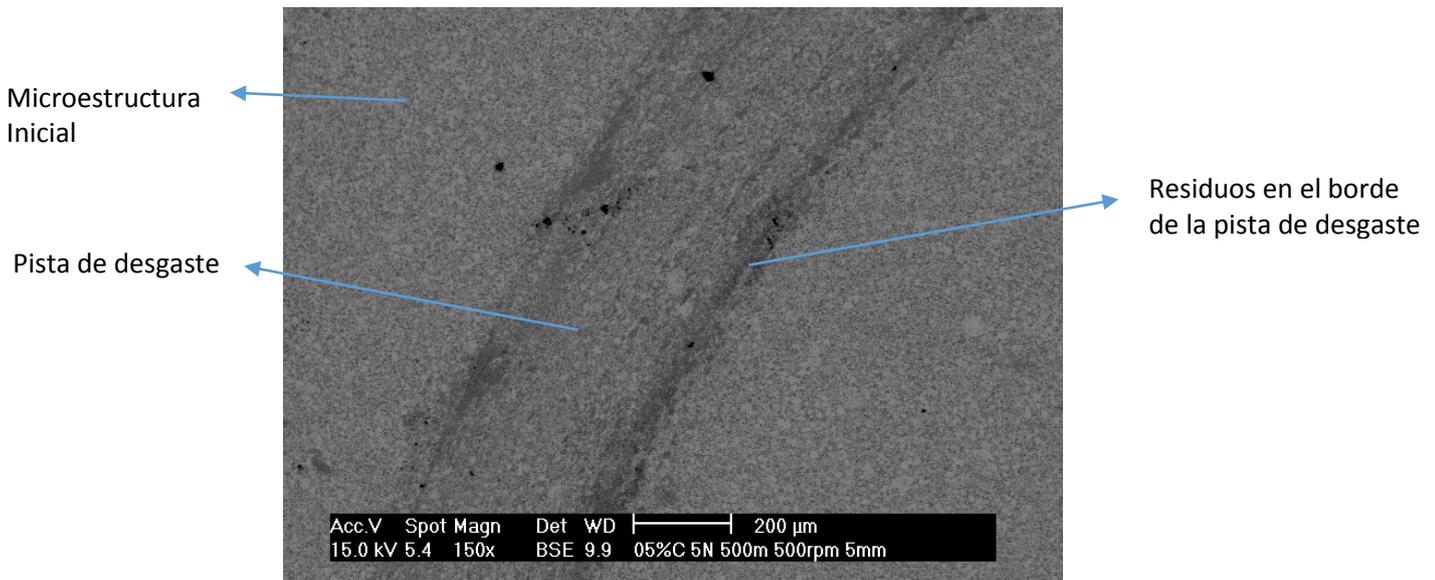
### 4.3.3. Cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C ensayado bajo carga de 5N

En la *Figura 4.35* se muestra una comparación de las pistas de desgaste a las tres distancias de deslizamiento ensayadas, proporcionadas para este tipo de cermet bajo carga de 5N. En ella se ve la evolución del ancho de pista medio debido al desgaste sufrido que se analiza a continuación



**Figura 4.35** Aspecto general de las pistas de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C bajo carga de 5N. a) 500m; b) 1000m; c) 1500m

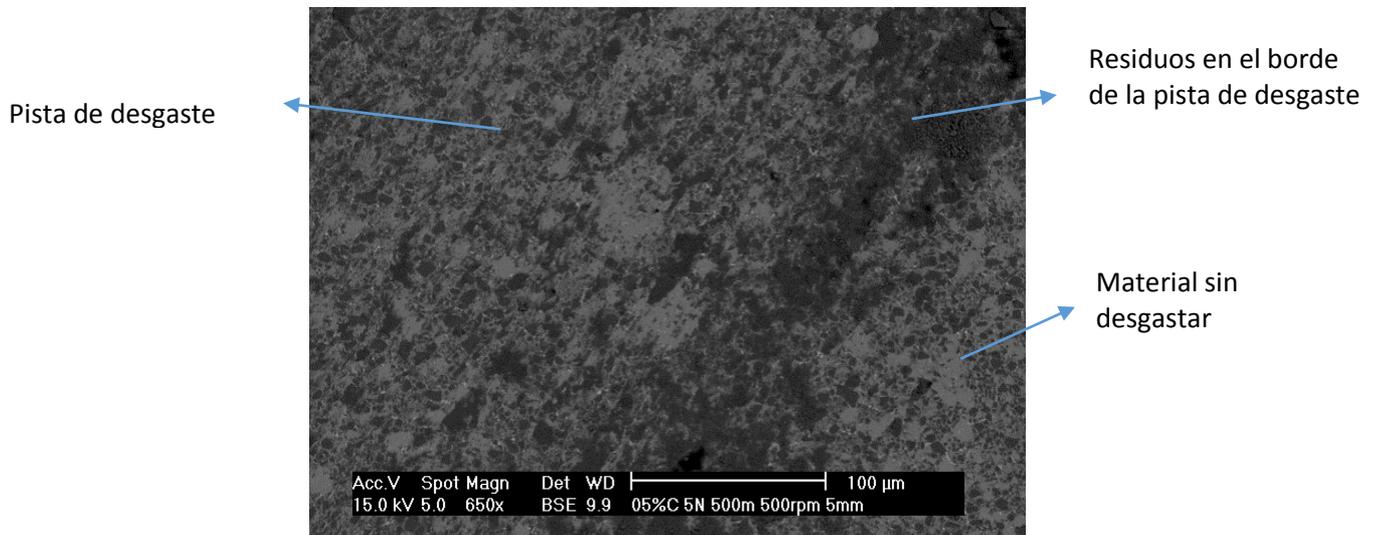
A distancia de deslizamiento de 500m, el material no ha sufrido un gran desgaste, a pesar de tener un ancho de pista medio de 408 $\mu$ m que es un valor considerable, pero como se muestra en la *Figura 4.36*, este desgaste no es muy perceptible, ya que la bola de alúmina apenas profundiza en la probeta del cermet.



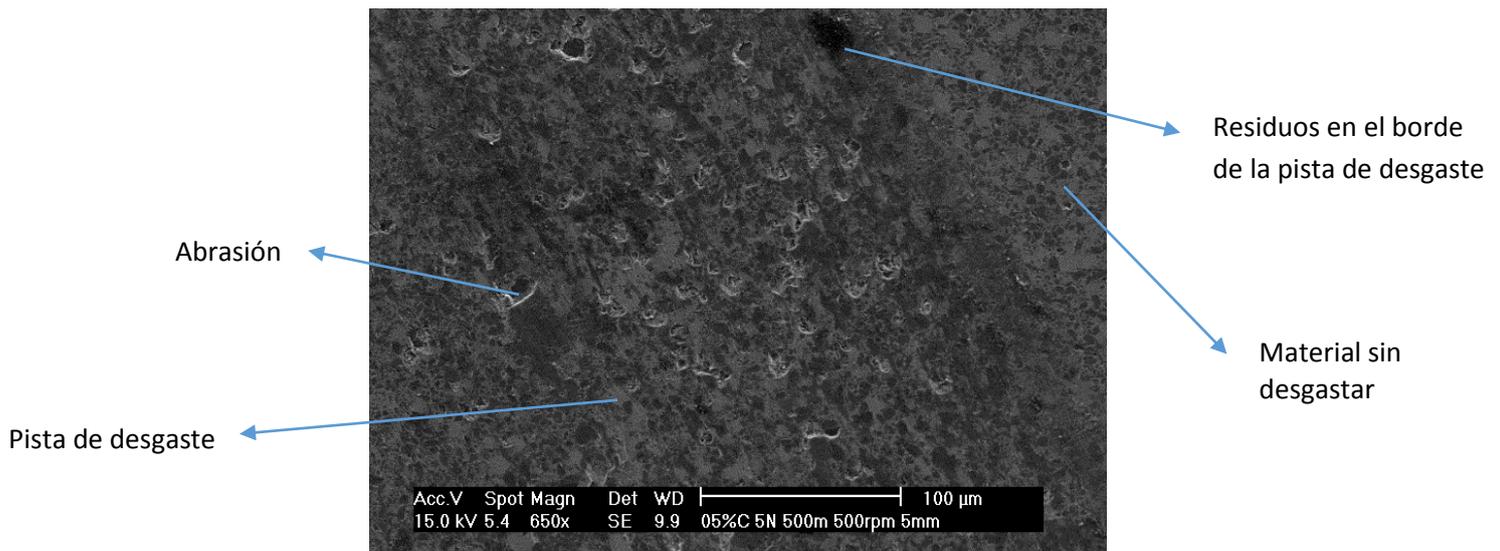
**Figura 4.36.** Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m

Como se ve en la *Figura 4.36*, la superficie ha sido poco desgastada. Los bordes de la pista están muy bien delimitados por residuos del cermet que han sido arrastrados por la bola de alúmina a medida que se ejecutaba el ensayo. En la *Figura 4.37* se presenta una imagen tomada en BSE y a mayores aumentos el borde de la pista, donde se ve con mayor claridad los residuos acumulados y que dentro de la pista la microestructura es similar a fuera, es decir, se observa el material prácticamente sin residuos ni modificaciones, únicamente algunas marcas de abrasión muy superficiales. En la imagen de la *Figura 4.38*, tomada en SE, se aprecian zonas de las que se

ha arrancado material, probablemente partículas de carbonitruro que no estuvieran bien unidas a la matriz, o cercanas a un poro, y pequeñas cantidades de óxidos acumulados localmente en partículas duras que quedan en relieve sobre la matriz desgastada

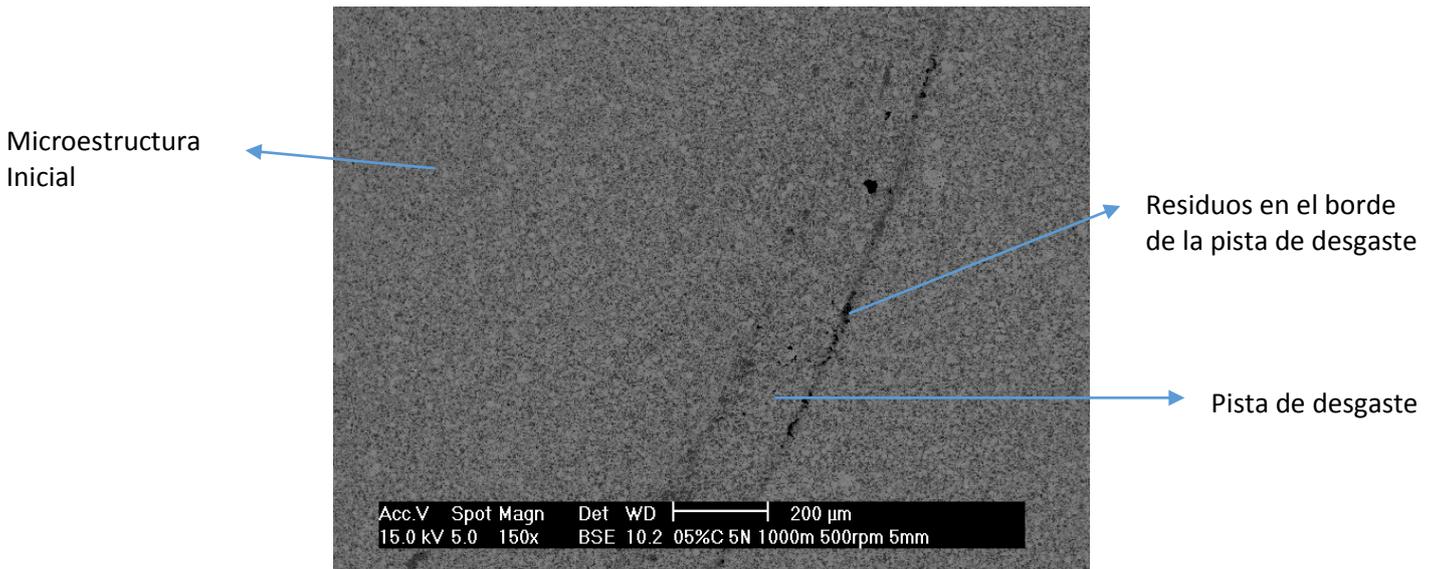


**Figura 4.37. Imagen del borde de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m.**



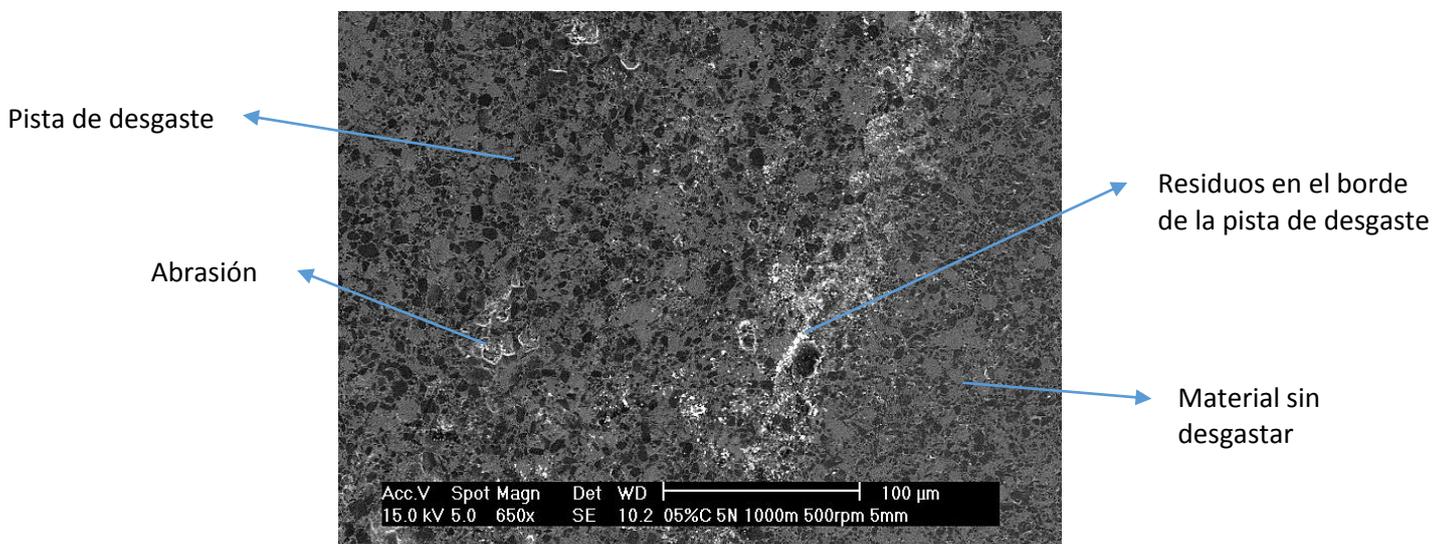
**Figura 4.38. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m.**

Cuando la distancia de deslizamiento aumenta a 1000m, el desgaste es muy similar al producido por 500m. Una primera prueba de esa pequeña diferencia existente se ve en el ancho de pista medio, que es un poco más grande, siendo de 489µm frente a los 408µm del ensayo a 500m. Como se ve en la *Figura 4.39*, el desgaste es inapreciable salvo por los bordes de la pista, donde se ve una gran acumulación de material desprendido.



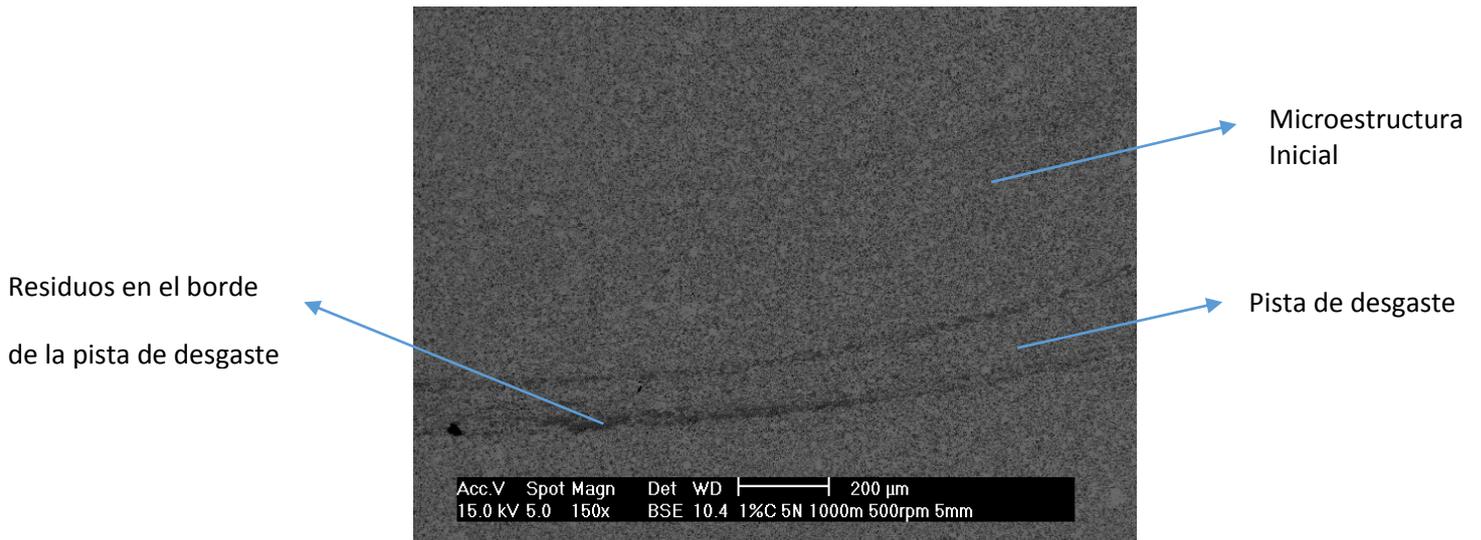
**Figura 4.39. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 1000m**

En la *Figura 4.40*, se muestra este borde de pista a mayores aumentos para descifrar el desgaste ocurrido en la probeta. En el borde de pista está el material acumulado debido al movimiento de la bola de alúmina sobre la probeta que arrastra al material desprendido durante el desgaste. El resto de la microestructura es prácticamente igual a la microestructura inicial, aunque dentro de la pista se ven en pequeñas puntos material arrancado.



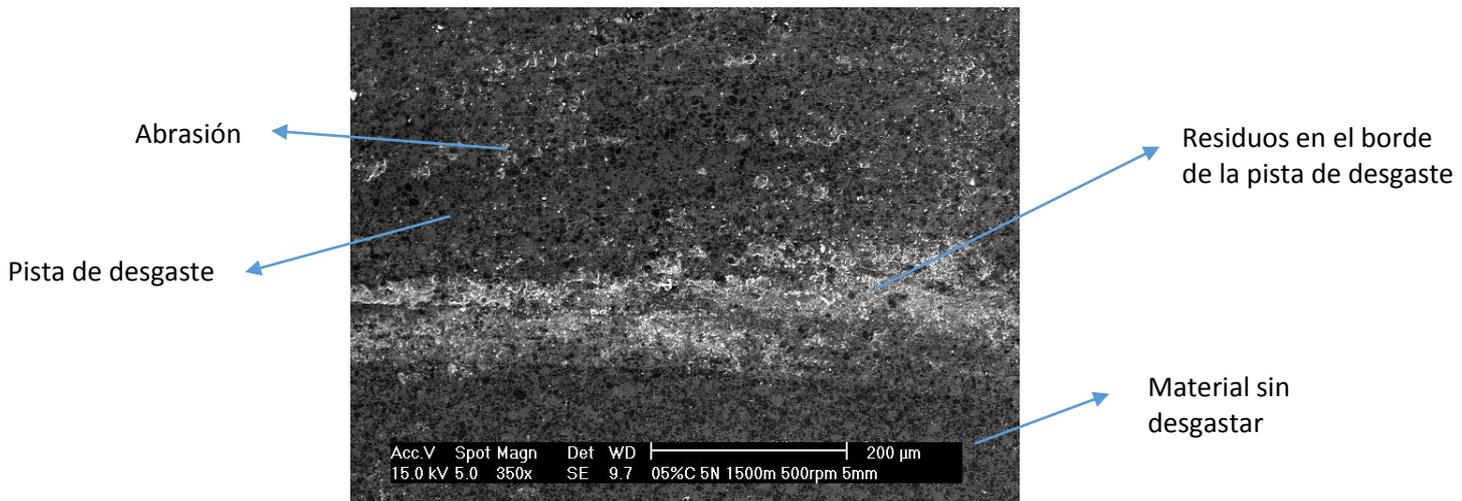
**Figura 4.40. Imagen del borde de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 100m.**

El desgaste producido a distancia de 1500m, sigue en la línea de los anteriores citados a menor distancia de deslizamiento. El ancho de pista ha sido de 0.568mm que es ligeramente mayor, pero de un valor proporcional a los de distancia de 500m y 1000m. Como se ve en la *Figura 4.41*, no se aprecia desgaste salvo por los bordes de la pista, que están muy bien delimitados por una acumulación de residuos originados durante el ensayo.



**Figura 4.41. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 1500m**

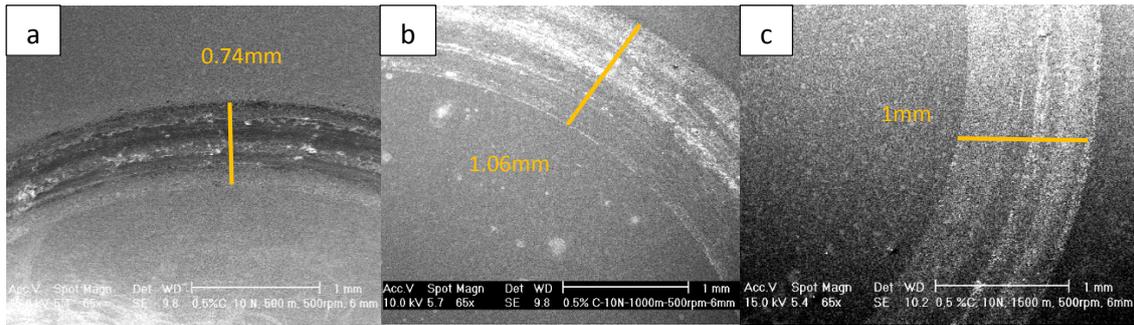
La *Figura 4.42* muestra de forma más clara el material acumulado en el borde de la pista debido al movimiento relativo entre la alúmina y la probeta, que la alúmina arrastra hacia el borde a medida que se va desprendiendo material. Dentro de la pista el desgaste producido al igual que en los anteriores casos ha sido que se ha arrancado material, ha sufrido abrasión.



**Figura 4.42. Imagen del borde e interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 5N, 1500m.**

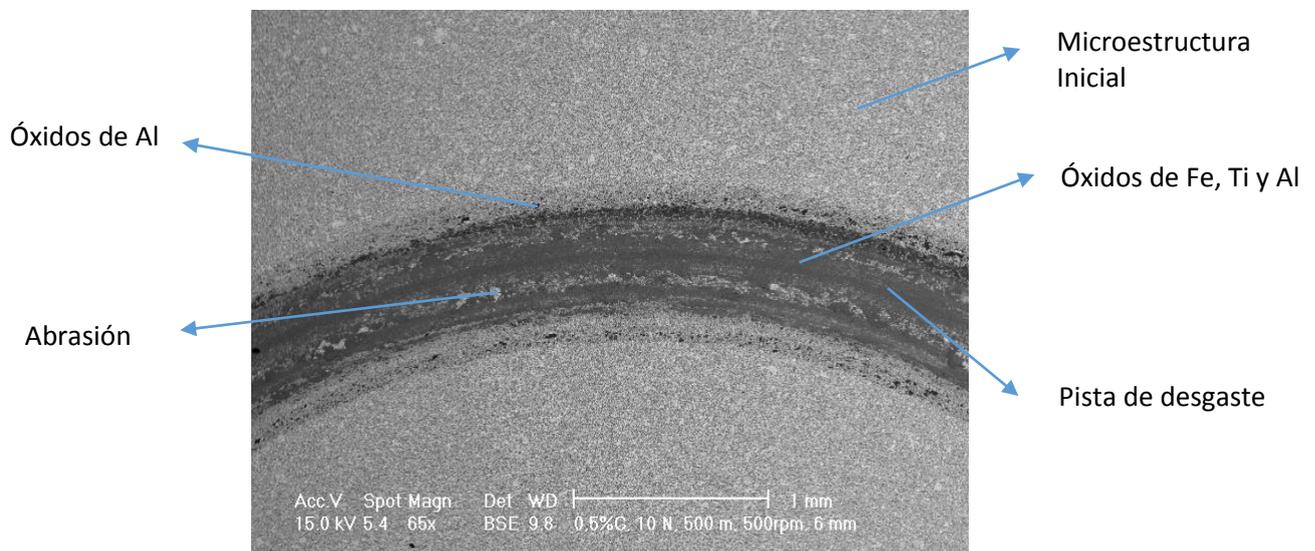
#### 4.3.4. Cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C ensayados bajo carga de 10N

En la *Figura 4.43* se muestra una comparación de las pistas de desgaste a las distintas distancias de deslizamiento proporcionadas para este tipo de cermet bajo carga de 10N. En ella se ve la evolución del ancho de pista medio debido al desgaste sufrido que se analiza a continuación.



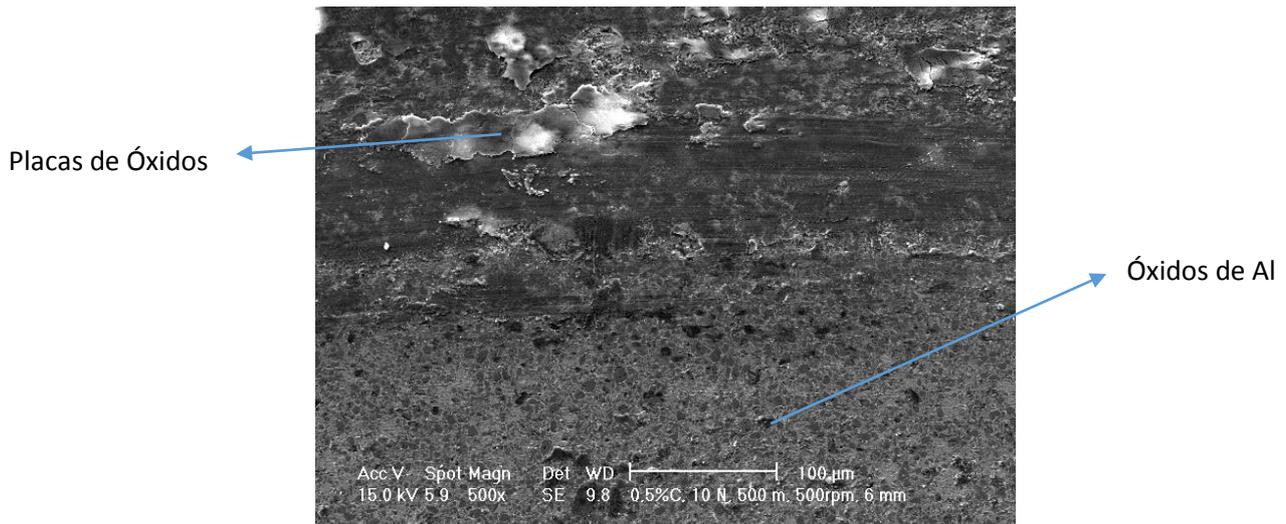
**Figura 4.43 Aspecto general de las pistas de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C bajo carga de 10N. a) 500m; b) 1000m; c) 1500m**

A distancia de deslizamiento de 500m, la probeta ha sufrido un desgaste considerable en comparación con las probetas anteriormente detalladas que estaban ensayadas bajo menor carga. El primer dato que muestra este aumento en el desgaste es el ancho de pista medio, cuyo valor es de 0.74mm, casi el doble que bajo carga de 5N.



**Figura 4.44. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 10N, 500m**

La pista se representa en la *Figura 4.44* y tiene una zona central de unos 0.5mm muy desgastada. En los bordes, sin embargo, hay una pequeña franja en donde el material ha sido desgastado pero siendo casi inapreciable. Esto se debe a que al empezar el desgaste se empiezan a formar muchos residuos provenientes de la abrasión que ocurre, estos residuos son oxidados y se acumulan todos en el centro de la pista de desgaste. Hay tanta acumulación de óxidos que crean una capa gruesa capaz de elevar la bola de alúmina. Esta pequeña elevación ocasiona que ya no haya contacto con los bordes de la pista por lo que esta deja de ser desgastada y por ello es distinta al interior de la pista. El desgaste ha sido por tanto abrasivo, arrancando material y dejando al descubierto los carburos propios de la composición. Estos residuos se oxidan formando óxidos de Fe y Ti que se distribuyen por toda la franja central de la pista de desgaste. Los óxidos, una vez formados se adhieren a la pista y son aplastados por la bola de alúmina, dándoles forma de placas o láminas (como se observa en la *Figura 4.45*). Además de óxidos de Fe y Ti, también hay óxidos de Al provenientes de la bola de alúmina. Esto se debe a que los óxidos iniciales una vez formados se endurecen y son capaces de desgastar a la bola de alúmina.

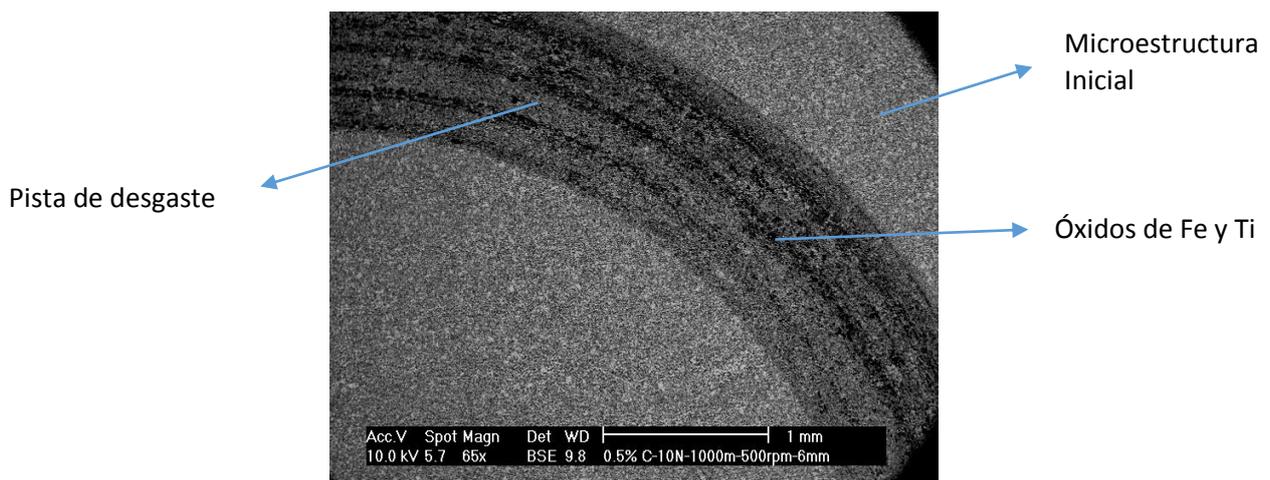


**Figura 4.45. Imagen del borde e interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 10N, 500m.**

En la *Figura 4.45* se aprecian los óxidos aplastados de la zona central de la pista de desgaste y como el en borde de ella apenas ha llegado a dañar su microestructura. En esta zona del borde aparecen en pequeños puntos acumulaciones de óxidos de aluminio que provienen de la bola de alúmina desgastada y que llega a desplazarse hasta el borde de la pista.

A distancia de deslizamiento de 1000m, el ancho de pista medio ha sido de 1.06mm y a diferencia del caso anterior, toda la pista de desgaste queda bien delimitada, no habiendo una zona en donde apenas ha sido desgastada en los bordes de la pista.

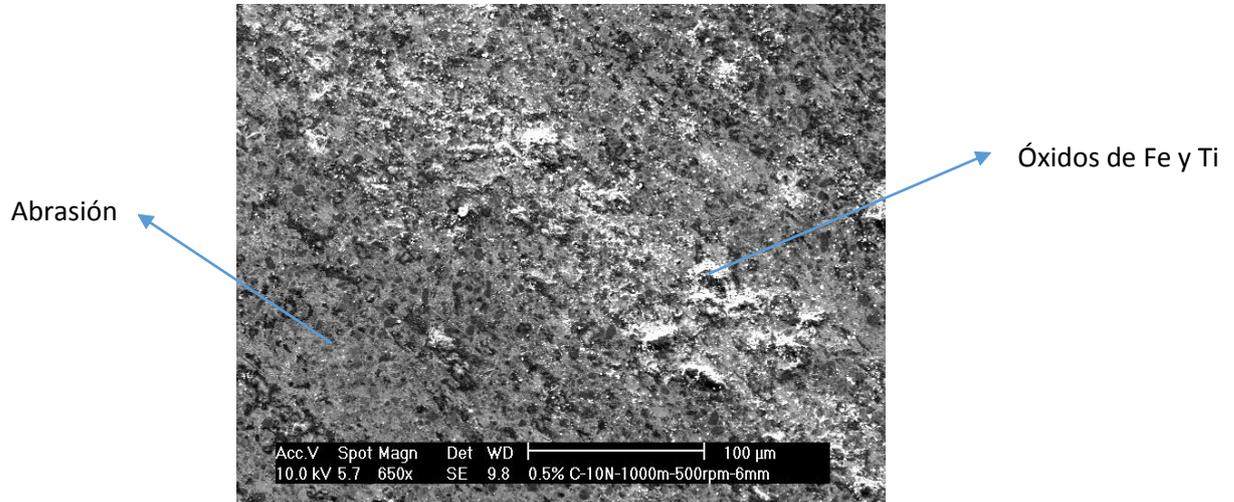
Se observa como en el interior de la pista de desgaste la microestructura es distinta que fuera de ella, *Figura 4.46*, diferencia con los ensayos bajo carga de 5N ya que en ellos apenas se distinguía la microestructura inicial de la microestructura desgastada.



**Figura 4.46. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 10N, 1000m**

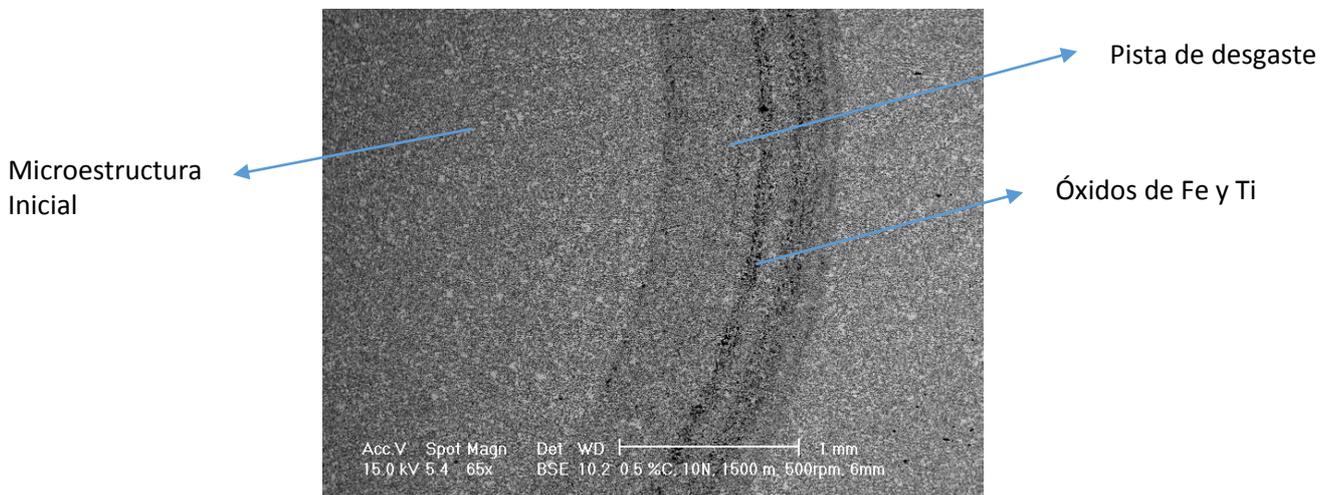
El desgaste producido ha sido principalmente la abrasión, pero sin llegar a arrancar material apenas, estando toda la microestructura de la pista de desgaste arañada y erosionada pero aun no arrancada, salvo en pequeñas zonas donde sí que ha llegado a desprender material. Además, distribuidos por toda la pista de desgaste se aprecian óxidos tanto de Fe y Ti propios del material

como de Al que provienen de la bola de alúmina que ha sido muy desgastada a medida que se ejecutaba el ensayo. Los óxidos de Fe y Ti se localizaban distribuidos a lo largo de toda la pista alrededor de las partículas de TiCN de la microestructura del cermet original, mientras que los óxidos de Al se sitúan la mayoría de ellos en el borde de la pista apareciendo unos pocos en mucha menor cantidad en el centro de la pista de desgaste, *Figura 4.47*.



**Figura 4.47.** Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 10N, 1000m.

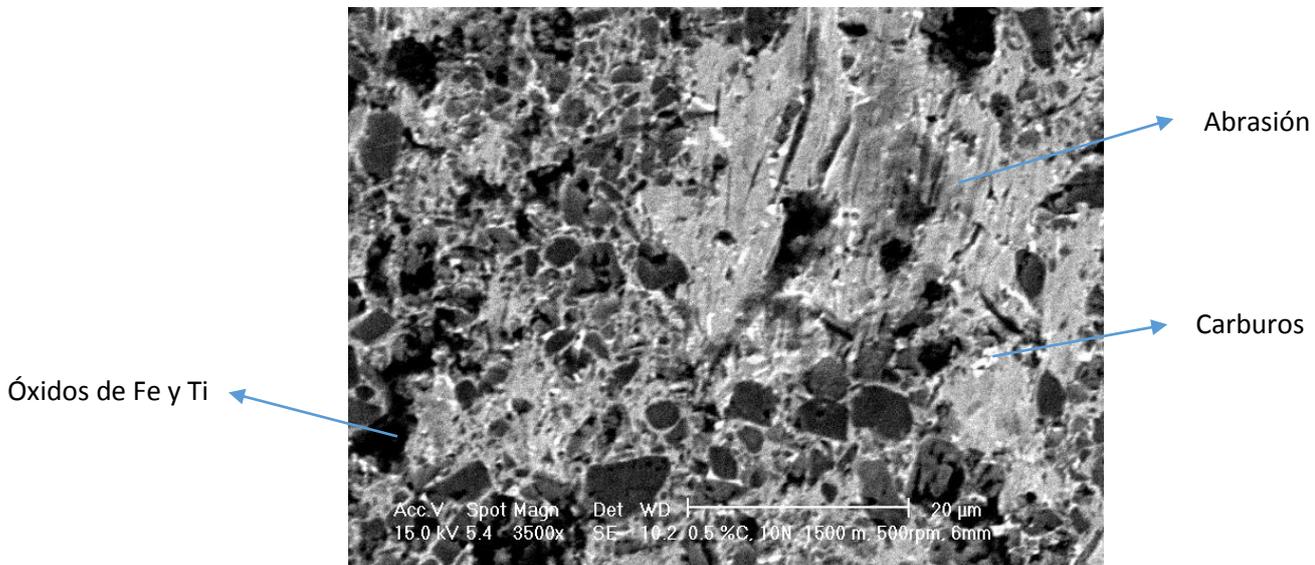
A distancia de deslizamiento de 1500m, el desgaste a 1500m es muy similar que el ocurrido a 1000m. El valor del ancho de pista medio en este caso es de 1mm. La pista de desgaste ha sido muy poco desgastada, *Figura 4.48*, apenas se ha dañado la microestructura aunque sí que ha habido desgaste.



**Figura 4.48.** Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 10N, 1500m

Este desgaste ha sido principalmente abrasivo, arrancando material de la pista de desgaste que posteriormente se oxida. Los óxidos que se forman son en su mayoría de Fe y Ti aunque también aparecen óxidos de aluminio provenientes de la bola de alúmina que ha sido desgastada aunque minimamente. Los óxidos se anclan alrededor de las partículas de TiCN, ya que es más duro que la matriz de hierro, por lo que se elimina la matriz, haciendo que sobresalga el TiCN y que tenga

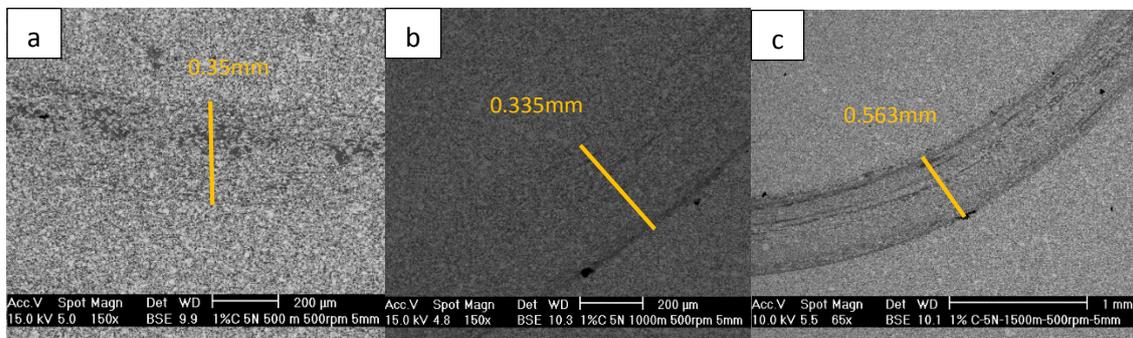
cierto relieve en donde los óxidos pueden sujetarse mejor. También al desgastarse la matriz permanecen los carburos propios de la composición del cermet. Todo ello se representa en la *Figura 4.49*.



**Figura 4.49.** Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C. Condiciones de ensayo: 10N, 1500m.

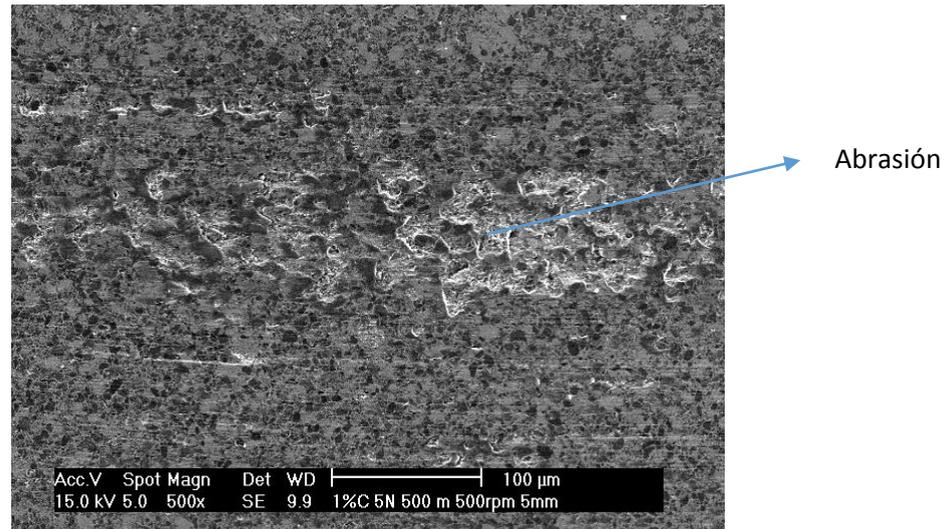
#### 4.3.5. Cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C ensayado bajo carga de 5N

En la *Figura 4.50* se muestra una comparación de las pistas de desgaste a las distintas distancias de deslizamiento proporcionadas para este tipo de cermet bajo carga de 5N. En ella se ve la evolución del ancho de pista medio debido al desgaste sufrido que se analiza a continuación.



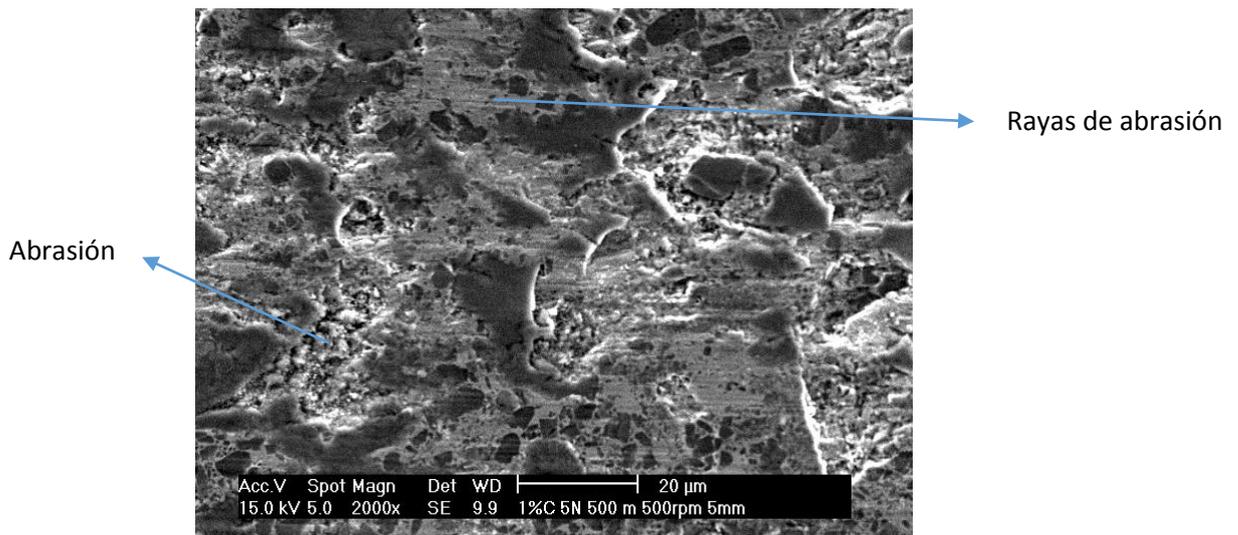
**Figura 4.50** Aspecto general de las pistas de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C bajo carga de 5N. a) 500m; b) 1000m; c) 1500m

La primera probeta ensayada de cermet con 1%C tiene un ancho de pista medio de 330 $\mu$ m, un valor pequeño que da una idea de lo poco que se ha desgastado. La pista se distingue con dificultad del material no desgastado, salvo por los bordes donde se ha acumulado una cantidad pequeña de material y en el centro de la pista, cuyas zonas oscuras corresponden al desgaste sufrido por la probeta. Este desgaste como se ve en la *Figura 4.51*, se debe a que el material ha sido arrancado durante el deslizamiento, es decir, ha sido abrasivo el desgaste.



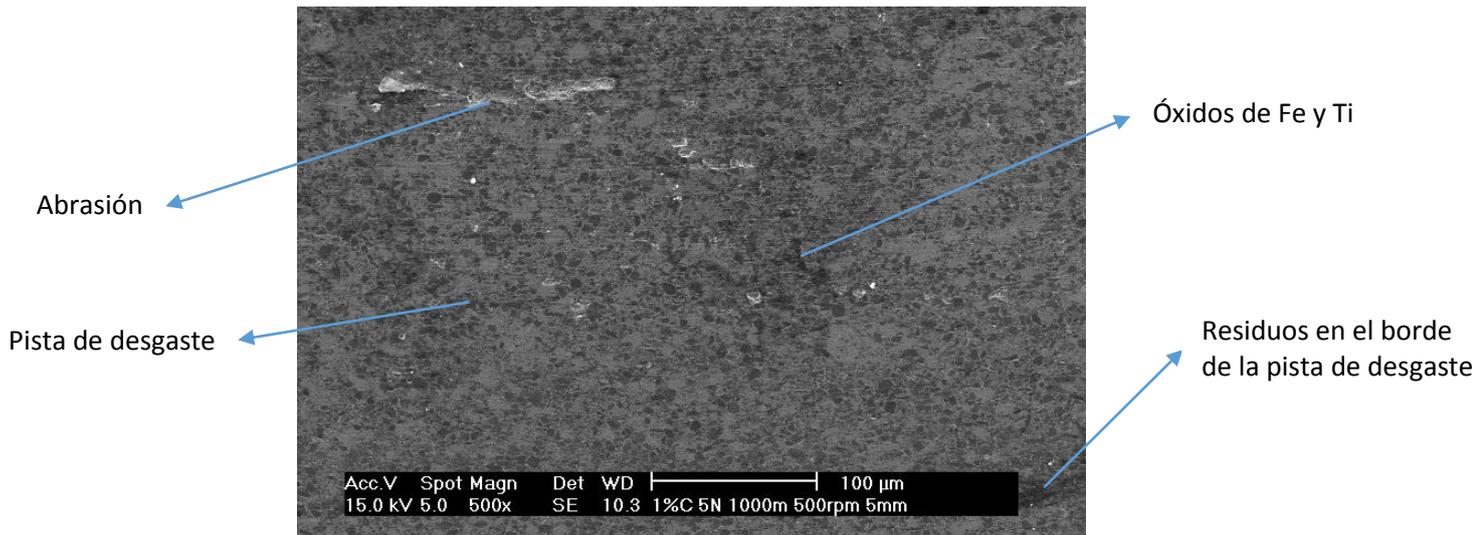
**Figura 4.51.** Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m.

Este desgaste se aprecia con mayor claridad en la *Figura 4.52*, efectuada a más aumentos. En la *Figura 4.52* se ven las partículas de carbonitruros erosionadas, con las rayas propias del desgaste por abrasión que ha sufrido el material. Cuando el desgaste abrasivo avanza, se desprende el material dejando al descubierto los carburos que forman parte de la composición del cermet.



**Figura 4.52.** Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 5N, 500m

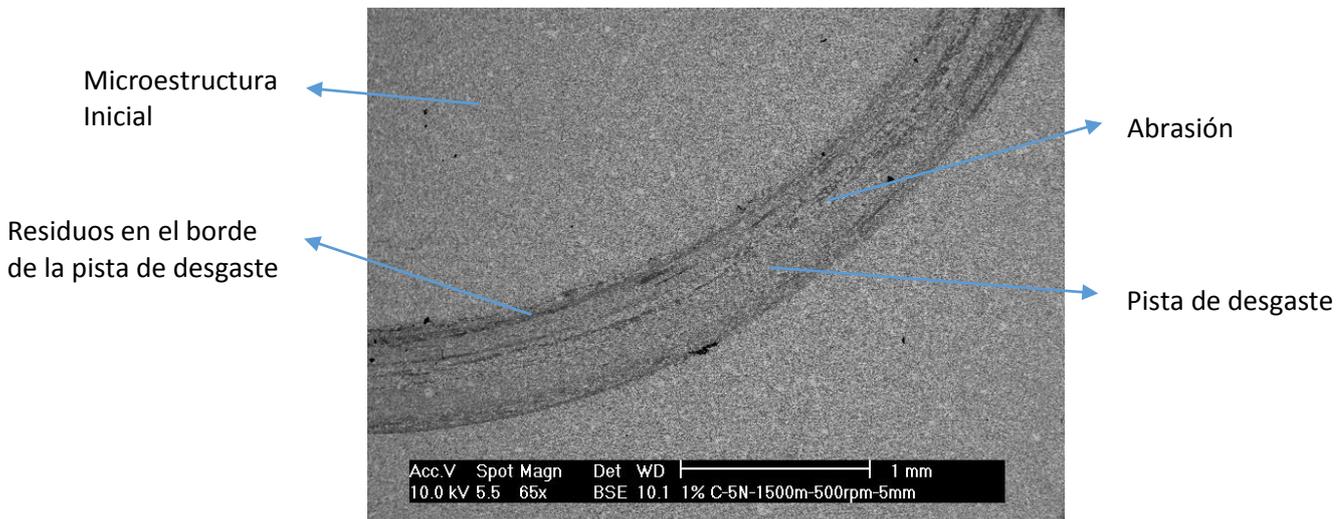
El ensayo realizado a 1000m ha sufrido un desgaste semejante al anterior, con un ancho de pista medio de 335 $\mu$ m, siendo un valor casi idéntico al de 500m. Como se ve en la *Figura 4.53*, el cermet apenas ha sido desgastado, no distinguiéndose la huella de la zona no desgastada salvo por los bordes de la pista donde se ha acumulado un poco de material desprendido. Este material desprendido es debido a la pequeña abrasión que sufre la probeta y que también se ilustra en la *Figura 4.53*.



**Figura 4.53. Imagen del borde e interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 5N, 1000m**

No ha ocurrido únicamente abrasión, también llega a oxidarse un poco el material arrancado durante el deslizamiento. Alrededor de las partículas de TiCN aparecen algunos óxidos propios del material, es decir, de Fe y Ti, mayoritariamente de Fe que es la fase más blanda de la composición y la que más se desgasta. A pesar de haber oxidación, estos óxidos son mínimos, siendo casi inapreciables.

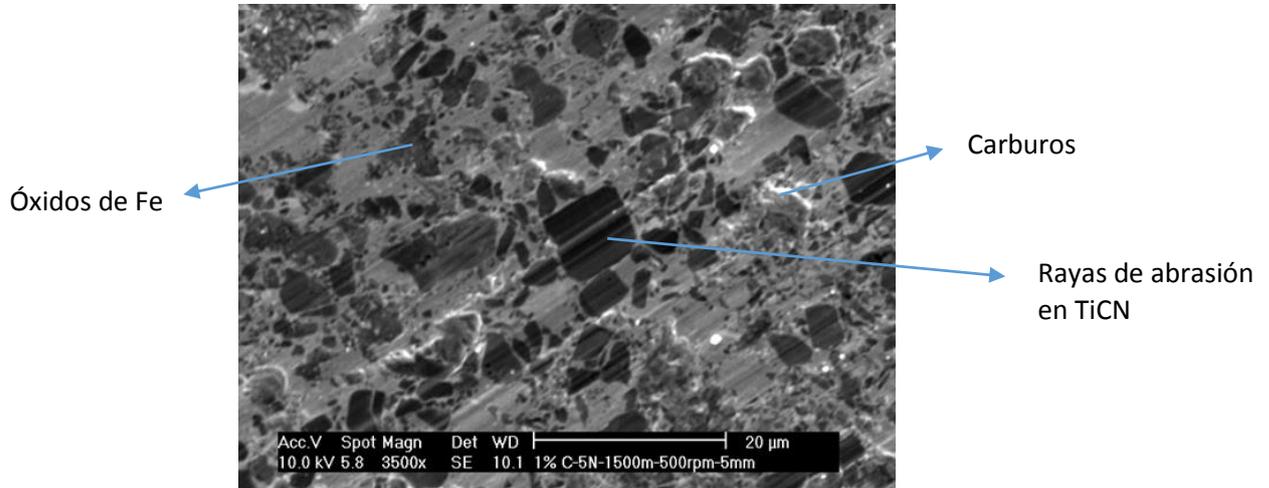
A distancia de deslizamiento de 1500m el desgaste es más apreciable que en los dos casos anteriores. El ancho de pista medio ha sido de 0.563mm. Como se ve en la *Figura 4.54*, a pesar de haber sufrido un desgaste mayor no es muy grande aunque la pista está muy bien delimitada por residuos del material originados durante el ensayo.



**Figura 4.54. Aspecto general de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 5N, 1500m**

Dentro de la pista de desgaste, *Figura 4.55*, se ve de forma mucho más clara el que se ha producido durante el ensayo. La microestructura inicial se aprecia en toda la superficie desgastada. Aun así, esta superficie no se mantiene igual que antes de ejecutar el ensayo, la superficie muestra las rayas típicas de la abrasión que se forman antes de arrancar el material.

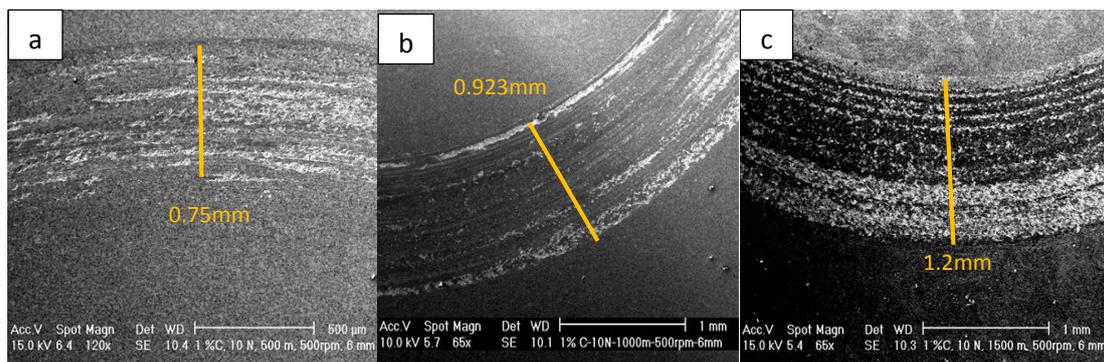
En pequeñas zonas, la abrasión ha avanzado llegando a arrancar el material de la matriz de Fe, ya que es más blanda que el TiCN al que únicamente llega a arañar. Al arrancar material, los carburos propios del material son descubiertos. Por último, aparecen también algunos óxidos de Ti y Fe alrededor de las partículas de TiCN, pero estos óxidos son mínimos y mayoritariamente de Fe la menor dureza de la matriz de hierro.



**Figura 4.55.** Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 5N, 1500m

#### 4.3.6. Cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C ensayado bajo carga de 10N

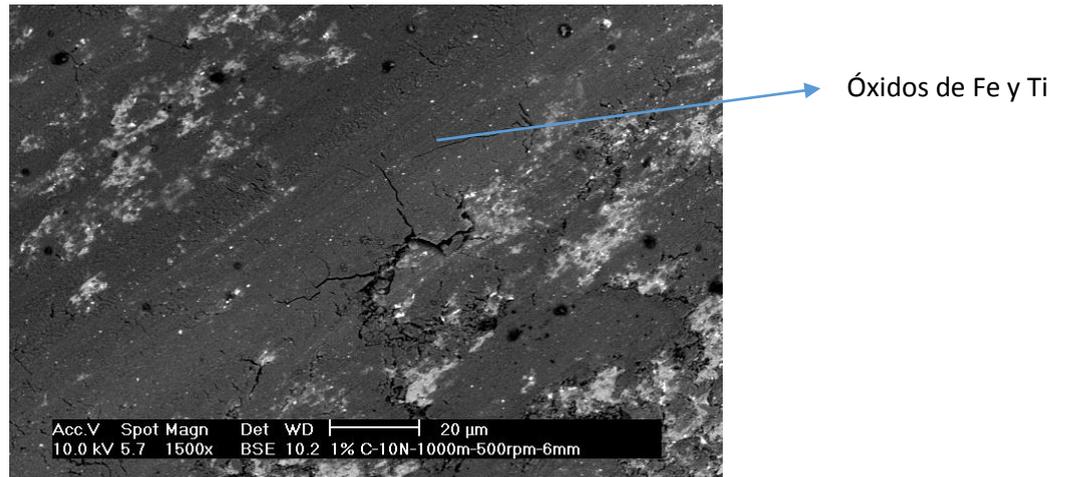
En la *Figura 4.56* se muestra una comparación de las pistas de desgaste a las distintas distancias de deslizamiento proporcionadas para este tipo de cermet bajo carga de 10N. El desgaste bajo esta condición es mucho más perceptible que bajo carga de 5N. En la imagen se ve la evolución del ancho de pista medio debido al desgaste sufrido que se analiza a continuación.



**Figura 4.56** Aspecto general de las pistas de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 0.5%C bajo carga de 10N. a) 500m; b) 1000m; c) 1500m

A distancia de deslizamiento de 500m, el ancho de pista medio ha sido de 0.75mm. La abrasión ha sido el desgaste predominante en este ensayo, arrancando material principalmente de la matriz de hierro ya que es más blanda que el TiCN, dejando al descubierto los carburos propios de la composición del cermet. Además de la abrasión se han originado óxidos que se distribuyen por toda la pista, estando más focalizados en la zona central de ella. Este desgaste se muestra en la *Figura 4.57*, que como se ve hay en zonas donde se distingue la microestructura inicial del cermet, arañada y erosionada debido a la abrasión.

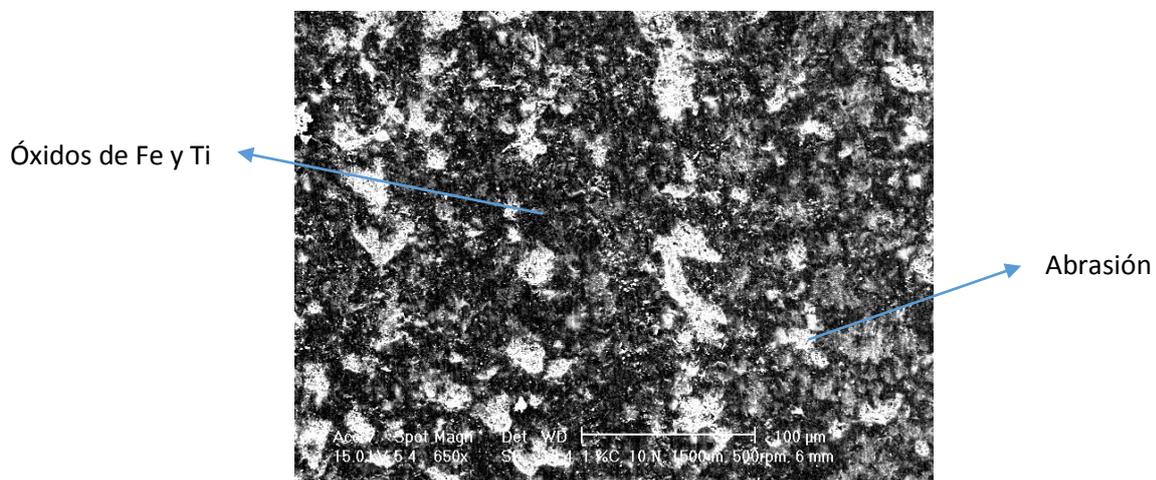




**Figura 4.59. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 10N, 1000m**

Como se aprecia en la *Figura 4.59*, al paso de la bola de alúmina, se crean grietas en la superficie de la capa de óxidos, es decir, sufre delaminación. Esta *Figura 4.59*, es similar a la *Figura 1.13* en donde se explicaba la teoría de la delaminación [32], [33].

El desgaste a 1500m es casi idéntico al ocurrido a menor distancia de deslizamiento. El ancho de pista medio ha sido mayor y tiene un valor de 1.2mm. La pista de desgaste está llena de óxidos distribuidos por toda la pista de desgaste. Los óxidos son de Fe y Ti y se originan a partir del material arrancado al inicio del ensayo mediante abrasión. Estos óxidos cubren casi toda la pista aunque en pequeñas zonas se ve la abrasión que ha afectado a la probeta. En la *Figura 4.60* se ve con más claridad el desgaste que ha sufrido.



**Figura 4.60. Imagen del interior de la pista de desgaste del cermet M2-Ti(C, N) con adición de 1%C. Condiciones de ensayo: 10N, 1500m**

#### 4.4. COMPARACIÓN CON DISTINTOS MATERIALES UTILIZADOS EN APLICACIONES DE HERRAMIENTAS DE CORTE.

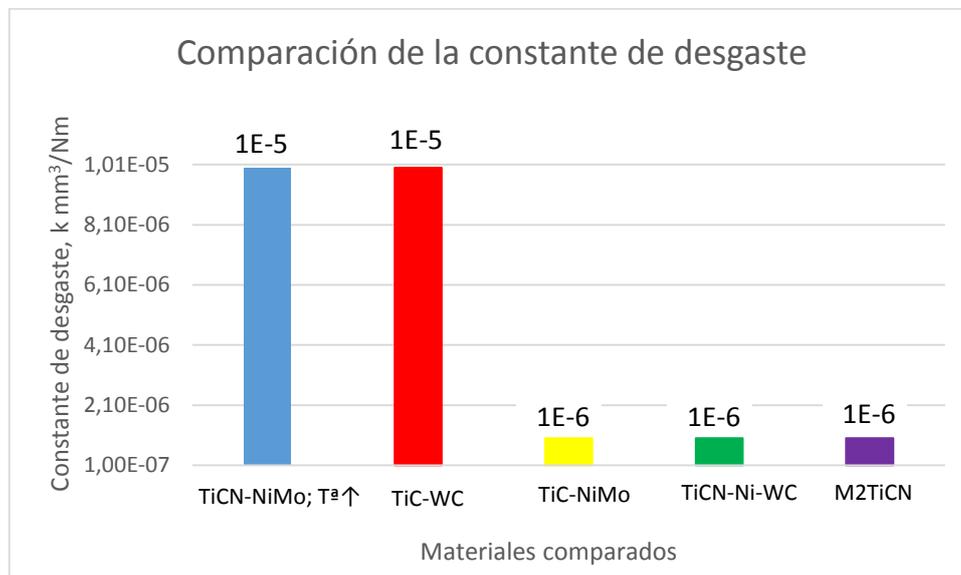
Se utiliza la constante de desgaste para poder comparar los cermets con los distintos materiales. La constante de desgaste obtenida tiene un orden de magnitud de  $10^{-6}$ , en la mayoría de los cermets, salvo en los que no tienen carbono añadido que como se ha visto tenían menor dureza y menor resistencia a desgaste, prueba de ello además es su constante de desgaste cuyo orden de magnitud es de  $10^{-5}$ . Se compara, por tanto, con los cermets con carbono añadido.

Los materiales con los que se comparan los cermets ensayados son los expuestos al final del *Capítulo 1*, es decir, otros cermets diferentes, carburos cementados y aceros rápidos.

##### -Comparación con diferentes cermets.

Los cermets con los que se ha comparado son cermets TiC o TiCN con matriz metálica de Ni y/o Mo a los que se les añaden distintos carburos. Las condiciones bajo las que se han realizado estos ensayos son muy diversas, habiendo grandes variaciones de fuerza, temperatura, velocidad de deslizamiento, distancia de deslizamiento e incluso el tipo de tribómetro, donde se han usado block on ring, ball on flat, ball on disc y pin on disc [31], [33], [38], [39].

La constante de desgaste en los cermets ensayados es igual e incluso un orden de magnitud menor que los cermets vistos en el *Capítulo 1*, con matriz metálica de Ni y/o Mo. En la *Figura 4.61* se muestra gráficamente esta comparación de la constante de desgaste.



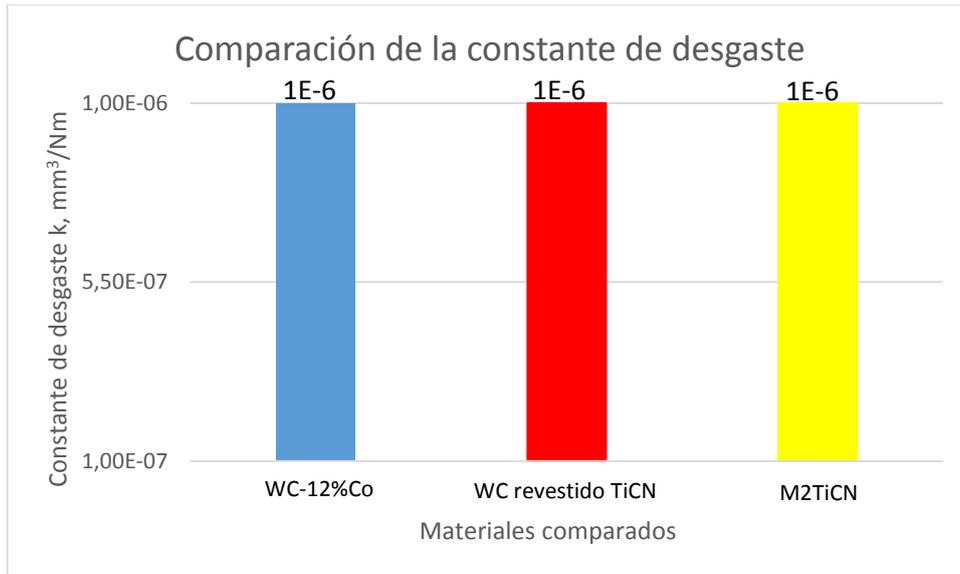
**Figura 4.61. Comparación del orden de magnitud de la constante de desgaste entre los cermets TiC y TiCN de matriz metálica Ni y/o Co a los que se le añaden carburos con los cermets M2TiCN**

##### -Comparación con carburos cementados

Los carburos cementados con los que se ha comparado son carburos cementados revestidos de TiCN y carburos cementados WC-12%Co. Las condiciones bajo las que se han realizado estos ensayos son muy diversas, variando la temperatura desde temperatura ambiente hasta llegar a 400°C. Además, la carga también es muy diferente, de 340N para los WC-12%Co y de 3N para

los revestidos con TiCN. Los tribómetros en donde se realizan también son distintos, utilizan el ball on disc y el ring on plate [41], [42].

A pesar de tanta variedad en cuanto a condiciones, la constante de desgaste ha sido muy parecida en todos los casos, teniendo un orden de magnitud igual al de los cermets ensayados en el presente trabajo. En la *Figura 4.62* se muestra gráficamente esta comparación de la constante de desgaste. Se puede deducir que los cermets M2TiCN presentan una resistencia al desgaste similar a estos cermets distintos, pero no se pueden sacar muchas conclusiones ya que han sido realizados los ensayos en condiciones distintas.

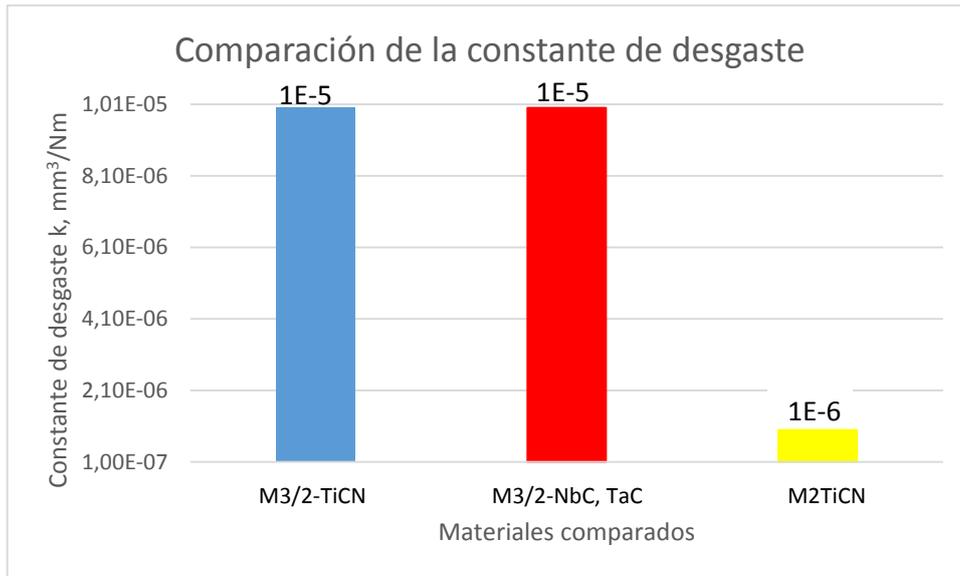


**Figura 4.62. Comparación del orden de magnitud de la constante de desgaste entre los carburos cementados WC-12%Co y WC revestido de TiCN con los cermets M2TiCN**

#### **-Comparación con acero rápido.**

El acero rápido con el que se ha comparado es de tipo M3/2 al que se le añade TiCN, NbC o TaC. Las condiciones del ensayo y el tribómetro en donde se ha realizado son idénticas a las de este trabajo [43], [44].

La constante de desgaste en los cermets ensayados es menor en un orden de magnitud que en el acero rápido. En la *Figura 4.63* se muestra gráficamente esta comparación de la constante de desgaste. Por tanto, no se puede sacar ninguna conclusión referente a la comparación de dureza entre los carburos cementados y los cermets M2TiCN. Esto indica que los cermets ensayados tienen mejor resistencia al desgaste.



**Figura 70. Comparación del orden de magnitud de la constante de desgaste entre los aceros rápidos con adiciones de TiCN y adiciones de NbC y/o TaC con los cermets M2TiCN**

# *Capítulo 5*

## ***CONCLUSIONES***



## 5. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el estudio y análisis de los ensayos a desgaste mediante la técnica 'pin on disc' sobre los materiales compuestos cermets de base carbonitruro y matriz metálica M2 con distintos porcentajes de carbono, 0%C, 0.5%C y 1%C, se pueden extraer las principales conclusiones sobre el comportamiento y propiedades de estos materiales. Además se evaluará la cumplimentación de los objetivos marcados en este proyecto, que eran:

1. Estudiar la influencia del carbono en la resistencia a desgaste para los cermets M2TiCN.
2. Comparar la resistencia al desgaste con distintos materiales utilizados en aplicaciones de herramientas de corte.

Los resultados más destacables de este estudio son los siguientes:

### 5.1. INFLUENCIA DEL CARBONO EN LA RESISTENCIA A DESGASTE

Todos los materiales han sufrido un proceso de desgaste similar. Al comenzar los ensayos se empieza a arrancar material proveniente de la pista de desgaste, es decir, se produce un desgaste abrasivo. Posteriormente, los residuos provenientes del desgaste abrasivo se oxidan formando una capa de óxidos que se distribuyen a lo largo de la pista y que se compactan al paso de la bola de alúmina. Esta capa de óxidos se endurece a medida que avanzan los ensayos, llegando a ser capaz de desgastar a la bola de alúmina utilizada como contracuerpo.

Para los cermets ensayados sin carbono añadido, este desgaste abrasivo y posterior oxidativo ocurre de forma inmediata como se comprueba en las fotos y análisis proporcionados por el SEM. No es así para los cermets ensayados con adición de carbono, 0.5%C y 1%C, en donde este desgaste ocurre pero de una forma mucho más lenta. Como se ha visto, apenas daña la microestructura en estos cermets y la abrasión no sucede tan rápido como con 0%C. Al aumentar la distancia de deslizamiento se arranca más material y se empiezan a formar los óxidos, pero sin ser muy apreciable. Esto es debido a que los cermets con carbono añadido se sinterizan de distinta forma a los que no añaden carbono, presentando mejores propiedades entre las que destaca una dureza de casi el doble.

Los cermets con 0.5%C añadido son los que tienen mayor resistencia a desgaste. La diferencia con los cermets sin carbono añadido es enorme, no así con los cermets con adición de 1%C. Con este tipo de cermet, el desgaste es idéntico bajo carga de 5N, pero bajo carga de 10N se aprecian diferencias, los cermets con 0.5%C añadido sufre menor desgaste y tiene menor pérdida de volumen, lo que tiene mejores propiedades. Aun así, no se aprecian tan grandes diferencias como con los cermets sin adición de carbono.

Otro aspecto a destacar es que en los cermets sin carbono en la composición, la capa de óxidos formada durante el deslizamiento llega a ser tan grande que impide el contacto de la bola de alúmina con la microestructura inicial, frenando el desgaste ocasionado en la probeta. A medida que continúa el ensayo, los óxidos se rompen, se delaminan pudiendo continuar el desgaste. Esto no se ha apreciado en los cermets con adición de carbono puesto que al ser más lento el desgaste apenas ha dado tiempo a empezar a arrancar material en la pista y a oxidar los residuos originados por la abrasión.



En base a los resultados obtenidos de volumen desgastado, constante de desgaste y a los análisis y fotos proporcionadas por el SEM, se concluye que el carbono tiene una gran influencia en la resistencia al desgaste de los cermets M2TiCN. Más en concreto, de los tres cermets

## **5.2. COMPARACIÓN CON DISTINTOS MATERIALES UTILIZADOS EN APLICACIONES DE HERRAMIENTAS DE CORTE**

Se utiliza la constante de desgaste para poder comparar los cermets con los distintos materiales. Los cermets que mejor resistencia al desgaste han tenido son los cermets con carbono añadido y presentan una constante de desgaste de un orden de magnitud de  $10^{-6}$ .

Los materiales con los que se comparan los cermets ensayados son los expuestos al final del *Capítulo 1*, es decir, otros cermets diferentes, carburos cementados y aceros rápidos.

### **-Comparación con diferentes cermets.**

Los cermets con los que se ha comparado son cermets TiC o TiCN con matriz metálica de Ni y/o Mo a los que se les añaden distintos carburos. Las condiciones bajo las que se han realizado estos ensayos son muy diversas, habiendo grandes variaciones de fuerza, temperatura, velocidad de deslizamiento, distancia de deslizamiento e incluso el tipo de tribómetro, donde se han usado block on ring, ball on flat, ball on disc y pin on disc.

La constante de desgaste en los cermets ensayados es igual e incluso un orden de magnitud menor que los cermets vistos en el *Capítulo 1*, con matriz metálica de Ni y/o Mo. Se puede deducir que los cermets M2TiCN presentan una resistencia al desgaste similar a estos cermets distintos, pero no se pueden sacar muchas conclusiones ya que han sido realizados los ensayos en condiciones distintas.

### **-Comparación con carburos cementados**

Los carburos cementados con los que se ha comparado son carburos cementados revestidos de TiCN y carburos cementados WC-12%Co. Las condiciones bajo las que se han realizado estos ensayos son muy diversas, variando la temperatura desde temperatura ambiente hasta llegar a 400°C. Además, la carga también es muy diferente, de 340N para los WC-12%Co y de 3N para los revestidos con TiCN. Los tribómetros en donde se realizan también son distintos, utilizan el ball on disc y el ring on plate.

A pesar de tanta variedad en cuanto a condiciones, la constante de desgaste ha sido muy parecida en todos los casos, teniendo un orden de magnitud igual al de los cermets ensayados en el presente trabajo. Por tanto, no se puede sacar ninguna conclusión referente a la comparación de dureza entre los carburos cementados y los cermets M2TiCN.

### **-Comparación con acero rápido.**

El acero rápido con el que se ha comparado es de tipo M3/2 al que se le añade TiCN, NbC o TaC. Las condiciones del ensayo y el tribómetro en donde se ha realizado son idénticas a las de este trabajo.



La constante de desgaste en los cermets ensayados es menor en un orden de magnitud que en el acero rápido. Esto indica que los cermets ensayados tienen mejor resistencia al desgaste.

Por tanto, únicamente con los aceros rápidos M3/2 se puede hacer una comparación del todo fiable ya que las condiciones en las que se han realizado los ensayos son idénticas a las de los cermets M2TiCN. En cuanto a los carburos cementados y los distintos cermets TiC, TiCN con matriz metálica de Ni y/o Co, al tener distintas condiciones la comparación efectuada no es del todo resolutive aunque sirve como idea general. En definitiva, se deberían realizar más ensayos bajo distintas condiciones para poder realizar unas comparaciones más extensas y fiables.



## *Capítulo 6*

# *LÍNEAS FUTURAS*





## 6. LÍNEAS FUTURAS

Considerando los resultados alcanzados y conclusiones obtenidas en este proyecto se propone continuar el estudio a desgaste de los cermets base carbonitruro y matriz de M2 con carbono en la composición. Esta continuación en la investigación iría focalizada de la siguiente manera:

1. Para este tipo de ensayo, pin on disc, modificar los parámetros para obtener más resultados y tener más datos sobre la resistencia al desgaste y su comportamiento tribológico. En esta línea sería interesante realizar ensayos a temperaturas superiores a temperatura ambiente.
2. Realizar otro tipo de ensayo distinto en el que se pueda medir otros tipos de desgaste como puede ser el desgaste a fatiga por ejemplo.
3. Realizar ensayos de fatiga térmica para estudiar si mantiene sus propiedades ante ciclos de frío-calor.
4. Realizar ensayos reales de corte para determinar la vida del material en condiciones reales de servicio.

Todo esto, proporcionaría una información muy detallada y completa sobre estos cermets que sería de gran utilidad y necesaria para determinar su aplicación dentro de los distintos procesos de mecanizado existentes.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Sandvick Coromant, Evolución del mecanizado, Mecanizado moderno, (1994) p 1-19
2. Li XS. Ceramic cutting tools: an introduction. Key Eng Mater 1994; 96:1-1
3. Coca Rebollero P, Rosique Jimenez J. Ciencia de Materiales Teoría-Ensayos-Tratamientos. 11 ed. Pirámide. 2003: 421-423.
4. Askeland D, Fulay P, Wright W. Ciencia e Ingeniería de Materiales. 6 ed. Lengage Learning. 2011; Cap 15: 571-574.
5. Ortner HM, Ettmayer P, Kolaska H. The history of the technological progress of hardmetals. Int J Refract Met Hard Mater 2014; 44:148-159
6. [http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/polycrystalline\\_cubic\\_boron\\_nitride/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx) 07/10/2013
7. [http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/polycrystalline\\_diamond/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_diamond/pages/default.aspx) 07/10/2013
8. Zhang, Honan. Cutting performance of titanium carbonitride cermet tools. Int J Refract Met Hard Mater 2007; 25(5-6):440-4
9. Aigner K, Lengauer W, Ettmayer P. Interactions in iron-based cermets systems. J Alloys Compd 1997; 262-263: 486-91.
10. Mun S, Kang S. Effect of HfC addition of microstructure of Ti (CN)-Ni system. Powder Metall 1999; 42(3):251-6.
11. Upadhyaya, G.S., Materials science of cemented carbides – an overview. Materials & Design, 2001. 22(6): p.483-489.
12. Meredith, B. and D.R. Milner, Densification mechanism in tungsten carbide-cobalt system. Powder Metallurgy, 1976. 19(1): p.38-45.
13. Ettmayer P, Lengauer W. The story of cermets. Powder Metall Int 1989; 21(2):37-8
14. Pastor H. Mater Sci Eng 1988; A 105/106:401-9. Ettmayer P, Lengauer W. Powder Metall Int 1989; 21(2):37-8
15. Ettmayer P, Kolaska H, Lengauer W, Dreyer K. Int J Refract Met Hard Mater 1995; 13:343-51 Pastor H. Mater Sci Eng 1988; A 105/106:401-9.
16. Peng, Ying. Development of TiCN-based cermets. Mechanical properties and wear mechanism. Int J Refract Met Hard Mater 2013;39:78-89
17. Zhang SY. Titanium carbonitride-based cermets: processes and properties. Mater Sci Eng A 1993; 163:141-8.
18. Pastor H. Present status and development of tool materials: part 1. Cutting tools. Int J Refract Met Hard Mater 1987; 6:196-209.
19. Levi G, Kaplan WD, Bamberger M. Structure refinement of titanium carbonitride (TiCN). Mater Lett 1998; 35: 344-50.
20. Ruisong Guo, Cai S, Ji HM, Wu HZ. Engineering structural ceramics. 1st ed. Tianjin: Tianjin University Press; 2002.
21. S. Ahn, S. Kang, J. Am. Ceram. Soc. 83 (6) (2000) 1489-1494.
22. H. Kwon, S. Kang. Microstructure and mechanical properties of TiC-WC-(Ti, W) C-Ni cermets. Materials Science and Engineering A 2009; 520: 75-79



23. <http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/5.Sinterizacionx.pdf> 11/03/2014
24. J. Zackrisson, A. Larsson, H-O Andreú. Microstructure of the Ni metallic matrix phase in a TiC-Mo<sub>2</sub>C-Ni cermet, 32,8,(2001) p:707-712
25. <http://www.clubdemantenimiento.com/desgaste-de-cojinetes-de-contacto-plano/> 13/03/2014
26. Bharat Busham. Principles and applications of tribology. New York, 1999 Ediciones. Wiley-Lutscience p: 198-199-254. P: 344-347. P: 479-540.
27. <http://www.tzh.de/products/tribometers,en> 10/12/2013
28. Francis E. Kennedy, Bharat Busham, Andras Z. Szeri. Modern tribology handbook. Volume 1. 'Macrotribology', 2001.
29. ASM Metals Handbook, Volume 18, 'Friction, Lubrication and Wear technology', 1992.pg: 184.236.242.271
30. Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, 'Engineering tribology', 2001.
31. Meng JH, Lu JJ, Wang JB, Yang SR. Tribological behaviour of TiCN-based cermets at elevated temperaturas. Mater Sci Eng A 2006; 418: 68-76.
32. Abrahanson, E. P.; Jahamir, S; Colling, D. A.; Suh, N.(1974). 'Failure by delamination during wear'. Proceeding of the workshop on Failure Analysis and the SEM IIT Research Institute, EEUU., pp: 889-894.
33. Pirso J, Viljus M. Sliding wear of TiC-NiMo cermets. Tribology International. 2004; 37: 817-24.
34. K.C. Ludena, 'Friction, Wear, Lubrication- A textbook in tribology', 1996.
35. Polcar T, Novak R, Siroky P. The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperaturas. Wear. 2006; 260: 40-49.
36. SM Handbook. Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM International. 1992; 18:21.
37. J. F. Archard. Contact and Rubbing of Flat Surface. J. Appl. Phis., vol 24, 1953, pp: 981-88.
38. Peng Y, Miao HZ, Peng ZJ. Development of TiCN-based cermets. Mechanical properties and wear mechanism. Int J Refract Met Hard Mater 2013; 39:78-89.
39. Zhao XZ, Liu JJ, Zhu BL, Onyang JL. Tribological properties of TiC-based ceramic high speed Steel at high temperaturas. Ceramics International. 1997; 24: 13-18.
40. Cardinal S, Malchere A, Garnier V. Microstructure and mechanical properties of TiC-TiN based cermets for tools application. Int J Refract Met Hard Mater, 2009; 27: 521-527.
41. Yang Q, Senda T, Hirose A. Sliding wear behavior of WC-12%Co coatings at elevated temperaturas. Surface and coatings technology.2006; 200:4208-12.
42. Wang Q, Zhou F, Chen K. Friction and wear properties of TiCN coatings sliding against SiC and Steel balls in air and wáter. Thin solid Films.2011; 519: 4830-41.
43. Gordo, E; Velasco, F; Antón, N; Torralba, JM. Wear mecahanisms in high speed Steel reinforced with (NbC) p and (aC) p MMCs. Wear, 2000; 239: 251-259.
44. Velasco, F; Gordo, E; Isabel, R; Ruiz-Navas, EM; Bautista, A; Torralba, JM. Mechanical and wear behaviour of high-speed steels reinforced with TiCN particles. Int J Refract Met Hard Mater, 2001; 19: 319-323
45. L. Prakkash, B. Gries, Acute inhalation toxicity by contact corrosión- the case of WC-Co, in: EPMA (Ed.), Proceedings EURO PM2007 Shrewbury, 2007, pp.189-196.



46. National Toxicology Program. Department of health and human services. <http://ntp.niehs.nih.gov/?objectid=03C9AF75-E1BF-FF40-DBA9EC0928DF8B15>, in, USA.
47. P. Etm Mayer, H. Kolaska, W. Lengauer, K. Dreyer, Ti (C, N) cermets- metallurgy and properties, *Int. J. Refract Met Hard Mater.* 13(1995) 343-351.
48. Cardinal, S., et al., Microstructure and mechanical properties of TiC-TiN based cermets for tool application. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2009. 27(3): p.521-527.
49. I. F. Machado, L. Girardini, I. Lonardelli, Molinari, The study of ternary carbides formation during SPS consolidation process in the WC-Co-steel system, *Int J Refract Met Hard Mater*, 2009; p. 883-891.
50. William D Callister Jr, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3ª ed. Reverté S.A, 1995. Cap 6: 136
51. UNE-EN ISO 4287. Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial, AENOR, Editor. 1999.
52. P.J. Goodhew, J. Humphreys and R. Beanland, *Electron microscopy and analysis*, ed. Taylor & Francis. 2001. Chapters 2, 5 and 6.
53. Alvaredo, P. et al, Microstructural development and mechanical properties of iron based cermets processed by pressureless and spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 2012.538(0): p. 28-34

