

**1. Título:** Influencia de la evolución microestructural de materiales duros (carburos cementados WC-Co) ante daños inducidos en servicio.

**2. Unidad Ejecutora Principal del Resultado:**

1. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente (UO).

**3. Autores:** Dr.C. David Coureaux Mustelier<sup>1,2</sup>

Dr.C Roberto Sagaró Zamora <sup>1</sup>

Dr.C Hipólito Carvajal Fals<sup>1</sup>

Dr.C Luis Miguel LlanesPitarch<sup>2</sup>

Dr.C. Carlos Roberto Camello Lima <sup>3</sup>

Dr.C Mario Martínez Orozco<sup>1</sup>

MSc. Miguel Ángel Mojena Reyes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente (UO), Cuba

<sup>2</sup> Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

<sup>3</sup> Universidad Metodista de Piracicaba, Brasil.

**4. Resumen**

La mayor expansión de carburos cementados WC-Co ultrafinos y nanométricos en novedosas aplicaciones tales como minibrocas, calzos herramientales e insertos intercambiables, componentes estructurales, boquillas, así como otras tradicionales como herramientas de corte y conformado; es limitada por la presencia de sollicitaciones mecánicas que pueden limitar su vida útil debido a una rotura prematura antes del desgaste. Por otra parte, procesos como la corrosión y el desgaste combinados provocan daño extremo en un número importante de industrias tales como la del procesamiento de minerales, la industria química y de producción de energía. Estos procesos incluyen mecanismos a través de los cuales se produce un reforzamiento de la efectividad del daño por uno u otro proceso.

En el presente estudio se evalúa la influencia de la microestructura para calidades ultrafinas y nanométricas en parámetros de diseño relevantes para aplicaciones condicionadas por la rotura prematura: resistencia a la fractura, sensibilidad a fatiga y tolerancia al daño inducido por sollicitaciones de contacto, identificando aquellas combinaciones más idóneas que permitan maximizar el desempeño de estos materiales en función de las condiciones de servicio a que estarán sometidas, incluyendo además en el caso de los recubrimientos el efecto sinérgico del desgaste y la corrosión.

## COMUNICACIÓN CORTA

### **Influencia de la evolución microestructural de materiales duros (carburos cementados WC-Co) ante daños inducidos en servicio.**

David Coureaux Mustelier, Roberto Sagaró Zamora, Luis M. Llanes Pitarch, Hipólito Carvajal Fals, Mario Sánchez Orozco, Miguel Angel Mojena Reyes, Carlos Roberto Camello Lima

De los innumerables esfuerzos que se realizan con la finalidad de desarrollar nuevos materiales duraderos y fiables, se deriva un acuerdo pleno a nivel mundial sobre la necesidad de un **compromiso óptimo entre la dureza y la tenacidad de fractura del material; propiedades que aunque generalmente muestran un comportamiento inverso están estrechamente vinculadas a la productividad industrial**. Una herramienta con dureza y resistencia al desgaste superiores repercute en un mayor volumen de material removido por unidad de tiempo, **lo cual es sintomático de una mayor producción de piezas**. En tanto, una mejora de la tenacidad de fractura representa **menos pérdida de tiempo asociada al reemplazo de herramientas rotas de forma prematura**. La búsqueda de alternativas para alcanzar dicho compromiso dio lugar a un descubrimiento revolucionario en los materiales para herramientas: *los carburos cementados*, también referidos como metales duros.

La mayor expansión de carburos cementados WC-Co ultrafinos y nanométricos en novedosas aplicaciones tales como minibrocas, calzos herramientales e insertos intercambiables, componentes estructurales, boquillas, así como otras tradicionales como herramientas de corte y conformado; es limitada por la presencia de sollicitaciones mecánicas (fractura, fatiga, concentradores de tensiones, contacto mecánico) que pueden limitar su vida útil debido a una rotura prematura antes del desgaste. Por otra parte, procesos como la corrosión y el desgaste combinados provocan daño extremo en un número importante de industrias tales como la del procesamiento de minerales, la industria química y de producción de energía. Estos procesos incluyen mecanismos a través de los cuales se produce un reforzamiento de la efectividad del daño por uno u otro proceso.

Los carburos cementados se caracterizan por un comportamiento a la rotura frágil, y la correspondiente fractura se origina a partir de defectos existentes en el material. Lo anterior conlleva a que el rendimiento y la fiabilidad de los elementos fabricados con estos materiales estén condicionados a la presencia de defectos. En este contexto, el empleo de la mecánica de la fractura elástica – lineal (MFEL) ha mostrado ser un enfoque satisfactorio para racionalizar el comportamiento a rotura de estos materiales, incluso bajo sollicitaciones cíclicas. La información existente en la literatura es extensa para calidades con carburos de tamaños grueso, medio y fino, pero muy limitada para microestructuras ultrafinas y nanométricas. En consecuencia, la documentación de la influencia de la microestructura en el comportamiento a fractura y fatiga del metal duro tal de incluir estas nuevas ventanas microestructurales, representa un requerimiento ineludible para un empleo más efectivo de estos materiales.

En lo que refiere a la geometría de elementos estructurales, una característica común en éstos es la presencia de cambios de sección, orificios de lubricación y/o entallas. Sin embargo, la escasa información sobre la influencia de la microestructura en la sensibilidad a la presencia de entallas bajo sollicitaciones mecánicas es una de las limitaciones más importantes con las que se encuentran las empresas fabricantes de metal duro al querer introducir este material, o al menos presentar su candidatura como sustituto al acero, en componentes estructurales.

En cuanto a condiciones de servicio el contacto mecánico es una de las sollicitaciones más frecuentes e importantes de las presentes en herramientas de conformado y componentes estructurales. Desde este punto de vista, estudios previos en materiales cerámicos han demostrado la validez de implementar técnicas de indentación esférica (contacto hertziano) tanto para evaluar la respuesta mecánica bajo sollicitaciones de contacto como para generar e introducir en el material daño extrínseco de forma controlada. Esta implementación permitirá dar respuesta a un tema de extrema relevancia como es la evaluación de la influencia de la microestructura de los carburos cementados en la transición de

fractura frágil a deformación cuasi-plástica como modo de daño al contacto prominente, así como la influencia del daño inducido en la integridad estructural del material en términos de la resistencia mecánica residual. En este mismo contexto la aplicación de modificaciones superficiales mediante tratamientos termoquímicos sobre estas diferentes calidades de carburos cementados convencionales, finas, ultrafinas y nanométricas permite la obtención de capas modificadas microestructuralmente y que incrementan la resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo de los materiales para herramientas.

Por otro lado, específicamente en aquellos términos de degradación de materiales en equipamientos que operan en ambientes agresivos, como por ejemplo, bombas centrifugas para el transporte de licor cáustico utilizadas en las industrias productoras de aluminio, sufren de un proceso de desgaste de sus superficies útiles por la coexistencia de los fenómenos de corrosión y erosión. La corrosividad del licor cáustico está relacionada con la presencia de Hidróxido de Sodio (NaOH) y la erosión con la existencia de partículas sólidas en suspensión a altas velocidades, fenómeno conocido como sinergismo erosión corrosión.

En concordancia con estas ideas, se identifica como **problema científico de la investigación**: la limitada información del comportamiento a fractura y fatiga para calidades ultrafinas y nanométricas de carburos cementados WC-Co, así como los escasos estudios existentes del comportamiento mecánico de estos materiales ante la presencia de concentradores de tensiones y/o el daño inducido en servicio que condicionan el buen desempeño de estos materiales en aplicaciones donde la rotura prematura puede preceder al desgaste. De igual forma se pretende evaluar la influencia microestructural de recubrimientos de carburos cementados de calidades ultrafinas y nanométricas en condiciones de desgaste mecánico corrosivo.

Nuestro país no queda exento de tal problemática universal, y como país del Tercer Mundo carece de las materias primas y de la alta tecnología, necesaria para procesar estos materiales herramientas de última generación, y debe recurrir a menudo pues a la importación de herramientas y componentes estructurales costosos en el mercado internacional. Al respecto, resulta evidentemente necesario para Cuba volcar el ingenio y su desarrollo científico-técnico en función de elevar el desempeño de estos materiales herramientas, así como el empleo de técnicas de modificación superficial para optimizar la habilidad microestructural de las superficies de aquellas partes de equipos y componentes industriales que trabajen en condiciones de desgaste erosivo corrosivo, conllevando de esta forma a la menor importación de los mismos debido a su mayor durabilidad, lo que consecuentemente incrementará la eficiencia y competitividad del proceso tecnológico en cuestión. Esta política trazada queda reflejada en los lineamientos económicos del PCC en abril del 2010, específicamente 123, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 136 y 139.

En el presente estudio tiene como **objetivo** evaluar la influencia de la microestructura en parámetros de diseño relevantes para aplicaciones condicionadas por la rotura prematura: resistencia a la fractura, sensibilidad a fatiga y tolerancia al daño inducido por sollicitaciones de contacto, identificando aquellas combinaciones más idóneas que permitan maximizar el desempeño de estos materiales en función de las condiciones de servicio a que estarán sometidas, incluyendo además en el caso de los recubrimientos el efecto sinérgico del desgaste y la corrosión.

## Resultados

El comportamiento a fractura de estos materiales se racionaliza satisfactoriamente en el marco de la mecánica de la fractura elástica lineal, bajo la consideración de la tenacidad de fractura como el parámetro intrínseco del material que rige las condiciones de fallo. Asimismo, una mayor tenacidad implica menor dispersión en los valores de resistencia a rotura; y por tanto, mayor fiabilidad. Sin embargo, el papel determinante de la microestructura se desprende del hecho que ella afecta directamente la tenacidad e indirectamente el tamaño y la distribución de los defectos intrínsecos, dando como resultado que el material más resistente no es ni el más duro ni el más tenaz, sino una con

características intermedias con respecto al tamaño de grano de la fase carburo y el contenido de la fase metálica [1].

Los resultados obtenidos del estudio sobre fatiga del metal duro validan la extensión de los conceptos de la mecánica de la fatiga para calidades ultrafinas y nanométricas, concluyendo que la susceptibilidad a fatiga de los carburos cementados son fuertemente dependientes de la microestructura al ser menos susceptibles a la fatiga con la disminución de la ductilidad efectiva del material. Sin embargo, mayores niveles de tenacidad resultan en una menor severidad de los concentradores de tensiones bajo sollicitaciones cíclicas, lo cual resulta en un efecto complejo de la microestructura sobre la resistencia a fatiga de componentes entallados [2-4].

Por su parte, el estudio de la tolerancia al daño inducido por contacto permite observar que la microestructura ejerce una influencia relevante en la respuesta mecánica bajo sollicitaciones de contacto hertziano. Ello se refleja en una transición en el modo de daño, de frágil a dúctil al aumentar la tenacidad de fractura destacando que aunque ambos inciden en la integridad estructural del material, un incremento de la tenacidad del material conlleva a una mayor tolerancia al daño inducido bajo sollicitaciones de contacto, tanto monotónicas como cíclicas [5-7]

Finalmente, la microestructura también juega un rol fundamental en los mecanismos de desgaste evidenciándose un mayor desgaste en aquellos materiales con un mayor contenido de ligante metálico Co al deteriorarse esta fase con una consecuente liberación de partículas WC. En este mismo sentido la obtención de recubrimientos superficiales a partir de polvos nanoestructurados y tamaños nanométricos de los carburos cementados por técnicas de HVOF permite obtener una mayor resistencia al desgaste erosivo, al obtenerse recubrimientos densos y una mayor adherencia a la fase ligante, con una mayor dureza y tenacidad de fractura que impiden la aparición y el crecimiento de las grietas dada la restricción que en las diferentes direcciones imponen los granos de carburos. Comoquiera según se ha determinado en estos estudios prevalece la componente erosiva en la sinergia, estos materiales nanoestructurados presentaron mayor resistencia a la corrosión dada la mayor resistencia a la destrucción de la capa pasivada y la aparición de fenómenos de corrosión localizada [8-11].

## Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten indicar a la microestructura de los carburos cementados como el factor más relevante de cara al rendimiento funcional óptimo de estos materiales bajo sollicitaciones mecánicas que conlleven rotura, fatiga y daño por contacto. En este contexto, un enfoque adecuado bajo este tipo de condiciones de servicio sería la selección de microestructuras que permitan una ponderación relativa superior de la tenacidad de fractura sobre la dureza, siempre y siempre y cuando los requerimientos tribocorrosivos implícitos a la aplicación sean satisfechos.

Asimismo, de la aplicación adecuada de los resultados derivados de estos estudios se espera como **aporte económico**, que con la selección de una microestructura de metal duro idónea para aplicaciones acordes a las condiciones aquí evaluadas, así como las posibilidades del tratamiento termoquímico, se contribuirá a una mayor fiabilidad mecánica y a un alargamiento de la vida útil de las herramientas y piezas fabricadas con dichos materiales. En tal sentido, los principales aportes de esta investigación encuentran aplicación inmediata en la EMI "Ignacio Agramonte Loynaz", única de su tipo en el país con contar con un proceso de fabricación de estos materiales y certificación de calidad de los suministradores de polvos y fabricantes de herramental de alta calidad; y que con pocas adaptaciones tecnológicas y el personal técnico y de servicio de que dispone, es capaz de convertir estos resultados científicos en beneficios económicos tangibles. La validez de tales resultados y su aplicación en la industria del herramental para la fabricación de piezas se presenta aquí certificada por la Empresa líder mundial en la fabricación de herramientas de carburos cementados, SANDVIK, que ha cooperado en el

suministro de las calidades convencionales y ultrafinas, así como las aun no comerciales nanométricas y en buena medida han financiado las investigaciones realizadas.

Es de significar además el uso de calidades nanométricas para aplicaciones en revestimientos resistentes al desgaste erosivo corrosivo de industrias como la minería, la construcción, metalmecánica, de energía y el petróleo, aportes que han sido corroborados por la empresa OGRAMAC, Ingeniería de Superficies, S.A. de Brasil, institución suministradora de los polvos y encargada de la deposición de los recubrimientos y colaboradora de los trabajos aquí presentados, que habiendo participado de las investigaciones, discusiones técnicas y publicaciones científicas ha ido introduciendo en el sector industrial los resultados de estas investigaciones.

## Referencias

1. Coureaux, D., Góez, A., Reig, B., y Llanes, L., "Comportamiento a fractura de carburos cementados WC-Co ultrafinos.", *Ingenierías*, Vol. XVI, No. 60, 35-40, (2013)
2. Coureaux, D., Góez, A., Mestra, A., Mateo, A. y Llanes, L., "Resistencia a Fractura y Fatiga de Materiales Compuestos WC-Co: Influencia de la Microestructura y Sensibilidad a la Presencia de Entallas" *IX Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, Girona, España, 5-8 Julio, (2011), ISBN: 978-84-8458-325-3 (Presentación Oral)
3. Coureaux, D., Reig, B., Rimbau, V., D'Armas, H., Mestra, A., y Llanes, L. "Notch effects on the fatigue endurance of cemented carbides" *Proceedings EuroPM2013, Volume I*, Ed. EPMA, p 101-106, 15-18 de Septiembre 2013, Gothenburg, Suecia (2013) ISBN 978-1-899072-41-5.
4. Torres, Y., Tarrago J.M., Coureaux, D., Tarrés, E., Roebuck, B., Chan, P., James, M., Liang, B., Tillma, M., Viswanadhame, R.K., Mingard, K.P., Mestra, A., Llanes, L "Fracture and fatigue of rock bit cemented carbides: Mechanics and mechanisms of crack growth resistance under monotonic and cyclic loading" *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 45 (2014) 179–188
5. Coureaux, D., Góez, A., Reig, B., Tarrés, E., Jiménez-Piqué, E., y Llanes, L., "Tolerancia al daño de carburos cementados.", *XI Congreso Nacional de Materiales. "Libro de resúmenes"*. 2010, p. 749. Zaragoza, España, (2010) ISSN: 1989-2535.
6. Góez, A., Coureaux, D., Ingebrand, A., Reig, B., Tarrés, E., Mestra, A., Mateo, A., Jiménez-Piqué, E. y Llanes, L., "Contact damage and residual strength in hardmetals", *Int. J. Refract. Met. and Hard Mater.*, 2012; 30:121-127, ISSN: 0263-4368
7. Coureaux, D., Ingebrand, A., Góez, A., Mestra, A. y Llanes, L., "Influencia de la microestructura en la evaluación del daño inducido bajo sollicitaciones cíclicas en carburos cementados.", *XII Congreso Nacional de Materiales*, Alicante, España, 30 Mayo-1 Junio (2012), ISBN: 978-84-695-3316-1
8. C.R.C. Lima, J.A. Batista, R. Libardi, H.C. Fals, R.Sagaró. Zamora, J.R.S. Ribeiro, V.A. Ferraresi, Developing alternative coatings for repair and restoration of pumps for caustic liquor transportation in the aluminum and nickel industry, *Surface & Coatings Technology* (2014), doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.010.
9. Lima, C. R. C.; Batista, J.A. ; Libardi, R. ; Fals, H. C. ; Zamora, R. S.; Ribeiro, J. R. S.; Ferraresi, V. A.. "Developing alternative coatings for repair and restoration of pumps of caustic liquor transportation in the aluminum and nickel industry." In: 6th RIPT Les Rencontres Internationales sur la Projection Thermique, 2013, Limoges, FR. Anais do 6th RIPT. Limoges: Université de Limoges, 2013. v. 1
10. C. R. C. Lima, R. Libardi, F. Camargo, H. C. Fals & V. A. Ferraresi. "Assessment of Abrasive Wear of Nanostructured WC-Co and Fe-Based Coatings Applied by HP-HVOF, Flame, and Wire Arc Spray." *Journal of Thermal Spray Technology*, DOI: 10.1007/s11666-014-0101-6.
11. Sagaró, R. Coureaux, D. et al. Influencia de la microestructura en el comportamiento tribológico de carburos cementados (WC-Co) borados, Volumen 23 N° 2, abril - junio 2015. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, ISSN 0718-3291 versión impresa, ISSN 0718-3305 versión en línea.