

DESGASTE ABRASIVO DE CUCHILLAS DE ARADO ROTATIVO EN UN SUELO FRANCO ARENOSO

ABRASIVE WEAR OF ROTARY PLOW BLADES IN A SANDY LOAMS SOIL

WILMER PÉREZ G.

Ingeniero Agrícola, M.Sc., Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, wilmeralonsop@gmail.com

HUGO GONZÁLEZ

Grupo de Tribología y Superficies, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, hagonzal@unal.edu.co

ALEJANDRO TORO

Grupo de Tribología y Superficies, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, aotoro@unal.edu.co

Recibido para revisar Enero 22 de 2009, aceptado Agosto 25 de 2009, versión final Septiembre 18 de 2009

RESUMEN: Se relacionó la tasa de desgaste de cuchillas de arado rotativo con la velocidad de giro de las mismas. El trabajo de campo se llevó a cabo en el Centro agropecuario Paysandú (corregimiento de Santa Elena – Medellín, en un suelo franco arenoso). Se seleccionó una velocidad del tractor de 2 km/h y profundidad de trabajo de 120 mm; el rotor se trabajó con tres velocidades de giro: 141, 177 y 251 rpm. La masa perdida promedio en campo fue de 0.67 g; 1.35 g y 2.33 g respectivamente para cada velocidad. Mediante microscopía óptica y electrónica de barrido se identificaron los mecanismos de desgaste predominantes, donde la acción tipo micro-corte prevaleció sobre otros tipos de desgaste abrasivo. Se determinó además la resistencia al desgaste abrasivo de las cuchillas en laboratorio de acuerdo a la norma ASTM G65 - procedimiento A.

PALABRAS CLAVE: Arado rotativo, labranza, desgaste, tribología, cuchilla.

ABSTRACT: The wear rate of rotary plow blades was related to the tool speed in field tests. The experiments were performed at Paysandú Farming Center (Santa Elena, Medellín, in a sandy loam soil). Fixed tractor speed of 2 km/h and working depth of 120 mm were selected. Three rotational speeds were tested, namely 141, 177, 251 rpm which led to average mass losses of 0.67 g, 1.35 g and 2.33 g respectively. Optical and scanning electron microscopes aided to identify the wear mechanisms acting on the surfaces, being abrasion, and specifically micro-cutting, predominant. Also, the abrasive wear resistance of the tools was determined in laboratory according to ASTM G65 standard, procedure A.

KEYWORDS: Rotary plow, tillage, wearing, tribology, blade.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que las pérdidas anuales causadas por desgaste en las naciones industrializadas son del orden del 0.3% al 3.0% del PIB nacional [1]. Existen estudios económicos realizados en Australia los cuales han demostrado que

anualmente se pueden perder hasta 400.000 horas en tareas de recambios [2]. La abrasión es responsable por las pérdidas de material y energía más acentuadas en sistemas productivos, y por consiguiente es el fenómeno de desgaste que presenta mayor impacto dentro del gasto de

las industrias. Cerca de un 50% de los daños causados se atribuyen al desgaste abrasivo, convirtiéndose en un problema de interés general [3]. De modo general, en la optimización de un sistema que tenga por objeto mejorar la resistencia al desgaste, deben identificarse en primer lugar los mecanismos de remoción de material que actúan sobre las superficies. En el caso de daño por acción de partículas duras, por ejemplo, se deben considerar las propiedades físicas y mecánicas del abrasivo, así como algunas propiedades del material que experimenta el desgaste tales como la dureza, la tenacidad a la fractura y el coeficiente de endurecimiento por deformación, entre otros. A partir del estudio de estas propiedades y de la observación detallada de las superficies puede determinarse si los mecanismos de remoción de material son predominantemente dúctiles (con deformación plástica y micro-corte) o frágiles.

Con base en lo anterior, es posible determinar las características de la superficie deseables para llegar a una condición óptima de resistencia al desgaste [4]. El desgaste abrasivo puede ocurrir en presencia de elevada "deformación plástica", caso en el que la dureza del contra cuerpo es un factor importante en la determinación de la resistencia al desgaste; o por "fractura frágil", donde, aunque la dureza juega un papel relevante, la tenacidad a la fractura es aún más importante [5]. La abrasión se puede definir como la remoción de material por la acción de partículas duras en movimiento relativo entre dos superficies, o por la acción de las protuberancias de una o ambas superficies. La abrasión involucra diferentes procesos físicos, dependiendo de la resistencia al desgaste de los materiales y de las condiciones de operación, así como del tipo de partícula abrasiva y el ángulo con que ésta ataca la superficie. La intensidad del desgaste abrasivo depende de la relación de dureza del abrasivo a la dureza de la superficie desgastada [5].

En términos de la configuración física del tribosistema la abrasión puede ser clasificada en 2 grandes categorías [5]:

(a) A dos cuerpos: cuando las partículas abrasivas están fijas a una de las superficies.

(b) A tres cuerpos: si las partículas abrasivas están libres entre las dos superficies.

El desgaste producto de la abrasión a dos cuerpos es uno o dos órdenes de magnitud mayor que el de a tres cuerpos, dado que en abrasión a tres cuerpos solo una pequeña porción de las partículas causa desgaste, debido a las variaciones en el ángulo de ataque [5]. El desgaste abrasivo es responsable por gran parte de las pérdidas de masa de herramientas de labranza, las cuales se usan para realizar una intervención mecánica sobre el suelo con el fin de crear condiciones óptimas en el desarrollo de los cultivos y por ende obtener altos rendimientos en las cosechas [6]. Una de las máquinas más utilizada en la labranza es el cultivador rotatorio ("Rotavator") el cual aplica la potencia del motor directamente al suelo a través de la toma de potencia, sin patinaje de las ruedas ni excesivo peso del tractor. Las cuchillas del rotavator están sujetas al eje del rotor por pernos a los platos del eje y se pueden cambiar o retirar para diferentes configuraciones del cultivo. Las cuchillas van colocadas sobre el rotor en una configuración de espiral o hélice de forma tal que una sola cuchilla golpea el suelo a la vez; bajo condiciones normales, éstas se afilan a sí mismas. La relación entre la velocidad de avance del tractor y de giro del rotor determina la cantidad de avance hacia delante por corte "F" [7]. Al investigar acerca de la cinemática de los arados rotativos se determinó que por medio de análisis matemático se puede demostrar que la eficiencia del arado es máxima cuando el diámetro de giro de las cuchillas es aproximadamente 1,25 veces la profundidad [8].

El desgaste en herramientas agrícolas incluye principalmente procesos de abrasión, impacto y acción triboquímica. La eficiencia de la herramienta y su capacidad de trabajo también se determinan por las condiciones del suelo en el cual se trabaja. Se han desarrollado muchas técnicas en la búsqueda de incrementar la resistencia al desgaste abrasivo de las herramientas agrícolas, entre ellas, la utilización de recubrimientos duros en la superficie de las herramientas que puede tener viabilidad económica y resultados operacionales

satisfactorios [9]. Trabajos efectuados con herramientas agrícolas como palas, rejas de arado, cultivadoras y gradas de disco, indican que la intensidad y el tipo de desgaste es función de las características mecánicas y de las condiciones del suelo. La evaluación del desgaste presentado en estos implementos mostró que el desgaste conlleva a la pérdida de forma de la herramienta, principalmente en la zona del filo, el cual inicialmente se pone romo, y posteriormente se da lugar a la aparición de grietas debido a la continua fricción y las altas presiones. Sin embargo, se observa que la deformación es mínima cuando la zona cercana al filo posee durezas elevadas [10]. La Figura 1 muestra de manera gráfica lo significativo que es el cambio de forma y dimensiones que puede sufrir una cuchilla de arado rotativo de eje horizontal operando en condiciones rutinarias [11].



Herramienta Nueva



Herramienta con desgaste severo

Figura 1. Herramienta nueva y herramienta con desgaste severo

Figure 1. Brand new and severely worn tools

Al caracterizar el desgaste y las propiedades metalúrgicas de aceros de uso agrícola efectuando gran cantidad de ensayos de desgaste con el fin de establecer una clasificación de

acuerdo a la aplicación del mismo en relación a las condiciones específicas del suelo, Bhakat y colaboradores establecieron de manera preliminar correlaciones entre el ciclo de vida de los implementos agrícolas y algunas características del material, mediante el estudio detallado de la interacción superficie-suelo [12].

El requerimiento de dureza mínimo para un implemento agrícola que trabaja en un suelo normal oscila entre 38 y 48 HRC. Sin embargo, en áreas desérticas en las cuales se encuentran suelos duros, se requiere una dureza de la herramienta entre 50 y 60 HRC [12].

Al evaluar el desgaste de cuchillas de tres tipos de arados rotativos operando en un suelo de clima seco, se determinó que la frecuencia rotativa de operación y las fuerzas súbitas de impacto herramienta – suelo son los factores que más inciden en el desgaste de éste tipo de herramientas [13].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se efectuó en el Centro agropecuario Paysandú (corregimiento de Santa Elena) de propiedad de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, con zona de vida bosque muy húmedo montano bajo (bmh –MB), temperatura promedio de 14 °C, altura de 2500 metros sobre el nivel del mar, topografía ondulada, suelo con textura franco arenosa que se utiliza principalmente en pastoreo de ganado.

La fuente de potencia fue un tractor marca Massey Ferguson, al cual se acopló un arado rotativo de eje horizontal (“rotavator”) marca Howard al cual se le pueden instalar 36 cuchillas repartidas en 7 bridas. En todas las pruebas se mantuvieron una velocidad de avance constante de 2 km/h y una profundidad de corte de 120 mm; se trabajó con tres velocidades de giro del rotor: 141, 177 y 251 rpm. Para cada velocidad se utilizó un juego independiente de tres cuchillas (nuevas al inicio de los ensayos), las cuales se pesaron antes y después de los ensayos utilizando una balanza marca Metler Toledo con resolución de 0.01 g con el fin de cuantificar la pérdida de masa después de 3 períodos de dos horas de trabajo. Las cuchillas se ubicaron a lo

largo del eje (una en el centro y las otras dos en los extremos).

Para cada velocidad se trabajó el suelo tres veces (3 intervenciones independientes) cada una en un lote diferente, registrándose el comportamiento de la pérdida de masa en función del tiempo. Las condiciones de operación (velocidad de avance, velocidad de operación y profundidad de trabajo) se mantuvieron aproximadamente constantes para garantizar la replicación del experimento.

Para cada velocidad de rotación el valor de pérdida de masa reportado correspondió al promedio de la pérdida de las tres cuchillas instaladas durante un tiempo de labor de 120 minutos por cada intervención.

La microestructura y la calidad superficial de las cuchillas se evaluaron antes y después del su utilización en campo empleando microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y espectrometría de rayos X localizada (microsonda EDS), con el objeto de determinar los mecanismos de desgaste predominantes.

La composición química del acero de las cuchillas se determinó utilizando espectrometría de emisión óptica. Luego, se determinó la dureza del material mediante un durómetro marca Elephant, de acuerdo a la norma ASTM E-18 (escala Rockwell C) [14].

Además, se determinó la resistencia al desgaste abrasivo de las cuchillas en condiciones de laboratorio, usando máquina de rueda de caucho-arena seca construida de acuerdo con la norma ASTM G65 [15] con el ánimo de inferir sobre la utilidad de este ensayo para previsión de desempeño de las herramientas en campo. El ensayo se efectuó siguiendo el procedimiento A de la norma citada, con un flujo de arena de 300 g/min y una velocidad de giro de la rueda de caucho de 200 rpm. La arena utilizada fue sílice con tamaño medio de partícula entre 212 y 300 μm .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Pérdida de masa en campo

La tabla 1 presenta los resultados generales de las pruebas. Cada valor de pérdida de masa corresponde al promedio de las mediciones en 3 cuchillas.

Tabla 1. Pérdidas de masa promedio y desviaciones estándar de las mediciones de campo.

Table 1. Average mass losses and standard deviations obtained from the field tests.

Prueba	Vel. de rotación (rpm)	Pérdida de masa Δm (g)	Desv. estándar $\sigma_{\Delta m}$ (g)
1	141	0.72	0.13
	177	1.30	0.34
	251	2.21	0.23
2	141	1.16	0.56
	177	1.36	0.19
	251	0.87	0.16
3	141	2.49	0.09
	177	0.97	0.06
	251	1.64	0.23

En las Figuras 2 y 3 se observa la pérdida de masa acumulada de las cuchillas en función del tiempo de operación y de las revoluciones acumuladas, respectivamente. Cada punto en las gráficas contiene la información promedio del desgaste de 3 cuchillas montadas simultáneamente.

De la Figura 2 Se puede deducir que, en función del tiempo de operación, la tasa de desgaste promedio es del mismo orden para las tres velocidades de rotación de la cuchilla. Los valores medios de las tasas de desgaste calculados mediante un ajuste lineal para cada conjunto de datos son:

141 rpm: 10.5 mg/min

177 rpm: 10.4 mg/min

251 rpm: 13.2 mg/min

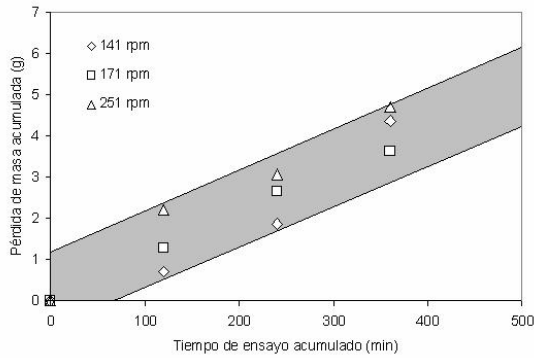


Figura 2. Pérdida de masa acumulada en función del tiempo de operación

Figure 2. Cumulative mass loss as a function of testing time

Por otro lado, la Figura 3 indica que, al considerar el número de revoluciones efectivo de cada cuchilla, la que trabaja a menor velocidad exhibe una tendencia a aumentar la tasa de desgaste medida con respecto al número de revoluciones acumuladas, mientras que las que trabajan a velocidad media y alta muestran un comportamiento relativamente semejante entre sí, con tasas estables de desgaste.

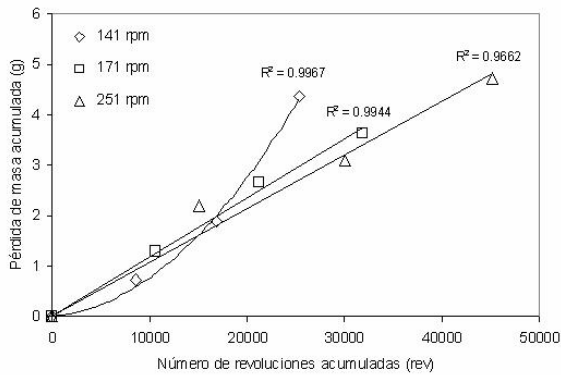


Figura 3. Masa perdida acumulada en función del número de rotaciones

Figure 3. Cumulative mass loss as a function of the effective number of cycles

Con el propósito de ilustrar mejor este efecto, la Figura 4 muestra el resultado de graficar la tasa media efectiva de desgaste ($\Delta m/\Delta rev$) en función de la velocidad de rotación de la herramienta. $\Delta m/\Delta rev$ se calculó como el cociente entre la pérdida de masa al final de las 6 horas de ensayo y el número total de revoluciones, el cual obviamente es diferente para cada velocidad de rotación.

Puede observarse en la Figura 4 que el aumento de la velocidad de rotación de la cuchilla lleva a menores valores de la tasa media efectiva de desgaste ($\Delta m/\Delta rev$), a pesar de que la masa perdida por unidad de tiempo de ensayo sea relativamente semejante para todos los ensayos, como se representa mediante la franja sombreada en la Figura 2.

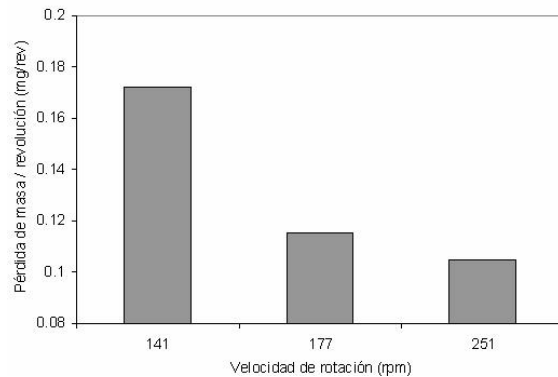


Figura 4. Variación del promedio de masa perdida por revolución de la cuchilla, en función de la velocidad de rotación

Figure 4. Average mass loss variation per cycle, as a function of the rotating speed

Las razones para la disminución de la tasa media efectiva de desgaste con la velocidad de rotación de la herramienta no han sido aún claramente establecidas, pero una de las hipótesis que se considera más viable es la siguiente: cuando la velocidad de rotación es menor es más probable que el mecanismo de desgaste dominante sea la abrasión a 2 cuerpos, pues la energía cinética entregada al suelo es menor y por lo tanto su estructura y propiedades locales de cohesión se ven menos afectadas. Cuando la velocidad es mayor, el suelo sufre mayor desagregación y la abrasión a tres cuerpos comienza a ser más importante. Esta hipótesis necesita ser verificada a partir de los cambios observados en el suelo luego de las operaciones de labranza a las diferentes velocidades; los resultados parciales con los que se cuenta actualmente indican que existe una tendencia a una mayor reducción de la resistencia a la penetración luego de las pruebas realizadas a mayor velocidad de las cuchillas. En un trabajo posterior se hará énfasis en este aspecto con el propósito de establecer las posibles correlaciones entre las propiedades finales del suelo y las condiciones de labranza.

3.2 Pérdida de masa en laboratorio

La Figura 5 muestra los resultados de la prueba de resistencia al desgaste abrasivo según norma ASTM G65 [15]. Se comparó el acero comercial con que se fabricaron las cuchillas con un acero de referencia AISI D2, el cual se sometió a tratamiento térmico con el fin de que tuviese igual dureza que el acero de las cuchillas de arado. El acero de referencia es un acero de alto carbono y alto cromo aleado con molibdeno y vanadio, de especial utilización en aplicaciones en las cuales predomina el desgaste abrasivo. Se caracteriza por presentar una buena tenacidad bajo las condiciones adecuadas de revenido. Los promedios de masa perdida para el acero de las cuchillas y el acero de referencia fueron de 4.55 g y 0.25g respectivamente.

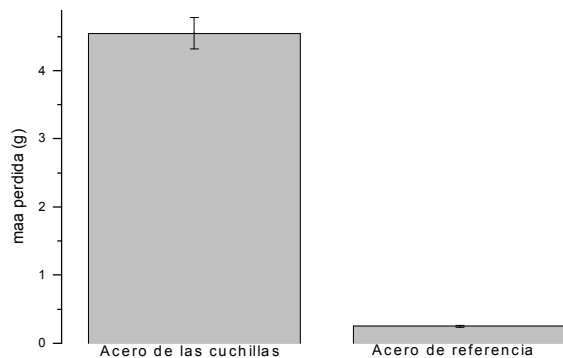


Figura 5. Pérdida de masa de las cuchillas y del acero de referencia, ensayos en máquina rueda de caucho/arena seca (ASTM G65).

Figure 5. Mass loss of blade and reference steels after dry sand – rubber wheel tests (ASTM G65).

3.3 Caracterización del acero de las cuchillas

Las cuchillas presentan una microestructura típica de martensita revenida (Figura 6). De acuerdo a la Tabla 2 los resultados de los ensayos de dureza presentan una desviación muy baja, lo cual indica que el material es altamente homogéneo y no posee tratamiento superficial.

En el cuadro de composición química del acero de las cuchillas (Tabla 3), el elemento de mayor peso es el manganeso, el cual posee la capacidad de propiciar cambios de fase inducidos por trabajo en el acero. Aceros con composición

química similar a ésta son el AISI 5130 y el AISI 15B35H [16].

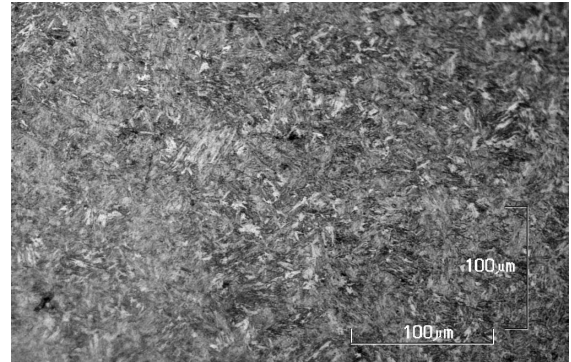


Figura 6. Microestructura del acero de las cuchillas. Martensita revenida.

Figure 6. Steel blade microstructure. Tempered martensite.

Tabla 2. Dureza de las cuchillas
Table 2. Hardness of the steel blades

Nº Probetas	2
Escala	HRC
Nº lecturas	10
Desviación (HRC)	0,5
Dureza (HRC)	47,5

Tabla 3. Composición química del acero de las cuchillas, analizada mediante Espectrometría de Emisión Óptica.

Table 3. Chemical composition of the steel blades, analyzed by OES.

ELEMENTO	% EN PESO
Carbono (C)	0,312
Silicio (Si)	0,203
Manganeso (Mn)	1,317
Azufre (S)	0,005
Fósforo (P)	0,017
Níquel (Ni)	0,041
Cromo (Cr)	0,317
Molibdeno (Mo)	0,027
Aluminio (Al)	0,024
Cobre (Cu)	0,017
Plomo (Pb)	0,002
Estañio (Sn)	0,001
Titanio (Ti)	0,027
Vanadio (V)	0,005
Antimonio (Sb)	0,003
Calcio (Ca)	0,001

3.4 Análisis de superficies desgastadas y mecanismos de desgaste

A partir del análisis de las superficies de las cuchillas antes de realizar los ensayos de campo (ver Figura 7) y después de la labor de preparación de suelo, se puede apreciar un predominio de acción abrasiva tipo corte y en menor grado la acción tipo arado. Entre las Figuras 8 y 14 se puede observar la superficie de las cuchillas para los tres tratamientos después de tres ensayos en campo.

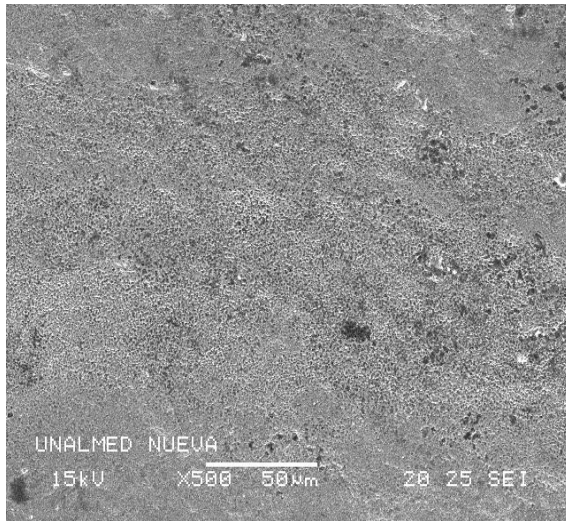


Figura 7. Superficie de la cuchilla antes de los ensayos

Figure 7. Blade's surface before the wear tests

En la Figura 8 se observa un ancho de canal de abrasión de aproximadamente 21 micras para una cuchilla trabajada a una velocidad de rotación de 141 rpm. A pesar de la limpieza a la que se sometió cada muestra evaluada (ultrasonido) se evidencian rastros de suelo lo que demuestra la alta incidencia de adhesión del suelo a la herramienta.

La Figura 9 muestra que el bisel de la cuchilla pierde material posiblemente a causa de los impactos cíclicos en esa zona de la cuchilla (zona que se somete a mayores esfuerzos).

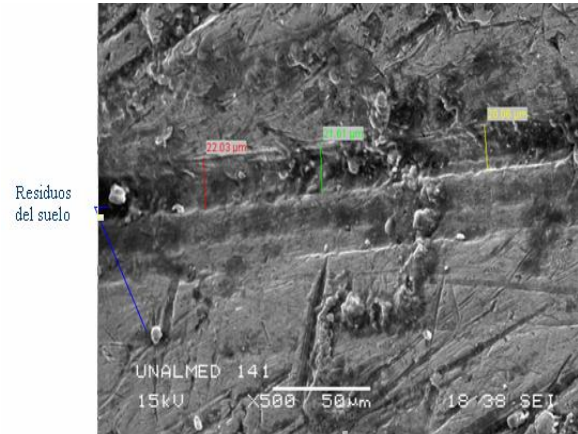


Figura 8. Superficie de la cuchilla después de ensayo a 141rpm

Figure 8. Blade's surface after testing at 141rpm

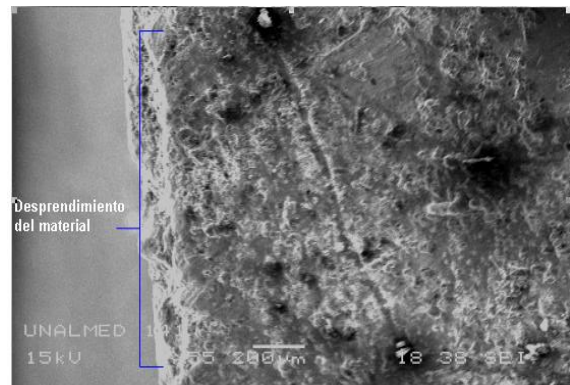


Figura 9. Pérdida de material en el bisel de la cuchilla (141 rpm)

Figure 9. Material loss at the blade's chamfered edge (141 rpm)

La Figura 10 presenta el aspecto de la superficie de una cuchilla trabajada a 177 rpm. Se verifica un ancho de canal de desgaste de aproximadamente 60 micras; donde se aprecia además un dominio marcado de la acción tipo corte ya que no se observa material desplazado hacia los lados del canal. Para esta velocidad de trabajo al parecer los canales generados presentan mayor paralelismo entre si, observándose una dirección dominante y menos canales con dirección aleatoria (Figura 11). Además se nota la presencia de óxidos.

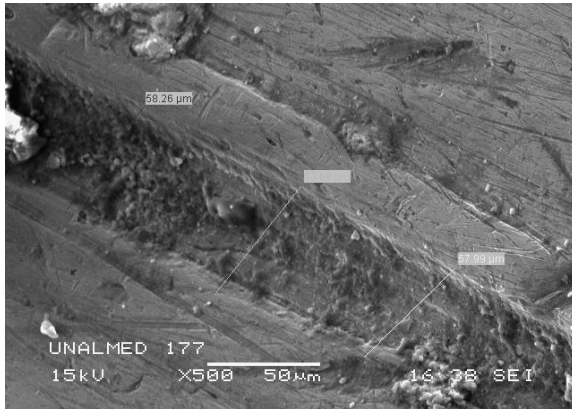


Figura 10. Superficie de la cuchilla después de tres ensayos (177rpm)
Figure 10. Blade's surface after three tests (177 rpm)

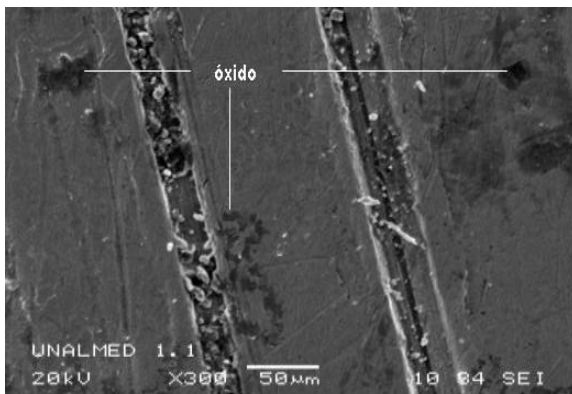


Figura 11. Dirección uniforme de los canales de desgaste y presencia de óxidos en la superficie (177rpm)
Figure 11. Uniform orientation of wear grooves and oxide presence on surface (177 rpm)

El estado del bisel de la cuchilla para la velocidad intermedia se observa en la Figura 12, la cual muestra una zona con dominio de deformación plástica.

Para la velocidad de rotación mayor (251 rpm) el estado final de la superficie de la cuchilla después de tres usos puede observarse en la Figura 13. El surco medido en la figura tiene un ancho de aproximadamente 33 micras y los surcos de desgaste presentan un patrón de dirección definido similar al de la velocidad rotacional media.

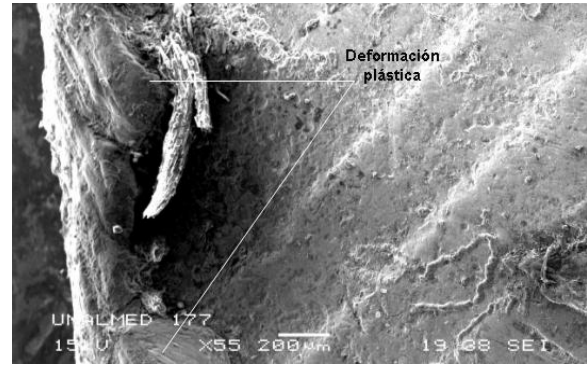


Figura 12. Deformación plástica en el bisel de la cuchilla (177rpm)
Figure 12. Plastic deformation at the blade's chamfered edge (177rpm)

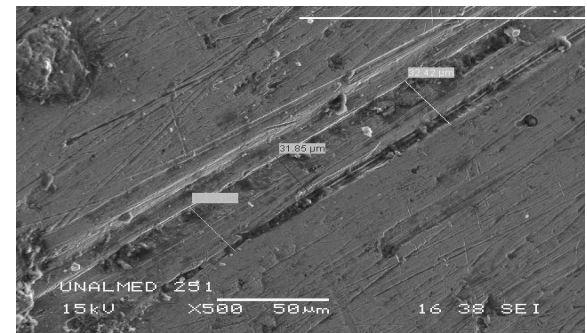


Figura 13. Superficie de la cuchilla después de tres ensayos (251rpm)
Figure 13. Blade's surface after three tests (251 rpm)

En la Figura 14 se observa la pérdida de material en el bisel de la cuchilla, posiblemente a causa de impacto con raíces duras.

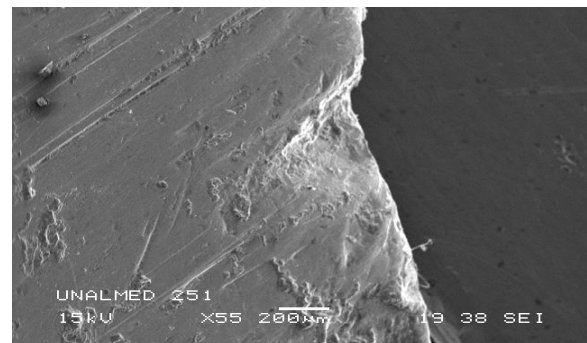


Figura 14. Pérdida de material en el bisel de la cuchilla.
Figure 14. Material Loss on blade's bevel

En términos generales, aunque la mayoría de los canales de desgaste que se forman son aproximadamente paralelos, se aprecian algunas ranuras generadas en diferentes direcciones, lo que da indicios de la manera como actúan las partículas abrasivas, pudiéndose pensar en que se presenta tanto desgaste a dos cuerpos (canales de mayor dimensión generados por el suelo que primero se encuentra con la cuchilla) y desgaste a tres cuerpos (canales de tamaño un poco menor y que se generarían a partir de las partículas que se han desprendido del cuerpo de suelo y quedan libres haciendo contacto sobre la cuchilla durante un tiempo determinado). Esta observación apoya la hipótesis de la dependencia de la tasa efectiva de desgaste con eventuales cambios en el mecanismo dominante de desgaste abrasivo, y futuros trabajos se orientarán hacia la realización de experimentos críticos que permitan estudiar la validez de dicha hipótesis.

4. CONCLUSIONES

La velocidad rotacional media (177 rpm) es una buena alternativa para roturación de potreros, ya que, por un lado se cumple con los objetivos de la labranza y por otro lado se puede obtener una mayor vida útil de las cuchillas, al compararse con las velocidades de 141 y 251 rpm.

En el análisis de los mecanismos de desgaste se evidencia el predominio de la acción tipo corte sobre la acción tipo arado como mecanismo de desgaste principal y la interacción suelo – cuchilla se presenta tanto como desgaste a dos cuerpos (donde el suelo se comporte como cuerpo rígido) y a tres cuerpos para el caso de cuerpos de suelo relativamente sueltos.

El ensayo de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65, a pesar de no replicar las condiciones reales del tribosistema suelo-cuchilla, puede servir como referente dado que entrega un resultado rápido de masa perdida bajo condiciones dominantes de abrasión a 2 cuerpos y permite comparar diferentes tipos de materiales usados en la fabricación de herramientas de arado.

AGRADECIMIENTOS

A la dirección de investigaciones de la Universidad Nacional Sede Medellín (DIME) por el financiamiento del proyecto con código 20201007760.

REFERENCIAS

- [1] RABINOWICZ, E., Friction and Wear of Materials, John Wiley & Sons, Inc., New York, 167 – 172, 1984.
- [2] FERGUNSON, S.A.; FIELKE, J.M.; RILEY, T.W., Wear of cultivator shares in abrasive south Australian soil, Journal of Agricultural Engineering Research 69, 99-105, 1998.
- [3] TORO, A., LEÓN, L Y GUTIERREZ, J. Relación microestructura resistencia al desgaste de recubrimientos duros ricos en cromo y tungsteno aplicados por soldadura eléctrica, Dyna 144, 165 – 171, 2004.
- [4] HUTCHINGS, I.M., Tribology, Friction and wear of engineering Materials, Edward Arnold, London, 273, 1992.
- [5] ZUM GAHR, K.H., Microstructure and wear of materials, Elsevier, Amsterdam, 80 – 350, 1987.
- [6] MALAGÓN, D., Propiedades físicas de los suelos, IGAC, Bogotá, 813, 1990.
- [7] BOTERO, J., Preparación de suelos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 100, 1994.
- [8] ÁLVAREZ, F., Arados Rotativos. Fundamentos teóricos para su análisis cinemático y dinámico, Revista Facultad Nacional de Agronomía Vol. XXXVIII N° 2, 115 – 127, 1985.
- [9] BAYHAN, Y., Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. Department of Agricultural Machinery, Tekirdag Agricultural Faculty, University of Trakia, Tekridag, Turkey, 570 – 574, 2006.

- [10] DURÁN GARCÍA, H., Efecto de las condiciones físicas del suelo y de las rejas de sembradora de cereales en el valor de la fuerza que provoca su rotura pasiva, INCI Vol. 26, N.9, 391 – 393. 2001.
- [11] PÉREZ, W., Desgaste abrasivo en cuchillas de arado rotativo de eje horizontal operando en un suelo franco arenoso, [Tesis de M.Sc. en Ingeniería de Materiales], Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [12] BHAKAT, A., MISHRA, A., MISHRA, N., JHA, S., Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel, *Wear* 257, 338 – 346, 2004.
- [13] GONZÁLEZ, H., TORO, A., PÉREZ, W., ANAYA, M., RESTREPO, C., Resistencia al desgaste de cuchillas de arados rotativos en operación en suelos tropicales, *Scientia et Technica* 36, 479 – 484, 2007.
- [14] ASTM STANDARD E 18-81, Standard Methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallical materials. ASTM, USA, 1981.
- [15] ASTM STANDARD G65. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASTM, USA, 2000.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook. Vol. 4, 9th. ed., Heat Treating, A.S.M., USA, 1981.