



NOMBRE DEL SIMPOSIO O TALLER SIMPOSIO INTERNACIONAL INDUSTRIA Y ENERGÍA

Comportamiento del desgaste del acero 1020 cementado con carbones de cáscara y tusa de maíz

Wear behavior of 1020 steel carburized with husk and cob corn charcoals

Eduardo Pérez Ruiz¹, Nicolás Alonso Rebolledo¹, Luis Negrín Hernández², Jorge Llano Martínez¹, Jeferson Piamba Jiménez³.

1-Eduardo Alberto Pérez Ruiz, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ibagué, Colombia.
e-mail: eduardo.perez@unibague.edu.co

1-Nicolás Alonso Rebolledo, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ibagué, Colombia.
e-mail: 2120141001@estudiantesunibague.edu.co

1-Jorge Fredy Llano Martínez, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ibagué, Colombia.
e-mail: Jorge.llano@unibague.edu.co

2-Luis Iván Negrín Hernández. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Marta Abreu, Cuba.
e-mail: linegrin@uclv.edu.co

3-Jeferson Fernando Piamba Jiménez, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de Ibagué, Colombia. e-mail: jeferson.piamba@unibague.edu.co

Resumen

La cementación sólida se ha realizado tradicionalmente con carbón vegetal o mineral como material aportante de carbono. Sin embargo, la literatura reporta el uso de corteza de palma, bambú, huesos de vaca, fibras de coco, cáscara de arroz, entre otros, como material cementante.

Por lo anterior, se evidencia el uso de sustancias alternativas a los cementantes tradicionales, no obstante, son pocos los reportes en cuanto a la resistencia al desgaste de los materiales cementados, lo cual brinda la posibilidad de explorar el uso de los residuos agrícolas en particular el uso de la cáscara y de la tusa del maíz como sustancias cementantes y su evaluación al desgaste por deslizamiento.

En este estudio se realizan ensayos "ball-on-disk" para conocer el comportamiento del desgaste que presenta el acero AISI 1020 cementado con carbón de cáscara de maíz y de tusa de maíz. Los resultados facilitan identificar que el carbón de cáscara de maíz permitió alcanzar dureza de 32,9 HRC, profundidad de capa de 971,8 μm , pérdida de masa de 0,1012 g en promedio y tasa de desgaste de $0,2594 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. En el caso



del carbón de tusa de maíz fue alcanzada dureza de 35,6 HRC, profundidad de capa de 811,7 μm , pérdida de masa de 0,4555 g en promedio y tasa de desgaste de $1,1678 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. De esta forma, se puede concluir que el carbón obtenido de la cáscara de maíz, aunque presenta menor dureza en la capa cementada, favorece la obtención de menor tasa de desgaste.

Palabras Clave: Cementación sólida; Biomasa de maíz; Dureza; Resistencia al desgaste.

Abstract

Carburizing pack has traditionally been performed with charcoal or mineral charcoal as carbon source material. However, the literature reports the use of palm bark, bamboo, cow bones, coconut fibers, rice husk, among others, as carburizing material. Therefore, the use of alternative substances to traditional carburizing materials is evident; however, there are few reports on the wear resistance of carburizing pack of materials, which offers the possibility of exploring the use of agricultural residues, particularly the use of corn husks and cob corn as carburizing substances and their evaluation of sliding wear.

In this study, ball-on-disk tests are performed to determine the wear behavior of AISI 1020 steel carburized with corn husk and cob corn carbon. The results show that corn husk charcoal achieved a hardness of 32.9 HRC, a layer depth of 971.8 μm , an average mass loss of 0.1012 g and a wear rate of $0,2594 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. In the case of cob corn charcoal, a hardness of 35.6 HRC, a layer depth of 811.71 μm , a mass loss of 0.4555 g on average and a wear rate of $1,1678 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, were achieved. Thus, is possible to conclude that the charcoal obtained from corn husk, although it has less hardness in the cemented layer, favors obtaining a lower rate of wear.

Keywords: Pack Carburizing; biomass of corn; Hardness; Wear resistance.

1. Introducción

Actualmente es usual encontrar como requisito, que una pieza empleada en diferentes máquinas tenga que soportar altas cargas, poseer alta dureza superficial y poseer un núcleo tenaz; adquiriendo con esta condición la capacidad de absorber de una forma eficiente impactos. Para esto, se han desarrollado estudios para el incremento de la dureza y la resistencia de los aceros, modificando sus microestructuras mediante tratamientos termoquímicos, como es el caso de la cementación sólida [1-12], que



permiten mejorar la resistencia al desgaste [13-21]. En algunos casos para la realización del tratamiento de cementación, el material cementante se obtiene de productos o desechos de la industria agrícola o de productos naturales que no fueron aprovechados en su totalidad; es así como Oyetunji et al [1] investigaron el impacto que tiene la cáscara de almendra de palma, concha de mar y hueso de vaca en la cementación de un acero con 0.018 % C. Las temperaturas de cementación del acero variaron entre 700 °C y 1100 °C, posterior a la cementación se le realizó un temple en aceite. Los investigadores concluyeron que la cáscara de almendra de palma y el hueso de vaca tienen un buen potencial para ser utilizados como material para cementación del acero de bajo carbono, ya que presentaron los mayores valores de dureza Vickers y de resistencia a la tensión, mientras que la concha de mar siempre presentó los valores más bajos.

De otro lado, Supriyono [2] estudió los efectos de la cementación sobre el acero con 0,17 % C, utilizando como fuente cementante carbón vegetal sacado de la madera; este proceso se realizó a una temperatura de 930 °C. y fueron usados tiempos de sostenimiento de 2, 3 y 4 horas. La composición de la mezcla cementante fue 20 % de carbonato de calcio (CaCO_3) y 80 % carbón de madera. Después de realizar este proceso de cementación con su respectivo tiempo de sostenimiento, concluyó que entre mayor es el tiempo de sostenimiento del proceso de cementación, la profundidad de la capa cementada es mayor, al igual que la resistencia del material en la zona superficial.

Por otra parte, Oluwafemi et al [3] Realizaron una variación de temperatura de cementación en acero ASIS 1020, para así determinar el comportamiento de la resistencia a la tracción de este tipo de acero, las temperaturas que usaron fueron 800°C, 850°C, 900°C y 950°C con tiempos de sostenimiento de 60 min, 90 min y 120 min, posteriormente realizaron un temple y revenido. Con los resultados obtenidos se pudo concluir que las mejores condiciones de dureza y de resistencia se obtuvieron con un tiempo de sostenimiento de 120 minutos a una temperatura de cementación de 950 C, seguido de un tratamiento térmico de temple en aceite con revenido a 500 °C por 60 minutos.

Algunos autores estudiaron el efecto de usar en las cementaciones el hueso molido [4], hueso de vaca [5], concha marina [6], caña de azúcar, cáscara de arroz [7] y cáscara de huevo como energizantes o activadores del cementante [8-9]. Ihom et al [9] utilizan



como cementante carbón obtenido de cáscaras de melón, bagazo de caña de azúcar, plásticos como el polietileno, flores de palma y cáscaras de huevo como activador; el acero utilizado para la cementación presentó en su composición 0,25% de carbono y una dureza de 30 HRC. Las muestras tratadas fueron calentadas 920 °C por un tiempo de 300 minutos, bajo dos condiciones, en una se utilizó material cementante únicamente y en la otra una mezcla de material cementante con cáscara de huevo (50 g) como activador. Las piezas fueron posteriormente templadas en agua. Los resultados mostraron que la mayor dureza alcanzada fue de aproximadamente 56HRC con la mezcla de flores de palma y cáscara de huevo, con profundidades de capa de 0,7 mm. Se demuestra en este trabajo el potencial de la cáscara de huevo como activador, debido a su alto contenido de CaCO_3 .

Dongo et al [10] estudiaron el efecto del uso de hueso animal, la concha de caracol y la concha de Bígaro común, en las propiedades del acero cementado. Para esto, realizaron cementaciones a 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C y 1100 °C con tiempos de 1 h, 2 h, 3 h, 4 h y 5 h. El estudio mostró que las propiedades mecánicas de los aceros cementados tienen influencia de cada uno de los materiales que fueron usados como cementante. Es así como, la concha de caracol generó mayores valores de dureza y las conchas de caracol y de bígaro común evidenciaron buena resistencia al desgaste, acompañadas de altos valores de dureza. Putra Negara et al [11], realiza cementación sólida a una temperatura de 950 °C con un tiempo de sostenimiento de 240 minutos en acero de bajo carbono (0,17%C), utilizando diferentes proporciones de una mezcla cementante constituida por carbón producido a partir del tallo de bambú y huesos de cabra y carbonato de bario como activador, los resultados logrados evidencian la creación de capa cementada con el consecuente incremento de dureza en la superficie de la pieza, la cual va disminuyendo al acercarse al núcleo. Las profundidades de capa obtenida con las diferentes mezclas oscilan entre 0,5 y 1 mm, la máxima profundidad alcanzada (1 mm) se logra con la mezcla constituida por 20% de carbonato de bario, 60% de carbón de huesos de cabra y 20% de carbón de tallo de bambú. Cementando con otro tipo de biomasa Negara y Muku [12] realizan también tratamiento térmico de cementación empleando carbón producido a partir de cáscara de coco mezclada con carbonato de bario como activador en una proporción 80/20 respectivamente, esto, con el fin de evaluar la resistencia al desgaste obtenida en un acero con 0,17% de carbono. En los



tratamientos realizados se utilizaron temperaturas de 950°C con tiempos de sostenimiento de 120, 240 y 360 minutos, después de la cementación las muestras fueron templadas en agua. Los resultados obtenidos mostraron mayor dureza y resistencia al desgaste en las muestras tratadas durante 360 minutos. Las muestras presentaron disminución progresiva de dureza desde la superficie hacia el núcleo, en el cual, la dureza correspondió con la del metal en el estado sin tratamiento térmico.

A su vez, Istiroyah et al [13] utilizaron carbón obtenido de la cáscara de coco y del arroz a 600 °C, en la cementación del acero AISI 316L. Las muestras fueron calentadas a 400°C y sostenidas 480 minutos. Los resultados indicaron que hubo una mejor distribución del carbono en el acero cementado con el carbón de cáscara de coco que en el cementado con carbón de cáscara de arroz. El comportamiento de la dureza obtenida, fue mayor en un 40% respecto al acero sin tratamiento, así mismo, la muestra cementada con carbón de cáscara de coco y con carbón de cáscara de arroz la dureza tuvo un incremento del 26%.

Algunos autores han estudiado el comportamiento de la fricción y del desgaste de los materiales cementados [14-21] en condiciones de desgaste por fretting [15], desgaste abrasivo [16] y desgaste por deslizamiento [17,18]. Selçuk et al [19] estudiaron la fricción y la resistencia al desgaste exhibido por el acero AISI 1020 y el acero 5115 sometidos a tratamientos termoquímicos de cementación, carbonitruración y borado, demostrando la efectividad de estos tratamientos para el incremento de la dureza superficial y de la resistencia al desgaste por deslizamiento. Hassan [20] estudió la resistencia al desgaste, mediante ensayo pin-on-disk, del acero cementado con carbón vegetal en comparación con carbón vegetal en mezcla con 10% de CaCO₃ y hueso de vaca. De esta forma, la cementación con solo carbón vegetal generó una capa de 1,1 mm con buena resistencia al desgaste, sin embargo, la cementación con hueso de vaca generó una capa de 2,32 mm y la mayor resistencia al desgaste. Sampelawang et al [21] estudiaron el comportamiento del desgaste del acero de bajo carbono, cementado con carbón de hueso de búfalo, encontrando que entre mayor volumen de hueso y menor tamaño de las partículas favorece el incremento de la resistencia al desgaste.

De forma reciente, Carmo et al [22] estudiaron por medio de ensayos de desgaste por deslizamiento, el efecto del temple con melaza de caña sobre la resistencia al desgaste del acero cementado con carbón de concha de ostras de perla y con carbón de mazorca



de maíz. Los resultados mostraron que al usar 10% de melaza de caña como medio de enfriamiento, fue incrementado el contenido de carbono en la superficie, la dureza del material y la resistencia al desgaste.

2. Materiales y procedimiento

2.1 Acero para la cementación

El material utilizado en este estudio, corresponde a un acero AISI 1020, el cual presenta la microestructura de la figura 1 y dureza en estado comercial de 180 HV (180HB). El acero fue debidamente cortado en discos de 76,2 mm de diámetro y espesor de 6 mm. Cada disco fue lijado con lijas de SiC en los grados 180, 220 y 320 hasta alcanzar el valor de rugosidad $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ en promedio (Figura 2).

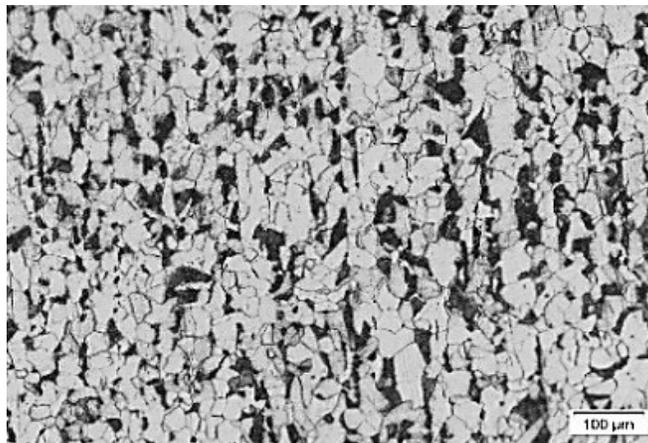


Figura 1. Microestructura del acero AISI 1020, obtenida a 10X
Fuente: Elaboración propia

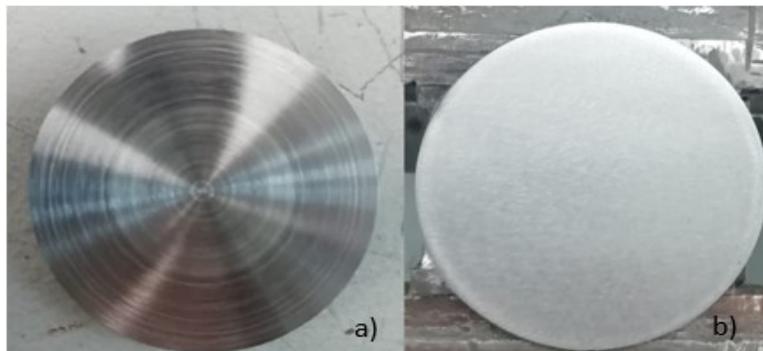




Figura 2. Acabado superficial de los discos a ser cementados. a) Refrentado b) Lijado
Fuente: Elaboración propia.

2.2 Preparación del carbón a partir de la cáscara y de la tusa del maíz

Inicialmente la cáscara del maíz y la tusa del maíz fueron secados bajo exposición de radiación solar por algunos días. Paso seguido, fueron cortados en trozos pequeños para ser molidos, introducidos en cajas de acero inoxidable y posteriormente sellados con mezcla de melaza de caña, caolín y arcilla, dicha mezcla garantiza la creación de una capa cerámica que hermetiza la caja, evitando ingreso de oxígeno al interior de la misma.

Para el proceso de pirólisis fue utilizado un horno eléctrico en donde las cajas selladas fueron sometidas a temperatura de 600 °C con duración de 3 horas en promedio. De esta forma fue obtenido el carbón que se presenta en la figura 3.



Figura 3. Carbón obtenido.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Proceso de cementación

Para la cementación del acero, fueron utilizadas cajas de acero inoxidable, en donde fueron introducidos los discos mecanizados y lijados con anterioridad junto con el carbón obtenido de la cáscara de maíz, así mismo fueron realizadas las cementaciones del acero con el carbón obtenido de la tusa del maíz. El proceso de cementación en los dos casos (cáscara y tusa de maíz), se realizó en horno eléctrico a temperatura de 980 °C durante 9 horas.

2.4 Tratamientos térmicos



Cada uno de los discos cementados con carbón de cáscara de maíz y de tusa de maíz fueron templados, dicho tratamiento se realizó llevando los discos a temperatura de 830°C y sosteniendo esa temperatura durante 50 minutos. Posterior a eso fueron enfriados en agua y en aceite mineral 10W30.

2.4 Medición de la dureza, la profundidad de capa y la tasa de desgaste.

Para la medición de la dureza, fue utilizado un micro durómetro de marca NOVOTEST el cual fue utilizado con carga de 1 Kg (9,8 N). Los valores de dureza reportados corresponden al promedio de 4 indentaciones realizadas en la capa cementada (sección transversal del disco). La medición de la profundidad de capa cementada, fue medida con el software OLYMPUS Stream, el cual obtiene señal de la cámara OLYMPUS SC100, acoplada al microscopio OLYMPUS BX51FM. Las imágenes para la medición de la capa fueron sacadas con aumento de 5X. Para la medición de la tasa de desgaste fue utilizado un banco para ensayos de desgaste con la configuración ball-on-disk, en el cual fue aplicada carga normal de 50 N sobre una esfera de Óxido de Zirconio, con una velocidad de ensayo de 0,34m/s y una distancia de deslizamiento de 1000 m aproximadamente. La medición de masa antes y después de cada ensayo fue realizada con una balanza analítica de precisión, de marca PRECISA XB 220A con resolución de 0,0001 g. Cada ensayo de desgaste fue repetido en un total de 3 veces y el promedio de los mismos fue reportado como resultado del ensayo.

3. Resultados y discusión

3.1 Dureza, profundidad de capa en el acero cementado

Los valores que se presentan en la tabla 1, corresponden al promedio de dureza, alcanzado en la región de capa cementada. En la tabla 2, se presenta el valor promedio de la profundidad de capa cementada, medido para cada uno de los carbones utilizados.

Tabla 1. Durezas HV y HRC promedio en la capa cementada
Fuente: Elaboración propia.

Carbón	Dureza HV	Dureza HRC
Cáscara de Maíz	320	32,9
Tusa de Maíz	340	35,6

Tabla 2. Profundidad promedio de capa cementada
Fuente: Elaboración propia.



Carbón	Profundidad promedio de capa (μm)
Cáscara de Maíz	971,8
Tusa de Maíz	811,7

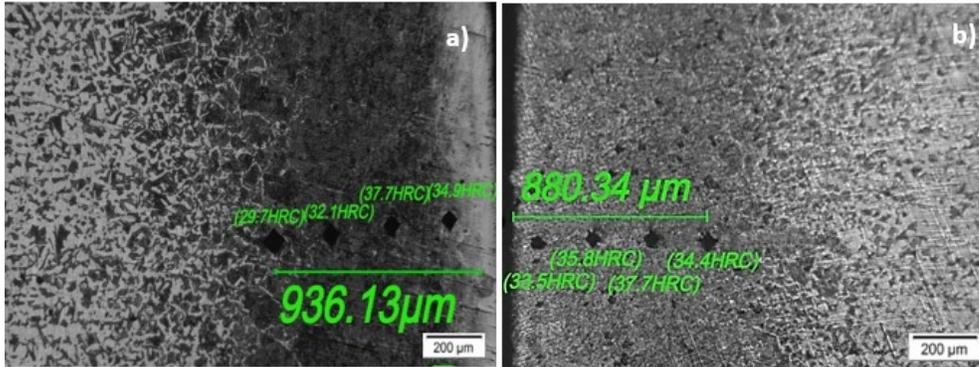


Figura 4. Medición de capa cementada. Imagen obtenida a 5X. a) Carbón de cáscara de maíz, b) carbón de tusa de maíz

Fuente: Elaboración propia

3.2 Tratamientos térmicos, dureza y ensayos de desgaste

En la tabla 3 se presentan los tratamientos realizados al acero cementado, junto con los valores de dureza promedio obtenidos en la capa cementada.

Tabla 3. Durezas promedio de capa cementada según cada tratamiento térmico
 Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento realizado	Dureza (HV)	Dureza (HRC)
Cementado con cáscara de maíz	320,0	32,9
Cementado con tusa de maíz	340,0	35,6
Cementado con cáscara de maíz y templado en agua	640,0	57,3
Cementado con tusa de maíz y templado en agua	757,8	62,4
Cementado con cáscara de maíz y templado en aceite 10W30	447,5	45,2
Cementado con tusa de maíz y templado en aceite 10W30	685,6	59,4

La figura 5 muestra las microestructuras obtenidas en la región de capa cementada, para el caso de las cementaciones que fueron templadas.

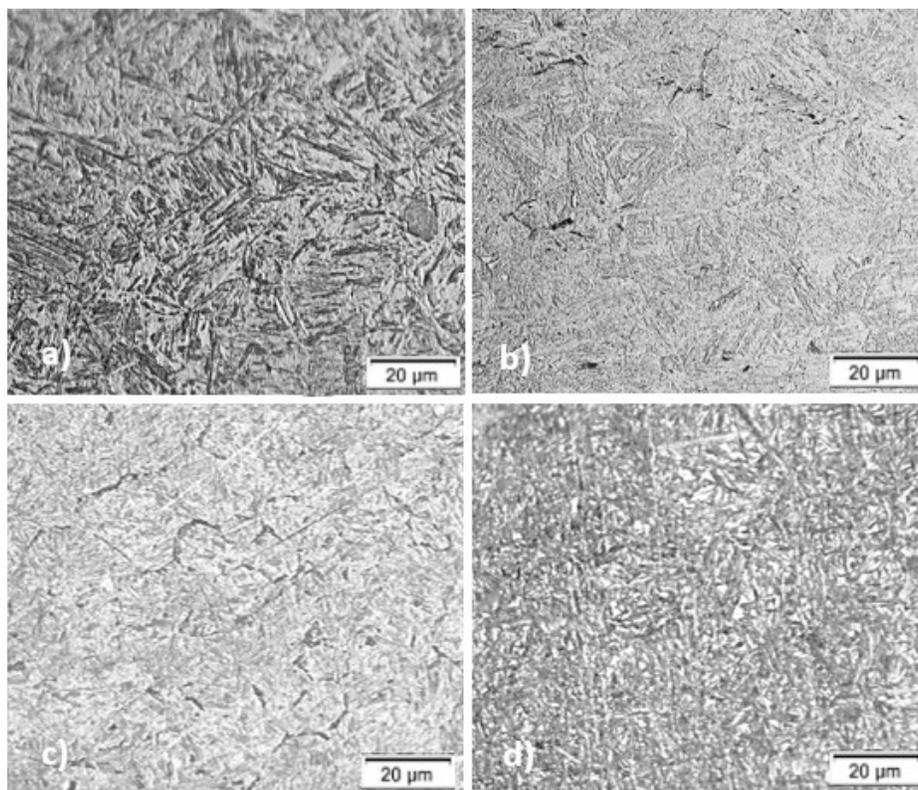


Figura 5. Microestructura de la capa cementada después del temple. Obtenida a 50X.
a) Cementación con cáscara de maíz y temple en agua, b) Cementación con tusa de maíz y temple en agua, c) Cementación con cáscara de maíz y temple en aceite 10W30, d) Cementación con tusa de maíz y temple en aceite 10W30.

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4 presenta los valores de pérdida de masa obtenidos del ensayo de desgaste por deslizamiento, para los aceros cementados con carbón de cáscara de maíz y con carbón de tusa de maíz, así como en el caso de los que fueron templados en agua y en aceite

Tabla 4. Pérdida de masa en promedio, para cada uno de los tratamientos realizados

Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento realizado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida masa promedio (g)
Cementado con cáscara de maíz	212,8277	212,7265	0,1012
Cementado con tusa de maíz	215,4189	214,9634	0,4555
Cementado con cáscara de maíz y templado en agua	193,1767	193,0009	0,1758
Cementado con tusa de maíz y templado en agua	210,3847	209,9544	0,4303
Cementado con cáscara de maíz y templado en aceite 10W:	210,8241	210,7559	0,0682
Cementado con tusa de maíz y templado en aceite 10W30	205,8789	205,8166	0,0623

Los resultados de la pérdida de masa tras el ensayo de desgaste muestran que, en los discos el que más pérdida de masa presentó fue el cementado con carbón de tusa de



maíz con una pérdida de masa de 0,4555 g, seguido del disco cementado y posteriormente templado en agua con una pérdida de masa de 0,4303 g. Es importante identificar que, de acuerdo con los resultados, la cementación con carbón de tusa de maíz fue la que generó en promedio, el valor de capa de cementación de menor profundidad (tabla 2).

En el caso de las cementaciones realizadas con carbón de cáscara de maíz, es posible identificar que el uso de esta sustancia, generó valores de dureza inferiores en todos los casos (cementación, cementación y temple en agua, cementación y temple en aceite), así como favoreció la obtención de los menores valores de pérdida de masa.

Como un indicador del comportamiento del desgaste, es posible la obtención de la tasa de desgaste, a través de la ecuación de desgaste de Archard, de esta forma, la tasa de desgaste cuantifica la cantidad de volumen (mm^3) removido, en función de la carga aplicada (N) y la distancia recorrida (m) en cada ensayo, es así como la tabla 5 presenta la tasa de desgaste calculada para cada uno de los casos presentados en la tabla 4.

Tabla 5. Tasa de desgaste calculada para cada uno de los tratamientos realizados
Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento realizado	Tasa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)
Cementado con cáscara de maíz	$0,2594 \times 10^{-3}$
Cementado con tusa de maíz	$1,1678 \times 10^{-3}$
Cementado con cáscara de maíz y templado en agua	$0,4490 \times 10^{-3}$
Cementado con tusa de maíz y templado en agua	$1,1034 \times 10^{-3}$
Cementado con cáscara de maíz y templado en aceite 10W30	$0,1748 \times 10^{-3}$
Cementado con tusa de maíz y templado en aceite 10W30	$0,1596 \times 10^{-3}$

De los resultados obtenidos (tablas 1 y 3), es posible identificar que el uso de la tusa de maíz como material de aporte de carbono en el proceso de cementación sólida, genera mayores valores de dureza en relación a la cáscara del maíz, así como genera los mayores valores de pérdida de masa en el ensayo de desgaste. De la misma forma, las cementaciones realizadas con tusa de maíz presentan la mayor tasa de desgaste. Lo anterior sugiere, que la tusa del maíz favorece la generación de una capa cementada de menor profundidad y de mayor dureza, lo que puede traducirse en mayor nivel de concentración de esfuerzos, lo que lleva a una mayor pérdida de masa y



consecuentemente mayor tasa de desgaste, en comparación con los resultados de las cementaciones con cáscara de maíz.

Finalmente, es posible observar que el uso de aceite en el tratamiento de temple, evita la transformación en alto porcentaje de martensita, favoreciendo la generación de microestructuras de alta dureza y alta tenacidad como la bainita en el interior de los granos y de sorbita (perlita fina) en los contornos de los mismos, lo que alivia esfuerzos, reduce los valores de dureza, genera menor pérdida de masa y menor tasa de desgaste.

4. Conclusiones

- El uso de cáscara y tusa de maíz como agentes cementantes en el proceso de cementación sólida sobre el acero AISI 1020, muestran resultados favorables en el valor de dureza superficial alcanzada.
- Los discos cementados con el carbón obtenido de cáscara de maíz alcanzaron una dureza promedio a lo largo de la capa cementada de 32,9 HRC, y los discos cementados con carbón obtenido de la tusa de maíz alcanzaron una dureza promedio de 35,6 HRC, demostrando una mayor capacidad de endurecimiento del carbón de tusa de maíz.
- Al realizarse los tratamientos térmicos, como el temple en agua se obtuvieron durezas superficiales promedio de 57,3 HRC los discos cementados con cáscara de maíz y de 62,4 HRC en los discos cementados con tusa de maíz. Así mismo, con el temple en aceite se obtuvieron durezas en promedio de 45,3 HRC para los discos cementados con cáscara de maíz y de 59,4 HRC en aquellos que fueron cementados con tusa de maíz.
- En el caso de los ensayos de desgaste realizados, el disco que mayor pérdida de material presentó fue el disco cementado con tusa de maíz, presentando una pérdida de material de 0,4555 g, seguido del disco cementado con tusa de maíz y templado en agua con pérdida de 0,4303 g. Así mismo, los discos que tuvieron menor pérdida de masa fueron los discos templados en aceite mineral, con una pérdida de masa de 0,0682 g y 0,0623 g para la cáscara de maíz y para la tusa del maíz respectivamente.
- A pesar de que el uso del carbón de cáscara de maíz genera menores valores de dureza en la capa cementada, favorece la reducción de pérdida de masa y por consecuencia presenta menores tasas de desgaste.

5. Referencias bibliográficas



- [1] Oyetunji, "Effects of Carburizing Process Variables on Mechanical and Chemical Properties of Carburized Mild Steel," *Journal of Basic & Applied Sciences*, 2012, doi: 10.6000/1927-5129.2012.08.02.11.
- [2] Supriyono, "THE EFFECTS OF PACK CARBURIZING USING CHARCOAL ON PROPERTIES OF MILD STEEL," *Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 19, no. 1, pp. 38–42, 2018.
- [3] O. Mary Oluwafemi, S. Ranti Oke, I. Olatunji Otunniyi, and F. Olufemi Aramide, "Effect of carburizing temperature and time on mechanical properties of AISI/SAE 1020 steel using carbonized palm kernel shell Softening Resistance, Dimensional Stability and Corrosion Behaviour of Alumina and Rice Husk Ash Reinforced Aluminium Matrix Composites Subjected to Thermal Cycling View project Alternative and Renewable Energy Potentials (in Africa) View project," 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/287218236>
- [4] F. O. Aramide, S. Ibitoye, and J. O. Borode, "Pack Carburization of Mild Steel, using Pulverized Bone as Carburizer: Optimizing Process Parameters Development of Avian Fibres Reinforced Composites for Structural Applications View project Microstructure, Mechanical, and Corrosion Properties of Welded Metallic Materials View project," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/49596555>
- [5] P. A. Ihom, "Case hardening of mild steel using cowbone as energiser," *African Journal of Engineering Research*, vol. 1(4), pp.97-101, Oct. 2013
- [6] O. Akanji, O. Fatoba, and A. Aasa, "The Influence of Particle Size and Soaking Time on Surface Hardness of Carburized AISI 1018 Steel," *British Journal of Applied Science & Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 37–44, Jan. 2015, doi: 10.9734/bjast/2015/13552.
- [7] J. F. Llano M, E. A. Pérez R, A. Cárdenas, "Husk rice used in the pack carburizing process of the AISI 1020 steel," *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 8, no. 3, pp. 333–336, 2019, Available: www.sciencepubco.com/index.php/IJET
- [8] I. A. Paul, N. G. Bem, N. I. Justine, and O. N. Joy, "Investigation of Egg Shell Waste as an Enhancer in the Carburization of Mild Steel," *American Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 29–33, 2013, doi: 10.12691/ajmse-1-2-3.



- [9] N. Iv, "The Potentials of Waste Organic Materials for Surface Hardness Improvement of Mild Steel," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, no. 11, 2012, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [10] E. I. Dongo, S. O. Seidu, and F. J. Ogbodo, "The effect of locally source carbonaceous materials on the mechanical properties of mild steel," *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 5, no. 3, pp. 77–82, 2016, doi: 10.14419/ijet.v5i3.5496.
- [11] D. N. K. Putra Negara, I. D. M. K. Muku, I. K. G. Sugita, I. M. Astika, I. W. Mustika, and D. G. R. Prasetya, "Hardness Distribution and Effective Case Depth of Low Carbon Steel after Pack Carburizing Process under Different Carburizer," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 776, pp. 201–207, Jul. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.776.201.
- [12] D. N. K. Putra Negara , D. M. K. Muku, "Carburized Low Carbon Steel by Use of the Coconut Midrib Charcoal Mixed with Barium Carbonate," *Journal of Materials Engineering and Processing Technology*, vol.1, pp. 11-14, Feb. 2017.
- [13] Istiroyah, M. A. Pamungkas, G. Saroja, M. Ghufron, and A. M. Juwono, "Characteristic of Low Temperature Carburized Austenitic Stainless Steel," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Feb. 2018, vol. 299, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/299/1/012048.
- [14] M. Ulutan, O. N. Celik, H. Gasan, and U, Er, "Effect of Different Surface Treatment Methods on the Friction and Wear Behavior of AISI 4140 steel," *J. Mater. Sci. Technol*, vol. 26, no. 3, pp. 251-257, 2010.
- [15] J. Tang *et al.*, "Evolution of fretting wear behaviors and mechanisms of 20CrMnTi steel after carburizing," *Metals*, vol. 10, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/met10020179.
- [16] V. I. Kolmykov, D. N. Romanenko, K. I. Abyshev, D. v. Kolmykov, and V. v. Bedin, "Efficiency of surface hardening by carburizing steel objects operating under abrasive wear conditions," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 58–61, May 2015, doi: 10.1007/s10556-015-9999-x.
- [17] W. Y. H. Liew, R. Protasius, J. L. J. Ling, N. J. Siambun, and N. A. Mohd-Lair, "Reciprocating wear behavior of mild steel carburized using Na₂CO₃-NaCl," *Tribology International*, vol. 95, pp. 406–418, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.040.



- [18] H. Elzanaty, "THE EFFECT OF CARBURIZATION ON HARDNESS AND WEAR PROPERTIES OF THE MILD STEEL SAMPLES," 2014. [Online]. Available: <http://www.ijias.issr-journals.org/>
- [19] B. Selçuk, R. Ipek, and M. B. Karamışkaramışç, "A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels."
- [20] K. S. Hassan, "Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 4, no. 1, p. 71, Jan. 2015, doi: 10.14419/ijet.v4i1.3866.
- [21] P. Sampelawang, Y. Bontong, S. Toding Lembang, and W. Yavet Tandirerung, "LOW CARBON STEEL WEARING PROPERTIES DUE TO PACK CARBURIZING WITH BUFFALO BONES CHARCOAL AS ENERGIZER," vol. 15, no. 9, 2020, [Online]. Available: www.arnjournals.com
- [22] S. Darmo, S. Sinarep, and R. Soenoko, "A study of the pack carburizing quenching treatment with cane molasses cooling medium effect on the wear resistance of low carbon steel," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 12–110, pp. 32–37, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.228627.