EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DEL ACERO AISI 1020 CEMENTADO CON CARBÓN OBTENIDO A PATIR DE LA CÁSCARA DE PAPA

NICOLÁS TAPICHA URREA

UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
IBAGUÉ – TOLIMA
2019

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DEL ACERO AISI 1020 CEMENTADO CON CARBÓN OBTENIDO A PATIR DE LA CÁSCARA DE PAPA

NICOLÁS TAPICHA URREA

ASISTENCIA DE INVESTIGACIÓN PARA OBTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:

Msc I.M. JORGE FREDY LLANO MARTÍNEZ

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

D+TEC

UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
IBAGUÉ – TOLIMA
2019

CONTENIDO

1. RESUMEN 7
2. INTRODUCCIÓN 8
3. REVISIÓN DE LITERATURA 9
4. OBJETIVOS 15
4.1 OBJETIVO GENERAL DE LA ASISTENCIA: 15
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 15
5. MARCO TEÓRICO 16
5.1 CEMENTACIÓN 16
5.2 CEMENTACIÓN SÓLIDA 16
5.3 CLASES DE MATERIALES CEMENTANTES 16
5.4 EJECUCIÓN Y APLICACIONES DE LA CEMENTACIÓN SÓLIDA 17
5.5 POTENCIAL DE CARBONO Y GRADIENTE DE CARBONO 17
5.6 TEMPERATURAS DE CEMENTACIÓN 17
5.7 REACCIONES QUÍMICAS 17
5.8 DESGASTE 18
5.9 TIPOS DE DESGASTE 18
6. MATERIAL Y EQUIPOS 19
6.1 MATERIAL: ACERO AISI 1020 19
6.2 EQUIPOS 19
6.2.1 CAJA DE CEMENTACIÓN 19
6.2.2 TORNO PARALELO 20
6.2.3 HORNO UTILIZADO EN LA CARBONIZACIÓN DE LA CÁSCARA, CEMENTACIÓN Y POST-TRATAMIENTOS 20
6.2.3 DURÓMETRO Y MICRODURÓMETRO 21
6.2.4 BANCO DE DESGASTE PIN ON DISK 22
6.2.5 CORTADORA METALOGRÁFICA 23
6.2.6 PULIDORA METALOGRÁFICA 24
6.2.7 MICROSCOPIO ÓPTICO 24
6.2.8 CÁMARA DIGITAL CMOS OLYMPUS 25
6.2.9 SOFTWARE UTLIZADO EN LA ADQUISIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES 26
7. PROCEDIMIENTO 26
7.1 MAQUINADO DE LOS DISCOS 26
7.2 PREPARACIÓN DE LA BIOMASA 27
7.3 PREPARACIÓN Y SELLADO DE LA CAJA DE CEMENTACIÓN 28
7.4 POST-TRATAMIENTOS A LA CEMENTACIÓN 30

7.5 MEDICIÓN DE DUREZAS 30
7.6 ENSAYOS DE DESGASTE 31
7.7 REGISTRO DE PÉRDIDA DE MASA 31
7.8 PROCESO METALOGRÁFICO 32
7.8.1 PULIDO Y ATAQUE QUÍMICO 32
8. RESULTADOS 33
8.1 MICRODUREZAS 33
8.2 MICROGRAFÍAS 33
8.3 DUREZAS SUPERFICIALES 36
8.4 PÉRDIDA DE MASA 36
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS 36
CONCLUSIONES 39
REFERENCIAS 40

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de dureza obtenidos por las probetas cementadas sin tratamientos térmicos posteriores 10
Tabla 2. Registro de durezas a diferentes tiempos de sostenimiento 10
Tabla 3. Tabla de resultados donde se puede apreciar los valores de dureza obtenidos con la mezcla de cada cáscara utilizada y el activador 12
Tabla 4. Valores de la profundidad de capa obtenidas con cada mezcla entre cáscara y activador 12
Tabla 5. Parámetros utilizados para el ensayo de desgaste basados en la norma ASTM G-99.. 13
Tabla 6. Composición química acero AISI 1020 19
Tabla 7. Información técnica Torno MAPI 20
Tabla 8. Dimensiones del hogar del horno 21
Tabla 9. Características técnicas horno 21
Tabla 10. Información técnica del durómetro y microdurómetro 22
Tabla 11. Especificaciones técnicas Tribómetro "Pin-on-disk" 23
Tabla 12. Información técnica de la cortadora metalográfica Q-3ª 23
Tabla 13. Información técnica de la pulidora metalográfica 24
Tabla 14. Información técnica del microscopio óptico Olympus BX51FM 25
Tabla 15. Información técnica de la cámara digital Olympus SC100 25
Tabla 16. Pesos de los discos de acero AISI 1020 según el tratamiento aplicado y sus nomenclaturas 27
Tabla 17. Condiciones de los tratamientos térmicos realizados 30
Tabla 18. Frecuencias y revoluciones utilizadas para cada ensayo de desgaste 31
Tabla 19. Durezas encontradas sobre la capa cementada por disco tratado 33
Tabla 20. Promedio de dureza para cada Disco evaluado en este trabajo 36
Tabla 21. Promedio de pérdida de masa de las muestras después de los ensayos de desgaste .. 36

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de durezas material cementado 10
Figura 2. Variación de durezas con respecto al porcentaje en peso de la mezcla cementante donde se tiene 20 % en peso de activador $CaCO_3$ 11
Figura 3. Porcentaje de carbono que tiene cada cáscara después de ser llevada a una temperatura 11
Figura 4. Comportamiento del acero 1018 al desgaste abrasivo 14
Figura 5. Microestructura de perlita y ferrita a 20x aumentos 19
Figura 6. Representación caja de cementación en hecha en SolidWorks 20
Figura 7. Torno MAPI. 20
Figura 8. Horno 21
Figura 9. Durómetro y Microdurómetro 22
Figura 10. Banco de desgaste "Pin On Disk" 23
Figura 11. Cortadora metalográfica 23
Figura 12. Pulidora metalográfica 24
Figura 13. Microscopio ópitco triocular Olympus upright BX51FM 25
Figura 14. Cámara Digital CMOS Olympus SC100 25
Figura 15. Software Visual Basic Stream 26
Figura 16. Vista superior y frontal de la geometría de los discos 27
Figura 17. Cáscara de papa sin carbonizar 27
Figura 18. Proceso de molido del carbón de cáscara de papa 28
Figura 19. Cáscara de papa carbonizada sin moler 28
Figura 20. Carbón de cáscara de papa total recolectado 28
Figura 21. Esquema del arreglo de los discos en la caja de cementación 29
Figura 22. Arreglo de los discos en la caja de cementación 29
Figura 23. Preparación de la mezcla utilizada para el sellado de la caja de cementación 29
Figura 24. Caja de cementación totalmente sellada 30
Figura 25. Numero de indentaciones a lo largo de cada disco 30
Figura 26. Disco I después de haber sido sometido a las 4 repeticiones de ensayo de desgaste 31
Figura 27. Balanza analítica SCIENTIFIC 32
Figura 28. Probeta de resina con cada muestra encapsulada 32
Figura 29. Proceso de desbaste y pulido de las muestras encapsuladas 32
Figura 30. Indentaciones sobre las muestras de cada disco en la resina 33
Figura 31. Micrografías ópticas captadas para cada disco tratado a 5x, 40x y 100x aumentos . 34

1. RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo la cementación en el acero AISI 1020 (en cinco discos de 76 mm de diámetro y 8 mm de espesor) a 950 °C con un tiempo de sostenimiento de 10 horas utilizando carbón obtenido de la cáscara de papa. Se encontró que utilizar este tipo de biomasa como agente cementante ayuda a mejorar propiedades en el acero como la dureza y resistencia al desgaste. En los resultados obtenidos se hizo evidente que el carbón de cáscara de papa eleva el nivel de contenido de carbono en la superficie de los discos, lográndose obtener una profundidad de capa de 1013.23 µm con un aumento en la dureza de 184 a 335 HV y una disminución en el promedio de pérdida de masa de 0.0470 a 0.0201 g. Se realizaron post-tratamientos de temple en agua, temple en aceite 10W30 y revenidos con el fin de observar el cambio microestructural y la influencia que tendrían en la dureza y resistencia al desgaste del acero. De igual manera se obtuvo que el cementar, templar en aceite a 850 °C y revenir a 400 °C durante 80 minutos da las mejores condiciones de desgaste, reduciéndose el promedio de pérdida de masa hasta 0.0104 g.

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha dado la necesidad de prolongar la vida útil de las piezas o elementos fabricados en materiales metálicos, especialmente en las aleaciones ferrosas (aceros). Buscándose mejorar las propiedades mecánicas del acero, se aplican determinadas técnicas de tratamientos superficiales como los tratamientos térmicos y termoquímicos.

Dentro de los tratamientos termoquímicos más utilizados se encuentra la cementación, el cual permite ayudar al endurecimiento superficial del acero gracias al aporte de carbono debido al proceso difusivo en agentes cementantes sólidos a temperaturas de austenización, conservándose la ductilidad y tenacidad presentes en el núcleo. Suelen utilizarse diversas materias para suministrar el carbono al acero, siendo las más empleadas el carbón vegetal y el carbón mineral en forma de coque y demás derivados.

En el presente informe investigativo se trata la cementación sólida del acero AISI 1020 con carbón obtenido a partir de la cáscara de papa, con el fin de estudiar la influencia en la resistencia al desgaste. Este estudio está basado y comparado con la literatura consultada como libros, artículos, tesis, revistas, entre otros.

Inicialmente se procedió a realizar la caracterización del acero en estado comercial, donde se registró su dureza y microestructura. Después se llevó a cabo el maquinado de cinco discos junto con la obtención del carbón de cáscara de papa, para después distribuirlos dentro de la caja de cementación. Finalizado el proceso, se realizaron tratamientos térmicos posteriores a la cementación con tiempos de sostenimiento de 80 minutos, los cuales fueron cuatro temples a 850 °C siendo dos con enfriamiento en agua y dos con enfriamiento en aceite 10W30, mientras que dos revenidos se realizaron a 400 °C. Los ensayos de desgaste se llevaron a cabo bajo una carga de 50 N con una distancia de recorrido de 1000 m repitiéndose cuatro veces por disco. Se compararon los resultados obtenidos a través de registros de dureza, micrografías y ensayos de desgaste.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Dentro de los tratamientos termoquímicos más utilizados se encuentra la cementación el cual se basa en las leyes de difusión atómica, en donde, desde una atmósfera enriquecida con carbono en estado atómico, éste se difunde hacia el interior de la superficie metálica a tratar, siendo esta preferiblemente un acero de bajo contenido de carbono [1]. Uno de los métodos aplicados a este proceso termoquímico es la cementación sólida en donde se emplea como material cementante el carbón mineral o vegetal [2]. Debido la alta inversión en extracción y la complejidad de producción y procesamiento tanto del carbón mineral como del carbón vegetal, se evalúa la utilización de agentes cementantes alternativos [3].

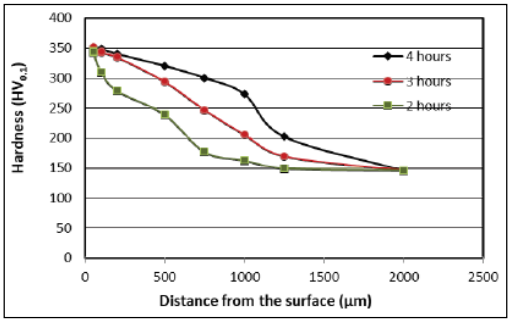
Tradicionalmente la cementación sólida se realiza utilizando carbón vegetal o carbón mineral como materiales que aportan carbono a la superficie de la pieza de acero. Estas materias primas se mezclan con carbonatos ($BaCO_3$, Na_2CO_3, K_2CO_3, $CaCO_3$), los cuales son llamados activadores y son productos que aceleran la reacción de cementación, el potencial de carbono y la velocidad de transporte del carbono del medio cementante a la superficie de la pieza [2].

La literatura reciente reporta el uso de otros tipos de materiales que han mostrado resultados positivos a la hora de ser aportadores de carbono al igual que los carbones tradicionales utilizados en la cementación. Salazar et al [4] realizaron un estudio donde analizaron el comportamiento del acero AISI 1018 al ser cementado con carbón de mangle y nance en una serie de discos a 900 °C durante dos horas con posterior temple más revenido. Así mismo, fueron cementadas brocas para realizar ensayos controlados de perforación sobre una lámina ferrosa de 4.76 mm de espesor donde se utilizó 91 % de carbón vegetal y 9 % de Na_2CO_3 a una temperatura de 820 °C durante una hora y media con su posterior temple más revenido. El promedio de dureza que se obtuvo de los discos cementados, templados y revenidos con carbón vegetal de nance fue de 45.27 HRC mientras que los discos cementados con carbón vegetal de mangle tienen un promedio de dureza de 44.38 HRC. Se lograron realizar 10 orificios con brocas cementadas, mientras que con las que no tenían un tratamiento superficial no se llevó a cabo ningún orificio sobre la lámina.

Mohsin et al [5] investigaron la eficiencia que puede tener el proceso de cementación y la disminución del tiempo del mismo con nanopartículas de negro de humo en un acero SAE 1024. La mezcla cementante consistió en 20% en peso de $BaCO_3$ y 80% en peso de nano partículas de negro de humo a temperaturas por encima de la austenítica durante dos, tres, y cinco horas. Una curva de perfil de durezas permitió definir la profundidad de capa en todas las muestras, siendo de 466 µm, 776 µm y 1 mm para muestras cementadas en dos, tres y cinco horas obteniéndose que la profundidad de capa aumenta a medida que lo hace el tiempo de sostenimiento. Así mismo obtuvieron durezas y profundidades de capa diferentes para los siguientes casos: en el primero, se utilizó la cementación con gas acetileno, en el segundo se utilizó carbón vegetal y en el tercero se utilizaron nanopartículas de negro de humo. Los resultados fueron de 190, 148 y 275 HV con profundidades de capa de 645, 468 y 776 µm respectivamente. Se encontró que las muestras cementadas con nanopartículas de carbón negro de humo muestran mayor efectividad a la hora de ser evaluadas como fuente de carbón.

Supriyono [6] investigó los efectos de la cementación sobre el acero con 0.17 % C utilizando como fuente cementante carbón vegetal. Dicho proceso se llevó a cabo a una temperatura de 930 °C. Se utilizaron tiempos de sostenimiento de 2, 3 y 4 horas y la composición de la mezcla cementante fue 20 % de activador Na_2CO_3 y 80 % de madera pulverizada.

Figura 1. Perfil de durezas material cementado



Fuente. Supriyono [6]

De la Figura 1 se puede observar el perfil de dureza del material cementado con su respectivo tiempo de sostenimiento en cuanto a tratamiento (cuatro, tres y dos horas). Muestra que a medida que aumenta distancia superficial la dureza disminuye, y que a mayor tiempo de sostenimiento la dureza aumenta.

Aramide et al [7] evaluaron las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, al impacto y la dureza del acero con 0.19 % C sometido a un tratamiento de cementación utilizando hueso de vaca pulverizado como fuente cementante.

Tabla 1. Resultados de dureza obtenidos por las probetas cementadas sin tratamientos térmicos posteriores

Muestras cementadas	Núcleo (HRC)	Periferia (HRC)
(A) 850 °C por 15 min	27	34
(B) 900 °C por 15 min	28	36
(C) 950 °C por 15 min	21	23
(D) 850 °C por 30 min	26	34
(E) 900 °C por 30 min	21	24
(F) 950 °C por 30 min	20	19

Fuente. Aramide et al [7]

De la tabla 1 y de los resultados obtenidos se concluyó que las muestras (B) y (D) fueron las que mejores condiciones mostraron al ser cementadas con hueso de vaca.

Ihom [8] evaluó el comportamiento de la dureza de un acero con 0.13 % C con respecto a la variación del tiempo de sostenimiento en la cementación. Las muestras fueron cementadas a una temperatura de 900 °C con tiempos de sostenimiento de 2, 4, 6 y 8 h utilizando una mezcla de 35 % en peso de hueso de vaca como activador y 65 % en peso de carbón vegetal, posterior a esto se realizó un temple más revenido. Las profundidades de capa obtenidas fueron: para 2 horas de sostenimiento 1.8 mm, en 4 horas de 1.8 mm, para 6 horas de 1.92 mm y en 8 horas de 2. 56 mm. Las durezas encontradas se muestran a en la tabla 2.

Tabla 2. Registro de durezas a diferentes tiempos de sostenimiento

Tiempo de sostenimiento de la cementación	Dureza (HRC)
2	65
4	66
6	67
8	69

Fuente. Ihom [8]

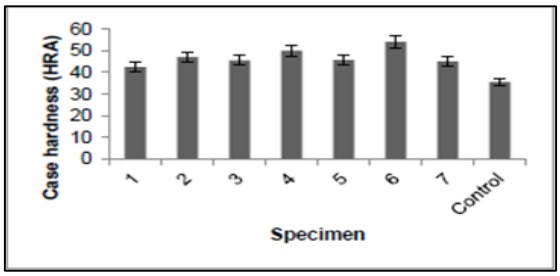
Momoh et al [9] utilizaron cáscara de nuez en polvo para cementar un acero de 0.25 % C. El tratamiento se llevó a una temperatura de 850 ° C con tiempos de sostenimiento de 45, 60 y 70

minutos. A partir de los resultados obtenidos se determinó que la muestra que fue cementada durante 70 minutos tiene las mejores condiciones a ensayos de impacto y tracción junto con una dureza en la capa cementada de 247.1 HV.

Oluwafemi et al [10] variaron las temperaturas de cementación y el tiempo de sostenimiento para así ver el comportamiento de la dureza y de la resistencia a la tracción del acero AISI / SAE 1020. El material cementante utilizado fue la cáscara de almendra de palma, y las temperaturas de cementación fueron 800, 850, 900 y 950 °C manteniendose durante 60, 90 y 120 minutos, con un tratamiento posterior de temple en aceite y revenido. Se realizaron pruebas de dureza, resistencia a la traccion e impacto. Las condiciones de cementación que presentaron los mejores resultados con respecto a las propiedades mecanicas se encontraron a una temperatura de 950 °C con un tiempo de sostenimiento de 120 minutos. Se obtuvo que la dureza superficial aumenta con el incremento del tiempo de sostenimiento, siendo de 37 HRC para 120 minutos.

Umunakwe [11] observó en la cementación el efecto del uso de mezcla entre cáscara de almendra de palma y cáscara de coco como fuentes cementantes a una temperatura de 950 °C para un acero con 0.16 % C. La mezcla de biomasa fue molida y tamizada a un tamaño de partícula de 150 µm. El mejor resultado de dureza encontrado se puede ver en la figura 2, donde la muestra 6 reportó una dureza de 55 HRA utilizándose una mezcla de 80 % en cáscara de coco y el 20 % con cáscara de almendra de palma.

Figura 2. Variación de durezas con respecto al porcentaje en peso de la mezcla cementante donde se tiene 20 % en peso de activador $CaCO_3$



Fuente. Umunakwe [11]

Oyetunji et al [13] investigaron la influencia 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. Cada agente cementante fue molido hasta hacerse polvo y mezclado con $BaCO_3$. Las temperaturas de cementación variaron entre 700 y 1100 °C, con tiempos de sostenimiento entre 1 y 5 horas. Las cajas de cementación y su contenido se dejaron enfriar al medio ambiente. El tratamiento posterior a la cementación (temple) se realizó a una temperatura de 850 °C durante 30 minutos y el medio de enfriamiento fue aceite. Los resultados del análisis de porcentaje de carbono muestran que la cáscara de almendra de palma y el hueso de vaca son potencialmente adecuados para ser utilizados como medio de cementación.

Figura 3. Porcentaje de carbono que tiene cada cáscara después de ser llevada a una temperatura

		% Carbon at Various Tempering Temperatures (°C)				
S/No	Carburizer	700	800	900	1000	1100
1	SS	0.074	0.073	0.079	0.0094	0.0062
2	PKS	0.004	0.066	0.101	0.151	0.53
3	AB	0.078	0.084	0.128	0.131	0.426
As received : 0.078%C						

SS=Sea Shell (Oyster Shell), PKS-Palm Kernel Shell; AB-Animal Bone (Mammilian Bone from Cattle).

Fuente. Oyetunji et al [13]

Ohize [14] estudió el efecto del carbón mineral, carbón de hueso de vaca y carbón vegetal sobre la dureza, la resistencia a la tracción y al impacto del acero AISI 1018 a una temperatura de 925 °C con un tiempo de sostenimiento de 5 horas. Se observó que el carbón vegetal como material cementante tiene un efecto cada vez mayor en algunas propiedades mecánicas del acero. Se obtuvo una dureza de 28.5 HRC para las muestras solamente cementadas, mientras que con temple aplicado posterior a la cementación se obtuvo un rango entre 51.177 HRC y 61.66 HRC.

Alagbe [15] utilizó grafito, carbón vegetal y cáscara de almendra de palma utilizando un 20% en peso de BaCO3 con la cementación. Los resultados revelaron que la muestra cementada con cáscara de almendra de palma arrojó mayor dureza (279 HV) y profundidad de capa de (534 μm) que las muestras tratadas en otros medios, lo que se atribuye a una mayor activación de la cáscara de almendra de palma al reaccionar con BaCO3 dando como resultado una difusión más rápida del carbono.

Akanji et al [16] mostraron que la mezcla de cementación entre carbón vegetal como material cementante y conchas marinas como activador aumenta la dureza del acero AISI 1018. Se encontró que la dureza aumentó de 2 a 31 HRC con la disminución en el tamaño de partícula del agente cementante 600 a 212 μm. Los mejores resultados se encontraron con la mezcla de agentes cementantes entre un 90 % en peso de carbón vegetal y 10 % en peso de conchas marinas para tamaños de partícula de 212 μm con una dureza de 31 HRC.

Ihom et al [17] observaron el efecto que tiene la cáscara de huevo como activador en una cementación con cáscara de melón, bagazo de caña y hojas de palma en un acero con 0.25 % C mejorando su dureza. Se establece que la cáscara de huevo funciona como una alternativa de activador con respecto al carbonato de calcio, ya que funciona bien durante la cementación elevando el potencial de carbono en la superficie del acero. El resultado del trabajo demostró que la cáscara de huevo puede utilizarse en lugar de otro activador, así mismo se demostró que el uso de biomasa como la cáscara de melón, el bagazo de caña de azúcar y las hojas de palma sirven como fuentes cementantes.

Tabla 3. Tabla de resultados donde se puede apreciar los valores de dureza obtenidos con la mezcla de cada cáscara utilizada y el activador

S/NO	MEZCLA CEMENTANTE	1	2	3	PROMEDIO DUREZA (HRC)
1	Bagazo de caña	45.3	43.8	46.3	45.1
2	Bagazo de caña y cáscara de huevo	47.8	43.8	44.8	45.5
3	Cáscara de melón	49.8	46.8	46.8	47.8
4	Cáscara de melón y cáscara de huevo	53.3	51.8	52.8	52.6
5	Hoja de palma	56.3	55.3	56.3	56
6	Hoja de palma y cáscara de huevo	58.3	55.3	56.3	56.6

Fuente. Ihom et al [17]

Tabla 4. Valores de la profundidad de capa obtenidas con cada mezcla entre cáscara y activador

Material cementante	Profundidad de capa (mm)
Cáscara de melón y de huevo	0.65
Cáscara de palma	0.70
Cáscara de palma y de huevo	0.75

Fuente. Ihom et al [17]

El mismo autor Ihom [18] utilizó diferentes porcentajes de mezcla entre material cementante y activador (hueso de vaca) sobre un acero de 0.13 % de carbono con la cementación. Al utilizarse el 100 % en peso de carbón vegetal se obtuvo una profundidad de capa de 1.56 mm. El 75 % de

carbón vegetal y 25 % de hueso de vaca arrojó una profundidad de 1.4 mm. Para un 70 % de carbón vegetal y 30 % de hueso de vaca se obtuvo una capa de 0.96 mm, mientras que para un 60 % de carbón vegetal y 40 % de peso de hueso de vaca se obtuvo una capa de 2.32 mm.

Okongwu [19] comparó el efecto de la piedra caliza, mármol y dolomita como sustituyente del $BaCO_3$ en la cementación en un acero de 0.14% C. Las muestras fueron sometidas a una temperatura de 900 °C y expuestas durante 2, 5 y 8 horas en compuestos cementantes que contienen carbón vegetal más cantidades variables hasta un 20% máximo de $BaCO_3$ y/o mármol, piedra caliza o dolomita. El mármol o la piedra caliza pueden reemplazar la mayor parte del carbonato de bario requerido como activador en la cementación sólida; De hecho, para el mejor efecto, se ha demostrado que la cantidad de carbonato de bario debe reducirse aproximadamente un 5%. Una mezcla de 15% de mármol y 5% de $BaCO_3$ resultaron dar el mejor resultado. Las mayores profundidades de capa alcanzadas durante 2, 5 y 8 horas fueron de 2.05, 2.44 y 4.16 mm respectivamente con la mezcla mencionada anteriormente.

Los trabajos realizados y mencionados anteriormente dan una idea de que el utilizar diferentes fuentes de carbono a las tradicionales en la cementación, dan resultados favorables con respecto a algunas propiedades mecánicas de aceros de bajo contenido de carbono como el aumento en la dureza y a la resistencia a la tracción. Así mismo, otros autores se han enfocado en mejorar otra propiedad importante como lo es la resistencia al desgaste por medio de la cementación y tratamientos térmicos posteriores, ya que producen un endurecimiento en el acero y por consiguiente se eleva la resistencia al desgaste [23].

Pérez et al [20] estudiaron el comportamiento del coeficiente de fricción con respecto al tiempo y la distancia de deslizamiento, así como la pérdida de masa experimentada por la muestra de acero AISI 1020 en estado comercial, corroborando los datos obtenidos con lo encontrado en literatura. Los parámetros de ensayo se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Parámetros utilizados para el ensayo de desgaste basados en la norma ASTM G-99

Principales variables del ensayo	
Variables	**Rango**
Carga	No esta especificada en la norma. Se utilizaron cargas de 9.79N, 21.83N Y 31.62 N
Velocidad	Según la norma debe estar entre 0.3 y 3 rad/s (60 a 600 r.p.m). En esta investigación se utilizaron 60, 180 y 300 r.p.m.
Distancia	No se especifica en la norma. Para esta investigación se utiliza 1000 m
Temperatura	No se tuvo en cuenta en esta investigación

Fuente. Pérez et al [21]

Se encontró que al aumentar la velocidad durante el contacto entre la superficie del pin con la del disco, la pérdida de peso tiende a disminuir, mientras que, si se mantiene constante dicha velocidad y se aumenta la carga de contacto, la pérdida de peso aumenta.

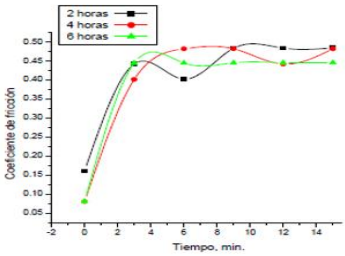
Ramírez [21] observó el comportamiento al desgaste por medio de ensayos tipo pin-on-disk sobre discos de acero SAE 1020 y pines del mismo acero, cementando con carbón vegetal a una temperatura de 900 °C con un tiempo de sostenimiento de 8 horas. Los resultados de desgaste reportaron la pérdida de masa en gramos tanto para los pines como para los discos. El valor promedio obtenido de dureza de la capa cementada es de 47.82 HRC con una desviación estándar de 3.88 HRC. El espesor de la capa cementada fue de 1.15 mm y se percibió claramente que

después de realizar ensayos de desgaste con discos cementados presentan una mejora al comportamiento de desgaste en comparación con el acero en estado comercial, ya que hubo un aumento del coeficiente de fricción de 0.28 a 0.47.

Ayala et al [22] estudiaron el comportamiento de los aceros SAE 1018 y 8620 cementados durante 2, 4 y 6 horas cuando son sometidos a un proceso de desgaste. La temperatura de cementación fue de 920 °C y la mezcla cementante consistió en un 90 % en peso de carbón vegetal pulverizado y 10% en peso de $NaCO_3$. Los resultados mostraron que a 2 horas de tratamiento la profundidad de capa cementada que se presentó fue de 1.1 mm, a 4 horas de 1.7 mm y a 6 horas de 2 mm. La Figura 4 muestra los resultados del desgaste abrasivo con arena pómez en un acero SAE 1018, donde se registra la variación de los coeficientes de fricción qué depende del tiempo de sostenimiento al que haya sido expuesto el acero.

Figura 4. Comportamiento del acero 1018 al desgaste abrasivo

Tiempo min.	Coeficiente de Fricción μ		
	Tiempo de cementado hrs.		
	2	4	6
0	0.1605	0.0802	0.0808
3	0.4419	0.4015	0.4446
6	0.4022	0.4818	0.4447
9	0.4832	0.4819	0.4450
12	0.4837	0.4418	0.4452
15	0.4843	0.4820	0.4455



Fuente. Ayala Et Al [23]

Selcuk Et Al [23] obtuvieron el coeficiente de friccion y el comportamiento al desgaste de los aceros AISI 1020 y 5115 cuando son cementados y carbonitrurados. La dureza del acero 1020 después de ser cementado y templado fue de 56 HRC, mientras que el carbonitrurado y templado de 62 HRC, demostrando que el segundo tratamiento es más efectivo para aumentar la dureza. Se observó que al comenzar el ensayo se incrementa el coeficiente de ficción hasta que se estabiliza. Para el acero cementado se obtuvo un coeficiente de friccion de 0.45 - 0.62 y para los carbonitrurados de 0.36 - 0.57.

Elzanaty [24] evaluó la resistencia al desgaste y la dureza adquirida de un acero con 0.16 % C al ser cementado, templado y revenido. La temperatura de cementación varió de 850 a 950 °C mostrándose los mejores resultados en la última. La resistencia al desgaste abrasivo resultó ser más alta para el acero cementado que para el de estado comercial, y la pérdida de masa durante la abrasión fue mayor para el acero de estado comercial y más baja para el acero cementado. Se concluye que a medida que aumenta la temperatura de cementación, la pérdida de masa disminuye y los valores de dureza obtenidos variaron en un rango entre 52-60 HRC.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL DE LA ASISTENCIA:

Evaluar la resistencia al desgaste adhesivo del acero AISI 1020 cementado con carbón obtenido a partir de la cáscara de papa

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener material pulverizado de carbón vegetal a partir de la cáscara de papa.
- Analizar el comportamiento de la dureza y de la microestructura de la capa obtenida en el proceso de cementación
- Evaluar el comportamiento de pérdida de masa que presenta la superficie del acero cementado.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 CEMENTACIÓN

La mayoría de las piezas que componen las máquinas son fabricadas con el fin de que sus propiedades mecánicas sean uniformes en toda la masa. Sin embargo, en mecanismos específicos se necesitan piezas que tengan superficies muy duras o resistentes al desgaste y que el núcleo sea tenaz. Tratamientos térmicos como la cementación, cianuración, nitruración, entre otros, son utilizados para el endurecimiento superficial de aceros.

La cementación es un tratamiento termoquímico que se aplica al acero de bajo contenido de carbono a temperatura austenítica con el objetivo de enriquecerlo en carbono en su superficie, obtener una capa superficial y así elevar la dureza conservándose un núcleo dúctil y tenaz. Existen tres formas en cómo se presenta la sustancia cementante siendo sólida, líquida y gaseosa. En la cementación con cementantes sólidos se utilizan materiales ricos en carbono donde suele emplearse el carbón vegetal (biomasa) y carbón mineral.

La cementación en sólido consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio cementante y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a temperatura de autenticación. Se pueden emplear aceros aleados y no aleados, de bajo contenido en carbono, generalmente de 0.08 a 0.25 %de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0.40 %de C. La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850 y 1000 °C, siendo las temperaturas próximas a 900 °C las más utilizadas [1].

5.2 CEMENTACIÓN SÓLIDA

En este caso, las piezas, después de su elaboración preliminar, se limpian quitándoles la herrumbre, la suciedad y la grasa. Se utilizan diversos materiales para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. Las más empleadas suelen ser el carbón vegetal y mineral que se mezclan con carbonatos de bario, calcio, sodio, entre otros.

En los procesos de cementación sólida, la principal fuente de carbono es el *CO* (Monóxido de carbono). El monóxido se produce por un compuesto sólido que reacciona dentro de la caja de cementación. En este proceso el carbón absorbido por el acero se forma por la descomposición del monóxido en carbono y el dióxido de carbono [28].

5.3 CLASES DE MATERIALES CEMENTANTES

El compuesto cementante comercial normal suele tener una mezcla de alrededor 20 % a 40 % de carbonatos alcalinos u otros metales, con carbón coke y o de leña, e incluso ambos al mismo tiempo. El principal activador utilizado es el carbonato de bario y usualmente comprende el 60 % a 70 % del contenido total de carbonatos. El polvo cementante más enérgico contiene el 40% de $BaCO3$ solamente (exento de otros carbonatos) y se emplea para cementar aceros no aleados cuando se requieren grandes profundidades cementadas.

Por ser más reactivo que el coke, se prefiere usar el carbón de leña como fuente principal de carbono, pero el coke ofrece algunas ventajas, como la buena resistencia en caliente y buena conductividad térmica, de todas maneras, la mayoría de los componentes cementantes tienen carbón de leña y coke, con mayor proporción del primero [28]

5.4 EJECUCIÓN Y APLICACIONES DE LA CEMENTACIÓN SÓLIDA

Las piezas para cementar se introducen en una caja con una cantidad suficiente del material cementante, el cual es una mezcla de carbón y el activador correspondiente, colocadas de manera que toda su superficie se encuentre rodeada de la mezcla. Después se cierra la caja con una tapa y se hace la junta hermética con barro, arcilla o cemento refractario; posterior a ello, las cajas se calientan hasta la temperatura de cementación y se sostienen las horas necesarias para obtener la profundidad de capa deseada. Una vez cumplido el tiempo establecido, se realiza el enfriamiento de las cajas. Si las piezas deben mecanizarse después del enfriamiento, se recomienda realizar un recocido intermedio a 650º C, para conseguir que la dureza se mantenga igual o menor de 32 HRC.

5.5 POTENCIAL DE CARBONO Y GRADIENTE DE CARBONO

Se denomina *potencial de C de la atmósfera* generada por el compuesto cementante, al contenido de C obtenido en la superficie del acero; se incrementa con el aumento de la relación de *CO* a *CO2*. El mayor % de C se desarrolla en la superficie del acero con el uso de energizantes o activadores que promueven la formación de *CO*. El *gradiente de concentración* de C en las piezas cementadas está influenciado principalmente por el potencial de C, la composición química del acero y la temperatura y el tiempo de cementación

5.6 TEMPERATURAS DE CEMENTACIÓN

La cementación sólida se realiza normalmente entre 815º C y 950º C, pudiendo incrementarse cuando se tratan aceros de grano fino que se mantengan sin crecimiento a temperaturas cercanas de 1040º C [1].

5.7 REACCIONES QUÍMICAS

Las reacciones químicas que pueden producir la cementación del acero en un medio cementante sólido como el carbón vegetal, sin adición de activadores, sólo se puede realizar en presencia de una fase gaseosa activa, por ejemplo, el aire, dentro de la caja de cementar:

C+ O2 CO2 exotérmica (1)
C+ ½ O2 CO exotérmica (2)
CO2+ C 2CO endotérmica (3)

Mientras que la primera reacción se emplea a temperaturas relativamente bajas, la (3) representa un equilibrio que, al aumentar la temperatura se desplaza cada vez más a la derecha. La atmósfera interior de la caja de cementación se enriquece cada vez más en CO. Se pueden emplear como activadores, carbonatos de bario, de sodio, de potasio, de magnesio, de estroncio, entre otros. La eficacia como modificadores de la reacción, disminuye en el orden en que se han citado. El proceso de activación se basa en las dos reacciones químicas siguientes:

$$Me\ CO_3 \rightarrow MeO + CO_2$$
$$CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$$

La descomposición de los carbonatos no debe ser brusca, sino progresiva para que perdure una atmósfera gaseosa de composición constante dentro de la caja, durante mucho tiempo. Durante el enfriamiento el óxido formado reacciona otra vez con el CO2, según la reacción

$$MeO + CO_2 \rightarrow MeCO_3$$

de lo que se deduce que el agotamiento del activador es relativamente pequeño.
La cementación del acero sólo ocurre en un intervalo pequeño de temperaturas, entre 800º y 950º C

$$Fe\ \gamma + 2CO \leftrightarrow [C]Fe\ \gamma + CO2$$

El CO2 formado debe separarse rápidamente de la superficie del acero, pues de otra manera volvería a actuar como descarburante. Por esta razón, en el medio cementante debe mantenerse un equilibrio entre el CO, que actúa como carburante, y el CO2, que es descarburante. Cuanto más CO exista, más se acelerará la cementación, y si hay exceso de CO2, se frenará la cementación o incluso puede producirse descarburación [1].

5.8 DESGASTE

El proceso de desgaste se puede definir como la pérdida de material de las superficies en contacto entre dos cuerpos, cuando se someten a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. Por lo tanto, siempre que haya un movimiento relativo entre dos sólidos que soportan carga, existe una situación potencial de desgaste, dicho movimiento se puede considerar unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Para el caso de estos dos últimos, también se puede dar una combinación de los mismos o el desgaste se puede dar debido a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes [22].

Junto al concepto de desgaste, es importante definir el concepto de fricción, el cual se define cómo la resistencia al movimiento que se produce cuando dos objetos sólidos que se encuentran en contacto, son puestos en movimiento relativo uno con respecto del otro.

5.9 TIPOS DE DESGASTE

Un metal puede ser sometido a un movimiento relativo ya sea con un cuerpo sólido o no sólido, así como también puede existir interacción entre metal y líquidos (agua o aceites lubricantes). Los tipos de desgaste se clasifican según la naturaleza del movimiento o los medios involucrados en una interacción de metales bajo carga. Según el último criterio, la clasificación de cómo se puede presentar desgaste se muestra a continuación:

a) Metal contra metal.

b) Metal contra sólido no-metálico.

c) Metal contra fluido.

No obstante, debido a que la naturaleza de las superficies en contacto puede cambiar de manera inesperada, y lo que antes era metal contra metal se puede volver metal contra no-metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente; la clasificación anterior pierde validez al aplicarla en situaciones reales. Por lo tanto, se prefiere clasificar al desgaste en virtud de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga. Los tipos principales de desgaste son: por adhesión, por abrasión, por cavitación, por vibración y por fatiga [22].

El **desgaste por adhesión** ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra o existe una presión que mantiene unidas a dichas superficies.

El **desgaste por abrasión** tiene lugar siempre que estén presentes partículas extrañas duras entre las superficies en contacto. Las partículas abrasivas se incrustan en una de las superficies y actúan como herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie.

El **desgaste por vibración** se produce entre dos superficies que tienen movimiento oscilatorio relativo de pequeña amplitud, del cual se forman partículas abrasivas que originan cavidades en la superficie a medida que la oscilación continúa.

El **desgaste por cavitación** se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie

El **desgaste por fatiga** surge como resultado de las cargas cíclicas, el cual probablemente es el mecanismo predominante de la mayoría de tipos de desgaste.

6. MATERIAL Y EQUIPOS

6.1 MATERIAL: ACERO AISI 1020

La composición química del material corresponde a la información indicada por la hoja técnica del proveedor y se puede ver en la tabla 6.

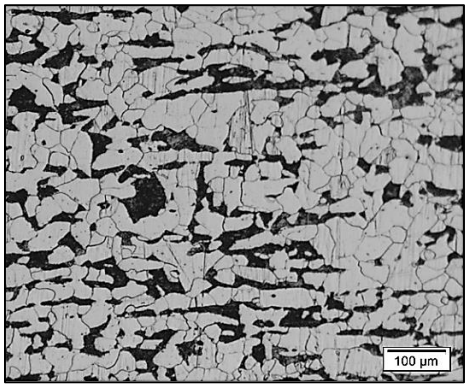
Tabla 6. Composición química acero AISI 1020

Calidad	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
1020	0.18/0.23	0.15/0.3	0.3/0.6	0.04	0.05

Fuente. Cía. General de Aceros S.A. [25]

Este acero bajo en carbono puede ser tratado con diferentes procesos térmicos, entre estos se encuentran la cementación, por ejemplo. Dicho metal suele utilizarse para la fabricación de piezas estructurales o de maquinaria que requieran mediana resistencia y con gran tenacidad, siendo su soldabilidad sencilla con soplete o al arco [25].

Figura 5. Microestructura de perlita y ferrita a 20x aumentos



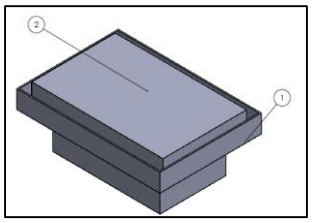
Fuente. Autor

6.2 EQUIPOS

6.2.1 CAJA DE CEMENTACIÓN

La caja que fue empleada en la ejecución de la cementación y la carbonización de la cáscara está elaborada en acero inoxidable (AISI 304) guardando dimensiones establecidas para almacenar de forma completa la muestra a tratar.

Figura 6. Representación caja de cementación en hecha en SolidWorks.



Fuente. Autor

6.2.2 TORNO PARALELO

En la figura 7 se observa el torno utilizado para el mecanizado de los discos y en la tabla 7 su información técnica.

Figura 7. Torno MAPI.

Fuente. Autor

Tabla 7. Información técnica Torno MAPI

Volteo Sobre Bancada	410 mm
Ancho De Bancada/Dureza	250 mm / 52 mm
Diámetro Del Husillo	52 mm
Nariz Del Husillo	D-6
Velocidad Del Husillo	16 / 45-1800 rpm
Avance Transversal	210 mm
Diámetro De La Herramienta	20 x 20
Diámetro De La Contrapunta	50 mm
Recorrido De La Contrapunta	150 mm
Cono De La Contrapunta	CM4
Potencia Del Motor Principal	3 KW (4.5 HP)
Sistema Eléctrico	220 V /60 Hz / 3 HP
Peso De La Máquina Aprox.	1550 Kg
Dimensiones De La Maquina	1940 x 700 x 1320 mm

Fuente: Autor

6.2.3 HORNO UTILIZADO EN LA CARBONIZACIÓN DE LA CÁSCARA, CEMENTACIÓN Y POST-TRATAMIENTOS

El horno utilizado en los tratamientos termoquímicos, térmicos y en la quema de la cáscara fue un tipo mufla Modelo 1200-220 marca Abarephor (figura 8), el cual permite realizar procesos a

temperaturas no mayores a los 1200 °C. En la tabla 8 se presenta las dimensiones del mismo y en la tabla 9 sus características técnicas.

Figura 8. Horno

Fuente. Autor

Tabla 8. Dimensiones del hogar del horno

Dimensiones del hogar	
Ancho	40 cm
Fondo	40 cm
Alto	40 cm

Fuente. Autor

Tabla 9. Características técnicas horno

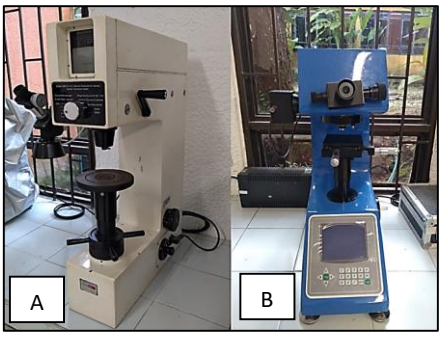
Dimensiones totales aproximadas	
Alto	120 cm
Ancho	90 cm
Fondo	70 cm
Potencia del diseño	10 kW
Voltaje de alimentación	220 V (Trifásica)
Temperatura máxima	1200 °C
Amperaje	27

Fuente. Autor

6.2.3 DURÓMETRO Y MICRODURÓMETRO

El durómetro utilizado en los ensayos de medición de durezas previas a los tratamientos y posterior a estos fue uno tipo universal de referencia HBRVU 187.5 como se puede observar en la figura 9 (A) y sus especificaciones técnicas en la tabla10. El microdurómetro utilizado mostrado en la figura 9 (B) es de marca NOVOTEST realizándose todos los ensayos bajo una carga de 9.8 N, y sus especificaciones técnicas se pueden ver en la tabla 10.

Figura 9. Durómetro y Microdurómetro



Fuente. Autor

Tabla 10. Información técnica del durómetro y microdurómetro

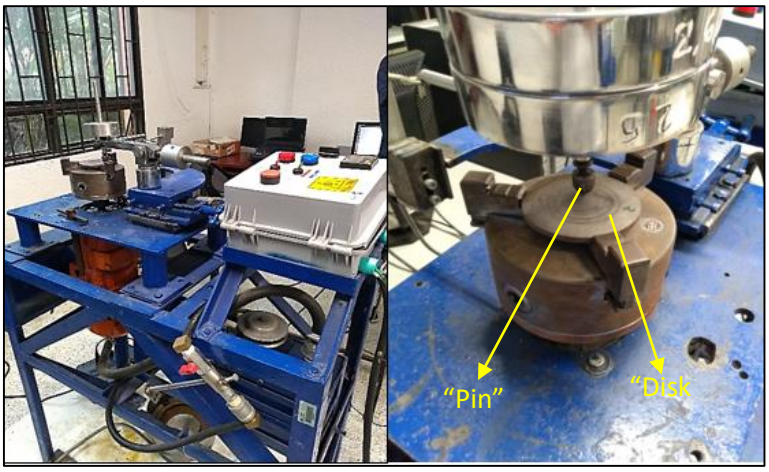
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DURÓMERO	
Cargas disponibles	[31.25-187.5] Kgf
Escalas	Brinell, Rockwell y Vickers
Lentes objetivas para lecturas Brinell y Vickers	2.5X-5X
Norma Técnica	DIN-EN-ISO 6506,6507,6508 y ASTM
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MICRODURÓMETRO	
Cargas disponibles	[10-1000] gf
Escalas	HV
Lentes objetivas para lecturas Vickers	10X-40X
Norma Técnica	GB/T4340.2-2012 ISO6507-2 y ASTME384

Fuente. Autor

6.2.4 BANCO DE DESGASTE PIN ON DISK

El banco Pin-on-disk" se caracteriza por realizar los ensayos aplicando una carga sobre un "pin" a una superficie circular llamada "disk". En la figura 10 se observa el tribómetro utilizado para los ensayos de desgaste y en la tabla 11 su información técnica.

Figura 10. Banco de desgaste “Pin On Disk”



Fuente. Autor

Tabla 11. Especificaciones técnicas Tribómetro “Pin-on-disk”

Velocidad de rotación	1 a 1700 rpm
Fuerza de fricción	Hasta 10 N (opcional 20 N)
Diámetro máximo del disco	80 mm Máximo
Espesor máximo del disco	Hasta 10 mm
Fuerza normal máxima	10 N (opcional 20 N)

Fuente. Autor

6.2.5 CORTADORA METALOGRÁFICA

En la cortadora metalográfica Q-3A (ver figura 11) se llevaron a cabo los cortes de cada disco para la obtención de la muestra a encapsular. Su información técnica se aprecia en la tabla 12.

Figura 11. Cortadora metalográfica

Fuente. Autor

Tabla 12. Información técnica de la cortadora metalográfica Q-3ª

Sistema de refrigeración	Independiente
Dimensiones	625 x 500 x 645 mm
Frecuencia	50 Hz

Peso	80 Kg
Numero de fases	3
Voltaje	380 V
Velocidad de rotación del disco de corte	2800 rpm
Máximo diámetro de corte	55 mm
Especificación del disco de corte	250 x 2 x 32 mm
Especificaciones del motor	Y90L-2 / 2,2 kW

Fuente. Autor

6.2.6 PULIDORA METALOGRÁFICA

El proceso de pulido se realizó en la pulidora metalográfica GP-2 (figura 12) y su información técnica se puede observar en la tabla 13.

Tabla 13. Información técnica de la pulidora metalográfica

Diámetro del disco pulido	230mm
Velocidad de rotación	450rpm
Potencia	370W
Voltaje	220V
Frecuencia	50Hz
Dimensiones	69*715*310 mm
Peso neto	45 Kg

Fuente. Autor

Figura 12. Pulidora metalográfica

Fuente. Autor

6.2.7 MICROSCOPIO ÓPTICO

El microscopio utilizado para la obtención de imágenes fue el microscopio metalográfico Olympus upright BX61FM (Ver figura 13) y sus especificaciones se encuentran en la tabla 14.

Figura 13. Microscopio ópitco triocular Olympus upright BX51FM

Fuente. Autor

Tabla 14. Información técnica del microscopio óptico Olympus BX51FM

Lámpara halógena	100W/12V
Objetivos	5x-100x (duplicables)
Diámetro de los objetivos	30 m

Fuente. Autor

6.2.8 CÁMARA DIGITAL CMOS OLYMPUS

Con respecto a la adquisición de imágenes la cámara digital utilizada fue la CMOS Olympus SC100 de alta resolución (ver Figura 14), ya que tiene un chip CMOS de 10,6 megapíxeles. La SC100 crea imágenes de alta resolución, con altos detalles especialmente cuando se trabaja en bajos aumentos. Las imágenes que se obtienen pueden ser analizadas con alto nivel de detalle directamente sobre la pantalla del monitor gracias al zoom digital de alta resolución y sus especificaciones técnicas se encuentran en la tabla 16.

Figura 14. Cámara Digital CMOS Olympus SC100

Fuente. Autor

Tabla 15. Información técnica de la cámara digital Olympus SC100

Sensor de imágenes	CMOS color
Tamaño del sensor	½ , 3 pulg
Resolución (máx.)	3840 x 2748 pixeles

Tamaño del pixel	1.67 x 1.67 µm
Binning	2 x 2
Conversor A/D	12 bits
Tiempos de exposición	0.12 ms – 14,6 s
Live frame rates	3,2 fps at 3840 x 2748 pixeles 12 fps at 1920 x 1375 pixeles 42 fps at 960 x 686 pixeles
Transferencia de datos	USB 2.0
PC control	32 it y 64 bit

Fuente. Autor

6.2.9 SOFTWARE UTLIZADO EN LA ADQUISIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

Con el apoyo del software STREAM BASIC (ver Figura 15) se obtuvieron imágenes captadas por el microscopio. Este software ofrece opciones de trabajo inteligente y la capacidad de adquirir imágenes nítidas. Los usuarios de cualquier nivel de experiencia pueden realizar tareas complejas de análisis de imágenes, desde l adquisición de imágenes hasta el informe estándar [26].

Figura 15. Software Visual Basic Stream

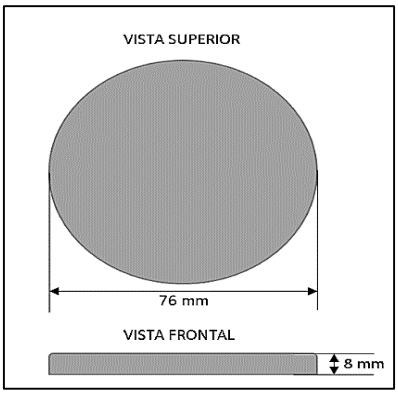
Fuente. Autor

7. PROCEDIMIENTO

7.1 MAQUINADO DE LOS DISCOS

Seis discos fueron maquinados a partir de una barra cilíndrica de 76 mm de diámetro hasta dejarlos con peso cercano a 200 g y un espesor de 8 mm. En la figura 16 se muestra la geometría que tendría cada disco y en la tabla 16 se muestra el peso inicial disco y la nomenclatura del disco con sus respectivos tratamientos.

Figura 16. Vista superior y frontal de la geometría de los discos



Fuente. Autor

Tabla 16. Pesos de los discos de acero AISI 1020 según el tratamiento aplicado y sus nomenclaturas

DISCO	TRATAMIENTO EN EL DISCO	PESO DEL DISCO
I	Sin tratamiento	180.78 gr
II	Cementación	191.77 gr
III	Cementación + Temple en agua	170.17 gr
IV	Cementación + Temple en agua + Revenido	181.85 gr
V	Cementación + Temple en aceite 10W30	192.96 gr
VI	Cementación + Temple en aceite 10W30 + Revenido	178.27 gr

Fuente. Autor

7.2 PREPARACIÓN DE LA BIOMASA

El material cementante seleccionado para llevar a cabo el proceso de cementación fue el carbón obtenido a partir de la cáscara de papa. Inicialmente la cáscara (figura 17) fue lavada para después ser cortada en trozos pequeños de dimensiones aproximadas a 2.5 x 2.5 cm, y se llevó a una temperatura de 400 °C durante 4 horas hasta carbonizarse. En total se realizaron cuatro procesos de carbonización a las mismas condiciones con el fin de recolectar suficiente agente cementante.

Figura 17. Cáscara de papa sin carbonizar

Fuente. Autor

Cada proceso de carbonización consistió en introducir 300 g de trozos de cáscara ya que al finalizar el proceso resultaba el 70 % de la cantidad inicial. El carbón pasó por un molino de placas (figura 18) hasta recolectarse 700 g necesarios para la cementación como se muestra en la figura 20.

Figura 18. Proceso de molido del carbón de cáscara de papa

Fuente. Autor

Figura 19. Cáscara de papa carbonizada sin moler

Fuente. Autor

Figura 20. Carbón de cáscara de papa total recolectado

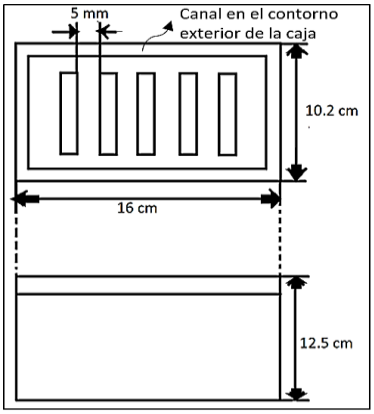
Fuente. Autor

7.3 PREPARACIÓN Y SELLADO DE LA CAJA DE CEMENTACIÓN

La preparación de la caja de cementación empieza introduciendo 50 g aproximadamente de carbón de cáscara de papa hasta formar una capa de agente cementante que evita que haya un contacto entre los discos y la caja de cementación.

En las figuras 21 y 22 se presenta el arreglo de los discos dentro de la caja, para que después sean cubiertos totalmente por carbón ya molido de cáscara de papa

Figura 21. Esquema del arreglo de los discos en la caja de cementación



Fuente. Autor

Figura 22. Arreglo de los discos en la caja de cementación

Fuente. Autor

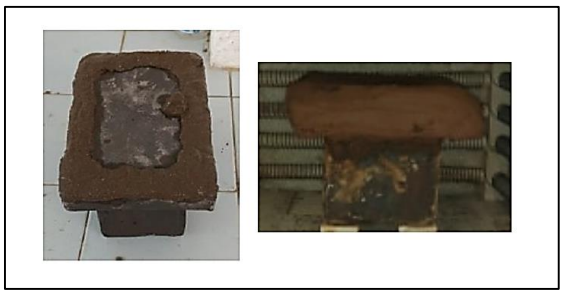
Una vez lista la caja de cementación con el material cementante y los cinco discos debidamente pulidos, se procede a realizar el sellado de la caja con una mezcla de melaza, caolín y arcilla. La preparación de dicha mezcla se consistió en amasar 500 g de arcilla, posterior a esto se le agregan gradualmente 80 ml de melaza y 120 ml de agua junto a 500 g de caolín hasta que la mezcla quede totalmente uniforme como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Preparación de la mezcla utilizada para el sellado de la caja de cementación

Fuente. Autor

Finalmente, se llenan los espacios entre la tapa y la caja en el canal del contorno de la caja hasta cubrir por completo los bordes como se muestra en la figura 24. Posterior al sellado, se dejó secar la mezcla por 12 horas en un ambiente fresco y sin contacto a la luz solar para garantizar un buen secado y así un buen sellado a la hora de realizar la cementación.

Figura 24. Caja de cementación totalmente sellada



Fuente. Autor

7.4 POST-TRATAMIENTOS A LA CEMENTACIÓN

Una vez cementados los discos se procedió a realizar tratamientos térmicos posteriores y en condiciones diferentes para cada uno como se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Condiciones de los tratamientos térmicos realizados

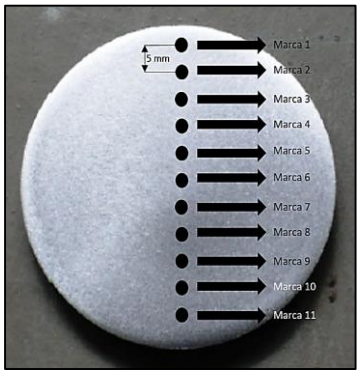
Disco	Tratamiento térmico	Medio de enfriamiento	Tiempo de subida	Tiempo de sostenimiento	Temperatura de sostenimiento (°C)
III	Temple	Agua	30 minutos	50 minutos	850
IV	Temple	Aceite 10W30	30 minutos	50 minutos	850
V	Revenido	Medio ambiente	30 minutos	50 minutos	400
VI	Revenido	Medio ambiente	30 minutos	50 minutos	400

Fuente. Autor

7.5 MEDICIÓN DE DUREZAS

Para el registro de la dureza de los discos se empleó el durómetro HBRVU mencionado anteriormente y utilizando escalas en Rockwell B para la caracterización del acero y en Rockwell C para los discos tratados térmicamente. Cabe resaltar que antes de cada ensayo los discos debieron ser pulidos garantizando una superficie limpia de impurezas. A lo largo del diámetro se realizaron 11 indentaciones conservando una distancia de 5 mm como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Numero de indentaciones a lo largo de cada disco



Fuente. Autor

7.6 ENSAYOS DE DESGASTE

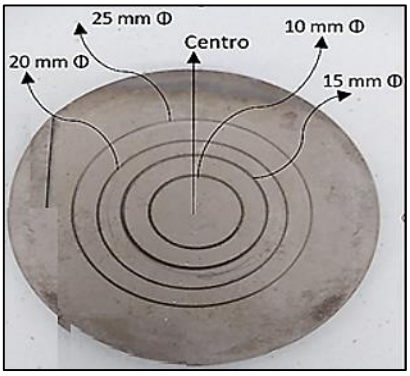
Los ensayos de desgaste se llevaron a cabo en condiciones libres de lubricantes u otra sustancia influyente en el desgaste del material en el equipo "Pin-On-Disk" que utiliza una esfera de Dióxido de Zirconio (ZrO_2), aplicándose una carga de 50 N durante 1000 m repitiéndose cuatro veces a 10,15,20 y 25 mm del centro hacia la periferia del mismo formando surcos como se ve en la figura 26. Debido a que el banco de ensayos de desgaste cuenta con un motor y éste a su vez con un variador de frecuencia, se logró regular de la velocidad y las revoluciones por minuto necesarias para cada ensayo. En la tabla 18 se muestran las revoluciones y las frecuencias utilizadas para cada distancia.

Tabla 18. Frecuencias y revoluciones utilizadas para cada ensayo de desgaste

Distancia del centro al surco formado (mm)	Frecuencia utilizada (Hz)	Revoluciones por minuto (r.p.m)
10	59.18	325.50
15	39.45	217.00
20	29.59	162.75
25	23.67	130.20

Fuente. Autor

Figura 26. Disco I después de haber sido sometido a las 4 repeticiones de ensayo de desgaste



Fuente. Autor

7.7 REGISTRO DE PÉRDIDA DE MASA

Antes del ensayo de desgaste que experimentó cada disco tratado, se procedió a realizar un registro de la masa inicial (tabla 16) de las muestras en la balanza analítica marca SCIENTIFIC (figura 27) con una precisión de 0.0001 dígitos. Cabe resaltar que después de cada repetición en el ensayo de pérdida de masa, se registró la masa inicial y final del disco como se observa en la sección de resultados.

Figura 27. Balanza analítica SCIENTIFIC

Fuente. Autor

7.8 PROCESO METALOGRÁFICO

Para el proceso metalográfico, se realizó un corte transversal a cada disco utilizando el sistema utilizando la cortadora metalográfica con el fin de extraer una o más muestras para luego ser encapsuladas en resina fría (figura 28), permitiendo así un buen control en el proceso de pulido de la muestra.

Figura 28. Probeta de resina con cada muestra encapsulada

Fuente. Autor

7.8.1 PULIDO Y ATAQUE QUÍMICO

El proceso de pulido de las muestras se llevó a cabo en la pulidora metalográfica la cual combina el proceso desbaste y de pulido final (figura 29). Las lijas utilizadas para el proceso de preparación y desbaste de material empezaron desde la numero 80 hasta la 2000 obteniéndose una superficie uniforme, libre de rayados y planos. Posterior desbaste se procedió a realizar el pulido final que consistió en pasar las muestras por un paño con alúmina liquida. Para el ataque químico de las muestras encapsuladas y debidamente pulidas, se utilizó VICRAL y NITAL.

Figura 29. Proceso de desbaste y pulido de las muestras encapsuladas

Fuente. Autor

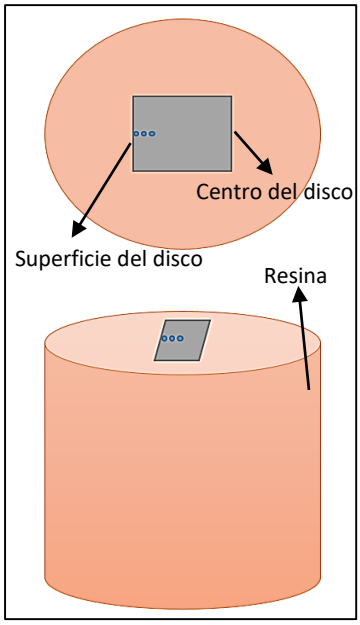
8. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados y su respectivo análisis se podrán evidenciar a continuación.

8.1 MICRODUREZAS

En la tabla 19 se presenta las durezas en HV realizadas con el microdurómetro de marca NOVOTEST en dónde se tomaron tres indentaciones por disco sobre la capa cementada desde la superficie hacia el centro del disco, así como se observa en la figura 30.

Figura 30. Indentaciones sobre las muestras de cada disco en la resina



Fuente. Autor

Tabla 19. Durezas encontradas sobre la capa cementada por disco tratado

Distancia de la superficie del disco a la indentación	**MICRODUREZAS (HV)**					
	Disco I (En estado comercial)	**Disco II** (Cementado)	**Disco III** (Cementado, Templado en agua)	**Disco IV** (Cementado, Templado en agua y revenido)	**Disco V** (Cementado, Templado en aceite 10W30)	**Disco VI** (Cementado, Templado en aceite 10W30 y revenido)
10 µm	184	335	896.7	699.3	636.1	483.4
350 µm	182	312	831.9	660.3	601.5	463.6
700 µm	181	296	789.1	636.1	555.4	447

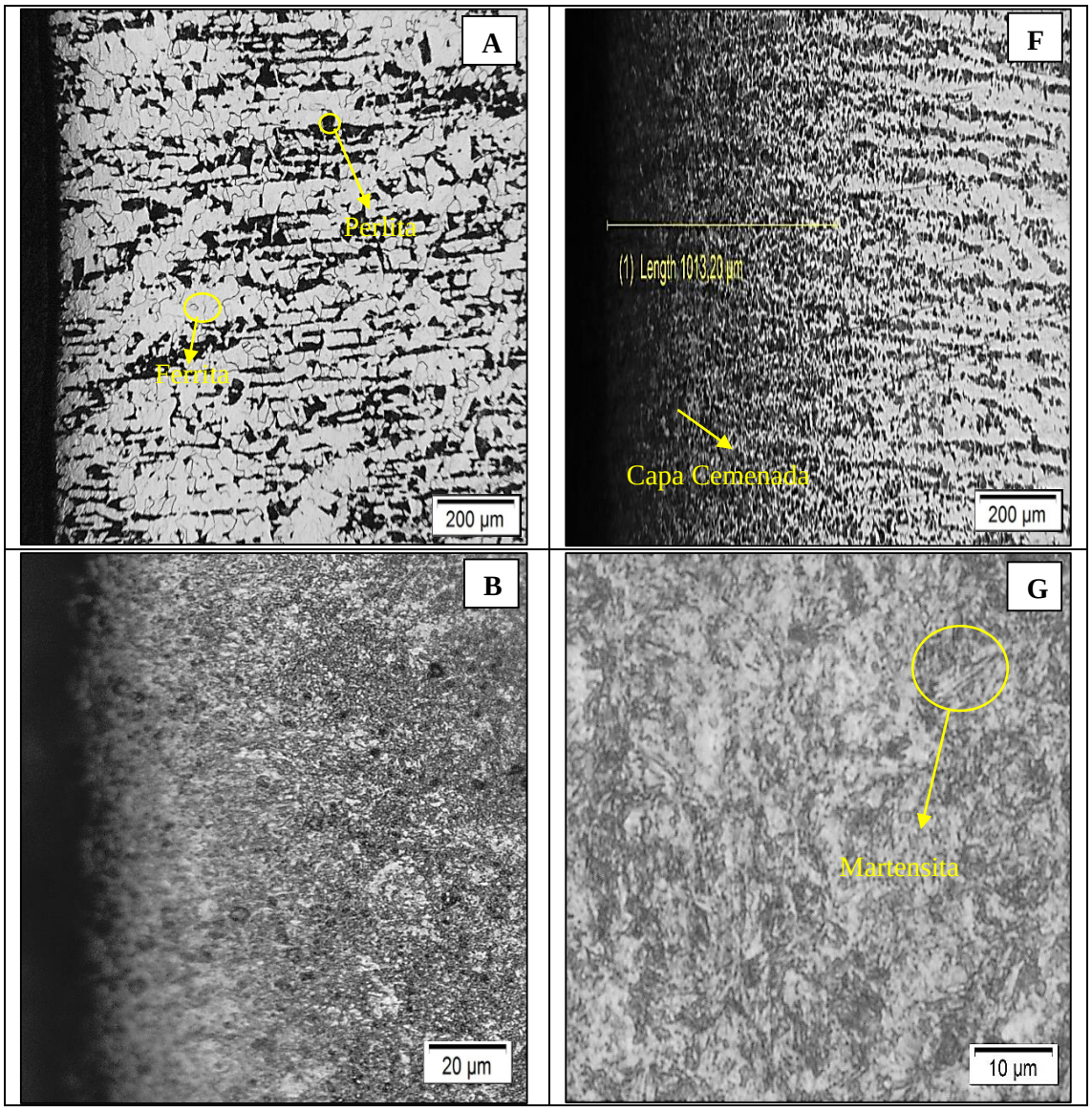
Fuente. Autor

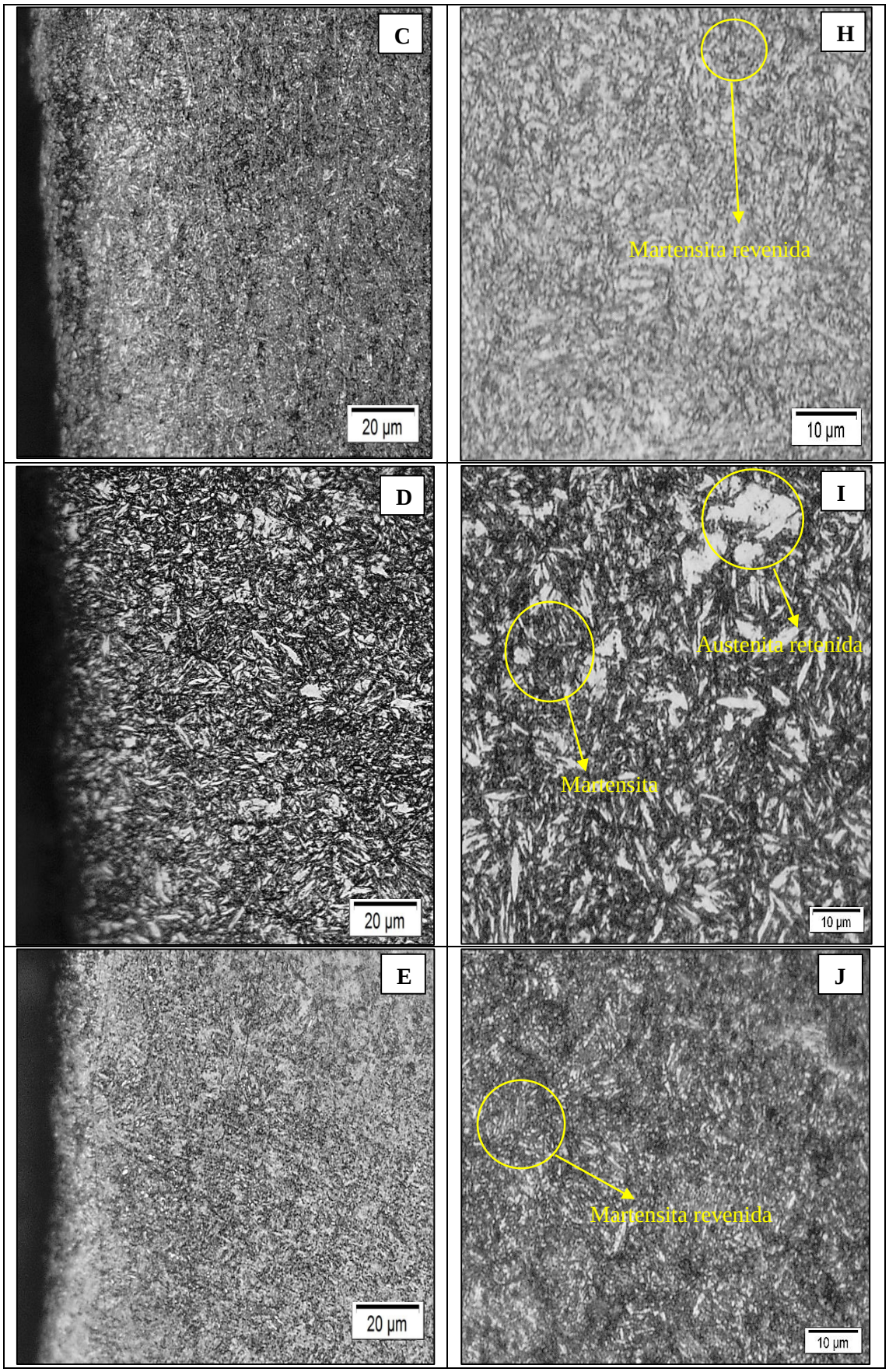
De la tabla 19 se observa que para el disco I que se encuentra en estado comercial registró una dureza de 184 HV cercana a la superficie del disco. Para el disco II la dureza fue de 335 HV, mientras que en el disco III de 896.7 HV. En cuanto al disco IV, se registró una dureza de 699.3 HV, el disco V mostró una de 636.1 HV y para el Disco VI fue de 483.4 HV.

8.2 MICROGRAFÍAS

La figura 31 contiene las imágenes obtenidas y utilizadas para el análisis metalográfico después de los tratamientos realizados para así poder observar el comportamiento microestructural en la capa cementada para cada disco. El método utilizado en este caso fue de microscopía óptica, y cada imagen esta referenciada con una letra que pertenece a los discos de la siguiente manera: Disco I (A), Disco II (F), Disco III (B) y (G), Disco IV(C)y (H), Disco V (D) y (I) y el Disco VI (E) y (J).

Figura 31. Micrografías ópticas captadas para cada disco tratado a 5x, 40x y 100x aumentos





Fuente. Autor

En la Figura 34 (A) se presenta la microestructura obtenida del acero AISI 1020 en estado comercial. En la figura 34 (F) se muestra la microestructura del acero cementado con el carbón obtenido a partir de la cáscara de papa, en donde se muestra un aumento significativo de las zonas perlíticas a nivel superficial, y una disminución de las regiones ferrificas a medida que se avanza desde la superficie del disco hacia el centro del mismo; El espesor aproximado de la capa cementada fue de 1013.02 µm sin utilizar activador.

En la figura 34 (B) y (D) se presenta la microestructura a 40X de forma general y en detalle a 100X en (G) y (I), obtenida en el tratamiento de temple utilizando agua y aceite 10W30 donde se observa una microestructura típica de aceros templados, siendo la martensita como microconstituyente principal con algunas zonas de austenita retenida. También se presentan las microestructuras obtenidas de los mismos temples mencionados anteriormente adicionando un revenido a cada uno en donde se observa martensita revenida a 40X en forma general en (C) y (E) y en detalle a 100X en (H) y (J).

8.3 DUREZAS SUPERFICIALES

En la tabla 20 se muestran los promedios de durezas superficiales en HV por disco tratado.

Tabla 20. Promedio de dureza para cada Disco evaluado en este trabajo

Promedio dureza	Disco I (HV)	Disco II (HV)	Disco III (HV)	Disco IV (HV)	Disco V (HV)	Disco VI (HV)
Superficie	183	334	893	695	625	482

Fuente. Autor

8.4 PÉRDIDA DE MASA

En la tabla 21 se muestra la tasa de pérdida de masa por Disco después de haber realizado los ensayos de desgaste respectivos.

Tabla 21. Promedio de pérdida de masa de las muestras después de los ensayos de desgaste

MUESTRA	PERDIDA DE MASA PROMEDIO (g)
Disco I	0.0470
Disco II	0.0201
Disco III	0.0183
Disco IV	0.0119
Disco V	0.0143
Disco VI	0.0104

Fuente. Autor

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 34 (A) se observa una microestructura típica en aceros de bajo contenido de carbono perteneciente al Disco I, dónde la matriz ferrítica está representada por las regiones blancas y se encuentra en mayor proporción que la perlita siendo las regiones oscuras, conservándose una organización de microconstituyentes uniforme sobre toda la región, con una microdureza de 184 HV encontrándose correspondiente a la del acero AISI 1020 en estado comercial.

La figura 34 (F) muestra un cambio a nivel microestructural después cementar el acero con el carbón de cáscara de papa (Disco II) en comparación con el Disco I, presentando un aumento en las regiones perlíticas sobre la zona cercana a la superficie del disco, a lo que se le puede denominar como capa cementada con una profundidad aproximada de 1013.2 µm. Se observa una reducción significativa de las regiones blancas a nivel superficial y una mayor formación de región oscura, decreciendo del borde izquierdo de la imagen hacia el borde derecho de la misma;

La micro dureza más cercana a la superficie del disco fue de 335 HV sobre la capa y en la tabla 19 se muestra como decrece de manera radial a medida que se aleja de la superficie, además de que se logró elevar la dureza del acero significativamente a nivel superficial.

En la literatura consultada se encontraron resultados similares a los mencionados anteriormente, en dónde Mohsin Et Al [5] obtuvieron una profundidad de capa fue de 776 µm y una micro dureza de 275 HV sobre la capa en un acero SAE 1024 cementando durante 5 horas con nano partículas de carbón negro de humo, Aramide Et Al [7] encontraron una dureza de 356 HV en la periferia del acero con 0.19 % en carbono al cementar por 30 minutos a 850 °C utilizando hueso de vaca como agente cementante; Oluwafemi Et Al [10] consiguieron una dureza de 363 HV cementando durante 120 minutos a 950 °C con cáscara de almendra de palma carbonizada sobre un acero AISI/SAE 1020.

En cuanto a las micrografías de los Discos III y V, se observa una microestructura martensítica como microconstituyente principal. En la figura 34 (G) se presenta una zona a 100X de (C) en donde se logra observar una estructura totalmente martensítica, resultando similar a las figuras expuestas en el trabajo de Ruiz et al [29] y en el de Ravagli el al [30] dónde trabajaron temple en agua para el acero AISI 1045. La Figura 34 (I) a diferencia de la (G), muestra una estructura martensítica en menor proporción con contornos de grano definidos y agujas alargadas debido a que no se logró una completa transformación de la austenita en martensita durante el temple y por ende se formaron algunas zonas de austenita retenida correspondiendo a las zonas blancas, y esto se debe a que el medio de enfriamiento (aceite 10W30) posee propiedades diferentes al agua, como viscosidad y conductividad térmica menores, haciendo que la velocidad de enfriamiento sea más lenta.

Algo similar a lo mencionado anteriormente se puede ver en las figuras del libro de Barreiro [31], Callister [32] y Askeland [34] dónde se observa las micrografías de aceros con microestructura martensítica representada por agujas con regiones blancas siendo éstas la austenita retenida.

Al considerar la dureza que se obtuvo sobre la capa cementada de los discos, se observa que en el caso del Disco III se encontró la dureza más elevada estando ubicada en la región próxima a la superficie del disco siendo de 896.7 HV, en comparación con las que se presentan en los otros discos que fueron tratados previamente a la cementación (templado y revenido). De la misma manera, se observa que el utilizar aceite 10W30 en el temple del Disco V se consiguió una dureza menor en comparación con el Disco III, siendo de 636.1 HV. Por otro lado, las durezas encontradas en ambos discos se encuentran dentro del rango para estructuras martensíticas (513 a 937 HV) según Barreiro [32] resultando coherente con las microestructuras que se muestran en las Figuras 34 (G) y (I) y siendo parecidas a las encontradas por Aramide [7] y Rashmi Et Al [12].

La martensita resultante del temple es muy dura y frágil, lo que conlleva a el incremento de tensiones internas adquiridas en el enfriamiento ejerciendo un efecto fragilizante sobre el material. Es por ello que se hace necesario realizar un revenido con el fin de alivianar las tensiones internas, disminuir la dureza y mejorar la ductilidad en el material [32].

En las Figura 34 (H) y (J) se presentan las micrografías para los discos a 1000 aumentos que después de ser templados fueron revenidos, donde se logra observar la presencia de martensita revenida similar a de la figura de Metals Handbook [33] y la figura de Askeland [34]. El revenir la martensita en los aceros causa que la resistencia mecánica y la dureza de ésta disminuyan mientras que la ductilidad y las propiedades al impacto mejoran [34]. La microestructura de la martensita revenida consiste en partículas extremadamente pequeñas de cementita dentro de una matriz ferrítica continua y uniformemente dispersas; Esta microestructura suele ser menos dura y tenaz que la martensita, aunque mucho más dúctil [32]. La dureza superficial sobre la capa cementada para el Disco IV fue de 699.3 HV mientras que para el Disco VI de 483.4 HV,

confirmando la disminución en la dureza superficial en comparación con los discos templados y al revisar las durezas que obtuvieron Montaño R [1] que cementó con carbón mineral y Salazar et al [4] con carbón de nance y mangle resultaron ser similares.

En la tabla 20 se muestra el promedio de las 11 indentaciones realizadas en el ensayo de dureza descrito anteriormente, y al compararlas con la primera dureza de la tabla 19, se observa una correspondencia entre éstas.

La pérdida de masa promedio que experimentó cada disco se puede ver en la tabla 21, en donde el Disco I registró 0.0470 g de pérdida siendo la más elevada y una dureza superficial de (184 HV) ya que en esta condición el material al tener un bajo porcentaje de carbono presenta alta ductilidad y baja resistencia, permitiendo así desprender la mayor cantidad de material posible ensayo de desgaste. Por otro lado, el Disco II registró 0.0201 g de pérdida de masa siendo más baja que en el Disco I con un aumento en la dureza superficial de (335 HV); En la Figura 34 (B) se puede observar el incremento de la zona perlítica en la superficie del disco lo cual conlleva al aumento de la dureza superficial y así una mejora en la condición a la resistencia al desgaste representada con la disminución en la pérdida de masa.

Por otro lado, el Disco III registró un promedio de pérdida de masa de 0.0183 g con una dureza superficial de 896.7 HV mientras que el Disco V perdió en promedio 0.0143 g con 636.1 HV en su superficie. Como se mencionó anteriormente, ambos discos muestran un comportamiento de mejora a la hora de ser sometidos a desgaste al ser comparados con el Disco I y II ya que su dureza aumentó significativamente debido a la estructura martensítica que se pudo observar en la figura 34 (G) y la Figura 34 (I). El Disco III muestra una mayor pérdida de masa promedio que el Disco V ya que presenta una microestructura martensitica más compacta debido a la transformación completa de la austenita en martensita, por ende, está más dura y frágil y por lo tanto tiende a desprenderse un poco más de material.

El Disco VI presentó una dureza superficial de 699.3 HV con una pérdida de masa promedio de 0.0119 g mientras que el Disco VI reportó una dureza de 483.4 HV con una pérdida de masa promedio de 0.0104 g lo cual resultó ser el promedio más bajo de la tabla 21, ya que como lo muestra la Figura 34 (E) y (J) éste disco posee una estructura martensítica revenida el cual resultó ser un poco más dúctil que la estructura encontrada en la Figura 34 (C) y (H) pertenecientes al Disco IV. La ductilidad adquirida en los Discos IV y VI se ve reflejada en la pérdida de masa ya que cuando fueron evaluados al desgaste adhesivo pareciera que los surcos tomaran la forma del pin hasta cierto punto del ensayo obteniéndose así perdidas de masa menores, a diferencia de los Discos III y V que, a condiciones de mayor dureza y alta fragilidad adquiridas en el temple disminuyen la posibilidad de ductilidad.

En resumen, los resultados mostrados y analizados anteriormente permiten ver que cementar el acero AISI 1020 con carbón obtenido de la cáscara de papa sin utilizar activador y aplicando un posterior temple y revenido ayuda a en la mejora de las propiedades mecánicas como dureza y ductilidad además de mejorar la resistencia al desgaste del mismo.

CONCLUSIONES

- Para lograr obtener 700 g de carbón de cáscara de papa necesarios para la cementación de los discos, se realizaron en total cuatro procesos de carbonización en dónde se utilizó una temperatura de 400 °C con un tiempo de sostenimiento de cuatro horas.

- El uso de cáscara de papa como agente cementante durante el proceso de cementación sólida sobre el acero AISI 1020 muestra resultados favorables en cuanto al carbono aportado durante el proceso difusivo, es decir, se produce un incremento en el porcentaje de carbono y en el valor de dureza a nivel superficial del disco cementado en comparación con el que se encuentra en estado comercial, siendo de 184 a 335 HV, como también cambios en su microestructura y en la resistencia al desgaste, que disminuyó de 0.0470 a 0.0201 g. La profundidad de la capa cementada alcanzada fue de 1013.23 µm.

- El realizar tratamientos posteriores a la cementación mostraron tener un efecto positivo tanto en la dureza superficial como en la resistencia al desgaste de los discos. Por ejemplo, el templar en agua elevó la dureza hasta 896.7 HV siendo la más alta encontrada, aunque la resistencia al desgaste resultó ser intermedia. Templar en aceite y revenir arrojó las mejores condiciones al desgaste, disminuyéndose la pérdida de masa hasta 0.0104 g con una dureza intermedia.

- El uso de carbón de cáscara de papa en un proceso de cementación resultó tener resultados positivos con respecto a la dureza y la resistencia al desgaste del acero AISI 1020, elevando su dureza superficial y aumentando la resistencia al desgaste adhesivo. Así mismo, aplicar tratamientos posteriores a la cementación como temple y revenido mostraron mejorar aún más la dureza y la resistencia al desgaste en los discos evaluados.

REFERENCIAS

[1] Montaño, R. B. (2014). Evaluacion del proceso de endurecimiento superficial de un acero SAE: 1020 Mediante carburizacion sólida y posterior temple y revenido. Aarequipa, Peru.

[2] Patiño, J. A. (29 de Marzo de 1996). Tratamientos térmicos de los aceros. Tratamientos térmicos de los aceros. San Nicolas de los Garza, Mexico.

[3] Gomez, L. F. (1991). Cementación en medio sólido en caja. Colombia.

[4] Salazar Wilmer, P. B. (s.f.). Estudios de cementación de aceros con carbones vegetales nacionales. Panama: RIDTEC.

[5] Mohsin All Raza, H. A. (2016). Carburacion de acero bajo en carbono usando nanoparticulas de carbon negro. Springer.

[6] Supriyono. (2018). The effects of pack carburizing using charcoal on propierties of mild steel. Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 3842.

[7] Fatai Olufemi Aramide, S. A. (2010). Pack Carburization of Mild Steel, using Pulverized Bone as Carburizer: Optimizing Process Parameters. leipt, 1-1

[8] Ihom P. Aondona, A. O. (2014). The Effect of Holding Time on the Hardness of Case Hardened Mild Steel. Materials Science and Metallurgy Engineering, 31-34.

[9] I.M. Momoh, O. A.-P. (2015). Effect of walnut shell powder on the mechanical properties of case-hardened steel. ISDS JOURNALS, 209-218.

[10] Olanike Mary Oluwafemi, S. R. (2015). Effect of carburizing temperature and time on mechanical properties of AISI/SAE 1020 steel using carbonized palm kernel shell. Leonardo Electronic Journal Of Practices and Technologies, 41-56

[11] Reginald Umunakwe, O. C. (2017). Effects of Carburization with Palm Kernel Shell/Coconut Shell Mixture on the Tensile Properties and Case Hardness of Low Carbon Steel. FUOYE Journal of Engineering and Technology, 1-6.

[12] Rashmi Ranjan Panda, D. A. (2014). Mechanical and Wear Properties of Carburized Low Carbon Steel Samples. International Journal of Multidisciplinary and Current Research, 1-4.

[13] Oyetunji, S. O. (2012). Effects of Carburizing Process Variables on Mechanical and Chemical Properties of Carburized Mild Steel. ResearchGate, 1-7.

[14] Ohize, EJ.: Effect of Local carbonaceous materials on the mechanical properties of mild steel. AU JT. **13**, 107–13 (2009)

[15] Alagbe, M.: Effects of some carburizing media on surface hardening of low carbon steel. J. Sci. Multidiscip. Res. **3**, 31–7 (2011)

[16] Akanji, O.L.; Fatoba, O.S.; Aasa, A.S.: The influence of particle size and soaking time on surface hardness of carburized AISI 1018 steel. Br. J. Appl. Sci. Technol. **7**, 37–44 (2015)

[17] Ihom A. Paul, N. G. (2013). Investigacion de residuos de cáscara de huevo potenciador en la carburacion del acero suave. American Journal of Materials Science and Engineering, 29-33.

[18] Ihom, P. A. (2013). Case hardening of mild steel using cowbone as energiser. netjournals, 97-101.

[19] D.A. Okongwu, V. P. (1987). Assessment of the efficacy of some carbonate minerals as energizers in pack carburisation of mild steel. Nijotech, 1-16.

[20] R, E. A. (2013). Comportamiento del coeficiente de friccion y perdida de masa, del acero 1020 en estado comercial en la ciuad de Ibague. Scientia et Technica.

[21] Ramirez, G. R. (2017). Estudio de desgaste tipo espiga sobre un disco utilizando un AISI 1020 cementado y un acero 01. San Salvador

[22] Ayala S, V. Y. (2007). Estudio del comportamiento al desgaste de aceros 1018 y 8620 recubiertos mediante un proceso de cementación sólida. Lima, Peru: CIBIM8.

[23] B. Selcuk, R. I. (2002). Un estudio sobre la friccion y el comportamiento al desgaste del carburizado, carbonitrados y borurosos en aceros AISI 1020 y 5115. ELSEVIER.

[24] Elzanaty, H. (2014). El efecto de la carburizacion en la dureza y desgaste de las propiedades en muestras de acero suave. International Journal of Innovation and Applied Studies, 995-1001.

[25] A. G99, «Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus,» ASTM International, 2010.

[26] OLYMPUS, «www.olympus-ims.com,» OLYMPUS, [En línea]. Available: https://www.olympus-ims.com/es/microscope/stream2/.

[27] MCTOOLS, «www.mctools.co,» mctools, [En línea]. Available: http://www.mctools.co/tornos-convencionales/115-torno-paralelo-cd6241x1000.html

[28] U. t. n. f. rosario, «Cementación,» Metalografia y tratamientos térmicos.

[29] Ruiz, E. A. (2016). Evaluacion de la dureza y microestructura del acero 1045 templado en sustancias refrigerantes no tradicionales. Ibague.

[30] Reyes, J. S. (2018). Estudio del grado de endurecimiento, cambio de la microestructura y resistencia al desgaste por deslizamiento del acero AISI 1045, utilizando refrigerante automotriz e industrial como sustancia de temple para los aceros. Ibague.

[31] Barreiro, J. A. (1949). TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS. Madrid: NuevasGraficas, S.A.

[32] Callister, W. D. (s.f.). CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES. REVERTÉ. S.A.

[33] ASM International, Metals Handbook Metallography and microestructures, V.9, Editor George F. Vander Voort, 2004

[34] Askeland, D. R. (1998). CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES. International Thomson Editores