



**Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo del
acero AISI 1020 cementado con carbón obtenido a partir
de la biomasa de café**

Juan Sebastián Cetina Peña

**Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Mecánica**

Ibagué, 2019



Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo del acero AISI 1020 cementado con carbón obtenido a partir de la biomasa de café

Juan Sebastián Cetina Peña

Asistencia de investigación que se presenta como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director (a):

Título Ing Eduardo Alberto Pérez Ruiz
Profesor Universidad de Ibagué

Co-director (a)s:

D+Tec
Grupo de investigación

**Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Mecánica**

Ibagué, 2019



Agradecimientos

A mis padres Luis Eduardo Cetina Mendoza y Maria Liliana Peña Acosta

Por su apoyo incondicional y haber confiado en mi

A mis hermanas Maria Jose Cetina Peña y Maria Juana Cetina Peña

Por acompañarme en mi camino profesional

A mi novia Magda Vivian Valencia Gutierrez

Por su apoyo incondicional

A mi hijo Matias Cetina Valencia

Por ser el pilar de mi vida

A Eduardo Alberto Pérez Ruiz Ingeniero Mecánico

Por su sabiduría como tutor y guiarme en mi camino profesional

A los tutores de la Facultad de Ingeniería

Por su sabiduría y enseñanza

A la Universidad de Ibagué

Por darme la oportunidad de obtener el Título como Ingeniero Mecánico



Resumen

En este trabajo se llevó a cabo la verificación de perfil de dureza en el acero AISI 1020 para posteriormente realizar la cementación (en cinco discos 76 mm de diámetro y 8 mm de espesor) a 970 °C con un tiempo de subida en el interior del horno de 1,5 horas y un tiempo de sostenimiento de 8,5 horas utilizando carboncillo obtenido de la borra de café. Los resultados obtenidos al utilizar este tipo de biomasa como agente cementante se encontró que ayudo a mejorar la resistencia al desgaste y la dureza del acero. En los resultados obtenidos se hizo evidente que el carboncillo de borra de café eleva el contenido de carbono en la superficie de los discos, adquiriendo una profundidad de capa de (1251,16 a 1287,03) μm con un aumento en la dureza de 27 HRC a 56 HRC y una pérdida de masa hasta de 0.0423g.

Palabras clave: Dureza, cementación, biomasa, desgaste.

Abstract

In this work the verification of the hardness profile in the AISI 1020 steel was carried out to subsequently perform the cementation (in five disks 76 mm in diameter and 8 mm thick) at 970 ° C with a rise time inside the 1.5-hour oven and a holding time of 8.5 hours using charcoal obtained from the coffee bean. The results obtained by using this type of biomass as a cementing agent were found to help improve the wear resistance and hardness of steel. In the results obtained it became clear that the coffee eraser charcoal raises the carbon content on the surface of the discs, acquiring a layer depth (1251.16 to 1287.03) μm with an increase in hardness of 27 HRC at 56 HRC and a loss of mass up to 0.0423g.

Keywords: Hardness, cementation, biomass, wear.



Contenido

Introducción	13
Capítulo 1: Estado del arte	14
Capítulo 2: Objetivos	18
2.1 Objetivo general:	18
2.2 Objetivos específicos:	18
Capítulo 3: Marco teórico	19
3.1 Cementación	19
3.2 Cementación solida	19
3.3 Clases de materiales cementantes	20
3.4 Ejecución y aplicaciones de la cementación sólida	20
3.5 Ventajas y desventajas de la cementación en caja	20
3.5.1 Ventajas:	20
3.5.2 Desventajas:	20
3.6 Temperatura de cementación	20
3.7 Velocidad de cementación	21
3.8 Desgaste	21
3.9 Tipos de desgaste	21
3.9.1 Desgaste por adhesión	21
3.9.2 Desgaste por abrasión:	22
3.9.3 Desgaste por cavitación:	22
3.9.4 Desgaste por corrosión	22
3.9.5 Desgaste por deslizamiento	22
3.9.6 Desgaste por fatiga	22
Capítulo 4: Material y equipos	23
4.1 Material	23
4.2 Equipos	23
4.2.1 Caja de cementación	23
4.2.2 Cortadora metalográfica	24
4.2.3 Horno abarhepor	24
4.2.4 Maquina pulidora	25
Capítulo 5: Procedimiento	28
5.1 Maquinado de los discos	28
5.2 Preparación de la biomasa	29
5.3 Preparación y sellado de la caja de cementación	31
5.4 Post-Tratamientos a la cementación	33
5.5 Medición de durezas	34



5.6 Ensayo de desgaste	34
5.7 Registro de masa.....	35
5.8 Proceso metalográfico	36
5.9 Pulido y ataque químico.....	36
Capítulo 5: Resultados.....	37
5.1 Durezas superficiales.....	37
5.2 Micrografías	37
5.3 Pérdida de masa.....	45
5.4 Profundidad de capa.....	45
Capítulo 6: Análisis de resultados	47
7. Conclusiones.....	49
Referencias.....	51
A. Anexo: Artículos científicos.....	52
B. Anexo: Documentos	53
C. Anexo: Imágenes de procesos y equipos.....	54
D. Anexo: Imágenes de metalografías	55



Lista de figuras

<i>Figura 1 Dureza Vs distancias de superficies cementadas.....</i>	14
<i>Figura 2 Dureza del acero carburizado con residuos de materiales carbonosos y residuos de materiales carbonosos mezclados con cáscara de huevo.</i>	15
<i>Figura 3 Profundidad media de la caja de acero.</i>	16
<i>Figura 4 Temperatura de calcinación.</i>	17
<i>Figura 5 Cementación sólida en acero SAE 3115.....</i>	21
<i>Figura 6 Composición química acero AISI 1020.....</i>	23
<i>Figura 7 Micrografía del Acero 1020 Sin templar a 200x.....</i>	23
<i>Figura 8 Caja de cementación</i>	24
<i>Figura 9 Cortadora metalográfica.....</i>	24
<i>Figura 10 Horno Abarhepor.....</i>	25
<i>Figura 11 Maquina pulidora GP-2</i>	25
<i>Figura 12 Durómetro.....</i>	26
<i>Figura 13 Banco de desgaste Pin-On-Disk</i>	26
<i>Figura 14 Microscopio óptico</i>	27
<i>Figura 15 Cámara digital CMOS OLYMPUS</i>	27
<i>Figura 16 Software Stream-Basic.....</i>	28
<i>Figura 17 Dimensiones Del Disco</i>	29
<i>Figura 18 Caja de cementación con Carbón de biomasa de café.....</i>	30
<i>Figura 19 Maquina de moler</i>	30
<i>Figura 20 Carbón a base de biomasa de café.....</i>	31
<i>Figura 21 Caja de cementación lista para el tratamiento térmico</i>	31
<i>Figura 22 Caja de cementación sellada herméticamente</i>	32
<i>Figura 23 Discos cementados.....</i>	32
<i>Figura 24 Disco acero AISI 1020 en estado comercial.....</i>	32
<i>Figura 25 Disco acero AISI 1020 cementado</i>	33
<i>Figura 26 Medición de durezas a lo largo del disco.....</i>	34
<i>Figura 27 Surcos a lo largo de la capa del disco.....</i>	35
<i>Figura 28 Probetas encapsuladas.....</i>	36
<i>Figura 29 Proceso de pulido</i>	36
<i>Figura 30 (A) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x200].....</i>	38
<i>Figura 31 (B) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x500].....</i>	38
<i>Figura 32 (C) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x1000].....</i>	39
<i>Figura 33 (D) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x2000].....</i>	39
<i>Figura 34 (E) Acero AISI 1020 cementado y templado en agua [Aumento x20].....</i>	39
<i>Figura 35 (F) Acero AISI 1020 cementado y templado en agua [Aumento x50]</i>	40
<i>Figura 36 (G) Acero AISI 1020 cementado y templado en agua [Aumento x200].....</i>	40
<i>Figura 37 (H) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x5]</i>	41



<i>Figura 38 (I) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x10]</i>	41
<i>Figura 39 (J) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x20]</i>	41
<i>Figura 40 (K) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x200]</i>	42
<i>Figura 41 (L) Acero AISI 1020 cementado y templado en aceite (Aumento x20)</i>	42
<i>Figura 42 (M) Acero AISI 1020 cementado y templado en aceite (Aumento x50)</i>	42
<i>Figura 43 (N) Acero AISI 1020 CEMENTADO, TEMPLADO EN AGUA Y REVENIDO [Aumento x50]</i>	43
<i>Figura 44 (O) Acero AISI 1020 CEMENTADO, TEMPLADO EN AGUA Y REVENIDO [Aumento x50]</i>	43
<i>Figura 45 (P) Acero AISI 1020 CEMENTADO, TEMPLADO EN AGUA Y REVENIDO [Aumento x100]</i>	43
<i>Figura 46 (Q) Acero AISI 1020 Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido [Aumento x10]</i>	44
<i>Figura 47 (R) Acero AISI 1020 Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido [Aumento x20]</i>	44
<i>Figura 48 (S) Acero AISI 1020 Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido [Aumento x50]</i>	45
<i>Figura 49 %C en función de la temperatura</i>	48
<i>Figura 50 Efecto del revenido en las propiedades de un acero al carbono</i>	49



Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1 TABLA DE DATOS OBTENIDOS DE DISCOS</i>	29
<i>Tabla 2 Parámetros de tratamientos térmicos</i>	33
<i>Tabla 3 Parámetros del ensayo de desgaste</i>	35
<i>Tabla 4 Promedio de pérdida de masa</i>	35
<i>Tabla 5 Dureza del Disco I en estado comercial</i>	37
<i>Tabla 6 Dureza de los Discos AISI 1020 con tratamiento térmico</i>	37
<i>Tabla 7 Numeración de imágenes metalográficas</i>	37
<i>Tabla 8 Pérdida de masa en cada Disco</i>	45
<i>Tabla 9 Profundidad de capa</i>	45

Introducción

Hoy en día se necesita prologar el ciclo de vida útil de las piezas fabricadas en materiales metálicos, como en las aleaciones ferrosas (aceros). Buscando mejorar las propiedades mecánicas de este aplicando diferentes técnicas de tratamientos superficiales como lo son los termoquímicos y térmicos.

En los tratamientos termoquímicos más utilizados actualmente se encuentra la cementación, el cual ayuda al endurecimiento superficial del acero aportando porcentaje de carbono debido al proceso difusivo en los agentes cementantes solidos al someterlos a temperaturas de austenización, conservando la ductilidad y tenacidad presentes. Se utilizan diferentes materias primas para suministrar el carbono al acero, siendo de las más utilizadas el carbón vegetal (adquirido con la quema de biomasa) y el carbón mineral en forma de turba, lignito entre otras.

En el informe investigativo se trata la cementación del acero AISI 1020 utilizando como material cementante carboncillo obtenido de la biomasa de café, con el fin de analizar y estudiar la influencia en la resistencia al desgaste y dureza. Se compara este estudio con trabajos realizados anteriormente.

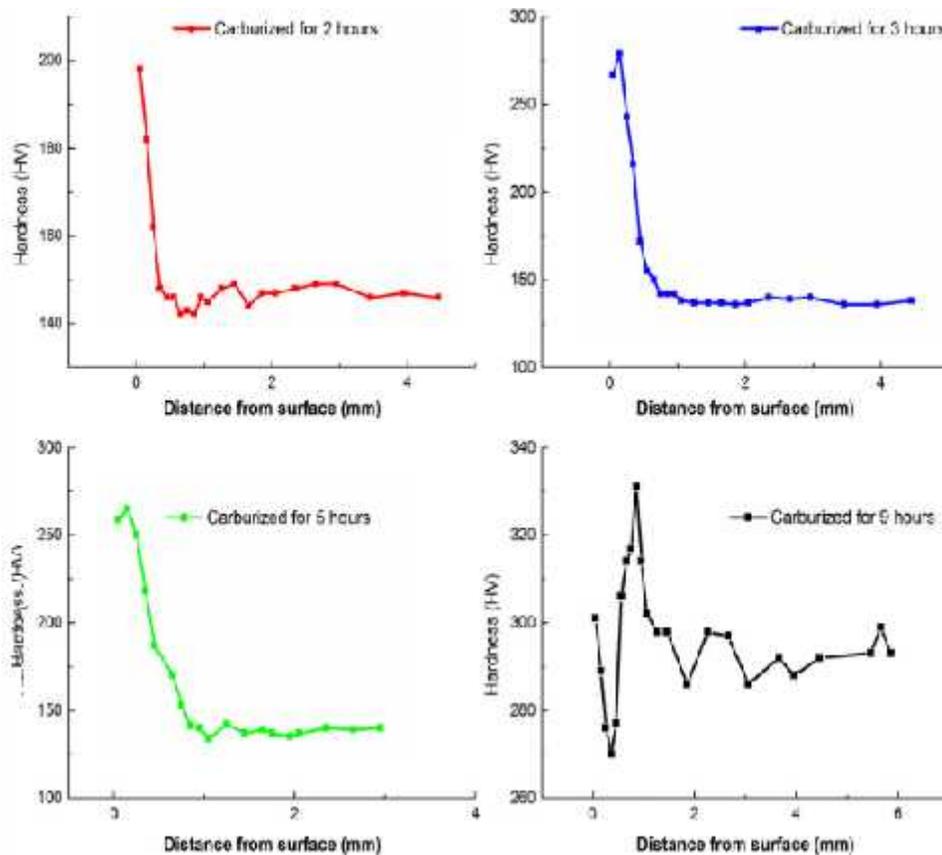
Para iniciar el proceso de investigación se procedió a la caracterización del acero en estado comercial, donde se realiza pruebas de macro dureza en el material. El paso siguiente fue llevar a cabo el corte y maquinado de cinco discos junto con la obtención del carboncillo de biomasa de café, para después vaciar dentro de una caja para cementación fabricada en acero inoxidable el carbón vegetal y localizar en el interior los cinco discos maquinados y lijados previamente para realizar el proceso de cementación del material con el carboncillo como agente de activación y, posteriormente ensayos de dureza. Finalizado este proceso, se realizaron tratamientos térmicos posteriores a la cementación con tiempos de subida de 30 minutos y sostenimiento de 50 min los cuales fueron dos temples a 800°C uno enfriado en agua y el otro con aceite 10W30 mobil, mientras de los dos revenidos se realizaron a 400°C. Los ensayos de desgaste se realizaron bajo una carga de 50N y con una distancia de recorrido de 1000m repitiéndolo con cambio de radio desde 10mm hasta 25mm; finalmente se compararon los resultados obtenidos a través de registros de dureza, micrografías y ensayos de desgaste.



Capítulo 1: Estado del arte

El tratamiento térmico es la operación de calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, tamaño del grano, aumentar tenacidad del material o producir capa superficial dura con un interior dúctil[1]. Ali raza and Asgar [2] investigaron el efecto del tiempo del proceso de carburización, así como medio de carburizado en la microestructura, la dureza y la profundidad para unas muestras de acero. Las muestras cementadas usando nanopartículas de negro de humo mostraron una mayor dureza que las muestras carburadas usando gas acetileno o una mezcla de carburación a base de carbón. Los resultados obtenidos mostraron un aumento para las muestras de acero con bajo contenido de carbono que va desde 140 hasta lograr 275 HV después de solo 3 h de carburización en una mezcla de carburización basada en nanopartículas de negro de humo, para un rendimiento igual 44 y 85% más alto respecto a las muestras carburizadas con acetileno y carbón mezcla.

Figura 1 Dureza Vs distancias de superficies cementadas



Fuente: Mohsin Ali Raza [2]

Uno de los métodos aplicados al proceso termoquímico es la cementación sólida en donde se emplea como material cementante el carbón mineral o carbón vegetal.[3]. Se indago sobre la posibilidad de aprovechamiento de residuos de cascara de huevo como fuente de carbonato de calcio, a manera de potenciador o energizante en el endurecimiento de acero de bajo %C. Como fuente de carbono se utilizaron desechos derivados de la caña de azúcar, cáscaras de melón y flores de la familia araceae(plantas monocotiledóneas herbáceas) Se demostró que, trascurrido el proceso de cementación, las muestras con las que se utilizó cascara de huevo obtuvieron mayor dureza (Figura 2), que aquellos sin este residuo[4].

Figura 2 Dureza del acero carburizado con residuos de materiales carbonosos y residuos de materiales carbonosos mezclados con cáscara de huevo.

S/NO.	Wastes/Indentations	1	2	3	Average Hardness value (HRC)
1	Sugar cane waste	45.3	43.8	46.3	45.1
2	Sugar cane + Egg shell	47.8	43.8	44.8	45.5
3	Melon shells waste	49.8	46.8	46.8	47.8
4	Melon shells + Egg shell	53.3	51.8	52.8	52.6
5	Araceae flower wastes	56.3	55.3	56.3	56.0
6	Araceae + Egg shell	58.3	55.3	56.3	56.6

Fuente: I.Paul [4]

Según los datos obtenidos se evidencia que la biomasa utilizada en el estudio del proceso fue eficiente al ser utilizada como material de carburización obteniendo durezas significativamente altas.

Autores como Umunakwe [5], utilizan cascara de almendra de palma junto con una mezcla de cascara de coco en la carburización a una temperatura de 950°C con un sostenimiento de tres horas seguido de un temple en agua y revenido a 450°C en donde se mantuvieron en un tiempo estimado de cuarenta minutos dejando enfriar las muestras finalmente a temperatura ambiente una vez realizado el proceso se concluyó que las mejores propiedades se obtuvieron al 80% en peso de cáscara de coco y al 20% en peso de mezcla de cáscara de almendra de palma como carburantes aumentando a una dureza de 55 HRC.

D.Gestion [3] dice que 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.



Ihom [6] 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.

Figura 3 Profundidad media de la caja de acero.

Carburizing compound	Effective case depth dc (mm)				Average case depth
	2 hrs.	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	
65% Charcoal and 35% Cowbone	1.8	1.8	1.92	2.56	2.02

Fuente: Ihom [6].

Turuka and Rao [7], estudiaron las propiedades físicas y características de las formas cristalinas de las partículas de sílice tras un proceso de pirolisis variando la temperatura y los gases atmosféricos en la combustión de cascarilla de arroz. Encontraron que la temperatura optima era de 600°C. El área superficial y volumen de poro mostraron un efecto positivo con el aumento de temperatura encontrando su máximo valor a 600°C, en presencia de nitrógeno.

Figura 4 Temperatura de calcinación.

S.No.	Sample details	Calcination Temperature	Abbreviation
1	Rice husk+Nitrogen	400 ^o C	RHN-4
2	Rice husk+Nitrogen	600 ^o C	RHN-6
3	Rice husk+Nitrogen	800 ^o C	RHN-8
4	Rice husk+Air	400 ^o C	RHA-4
5	Rice husk+Air	600 ^o C	RHA-6
6	Rice husk+Air	800 ^o C	RIA-8
7	Rice husk+N ₂ +Steam	400 ^o C	RHNW-4
8	Rice husk+N ₂ +Steam	600 ^o C	RHNW-6
9	Rice husk+N ₂ +Steam	800 ^o C	RHNW-8
10	Ricehusk+N ₂ (40ml/min.) + Air(40ml/min.)	400 ^o C	RIINA-4
11	Ricehusk+N ₂ (40ml/min.) + Air(40ml/min.)	600 ^o C	RHNA-6
12	Ricehusk+N ₂ (40ml/min.) + Air(40ml/min.)	800 ^o C	RIINA-8

Fuente: Turaka [7]

B.selcuk and ipek [8], lograron obtener el coeficiente de fricción 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.

Ramírez [9], 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 de 0.0187g 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 de 3.8 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 debido a que el coeficiente de fricción aumento de 0.28 a 0.47.

H.Elzanaty [10] 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, mostrando los mejores resultados a 950°C. 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 esto debido a la capa superficial cementada en el acero. 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 50-60 HRC.



Capítulo 2: Objetivos

2.1 Objetivo general:

-) Evaluar la resistencia al desgaste adhesivo del acero AISI 1020 cementado con carbón obtenido de biomasa a base de café.

2.2 Objetivos específicos:

-) Obtener material pulverizado de carbón vegetal a partir de la biomasa a base de café
-) Analizar el comportamiento de la dureza y de la microestructura de la capa cementada obtenida
-) Evaluar el comportamiento del desgaste adhesivo que presenta la superficie del acero cementado.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Cementación

La gran parte de las piezas mecánicas que componen todo tipo de máquinas son fabricadas con el fin de que el ciclo de vida útil y propiedades mecánicas sean uniformes en toda su estructura. Sin embargo, en ciertos mecanismos específicos (como por ejemplo engranajes) se necesitan piezas que posean superficies muy duras o con alta resistencia al desgaste. Los tratamientos térmicos y termoquímicos permiten cumplir con el aumento de las propiedades mecánicas del material y así evitar fallos prematuros en piezas donde las cargas son críticas.

La cementación es un tratamiento térmico y químico el cual un acero de bajo contenido de carbono es sometido a una atmosfera que le inyecta carbono a la superficie, esa inyección de carbono se va dando de afuera hacia adentro del acero por lo tanto depende del tiempo el grosor de la capa que se pueda lograr de cementación, la idea de la cementación es aumentar el contenido de carbono en la superficie para luego poder endurecerla con una reacción martensítica o a través de un temple la idea es que esa capa dura resista fricción, desgaste, golpes sin desgastar la superficie del material, sin embargo la parte interna que es de bajo contenido de carbono nunca va a poder endurecerse tanto por lo tanto va a ser capaz de soportar impactos y deformaciones; aquí lo que estamos obteniendo es un material duro en la superficie con una cascara definida y tenaz en el núcleo.

La cementación se puede obtener de distintas maneras, sometiéndose el material en hornos con atmosfera controlada, cementación con plasma o cementación con una caja y carbón; todos estos tratamientos requieren altas temperaturas por lo general entre 850°C y 1000°C se mantiene cierta cantidad de tiempo hasta que el material logre el espesor de la capa en la superficie. En la cementación con cementantes sólidos se utilizan materiales ricos en carbono donde suele emplearse el carbón vegetal (biomasa) y carbón mineral.

3.2 Cementación solida

En la cementación sólida, las piezas son sometidas a proceso de mecanizado y lijado para erradicar cualquier tipo de suciedad en la superficie. Se utilizan varios tipos de materiales para suministrar % de carbono al acero durante la cementación. Las más empleadas son el carbón vegetal y mineral con activadores de carbonato de bario y sodio.

En los procesos de cementación solida la fuente principal de carbono es el CO. Este se produce por un componente solido que reacciona dentro de la caja hermética, donde es introducido el material junto con el carbón; en este proceso el carbono absorbido por el acero se forma por la descomposición entre el CO Y EL CO₂[11].



3.3 Clases de materiales cementantes

Los compuestos carburantes comerciales tienen una mezcla de 10% a 20% de carbonatos alcalinos u otros metales, con carbón de leña o coke sin azufre. El carbonato de bario usualmente comprende de 60% a 70% del contenido total de carbonatos. El cementante más enérgico contiene el 40% de carbonato de bario (C_3B) y se emplea para cementar aceros cuando se requieren grandes profundidades cementadas.

3.4 Ejecución y aplicaciones de la cementación sólida

Las piezas previamente mecanizadas y lijadas para remover cualquier tipo de impurezas se introducen en una caja para cementar totalmente hermética en la cual a su vez se introduce la mezcla de carbón activado; posteriormente la caja es totalmente sellada con una mezcla de arcilla, caolín y agua para evitar incursión de oxígeno en el interior de la caja puesto que pueden existir fisuras y esto dañaría el proceso de cementación. La caja es introducida al otro donde es sometida a la temperatura correspondiente de cementación y sosteniéndola lo suficiente para obtener la profundidad de capa deseada.

3.5 Ventajas y desventajas de la cementación en caja

3.5.1 Ventajas:

-) Puede usarse en gran variedad de hornos, puesto que no requiere el uso de atmosferas controladas.
-) Es eficiente y económico para el proceso individual de una pequeña cantidad de piezas.
-) Ofrece una amplia selección de técnicas para cementación selectiva de piezas.

3.5.2 Desventajas:

-) No es adecuado para la producción de capas finas que requieran controles estrictos.
-) No se puede controlar el %C en la superficie.
-) El peso de la caja y el material reduce la velocidad de calentamiento y de enfriamiento y por ende se requiere más tiempo en la cementación[12].

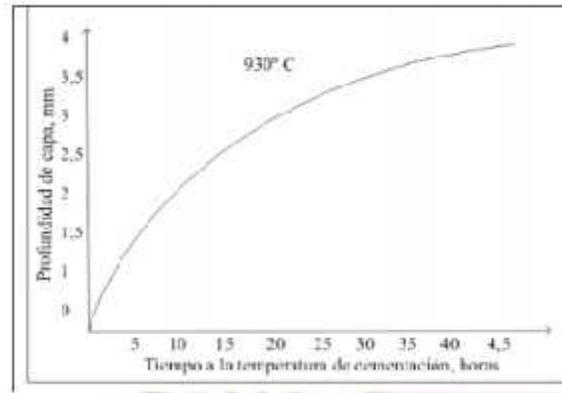
3.6 Temperatura de cementación

La temperatura de cementación en caja se realiza normalmente entre 800°C a 1000°C pudiendo incrementarse dependiendo del tamaño del grano del acero.

3.7 Velocidad de cementación

La velocidad a la cual se logra la capa en el material se incrementa rápidamente con la temperatura; donde la velocidad de cementación es más rápida al comienzo del ciclo y disminuye gradualmente a medida que este se extiende[12]. En la siguiente figura se muestra la profundidad de la capa en función del tiempo de cementación.

Figura 5 Cementación sólida en acero SAE 3115



Fuente: R.Aleman [12]

3.8 Desgaste

El desgaste puede definirse como la pérdida de material en la superficie de trabajo, cuando se ajusta un movimiento bajo acción de fuerza y contacto entre dos piezas. Esto genera daños en las dimensiones de las piezas lo cual conlleva a la disminución del ciclo de vida útil de una máquina. En todas las industrias se presenta desgaste en los componentes de las máquinas y, en algunos casos se acelera el fin de la vida útil debido a cargas de trabajo a las que esté sujeta[13].

3.9 Tipos de desgaste

3.9.1 Desgaste por adhesión

Se presenta cuando dos superficies tienen contacto entre ellas generando un rozamiento continuo. Estableciendo fuerzas adhesivas fuertes que arrancan los fragmentos de una superficie y se adhieren a la otra.



3.9.2 Desgaste por abrasión:

Este fenómeno se presenta siempre que estén presentes partículas duras entre las superficies en contacto, generando remoción por presencia de estas partículas en libertad de movimiento que se deslizan contra las superficies.

3.9.3 Desgaste por cavitación:

Es causado cuando un líquido en circulación (refrigerante, aceite, etc) está sujeto a cambios de presión o temperatura generando unas burbujas que se adhieren a las paredes del material y colapsan perforando el material.

3.9.4 Desgaste por corrosión

Es causado por la formación de óxido en la superficie del material, el cual debilita las paredes, exponiéndose a los fenómenos de deslizamiento y posteriormente perdiendo material.

3.9.5 Desgaste por deslizamiento

Es causado debido a un constante contacto entre dos superficies metálicas en presencia de material abrasivo o por falta de lubricación.

3.9.6 Desgaste por fatiga

Se origina como resultado de las cargas cíclicas, el cual probablemente es el mecanismo predominante de la mayoría de tipos de desgaste.

Capítulo 4: Material y equipos

4.1 Material

El acero AISI 1020 es uno de los aceros de bajo carbono más comúnmente utilizados. Tiene un contenido de carbono del 0.2% y aproximadamente de 0.5% de manganeso. Tiene una combinación equilibrada de resistencia y ductilidad y puede ser endurecido por procesos térmicos o termoquímicos.

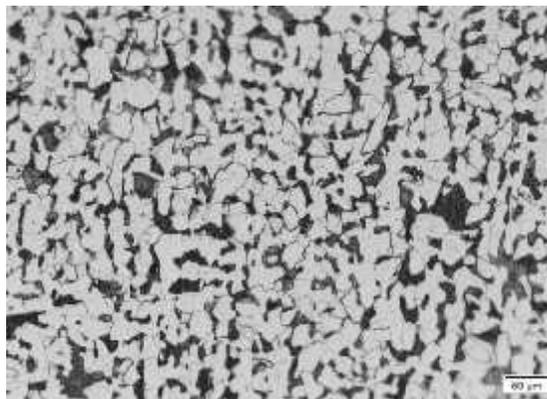
Su composición química es la siguiente:

Figura 6 Composición química acero AISI 1020

Componente	Símbolo	% Mínimo	% Máximo
Carbono	C	0.18	0.23
Manganeso	Mn	0.3	0.6
Fósforo	P	-	0.40 Max
Azufre	S	-	0.50 Max
Hierro	Fe	Balance	Balance

Fuente: A.AISI [14].

Figura 7 Micrografía del Acero 1020 Sin templar a 200x



Fuente: Autor

4.2 Equipos

4.2.1 Caja de cementación

La caja metalográfica fue utilizada para la quema de la biomasa (borra de café) utilizada como materia prima para obtener carboncillo y posteriormente para realizar las cementaciones de los discos incrustándolos en el carbón obtenido.



Figura 8 Caja de cementación



Fuente: Autor.

4.2.2 Cortadora metalográfica

La cortadora fue utilizada para extraer los fragmentos de superficie y borde de los discos cementados utilizados posteriormente para encapsularlos.

Figura 9 Cortadora metalográfica



Fuente: Autor.

4.2.3 Horno abarhepor

Horno Abarhepor mufla Modelo 1200-220 utilizado para la quema de la biomasa de café, cementación, temple y revenidos.

Figura 10 Horno Abarhepor



Fuente: Autor

4.2.4 Maquina pulidora

El proceso de pulido se realizó en la maquina GP-2 con el fin de obtener tanto la superficie limpia de los fragmentos del material encapsulados y proceder al ensayo metalográfico.

Figura 11 Maquina pulidora GP-2



Fuente: Autor.

4.2.5 Durómetro

El durómetro fue utilizado para medir durezas superficiales del material en estado comercial y después de realizar tratamientos térmicos.



Figura 12 Durómetro



Fuente: Autor

4.2.6 Banco de desgaste Pin On Disk

El banco de desgaste Pin On Disk fue utilizado para aplicar una carga sobre un pin a la superficie de los discos mecanizados recorriendo una distancia de 1000m a diferente distancia de radio y así evaluando pérdida de masa en el material por desgaste.

Figura 13 Banco de desgaste Pin-On-Disk



Fuente: Autor

4.2.7 Microscopio Óptico

El microscopio utilizado para obtener las imágenes metalográficas de las probetas encapsuladas fue el Olympus upright BX61FM.

Figura 14 Microscopio óptico



Fuente: Autor.

4.2.8 Cámara digital Cmos Olympus

La cámara digital utilizada para obtener las imágenes fue la CMOS OLYMPUS SC100, ya que esta al contar con un lente CMOS de 10,6 megapíxeles crea imágenes de alta resolución y con altos detalles especialmente cuando se trabaja a bajos aumentos.

Figura 15 Cámara digital CMOS OLYMPUS



Fuente: Autor

4.2.9 Software Stream-Basic

Con la ayuda del software Stream-Basic se obtuvieron imágenes y medidas de gran importancia para un adecuado análisis de los resultados de la carburación del acero.



Cualquier tipo de usuario está en la capacidad de realizar tareas complejas de análisis de imágenes a distintos aumentos y determinar medidas de capas superficiales en el material.

Figura 16 Software Stream-Basic



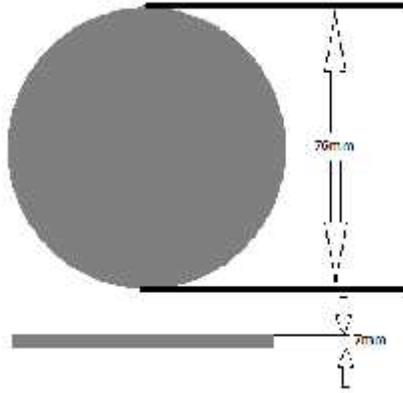
Fuente: Autor.

Capítulo 5: Procedimiento

5.1 Maquinado de los discos

Cinco discos fueron maquinados a partir de una barra cilíndrica de 76mm de diámetro de una barra de acero 1020 en estado comercial hasta dejarlo con un peso cercano a 200g y un espesor de 6mm a 6mm. En la (Figura 17) se muestra la geometría que tiene cada disco y en la (Tabla 1) el peso inicial del disco y nomenclatura del disco con los tratamientos a realizar.

Figura 17 Dimensiones Del Disco



Fuente: Autor.

Discos en estado comercial y sometidos a tratamientos térmicos:

Tabla 1 TABLA DE DATOS OBTENIDOS DE DISCOS

DISCO	TRATAMIENTO EN EL DISCO	PESO DEL DISCO
I	Acero en estado comercial	156.54 g
II	Cementación + temple en agua	163.85g
III	Cementación	169.77g
IV	Cementación + temple en agua + revenido	166.54g
V	Cementación + temple en aceite 10W30	170.25g
VI	Cementación + temple en aceite 10W30 + revenido	165.14g

Fuente: Autor

5.2 Preparación de la biomasa

El material cementante seleccionado para llevar a cabo el proceso de cementación fue el carbón obtenido a partir de biomasa de café. Inicialmente la borra de café fue introducida al interior de la caja cementante para después ser sometida a una temperatura de 500°C durante un tiempo de subida de 1.5horas y un tiempo de sostenimiento de 4 horas hasta la obtención del carbón. En total se realizaron 7 procesos de carbonización de biomasa a las mismas condiciones con el fin de recolectar 6 kg de agente cementante.



Figura 18 Caja de cementación con Carbón de biomasa de café



Fuente: Autor

Posteriormente al adquirir el carbón de borra de café se procede a moler para disminuir su granulometría y evitar incursiones de trozos grandes y compactos de carbón.

Figura 19 Maquina de moler



Fuente: Autor.

Finalmente, el carbón de biomasa de café con 77.1841%C está listo para realizar el proceso de cementación con los discos de acero AISI 1020.

Figura 20 Carbón a base de biomasa de café

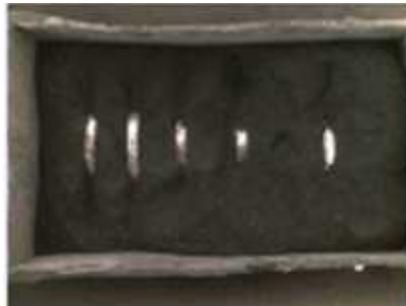


Fuente: Autor

5.3 Preparación y sellado de la caja de cementación

Al obtener los discos mecanizados y el carbón de biomasa de café, se procede a la preparación de la caja de cementación, donde en el interior de la caja se va a verter el carbón y se van a localizar los 5 discos de acero AISI1020.

Figura 21 Caja de cementación lista para el tratamiento térmico



Fuente: Autor

Una vez la caja cementante esta lista se procede a sellarla herméticamente para prevenir incursión de oxígeno al interior, donde se ajusta y se sella la tapa con una mezcla 500g de arcilla, 500g de caolín, 80mL de miel melaza y 120mL de agua.



Figura 22 Caja de cementación sellada herméticamente



Fuente: Autor

Discos después del proceso de cementación.

Figura 23 Discos cementados



Fuente: Autor

Discos antes y después del proceso de cementación.

Figura 24 Disco acero AISI 1020 en estado comercial



Fuente: Autor

Figura 25 Disco acero AISI 1020 cementado



Fuente: Autor

5.4 Post-Tratamientos a la cementación

Una vez finalizado el proceso de cementación se procedió a realizar los tratamientos térmicos posteriores como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2 Parámetros de tratamientos térmicos

Disco	Tratamiento térmico	Medio de enfriamiento	Temperatura máxima (°C)	Tiempo de subida (Minutos)	Tiempo de sostenimiento (Minutos)
I	Acero en estado comercial	NT	NT	NT	NT
II	Cementación + temple en agua	Agua	800	30	50
III	Cementación	M.ambiente	970	90	510
IV	Cementación + temple en aceite 10W30	Aceite 10W30	800	30	50
V	Cementación + temple en agua + revenido	M. Ambiente	400	30	50
VI	Cementación + temple en aceite 10W30 + revenido	M. Ambiente	400	30	50

Fuente: Autor



5.5 Medición de durezas

En la medición de durezas en el material se utilizó el durómetro con punta de diamante, característico por su uso en la escala Rockwell C. Se realizan macrodurezas a lo largo de la superficie de cada disco con un total de 8 indentaciones.

Figura 26 Medición de durezas a lo largo del disco



Fuente: Autor

5.6 Ensayo de desgaste

Los ensayos de desgaste se realizaron sin la presencia de lubricantes y otra sustancia influyente en el desgaste del material. En el banco Pin-On-Disk, se utiliza una esfera de óxido de zirconio (ZrO_2), donde se aplicó una carga de 50N, una velocidad lineal de 0.342m/s durante un recorrido de 1000m. Se realizó el mismo proceso a lo largo de la cara del disco a radios de 10, 15, 20 y 25mm desde el centro hacia la periferia. Dando como resultado la aparición de surcos generados por el rozamiento de las dos superficies.

Figura 27 Surcos a lo largo de la capa del disco



Fuente: Autor

A continuación, se observa la frecuencia y velocidad angular utilizados en el ensayo; así como el radio y el dato obtenido de la velocidad lineal.

Tabla 3 Parámetros del ensayo de desgaste

Radio (mm)	Frecuencia (Hz)	Velocidad Angular(rpm)	Velocidad Lineal(cm/s)
10	59.18	325.50	34.08
15	39.45	217.00	325.5
20	29.59	162.75	325.5
25	23.67	130.20	325.5

Fuente: Autor.

5.7 Registro de masa

Se hizo un registro de masa antes y después de cada ensayo de desgaste, donde se obtuvo la pérdida de masa al realizarlo.

Tabla 4 Promedio de pérdida de masa

DISCO	TRATAMIENTO EN EL DISCO	PROM PERDIDA MASA (g)
II	Cementación + temple en agua	0.01317
III	Cementación	0.1647
IV	Cementación + temple en aceite 10W30	0.01904
V	Cementación + agua + revenido	0.00983



VI	Cementación + temple en aceite 10W30 + revenido	0.0128
----	---	--------

Fuente: Autor

5.8 Proceso metalográfico

En este proceso se realizaron cortes para obtener muestras de la superficie y el borde del disco, seguidamente las muestras son encapsuladas y lijadas para poder estudiar la microestructura presentada después de los tratamientos térmicos.

5.9 Pulido y ataque químico

El proceso de pulido se realizó después de encapsular las muestras tomadas de los discos con la pulidora metalográfica, donde se utilizaron lijas desde la 80 hasta la 2000 obteniéndose una superficie libre de impurezas, uniforme y libre de rayados. Después del proceso de lijado se realizó el proceso de pulido donde se pasan las superficies previamente lijadas por un paño con alúmina líquida para por último realizarse el ataque químico de las muestras con vicral y nital.

Figura 28 Probetas encapsuladas



Fuente: Autor.

Figura 29 Proceso de pulido



Fuente: Autor.

Capítulo 5: Resultados

5.1 Durezas superficiales

En la **Tabla 5** y **Tabla 6** se evidencia los resultados obtenidos en durómetro con el fin de observar que cambios tuvo de dureza en la superficie de cada uno de los discos tratados térmicamente:

Tabla 5 Dureza del Disco I en estado comercial

DISCO	TIPO DE ACERO	DUREZA (HRB)
I	AISI 1020 EN ESTADO COMERCIAL	74.23

Fuente: Autor.

Tabla 6 Dureza de los Discos AISI 1020 con tratamiento térmico

DISCO	TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA (HRC)
II	Cementado y templado en agua	59.13
III	Cementado	28.93
IV	Cementado y templado en aceite 10W30	54.37
V	Cementado, templado en agua y revenido	51,06
VI	Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido	45.86

Fuente: Autor.

5.2 Micrografías

En la tabla 7 enumerarán los discos y la numeración de las imágenes metalográficas después del ataque químico con el fin de observar el comportamiento de la microestructura de cada uno dependiendo sus respectivos procesos térmicos.

Tabla 7 Numeración de imágenes metalográficas

DISCO	NOTAS
I	Imágenes de la cara del disco del acero en estado comercial.
II	Imágenes de la cara del disco cementado y templado en agua.
III	Imágenes de la capa del disco cementado
IV	Imágenes de la cara del disco cementado y templado en aceite 10w30.



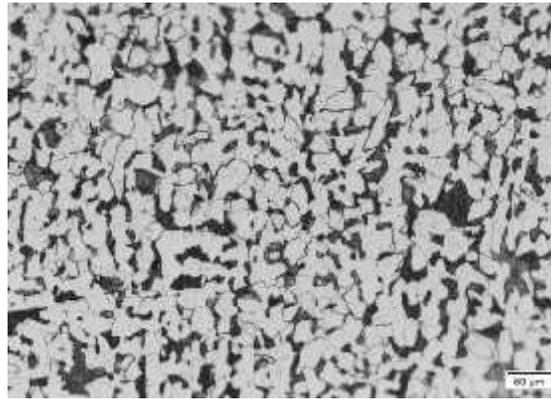
V	Imágenes de la capa del disco cementado, templado en agua y revenido.
VI	Imágenes de la capa del disco cementado, templado en aceite 10w30 y revenido.

Fuente: Autor

Disco I

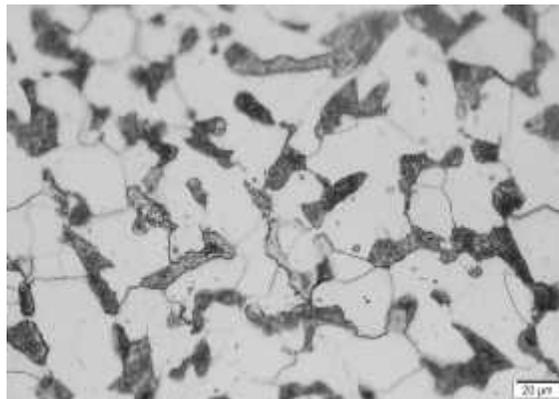
En estado de acero AISI 1020 en estado comercial, se puede observar un gran contenido de ferrita junto con granos de perlita. Lo que se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 30 (A) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x200]



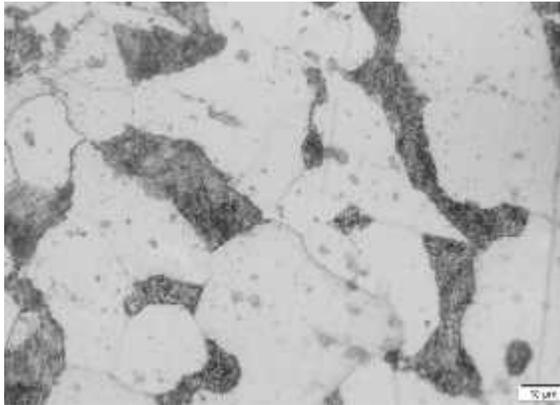
Fuente: Autor

Figura 31 (B) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x500]



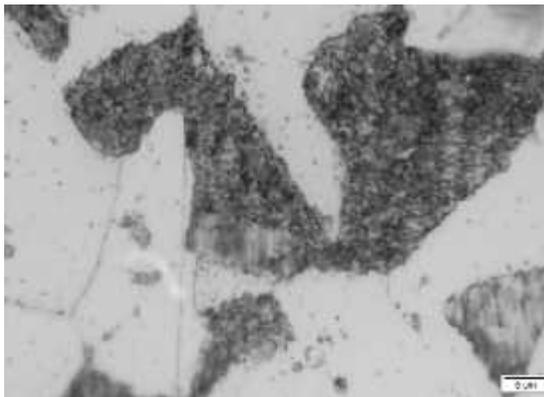
Fuente: Autor

Figura 32 (C) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x1000]



Fuente: Autor

Figura 33 (D) Acero AISI 1020 en estado comercial[Aumento x2000]

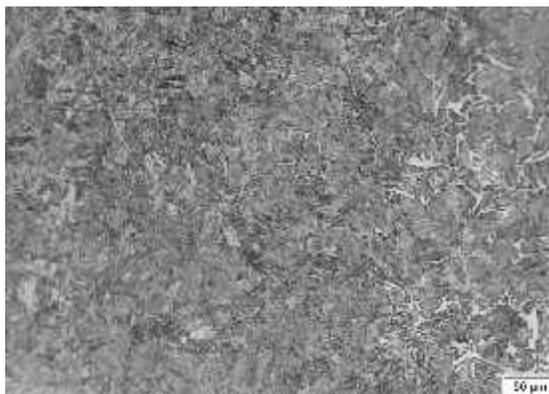


Fuente: Autor

Disco II

En la cara del disco cementado y templado en agua se presenta un aumento importante martensita en su capa. Lo que se puede observar en las siguientes figuras:

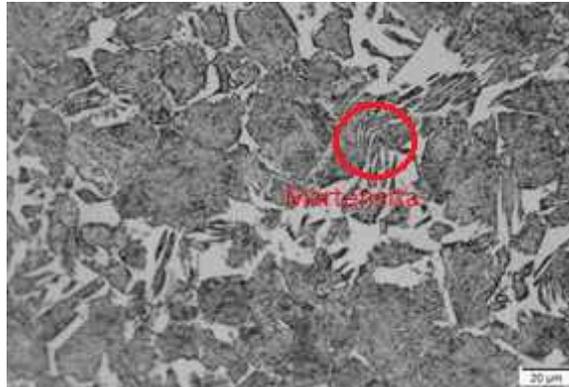
Figura 34 (E) Acero AISI 1020 cementado y templado en agua [Aumento x20]





Fuente: Autor

Figura 35 (F) Acero AISI 1020 cementado y templado en agua [Aumento x50]



Fuente: Autor

Figura 36 (G) Acero AISI 1020 cementado y templado en agua [Aumento x200]

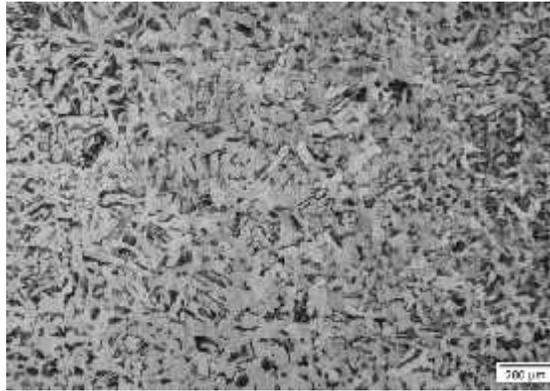


Fuente: Autor

Disco III

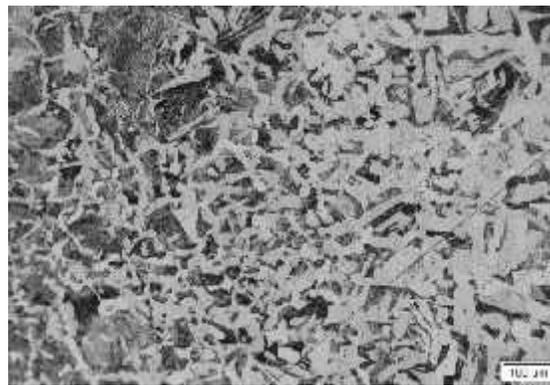
En la capa del disco cementado se puede observar que presenta aumento de perlita en su microestructura y disminución de ferrita. Lo que se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 37 (H) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x5]



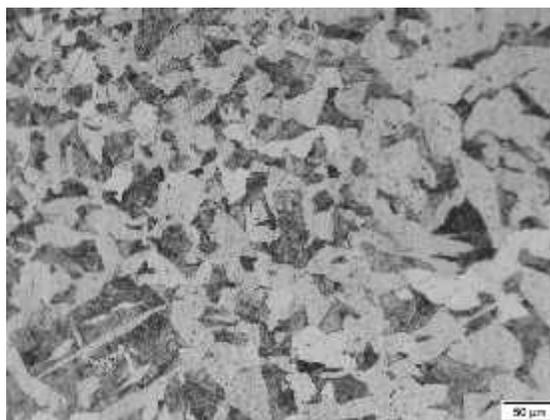
Fuente: Autor

Figura 38 (I) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x10]



Fuente: Autor

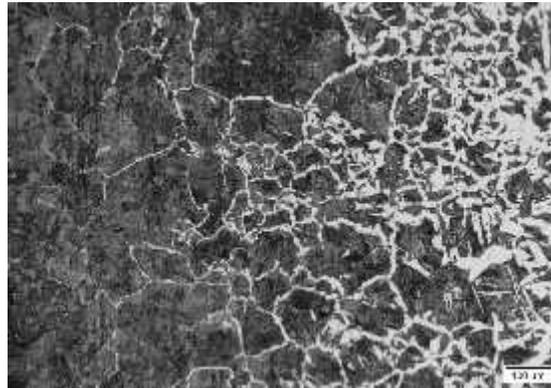
Figura 39 (J) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x20]



Fuente: Autor



Figura 40 (K) Acero AISI 1020 cementado con carbón de biomasa de café [Aumento x200]



Fuente: Autor

Disco IV

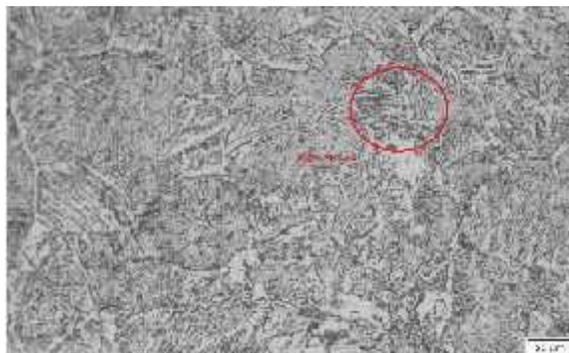
En la cara del disco cementado y templado en aceite 10W30 podemos observar que presenta una microestructura martensítica. Lo que se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 41 (L) Acero AISI 1020 cementado y templado en aceite (Aumento x20)



Fuente: Autor

Figura 42 (M) Acero AISI 1020 cementado y templado en aceite (Aumento x50)



Fuente: Autor

Disco V

En la capa del disco cementado, templado en agua y revenido presenta una microestructura martensítica revenida. Lo que se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 43 (N) Acero AISI 1020 CEMENTADO, TEMPLADO EN AGUA Y REVENIDO [Aumento x50]



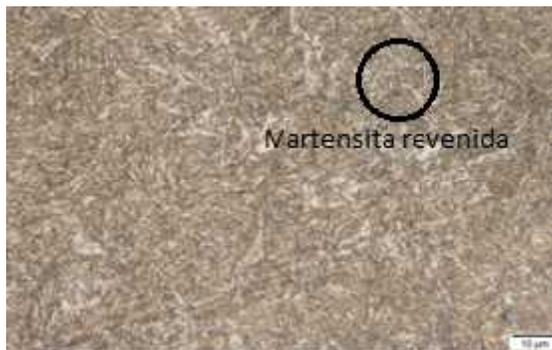
Fuente: Autor

Figura 44 (O) Acero AISI 1020 CEMENTADO, TEMPLADO EN AGUA Y REVENIDO [Aumento x50]



Fuente: Autor

Figura 45 (P) Acero AISI 1020 CEMENTADO, TEMPLADO EN AGUA Y REVENIDO [Aumento x100]





Fuente: Autor

Disco VI

En la capa del disco cementado, templado en agua y revenido se presenta una estructura con martensita revenida granular. Lo que se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 46 (Q) Acero AISI 1020 Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido [Aumento x10]



Fuente: Autor

Figura 47 (R) Acero AISI 1020 Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido [Aumento x20]



Fuente: Autor

Figura 48 (S) Acero AISI 1020 Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido [Aumento x50]



Fuente: Autor

5.3 Pérdida de masa

Se evidencio que el Disco V presenta la menor pérdida de masa debido a los tratamientos térmicos realizados y a la velocidad de enfriamiento del temple en agua.

Tabla 8 Pérdida de masa en cada Disco

MUESTRA	PERDIDA DE MASA PROMEDIO/DISCO (g)
Disco II	0.1647
Disco III	0.01317
Disco IV	0.01904
Disco V	0.00983
Disco VI	0.0128

Fuente: Autor

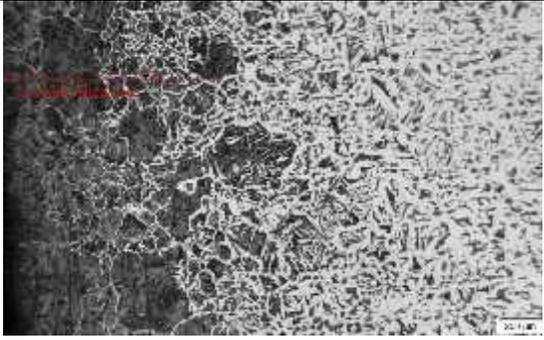
5.4 Profundidad de capa

En la tabla 9 se evidencia la profundidad de capa de cada uno de los discos con tratamientos térmicos realizados.

Tabla 9 Profundidad de capa

TIPO DE TRATAMIENTO	PROFUNDIDAD ALCANZADA POR LA CAPA CEMENTADA	IMAGENES
O		



Cementado	1003.90 μm	
Cementado, templado en agua y revenido	1287.03 μm	
Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido	1113.53 μm	

Capítulo 6: Análisis de resultados

En las imágenes del Disco I MICROGRAFIAS se observa la microestructura en aceros de bajo contenido en carbono como lo es el AISI 1020, donde la ferrita (representada por las regiones blancas) y se encuentra en mayor proporción que la perlita (representada por la región oscura), conservando una organización de microconstituyentes (contorno de grano) uniforme.

Después de cementar el acero con el carbón de borra de café se muestra un cambio microestructural en comparación con las imágenes del Disco III MICROGRAFIAS presenta en su capa un aumento en las regiones perlíticas desde la periferia hacia el centro del disco, con una profundidad de capa aproximada de 1035.6 μm . Se puede observar la reducción de las regiones ferríticas a nivel superficial desde el centro hacia la periferia del mismo; además de aumentar su dureza a 28.93 HRC.

En la literatura consultada se encuentran resultados similares a los mencionados anteriormente donde dice Ali [1] dice que la perlita es un agregado eutectoide, formado por capas alternativas de ferrita y cementita (Carburo de hierro, Fe_3C), donde aparece en el enfriamiento lento de la austenita, es decir, dentro del horno o al aire (normalizado). Aramide Et al [15] 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.

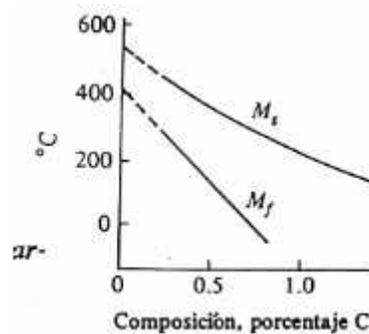
Al analizar las micrografías del Disco II y Disco IV MICROGRAFIAS , se observa una microestructura martensítica predominante. En el Disco II se logra observar una estructura con generación de agujas de martensita y siendo la sombra oscura la sombra de los picos; resultando similar a las figuras plasmadas en la investigación de Ruiz et al[16] donde se trabajó con un acero de mediano carbono en ese caso AISI 1045. A diferencia del Disco IV que nos muestra una estructura martensítica en menor proporción con los contornos de grano definidos y agujas alargadas puesto que no se logra una transformación completa de la austenita en martensita durante el temple debido a su velocidad de enfriamiento (aceite 10w30).



Según Ali [1], la martensita es el constituyente típico de los aceros templados. Consiste en una solución sobresaturada de carbono en hierro. Los átomos de carbono son los responsables de la deformación de la red cristalina del hierro, que se transforma en tetragonal, V. Capote [17] dice que la dureza de la martensita puede atribuirse precisamente a la tensión que produce en sus cristales esta deformación de la misma manera que los metales deformados en frío deben a los granos deformados y en tensión el aumento de dureza que experimentan. Después de la cementita es el constituyente más duro de los aceros.

Las micrografías del Disco V (Figura 29) y Disco VI (Figura 30), al ser templados y después revenidos, se logra observar la presencia de martensita revenida, según el artículo [18] es importante destacar que el contenido de carbono afecta durante el enfriamiento, tanto a las temperaturas de inicio (M_s) y de fin (M_f) de la transformación martensítica.

Figura 49 %C en función de la temperatura

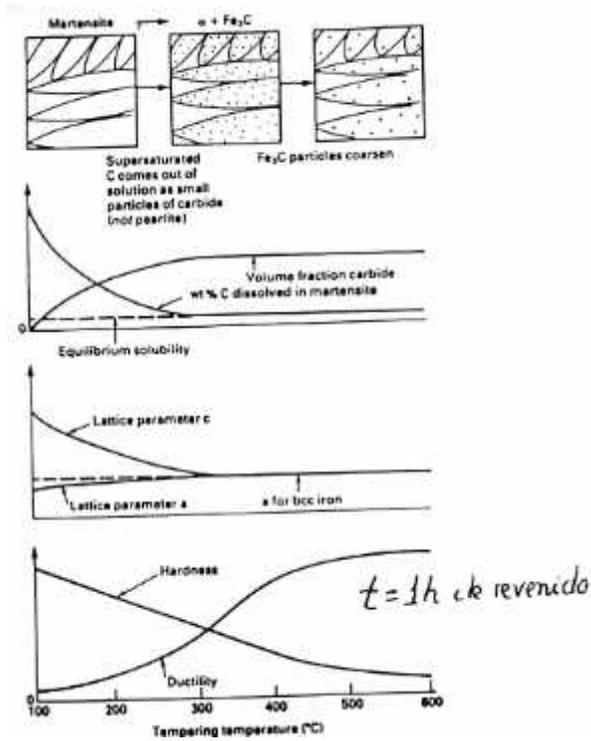


Fuente: Aleman [12]

Si el contenido de C es muy alto, como resultado de un temple hasta la temperatura ambiente, podría quedar martensita retenida, ya que la temperatura inicial (M_s) estaría por debajo de la temperatura ambiente.

Al revenir la martensita, se generará difusión atómica en una matriz metaestable, altamente distorsionada y con muchas interfaces. En el revenido el sistema deberá evolucionar hacia dos fases de equilibrio, que son la ferrita y la cementita. La estructura fina resultante de la martensita revenida son finas partículas de la fase cementita en una matriz de la fase ferrita.

Figura 50 Efecto del revenido en las propiedades de un acero al carbono



Fuente: [18]

Los resultados mostrados y analizados para cada uno de los tratamientos térmicos a los que fue sometido el acero AISI 1020 permiten observar que al cementar con carbón obtenido de la borra de café sin utilizar ningún tipo de activador y aplicando posteriormente un temple y revenido mejor las propiedades mecánicas como dureza, ductilidad y resistencia al desgaste del material.

7. Conclusiones



-) Para obtener los 800g de carbón de borra de café necesarios para la cementación de los discos, se realizaron en total siete procesos de carbonización, ya que al retirar la tapa de la caja cementante se obtenía el 40% de carbón del 100% de materia prima introducida.
-) El uso del carbón de borra de café como agente cementante durante el proceso de cementación sólida al acero AISI 1020 nos entregó resultados muy favorables al aumentar la dureza en la capa superficial con valores entre 45 - 60 HRC.
-) La microestructura del disco cementado, templado en agua y revenido presentó el mayor grosor de capa siendo de 1287,03 μm , La microestructura del disco cementado, templado en agua y revenido presentó el mayor grosor de capa siendo de 1287,03 μm . Comparándolo con la capa del disco cementado de 1003.90 μm , y el cementado, templado en aceite 10W30 y revenido que es de 1113.53 μm .
-) El uso del carbón de borra de café en el proceso de cementación entregó resultados positivos del acero AISI 1020, elevando su dureza superficial. En el caso de los estudios realizados el Disco IV presentó en mayor medida pérdida del material siendo de 0.00983g.

Referencias

- [1] S. Ali *et al.*, “No Titleبیبیب,” , vol. , no. 2, p. , 2018.
- [2] M. A. Raza, H. Asgar, A. Abdullah, R. Ahmad, A. Inam, and F. A. Ghauri, “Carburising of Low-Carbon Steel Using Carbon Black Nanoparticles,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 11, pp. 4661–4667, 2016.
- [3] D. E. L. a Gestión and C. En, “Universidad Autonoma De Coahuila,” pp. 6–7, 2009.
- [4] 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,” *Am. J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 29–33, 2013.
- [5] C. I. M. and D. O. K. Reginald Umunakwe, Obinna C. Okoye, “Effects of Carburization with Palm Kernel Shell/Coconut Shell Mixture on the Tensile Properties and Case Hardness of Low...,” *FUOYE J. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [6] I. P. Aondona and A. Offiong, “The Effect of Holding Time on the Hardness of Case Hardened Mild Steel,” vol. 2, no. 3, pp. 31–34, 2014.
- [7] P. Kishore, A. K. Turaka, B. N. Srinivas, and K. S. Rao, “Study of Physical Properties of Bio-Waste Materials Like Rice Husk Ash Prepared in Different Atmospheres and Temperatures,” *Int. J. Recent Innov. Eng. Res.*, vol. 2, no. 7, pp. 26–31, 2017.
- [8] B. Selçuk, R. Ipek, and M. B. Karami , “A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 141, no. 2, pp. 189–196, 2003.
- [9] U. D. E. E. L. Salvador, “Ingeniero mecánico,” 2017.
- [10] H. Elzanaty, “the Effect of Carburization on Hardness and Wear Properties of the Mild,” vol. 6, no. 4, pp. 995–1001, 2014.
- [11] W. J. Salazar, “Metalografía y tratamientos termicos,” pp. 1–11, 2010.
- [12] R. Aleman, “Evaluacion Del Proceso De Endurecimiento Superficial De Un Acero Sae :1020 Mediante Carburización Sólida Y Posterior Temple Y Revenido,” 2014.
- [13] A. S. R. (congres. iberoamericano de ingenieria mecanica) Ayala Rodriguez S. , Villa y Rabasa G., Castillo Sanchez M., “Estudio Del Comportamiento Al Desgaste De Aceros 1018 Y 8620 Recubiertos Mediante Un Proceso De Cementación Sólida.,” *Congreso. Pucp. Edu. Pe*, 2007.
- [14] A. Aisi, “Acero aisi - 1020 1.,” 2017.
- [15] F. O. Aramide, S. A. Ibitoye, I. O. Oladele, and J. O. Borode, “Pack carburization of mild steel, using pulverized bone as carburizer: Optimizing process parameters,” *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.*, vol. 9, no. 16, pp. 1–12, 2010.
- [16] E. A. Pérez Ruiz, A. C. Galeano Perilla, and L. I. Negrín Hernández, “Evaluación de la dureza y microestructura del acero 1045 templado en sustancias refrigerantes no tradicionales,” *Sci. Tech.*, vol. 21, no. 3, p. 213, 2016.
- [17] V. Capote, “Metalografía,” *Temas para la Educ.*, vol. 17, pp. 1–14, 2011.
- [18] “ (مطالعه) آبهای تصفیه نانوفیلتراسیون رشیدیمهرآبادی . فاضلی، ع. روستایی، م. . “No Title,” pp. 1–4.



A. Anexo: Artículos científicos

<..\juan\EntregaFinalTDG\FinalTDG\ArticulosCientificos>

B. Anexo: Documentos

[..\juan\EntregaFinalTDG\FinalTDG\Documentos](#)

C. Anexo: Imágenes de procesos y equipos

<..\juan\EntregaFinalTDG\FinalTDG\ImagenesProcesosEquipos>

D. Anexo: Imágenes de metalografías

<..\juan\EntregaFinalTDG\FinalTDG\ImagenesMetalografias>