

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CEMENTACIÓN GASEOSA PARA EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE ACEROS

*Oscar E. Ríos¹, Claudia P. Serna¹, Rufino Medina¹, Ricardo E. Aristizábal¹

1: Grupo GIPIMME, Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

*E-mail: eduardo.rios@udea.edu.co

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CEMENTACIÓN GASEOSA PARA EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE ACEROS

RESUMEN: En el presente trabajo se describe el diseño, construcción y prueba de un equipo a escala de laboratorio para tratamientos térmicos con atmósfera controlada para el estudio de la carburización gaseosa de aceros. El equipo posee las siguientes características: producción controlada de una atmósfera gaseosa que está compuesta por una mezcla de gas endotérmico sintético (20% CO, 40% N₂, 40% H₂) y gas acetileno (C₂H₂), brindando la posibilidad de obtener diferentes potenciales de carbono (Cp), zona de reacción isotérmica, inerte y hermética. Para la puesta a punto del equipo se trabajó con probetas de acero AISI-SAE 1020, este acero es comúnmente utilizado en la fabricación de piezas como bujes, piñones, pasadores y rodillos, las cuales requieren una profundidad de capa total cementada de hasta 1.2 mm. En las muestras cementadas se caracterizaron la microestructura por microscopía óptica, la composición química por espectrometría de emisión óptica y las propiedades mecánicas por barrido de microdureza Vickers en la sección transversal. Los resultados permiten evidenciar un mayor control y eficiencia en la transferencia de carbono durante el ciclo de carburización, favoreciendo la optimización de recursos y tiempos de proceso.

Palabras Claves: Cementación gaseosa, aceros bajo carbono, potencial de carbono, gas endotérmico sintético.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A GAS CEMENTATION SYSTEM FOR SURFACE TREATMENT OF STEELS

ABSTRACT: This article describes the design, construction and testing of a laboratory scale equipment for thermal treatment with controlled atmosphere for the study of steel gaseous carburization. The machine has the following characteristics: controlled production of a gaseous atmosphere consisting of a synthetic endothermic gas mixture (20% CO, 40% N₂, and 40% H₂) and acetylene (C₂H₂), providing the possibility of obtaining different carbon potentials (Cp) and the isothermal, inert and hermetic reaction zone. For equipment tuning it has been used samples of AISI-SAE 1020 steel, this material is commonly used in the manufacture of pieces like bushings, sprockets, pins and rollers, which require a depth of total cemented layer up to 1.2mm. In cemented samples microstructure were characterized by optical microscopy, chemical composition by optical emission spectrometry and mechanical properties by Vickers microhardness cross section scattering. The results show an enhanced control and efficiency in

the carbon transfer during the carburization cycle with acetylene addition, favoring resources optimization and time processing.

Keywords: Carburizing gas, low carbon steel, carbon potential, synthetic endothermic gas.

1 INTRODUCCIÓN

La cementación es un tratamiento térmico por el cual el contenido de carbono de la superficie en una pieza de acero con bajo carbono aumenta debido a la exposición a una atmósfera rica en carbono a una temperatura dentro del campo de fase austenítico. El endurecimiento se obtiene cuando la pieza se temple y la capa superficial de alto carbono forma martensita.

El diagrama Fe-C muestra que la máxima solubilidad del carbono en la austenita está en el rango entre 0.8% en la temperatura eutécticoide y alrededor de 2% en la temperatura eutéctica [1]. Aunque, los elementos aleantes reducen la solubilidad del carbono, cantidades más que suficientes de éste pueden introducirse dentro de la austenita en un acero al carbono sin alear o aleado por cementación para producir martensita de máxima dureza después del temple. Pueden presentarse algunos inconvenientes, tales como la formación de carburos, martensita frágil o austenita retenida, si el contenido de carbono es demasiado alto. Por estas razones el contenido máximo de carbono en aceros cementados se controla generalmente entre 0.8 y 1% en peso [2].

La cementación se realiza frecuentemente entre 850°C y 950°C pero a veces se utilizan temperaturas mayores para reducir el tiempo del tratamiento térmico o producir capas de alto contenido de carbono de mayor profundidad [3]. La introducción del carbono en la austenita durante la cementación está influenciada por dos procesos importantes: uno es la reacción que causa que el carbono sea absorbido en la superficie del acero; y el otro es la velocidad a la cual el carbono puede difundirse desde la superficie hacia el interior del acero. El carbono se introduce por el uso de atmósferas gaseosas (cementación gaseosa), baño de sales (cementación líquida) y compuestos sólidos (cementación en caja) [4]. En los procesos de cementación con agentes carburantes sólidos o líquidos, se obtiene el gas cementante en la proximidad inmediata de la superficie que se va a carburar. El gas formado en estas condiciones tiene una composición química apenas controlable y solo se puede modificar limitadamente [5]. La cementación gaseosa es muy usada y brinda capas cementadas más gruesas que las dadas por los otros métodos porque [6]:

- a) La temperatura de cementación se puede escoger entre límites amplios.
- b) Es posible ajustar la cantidad de gas cementante al área de la superficie que se va a cementar.
- c) Puede variarse la actividad del cementante.
- d) Es posible acelerar la cementación por adición de gases carburantes.

La composición del gas se puede determinar para conocer el potencial de carbono (C_p) el cual indica la concentración máxima de carbono que alcanza la superficie a carburar [7]. Hay una serie de métodos para medir y controlar continuamente el C_p : el análisis por espectroscopia de infrarrojo de la proporción de monóxido de carbono de la atmósfera del horno, el punto de rocío; sabiendo la temperatura a que condensa el agua de la atmósfera del horno y por uso de sonda de

carbono/oxígeno, la cual utiliza la presión parcial de oxígeno dividido por la presión parcial de monóxido de carbono (CO) junto con la temperatura para calcular el porcentaje de carbono disponible en la superficie de las piezas de trabajo [8].

2 CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

La cementación gaseosa requiere de tres procesos que son: preparación de la atmósfera o de la mezcla gaseosa a utilizar, proceso de carburización y análisis de los gases involucrados en el proceso. Con base en esto, el equipo de cementación se dividió en tres zonas: preparación de atmósfera, de carburización o reacción y de análisis de gases. Cada zona se diseñó de tal manera que fuera un módulo autónomo que cumpliera con los objetivos asignados y que al unirlos formaran el sistema de cementación. Esta planeación permitió que el sistema fuera versátil, fácilmente modificable, de fácil desmonte y reparación.

Dentro de los requerimientos de diseño se presentaron las siguientes necesidades para cumplir con las exigencias de la investigación: producción controlada de atmósfera para carburización, ingreso de mezclas gaseosas homogéneas, condiciones de hermeticidad en el horno, zona isotérmica de trabajo en el reactor, disponibilidad de un amplio rango de temperaturas y análisis de los gases involucrados en el proceso.

2.1 Montaje del sistema de cementación gaseosa

2.1.1 Zona preparación de atmósfera

El diseño de esta parte del equipo consistió en planificar como sería la entrada de los gases de cementación a la zona de reacción. En las Figuras 1(a) y 1(b) se muestra la disposición de los componentes de esta zona. Se dispuso de conexiones para la entrada de gases, los cuales convergen en un mezclador, el cual tiene por objeto entregar atmósferas a la zona de reacción con una amplia gama de composiciones y concentraciones.

El mezclador cuenta con un manómetro de presión, un sistema de seguridad el cual se dispara (libera presión) cuando el sistema alcanza los valores máximos permisibles de operación, que vienen dados por la tubería de acero inoxidable de ¼" que se utiliza para el transporte de los gases y que soportan un máximo de 120 psi (827 kPa) de presión. A la salida del mezclador se encuentra un rotámetro marca Dwyer que puede controlar caudales de 100 a 1000cc/min de mezcla cementante en condiciones normales.

Las líneas de conducción de los gases hasta la entrada a la zona de reacción se realizaron con tubería de acero inoxidable de ¼". Se cuenta con una válvula de seguridad (¼" de giro) a la salida del mezclador, a fin de poder separar las zonas de reacción y preparación de atmósfera.

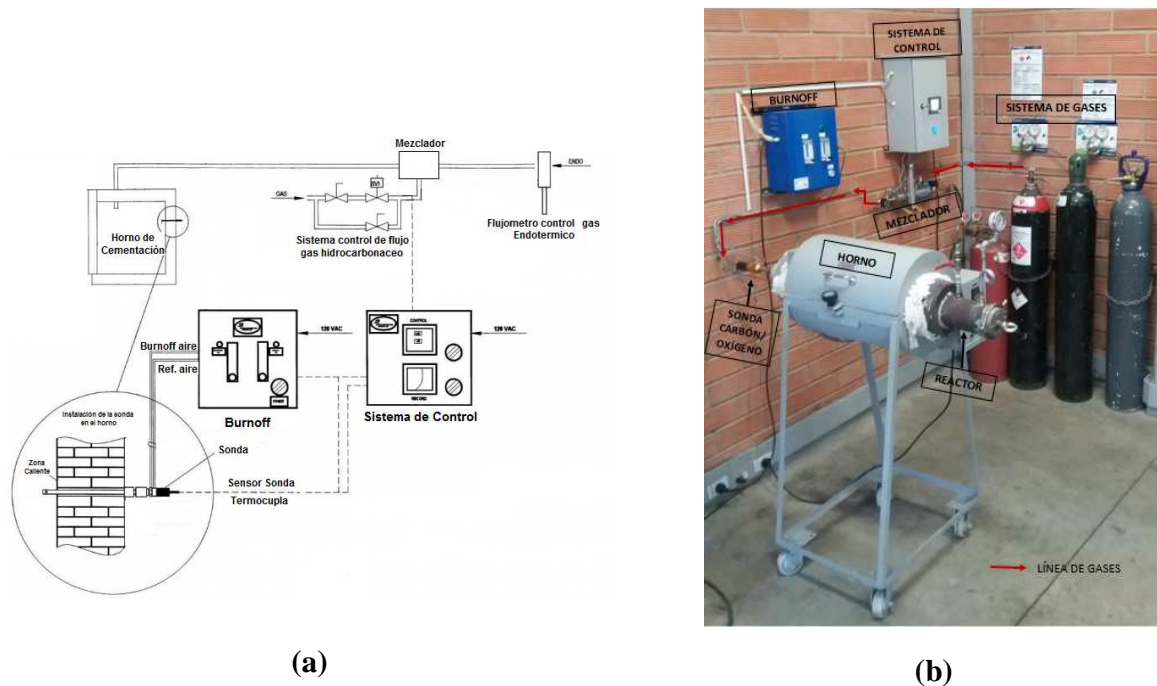


Figura 1. Sistema de cementación Universidad de Antioquia: (a) Plano Sistema de cementación, (b) Imagen del equipo de laboratorio montado para tratamientos térmicos con atmósfera controlada.

2.1.2 Zona de Reacción

Para obtener resultados uniformes en las capas cementadas, es importante que no existan diferencias apreciables de temperatura en las piezas a tratar, lo cual dependerá de la densidad de esta, del diseño del reactor y la velocidad de calentamiento y circulación de la atmósfera. Por lo que es importante garantizar una zona de reacción hermética, isotérmica e inerte. Para cumplir con estas características se optó que el reactor fuera un tubo circular de 0.7 m de longitud, un diámetro nominal de 0.115 m en acero al carbono ASTM A-550 Grado 50.

El reactor descansa dentro de un horno de calentamiento por resistencias que cuenta con un controlador de temperatura digital PID autónomo que permite hasta ocho rampas de calentamiento. En la Figura 2 se observa la disposición del reactor en el horno. Dicha ubicación permite obtener una zona isotérmica de 0.3 m en el interior del reactor, en su sección media, donde la variación máxima de temperatura es de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. El horno puede llegar hasta una temperatura máxima de 1200°C en un tiempo de 4 horas.

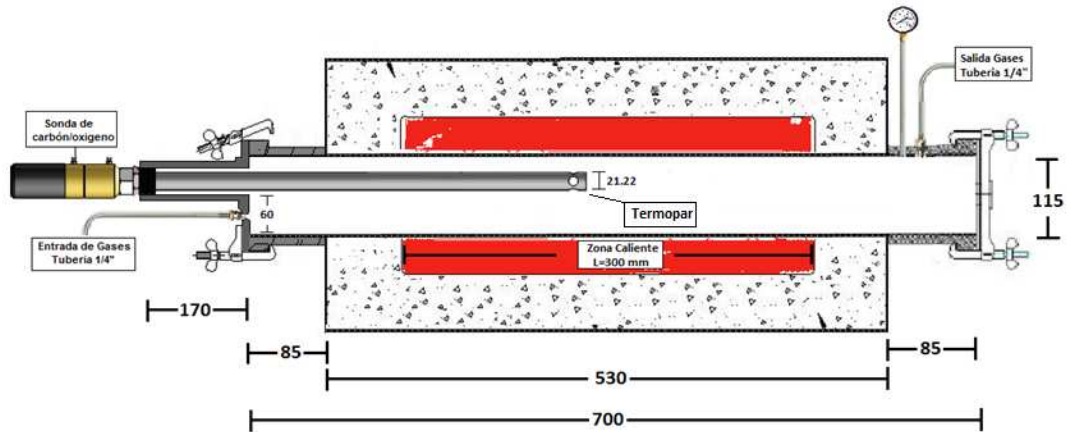


Figura 2. Esquema reactor de cementación (medidas en mm).

2.1.3 Zona de control y seguimiento de la atmósfera cementante

El monitoreo de la atmósfera cementante es realizado por una sonda de carbono/oxígeno. La sonda está instalada en el horno de tratamiento térmico, como se ilustra en la Figura 2, la señal de salida es una tensión continua función de la diferencia de presiones parciales del oxígeno entre los electrodos que componen la sonda, la cual incorpora un termopar tipo S cuya señal es usada por el convertidor de señal o regulador 9120, marca Super Systems Inc. Figura 1(a), para el acondicionamiento de las señales y de esta manera conocer el valor del C_p .

A la salida del reactor hay una derivación al exterior, cerrada por una válvula de aguja, cuyo fin es reducir la presión del sistema en caso de taponamiento o sobrepresiones, y es útil en la quema o extracción de muestras gaseosas sin tratar.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales

Se utilizaron probetas cilíndricas de acero AISI-SAE 1020 comercial de 50 mm de diámetro cuya composición se determinó mediante espectrometría de emisión óptica en un equipo marca Bruker Magellan, modelo Q8. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1. La barra de acero se dividió en discos de 10 mm de espesor a los cuales se les realizó el respectivo tratamiento térmico de carburización.

Tabla 1. Composición química en porcentaje en peso de las probetas de acero AISI-SAE 1020.

Fe	C	Si	Mn	P	S
98.77	0.204	0.180	0.703	0.023	0.021
Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.018	0.003	0.004	0.039	0.001	0.001

Para la carburización se utilizó gas endotérmico sintético de composición 20%CO, 40%N₂ y 40%H₂, al que se le adicionó 10% de gas acetileno, con el objetivo de obtener un amplio rango de potenciales de carbono, evaluándose de esta manera las capacidades del equipo para determinar las mejores condiciones de proceso. El comportamiento del acero dentro del horno de cementación en el rango de los 700°C a 950°C, donde se presentan las reacciones de carburización o descarburización según las condiciones del sistema; se evaluó mediante el uso de diferentes atmósferas: nitrógeno, gas endotérmico sintético y atmósfera con un C_p de 0.2%.

3.2 Tratamiento térmico

Los parámetros con los que se realizaron los tratamientos térmicos se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de los tratamientos térmicos.

TRATAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	TIMPO (min.)	C _p
Carburización	900	60	0.8
	900	30	0.8
Temple directo	Agua		
Velocidad de Calentamiento (°C/min)	5		
Enfriamiento en horno (°C/min)	4		

3.3 Ensayo de microdureza

En todas las probetas se realizaron medidas de microdureza Vickers posterior a cada tratamiento térmico, para llevar un control de la homogeneidad de las superficies y comparar con los valores de dureza del material en estado de entrega. La medición de las microdurezas Vickers, tanto en la superficie como en el núcleo de las muestras, se llevó a cabo de acuerdo a las norma ASTM E92-82 [9].

Se utilizó un microdurómetro Shimadzu HMV-G 20DT, con cargas de 300 g-f y 15 segundos de sostenimiento, haciendo un barrido desde la superficie hasta el núcleo cada 50µm, realizando de este modo 8 indentaciones por muestra en un total de tres probetas por ensayo.

3.4 Ensayo metalográfico

La caracterización microestructural, se realizó mediante microscopía óptica (MO) en un microscopio marca Nikon modelo MA 100. La preparación de las muestras inició con un desbaste grueso mediante lija 100, luego con desbastado fino pasando por una serie de lijas 240, 340, 400, 600 y 1000, para un posterior pulido en paño usando como abrasivo polvo de alúmina (Al₂O₃) de 3 µm, y ataque químico para revelar la microestructura con el reactivo Lepera. Se realizaron observaciones en el microscopio óptico hasta 1000X, y también mediciones de tamaño de grano de acuerdo a la norma ASTM E112 [10].

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Análisis Microestructural

El tratamiento térmico fue diseñado para un temple único posterior a la carburización sin afinamiento de núcleo. Al temprar desde la temperatura de carburización (900°C) se buscó, principalmente, obtener martensita muy fina en la capa externa con la máxima dureza y poca cementita.

En la Figura 3(a) se puede observar la microestructura en estado de entrega del acero AISI-SAE 1020. Este presenta una estructura ferrítico/perlítica. Se determinó que el acero en estado de entrega presenta un número de grano 6.5 y un tamaño de grano medio de 38µm.

Resultados de la etapa de calentamiento con diferentes mezclas de gases, se muestran en las Figuras 3(b), 3(c) y 3(d). En la Figura 3(b) se observa que con la utilización de gas nitrógeno se obtiene una capa superficial descarburada de 90µm en promedio, además se nota un crecimiento en el tamaño de grano de la zona descarburada, debido principalmente a la prolongación del tiempo de calentamiento en el rango de los 800°C a 900°C, que fue aproximadamente una hora. Efecto similar, se observa al utilizar una atmósfera de gas endotérmico sintético, Figura 3(c). Este comportamiento durante la etapa de calentamiento que enfrentan las muestras, al utilizar atmósfera de nitrógeno o gas endotérmico sintético, se debe a que el carbono en la superficie es extraído por el ambiente del reactor, provocando una caída en la concentración superficial del acero.

Al emplear la mezcla de gas endotérmico sintético con adiciones del 5% de gas acetileno (C₂H₂) durante el calentamiento, se logra obtener un potencial de carbono en la atmósfera de 0.2%, con lo que es posible igualar el contenido inicial de carbono presente en el acero, manteniendo en la superficie la microestructura ferrítico/perlítica original del material de trabajo, Figura 3(d), esta fue la condición utilizada para el proceso de cementación.

Los resultados de las muestras cementadas se presentan en las Figuras 4(a) y 4(b), se aprecia la estructura típica de una muestra sometida a temple, compuesta principalmente por martensita, con contornos de grano de ferrita widmanstatten y bainita. La diferencia entre ambas piezas radica en el espesor de capa alcanzado en la cementación. Para la muestra que se sostuvo una hora, Figura 4(a), se obtuvo un espesor de capa cementada de 280µm, mientras que para la muestra con tiempo de sostenimiento treinta minutos, Figura 4(b), se logró obtener un espesor de capa cementada de 160 µm.

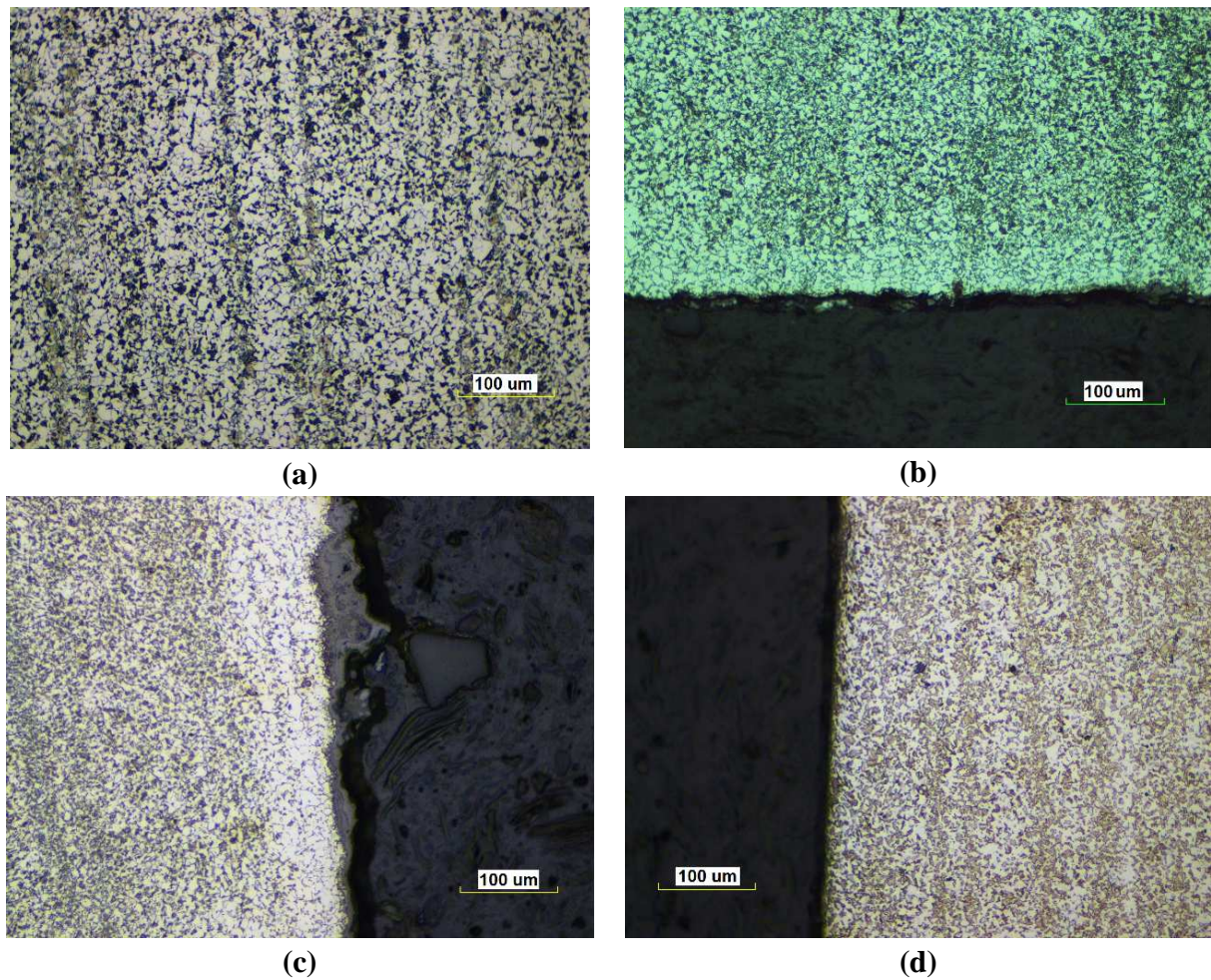


Figura 3. Metalografías acero AISI-SAE 1020: (a) Estado de entrega; (b) Rampa de calentamiento utilizando atmósfera de nitrógeno; (c) Rampa de calentamiento utilizando atmósfera endotérmica sintética; (d) Rampa de calentamiento utilizando atmósfera endotérmica sintética y gas acetileno, C_p 0.2%.

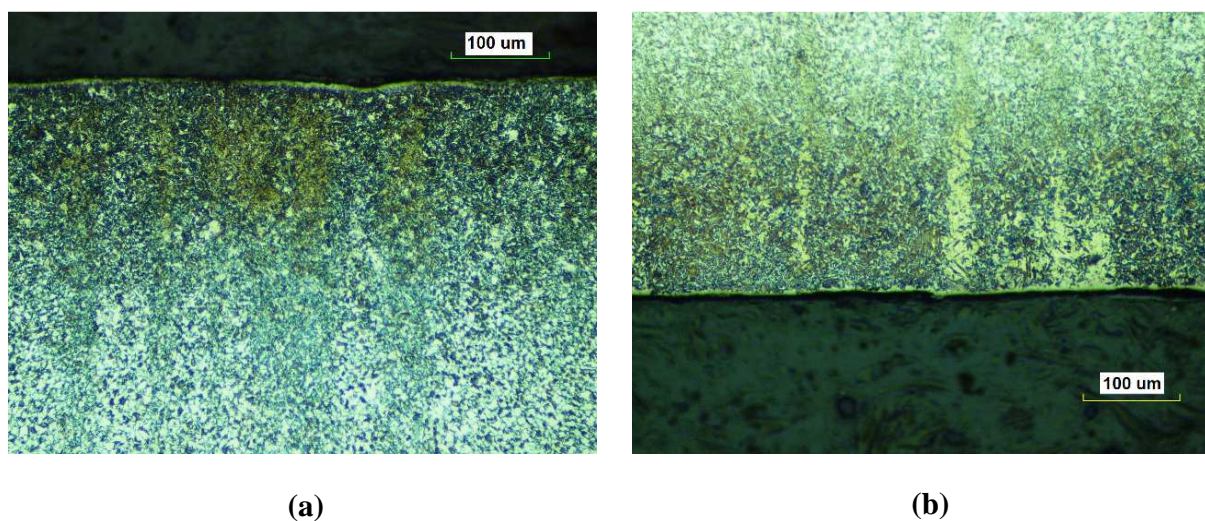


Figura 4. Metalografías de muestras de acero AISI-SAE 1020 con temple directo en agua: (a) 900 °C, 1 hora de sostenimiento y 0.8% Cp; (b) 900 °C, 30 minutos de sostenimiento y 0.8% Cp.

Los resultados de la capa carburizada que se observan en las Figuras 5(a) y 5(b) está compuesta por una zona hipoeutectoide de perlita laminar (área oscura) bordeada de una red de ferrita. En la Figura 5(a) se observa la muestra carburizada durante una hora lo que produjo un espesor de capa de 280 μ m, a diferencia de la muestra carburizada durante 30 minutos, Figura 5(b), la cual presentó un espesor de capa de 140 μ m.

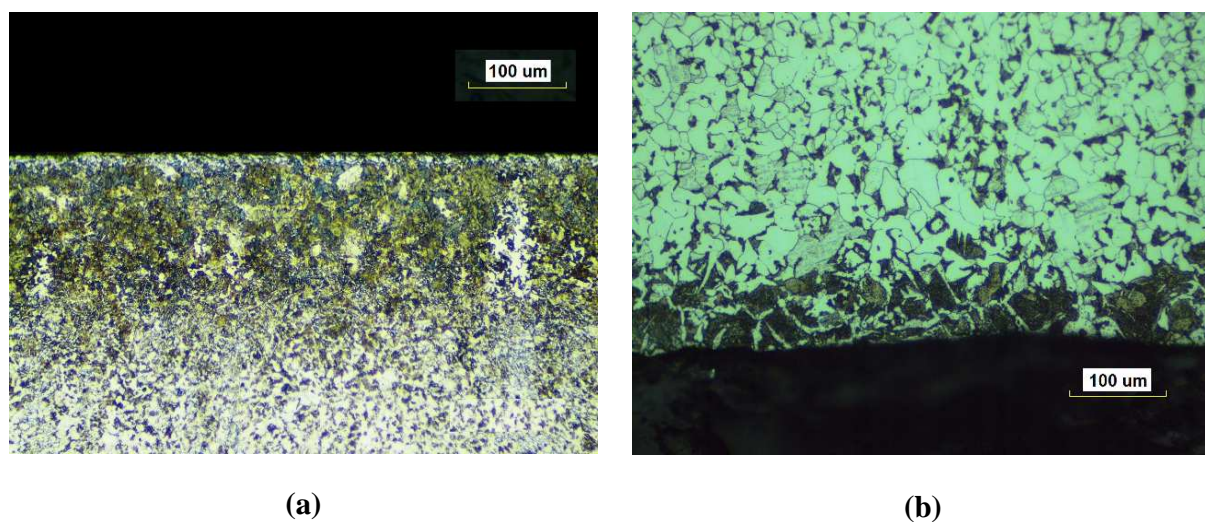


Figura 5. Metalografías de muestras de acero AISI-SAE 1020 enfriadas en el horno: (a) 900 °C, 1 hora de sostenimiento y 0.8% Cp; (b) 900 °C, 30 minutos de sostenimiento y 0.8% Cp.

4.2 Ensayo de microdureza

El análisis del perfil de microdureza de las muestras cementadas con una hora de sostenimiento y un C_p de 0.8%, indica una profundidad de cementación de $280\mu\text{m}$ y una dureza superficial de 610 HV (56 HRC) como se puede apreciar en la Figura 6(a).

El análisis de la microdureza de las muestras con 30 minutos de sostenimiento y un C_p de 0.8%, reveló una profundidad de cementación de $140\mu\text{m}$ y una dureza superficial de 590 HV (55 HRC) Figura 6(b).

Los resultados obtenidos en el ensayo de microdureza son satisfactorios ya que corresponden a las especificaciones que se habían fijado. Sin embargo, el perfil de microdureza muestra un ligero descenso de la dureza de las muestras en la superficie cementada, esto se puede atribuir al hecho de que previamente a la realización del temple, se llevaba a cabo una purga de bloqueo de la atmósfera cementante mediante la inyección de nitrógeno, provocando un descenso en el potencial de carbono, lo que genera la descarburación en la superficie, y en consecuencia la reducción de dureza. Este hecho ayuda a evitar la presencia de redes de cementita o de carburos que puedan hacer frágil la capa cementada y con tendencia a descascarillarse, por esto la martensita del interior de la capa puede presentar un mayor porcentaje de carbono e incrementar la dureza de la misma como se muestra en la gráfica de la Figura 7 [11], de la cual se evidencia que las muestras obtenidas, superficialmente presentan una transformación del 80% de martensita y con un contenido de carbono mínimo de 0.75%.

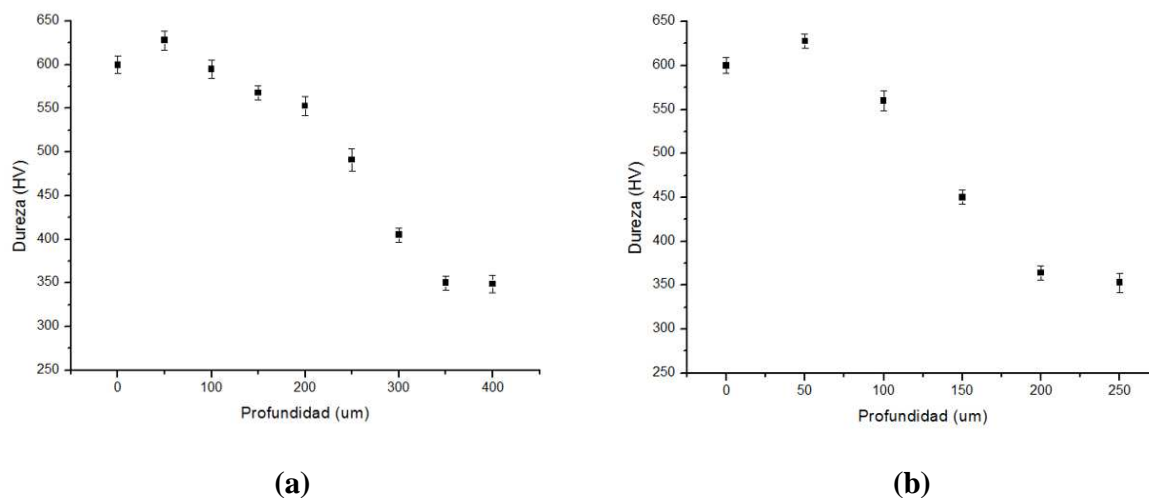


Figura 6. Perfil de durezas (HV) de las muestras cementadas en función de la profundidad (μm): (a) Una hora de sostenimiento, 0.8% C_p , Temple en agua, (b) Treinta minutos de sostenimiento, 0.8 C_p , Temple en agua.

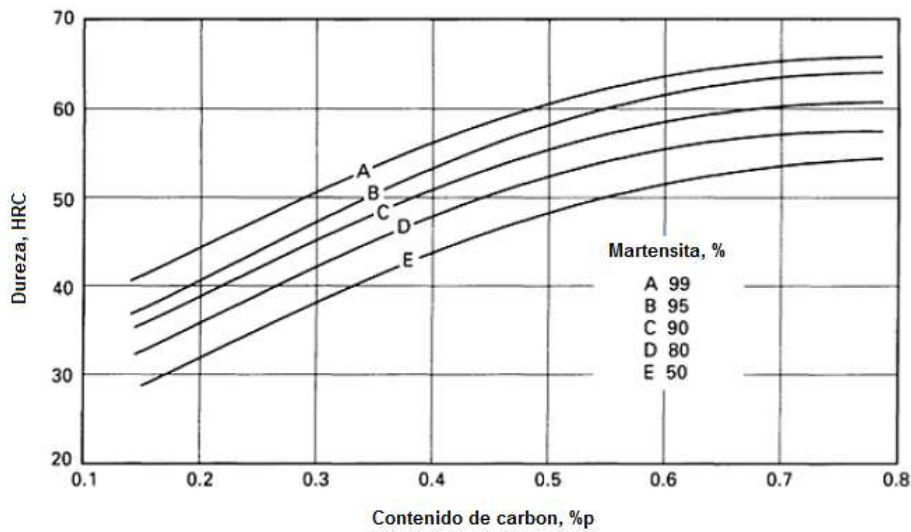


Figura 7. Relación entre la dureza, el contenido de carbono y la cantidad de martensita [11].

4.3 Atmósfera cementante

La introducción de una proporción del 5 al 10% de acetileno respecto al caudal total resulta en una reducción importante de las reacciones de aromatización y en la obtención de porcentajes de carbono del 0.2 al 1.1%. El acetileno tiene un proceso de descomposición prácticamente instantáneo en la superficie del metal, y no requiere como en el caso del propano un paso intermedio de descomposición por pirolisis y generar así el acetileno, que es la fuente de carbono que adsorberá el metal. Por lo tanto se consigue que penetre de forma eficaz incluso en geometrías complicadas, además las moléculas de acetileno se disocian sin formar metano no reactivo, y produce muy poco hollín en comparación con los demás gases hidrocarbonáceos utilizados en el proceso de cementación gaseosa lo que proporciona un rendimiento significativamente mayor que otros gases como metano o el propano. Por otra parte, el acetileno en su descomposición se disocia en dos átomos de carbono activos sin formar fragmentos vinílicos (en comparación con un único átomo de carbono más los fragmentos de moléculas secundarias producidas por la disociación del propano, etileno, entre otros.) Figura 8.

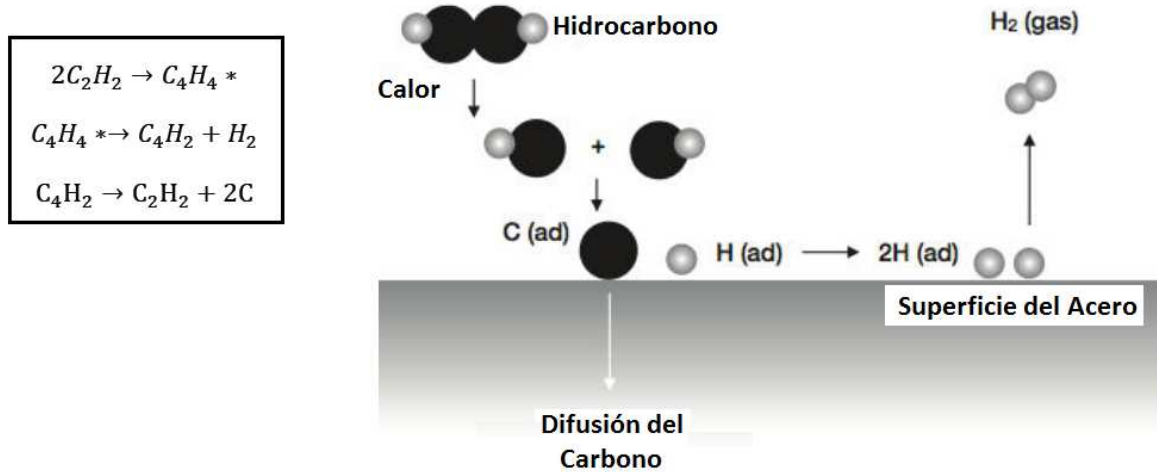


Figura 8. Mecanismos de disociación del acetileno en la superficie del acero [12].

5 CONCLUSIONES

El equipo de laboratorio para tratamientos térmicos con atmósfera controlada para cementación gaseosa diseñado y construido, presentó un buen desempeño y permitió obtener datos confiables y reproducibles, mostrando el gran potencial que posee, lo que permitirá realizar estudios profundos de los fenómenos relacionados con la carburización.

Se obtuvieron diferentes potenciales de carbono (C_p) utilizando gas acetileno en proporciones hasta el 10% como agente enriquecedor de carbono en la atmósfera carburizante.

Se logró verificar que durante la etapa de calentamiento hasta las temperaturas de cementación, en el rango comprendido entre $700^{\circ}C$ y $950^{\circ}C$, donde ocurren las reacciones de carburización, si no hay un debido control de la composición de la atmósfera del horno se podría generar descarburación de las piezas de acero, lo que alteraría los cálculos teóricos del proceso de cementación.

La dureza promedio obtenida para el acero AISI-SAE 1020, cementado a $900^{\circ}C$, C_p de 0.8% y temple en agua es de 600 HV (55 HRC). Se puede atribuir entonces una transformación mínimo de 80% de martensita y con un contenido de carbono mínimo de 0.75%.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al grupo GIPIMME de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia por la utilización de las instalaciones para los tratamientos térmicos y la caracterización microestructural, al programa Jóvenes investigadores Colciencias, al proyecto

CODI: PRG14-1-07 y a la Estrategia de Sostenibilidad 2014-2015 de la Universidad de Antioquia, por brindar la posibilidad de desarrollar el presente trabajo de investigación.

7 REFERENCIAS

- [1] A. Valencia Giraldo. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín. 2009. Pp. 335 – 365.
- [2] Ortiz, A. López, C. “Dureza efectiva de una capa cementada en una atmósfera endotérmica a partir de metano, en aceros bajo carbono”. Scientia ET Technica Año 16, # 49. Universidad Tecnológica de Pereira, 2001, pp. 189-192.
- [3] ASM Handbook Committee, ASM Handbook Volume 4 Heat Treating. 1991, pp. 721–748.
- [4] F. Morral, E. Jimeno, P. Molera. “Metalurgia general: Tomo 2”. Editorial Reverte, 1985, pp 1126-1127.
- [5] Apraiz Barreiro J. Tratamientos térmicos de los aceros. Editorial Dossat S.A. 8º Edición. 1984. pp. 324 - 335.
- [6] Wang, X. “Activated atmosphere case hardening of steels”. Instituto politécnico de Worcester. 2011, pp 6-8.
- [7] P. Molera. “Tratamientos térmicos de los metales”. Editores Boixareu. Pag. 60. 1991. Disponible en: <https://books.google.com.co>.
- [8] Herring, D. H., Understanding Furnace Atmospheres, Atmosphere Operation and Atmosphere Safety, Heat Treating Hints, Vol. 1 No. 7.
- [9] ASTM International, “ASTM E92-82 (2003) e2 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials,” 2003.
- [10] Annual Book of Standards. “Standard test methods for determining average grain size”. Designation E112-10.
- [11] ASM International. Metals Handbook 9th edition, vol. 4 pp. 30 – 34.
- [12] J. Castelao. “Tratamiento de cementación en hornos de baja presión”. Universidad Autónoma de Barcelona. Escuela técnica superior de Ingeniería. Anexo 4, Pag. 5-47. 2014.