

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE CARBURIZACIÓN DE ACEROS MEDIANTE EL PROCESO OAW

ANÁLISIS DE DUREZA PARA PROBETA DE ACERO SAE 1018

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

LUIS DAVID MINA SALAZAR

luis.mina@epn.edu.ec

DIRECTOR: Galo Homero Barragán Campos

homero.barragan@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, LUIS DAVID MINA SALAZAR declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



LUIS DAVID MINA SALAZAR

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por LUIS DAVID MINA SALAZAR, bajo mi supervisión.



GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

LUIS DAVID MINA SALAZAR

GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS

EFRÉN JOSUÉ BARRIGA SIMBA

DEDICATORIA

A mis padres por haberme apoyado a lo largo de todo este proceso, además de haber forjado a la persona que soy en la actualidad, por ello, este y muchos logros más se los dedico a ustedes.

También se lo dedico a Jorge y mi novia Daniela quienes decidieron cumplir el rol de excelentes amigos al ser ese hombro, donde arrimarse en los tiempos difíciles, y supieron apoyarme moral y psicológicamente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
RESÚMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Proceso de carburización o cementado.....	2
1.4.2 Tipos de carburización.....	3
1.4.3 La llama oxiacetilénica.....	6
1.4.4 Tipos de llamas.....	7
1.4.5 Ensayo de dureza Rockwell.....	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Establecimiento de variables.....	11
2.2 Estudio preliminar.....	12
2.3 Procedimiento experimental.....	12
2.4 Descripción de equipos	16
2.5 Diagrama del proceso	19
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	20
3.1 Resultados	20
3.2 Comentarios, probetas preliminares.....	24
3.3 Conclusiones.....	26
3.4 Recomendaciones.....	27

4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
5	ANEXOS.....	30
	ANEXO I	31
	ANEXO II	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de cementación con material sólido (fuente propia)	4
Figura 2	Esquema de cementación con material líquido (Fuente propia)	5
Figura 3	Esquema tipos de llama (Fuente propia).....	9
Figura 4	Relaciones para la composición de la llama carburante (Fuente propia).....	11
Figura 5	Probetas y microestructura original material base (Fuente propia).....	13
Figura 6	Medición de durezas (Fuente propia).....	14
Figura 7	Disposición de trabajo en el torno (Fuente propia)	14
Figura 8	Durómetro utilizado [7].....	16
Figura 9	Equipo para OAW (Fuente propia).....	17
Figura 10	Torno mecánico del laboratorio (Fuente propia).....	18
Figura 11	Resultados de dureza superficial y línea de tendencia (Fuente propia).....	22
Figura 12	Dispersión entre datos experimentales y teóricos (Fuente propia)	23
Figura 13	Llama completamente carburante y hollín en la probeta P-02. (Fuente propia).....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Durómetro Hardrocker	16
Tabla 2 Equipo de OAW	17
Tabla 3 Torno NODO.....	18
Tabla 4 Parámetros de prueba	20
Tabla 5 Parámetros probetas finales	21
Tabla 6 Resultados de dureza superficial	21
Tabla 7 Error entre datos experimentales y teóricos	23

RESUMEN

En este trabajo se realiza el estudio de los efectos en la utilización de llamas carburantes del proceso oxiacetilénico utilizado en soldadura, sobre la superficie de un material metálico, esperando conseguir un efecto similar a la carburización o cementado, para ello se utilizan probetas cilíndricas de acero SAE 1018, las cuales son sometidas a una flama variable, en función del tiempo y composición con el fin de obtener un aumento evidente en la dureza superficial del material, posteriormente se realiza un estudio metalográfico con el fin de determinar si existe difusión de carbono en la superficie atacada, además de un estudio simplificado de costos para contrastar el proceso con los métodos tradicionales. Los resultados arrojan, que la dureza aumenta entre 12 y 23 por ciento dependiendo del tiempo de exposición, el cual fue relativamente corto en relación a procesos de carburización tradicionales, con evidentes diferencias en cuanto a costos, además se puede evidenciar que existe difusión de carbono en la superficie, comprobando que se trata de un proceso de cementado, con potencial aplicación en procesos industriales.

PALABRAS CLAVE: Llama carburante, oxiacetilénico, carburización, dureza superficial.

ABSTRACT

In this work, the study of the effects in the use of carburizing flames of the oxyacetylene process used in welding, on the surface of a metallic material, is carried out, hoping to achieve an effect similar to carburizing or cementation, for which cylindrical SAE 1018 steel specimens are used, which are subjected to a variable flame, depending on the time and composition in order to obtain an evident increase in the surface hardness of the material, later a metallographic study is carried out in order to determine if there is diffusion of carbon in the attacked surface, in addition to a simplified study of costs to contrast the process with traditional methods. The results show that the hardness increases between 12 and 23 percent depending on the exposure time, which was relatively short in relation to traditional carburization processes, with evident differences in terms of costs, it can also be shown that there is diffusion of carbon in the surface, verifying that it is a cementation process, with potential application in industrial processes.

KEYWORDS: Carburizing flames, oxyacetylene, carburizing, surface hardness.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Dentro del estudio presentado se ha determinado que existirán dos componentes relacionados que permitirían obtener información clara para la elaboración del procedimiento propuesto, estos componentes se enfocarían en el aumento de la dureza superficial del material sometido a este proceso, y la realización de metalografías que permitan evidenciar la variación de composición en la superficie del mismo gracias a la difusión de carbono durante el flameado.

Para el análisis de dureza de las probetas de acero SAE 1018, se utilizó un eje de este acero el cual fue sometido a un análisis micrográfico con el fin de determinar qué tipo de tratamiento previo puede tener el material, para descartar la posibilidad de que el acero presente un endurecimiento previo de su superficie, de ser el caso se podría realizar un normalizado para obtener un acero con sus propiedades base originales, y poder recolectar datos de su dureza superficial como referencia para la aplicación del procedimiento de carburización con llamas oxiacetilénica, experimentando con las variables del proceso como tiempo de aplicación, método de aplicación, tipo de llama, entre otras variables existentes, con el objetivo de aumentar la dureza superficial de pequeñas probetas en un porcentaje que permita determinar la metodología apropiada para la realización de este estudio de durezas, y contrastarlo con los métodos tradicionales de carburización utilizados actualmente en la industria, intentando encontrar una utilidad específica para este tratamiento superficial no convencional.

1.1 Objetivo general

Analizar la dureza superficial en probetas de acero SAE 1018 sometidas a llamas carburantes con el proceso OAW.

1.2 Objetivos específicos

1. Determinar la dureza superficial del material base para probetas de acero SAE 1018

2. Determinar el tiempo de aplicación de las llamas carburantes con el fin de incrementar en al menos 10% la dureza superficial de los aceros.
3. Analizar el tipo de llama más adecuado para realizar la carburización, teniendo en cuenta la potencia y la relación acetileno/oxígeno.
4. Aplicar llamas carburantes sobre la superficie de las probetas, variando los tiempos de ataque y composición química de la llama aplicada.
5. Realizar mapeos de dureza en la superficie de las probetas sometidas a las llamas y elaborar una curva de tendencia para la aplicación de este proceso.

1.3 Alcance

Elaborar un procedimiento de aplicación para este tratamiento superficial, con base en las variables utilizadas durante la experimentación del mismo, tales como tiempo y composición de las llamas carburantes del proceso OAW.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Proceso de carburización o cementado.

Se suele describir a la carburización o cementado como el resultado del calentamiento de hierro o de acero a una temperatura por debajo de su punto de fusión en presencia de un sólido, líquido, o material gaseoso rico en carbono, que se descompone de manera que se liberan átomos de carbono cuando se calienta a la temperatura utilizada. De esta manera, es posible obtener por la penetración gradual, difusión, o la absorción del carbono por el acero, una "zona" o "caso" de mayor contenido de carbono en las superficies exteriores a la del objeto original. Cuando un objeto cementado se enfría rápidamente en

agua, aceite, salmuera, etc., desde la temperatura adecuada, esta zona se vuelve dura, dejando el interior de la pieza suave, pero de gran dureza [1]

Dos factores hay en juego: La reacción de carbón - absorción en la superficie y la difusión del carbón dentro del metal.

1.4.2 Tipos de carburización

La carburización o cementación se puede aplicar en todo elemento que requiera una mayor resistencia a esfuerzos superficiales, tenacidad y resistencia al desgaste, como se suele observar en piñones, ejes, levas, entre otros. Es un proceso que ha requerido cierta versatilidad por ello, se puede diferenciar entre tres tipos de carburización en cuanto al material cementante:

- Material sólido
- Material líquido
- Material gaseoso

Material sólido:

La carburización en un medio sólido suele requerir de un recipiente en el que se deposite una cierta cantidad de material rico en carbono, variando el tiempo de permanencia para el porcentaje o tamaño de la capa de difusión deseada, dentro del material cementante se debe ubicar al elemento que se quiere “endurar”, por ello este método se puede ver limitado en cuanto al tamaño de la pieza.

El procedimiento requiere que dichas cajas sean resistentes a altas temperaturas durante tiempos prolongados, ya que la pieza deberá estar sumergida en el material cementante durante horas y a una temperatura entre 900 y 950 °C, como mezcla cementante se puede utilizar la de 70 % a 80 % de carbón vegetal pulverizado, con un 20

% a 30 % de un carbonato como por ejemplo el Carbonato de bario (BaCO_3), el cual puede actuar como catalizador, además de contribuir al desprendimiento del carbón en estado elemental, necesario para la carburización, como se indica en la figura 1.

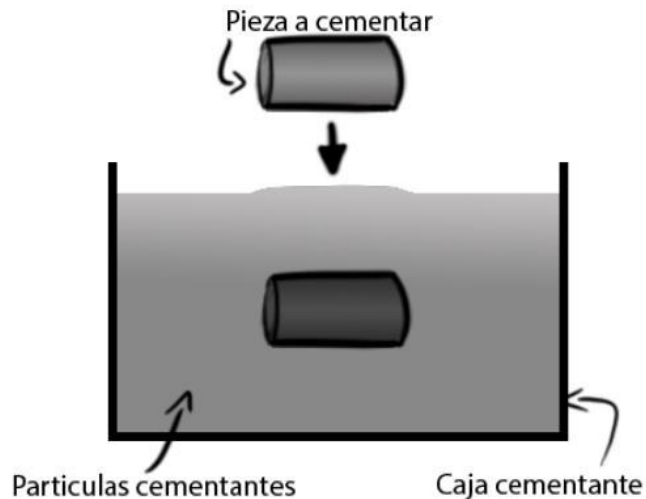


Figura 1 Esquema de cementación con material sólido (fuente propia)

Material líquido:

Para la carburización en un medio líquido se debe fundir sales de baño a $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, donde se sumergirá a los elementos por cementar, dichas sales suelen estar constituidas por una sal base como cloruro o carbonato de sodio, junto con una sal que aporte carbono, como el cianuro de sodio o de potasio, y una sal activante como el cloruro de bario, y respetando porcentajes en base a los resultados esperados. Figura 2.

Gracias a la presencia de cianuros, es posible obtener una capa muy fina exterior por la formación de nitruros, capa que tendría una muy elevada dureza, lo que sería una ventaja de este procedimiento, aunque se ve en desventaja por el tamaño de la pieza y por cuestiones de costos.

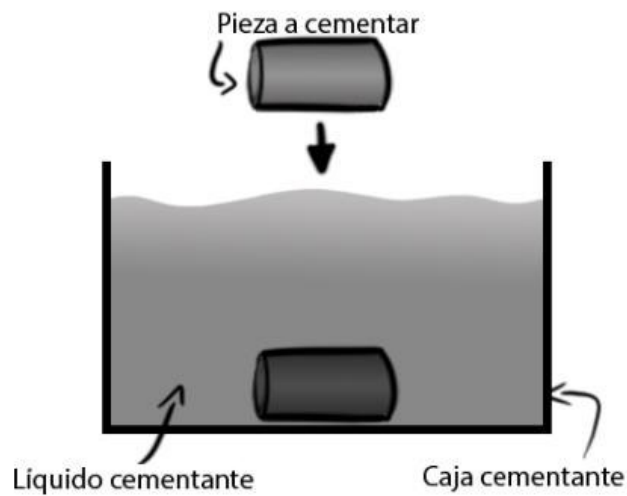


Figura 2 Esquema de cementación con material líquido (Fuente propia)

Material gaseoso:

Para la carburización gaseosa se necesita instrumentación más compleja ya que esta permite la cementación en masa de elementos o piezas, sin duda una ventaja significativa frente a los demás tipos, además que este procedimiento puede llegar a ser dos o tres veces más rápido, presenta menos complicaciones a la salud del usuario, y gracias a que el crecimiento de grano es más limitado, las propiedades del núcleo sin cementar son mejores.

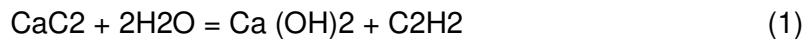
Usualmente se lo realiza en hornos donde se inyecta un gas cementante como hidrocarburos saturados, tales como el butano, propano, metano entre otros, y al calentarlo entre 900 a 1000°C se desprende el carbono elemental necesario para la cementación de los aceros. Para el presente proyecto esto se realizó utilizando llamas oxi acetilénicas carburantes por lo que la aplicación es más directa.

1.4.3 La llama oxiacetilénica.

La llama oxiacetilénica se define como la llama resultado de la combustión del acetileno y del oxígeno.

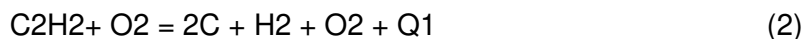
Entre los gases utilizados para esta llama, se encuentra como combustible al acetileno (C₂H₂), siendo uno de los gases más utilizados en aplicaciones de corte y soldadura, el cual se obtiene como resultado de la reacción química entre carburo de calcio (CaC₂) y agua (H₂O), como se observa en la ecuación 1. [2]

El acetileno se usa por el mínimo desperdicio que térmico y gracias a que requiere una cantidad mínima de oxígeno para realizar la combustión completa, en la industria se suele almacenar este gas disuelto en acetona o dimetilformamida dentro de cilindros especiales que poseen un diseño que facilita la prevención de su descomposición. [3]

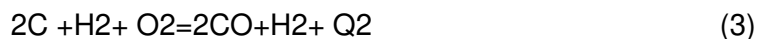


Ya que la mezcla entre estos dos gases es altamente explosiva, se debe tener especial cuidado en cuanto a la instrumentación utilizada, y las proporciones de la mezcla a utilizar. La llama real se presenta por etapas lo que contribuye a un ahorro del oxígeno que requiere la llama.

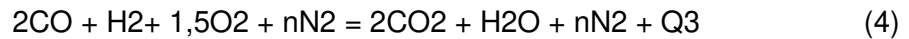
En el extremo de la boquilla de la antorcha sucede la descomposición del acetileno, el cual ocurre a una temperatura superior a 400 °C formando el cono luminoso de llama, como se indica.



La segunda reacción ocurre en la zona denominada reductora y se produce la combustión parcial del carbono, como se indica y como productos de la reacción se tiene el monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), tal como se ve en la ecuación 2.



En el siguiente tramo y utilizando el oxígeno del aire se completa la reacción, donde el monóxido de carbono da como resultado bióxido de carbono (CO₂) y el hidrógeno da como resultado vapor de agua. Como se puede observar en la ecuación 4. [4]



Otro aspecto considerado en la selección del acetileno como gas de combustión para este proceso, es el potencial calórico del mismo, el cual se suele calcular con la ecuación 5, y es que este potencial, suele considerarse para propiedades de precalentamiento del acero a soldar o cortar, junto con el tiempo de aplicación y velocidad de corte. [2]

$$q = C_c \times V \times 3600 \text{ Cals} \quad (5)$$

Donde:

C_c: Calor de combustión del gas combustible [Cal/lt]

V: Caudal o gasto de combustible [lt/h]

1.4.4 Tipos de llamas

En los sopletes de la soldadura por oxiacetilénica es posible obtener tres tipos de flama, dependiendo de las proporciones de los gases implicados.

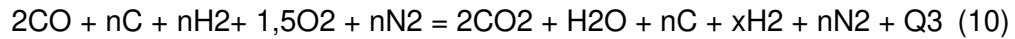
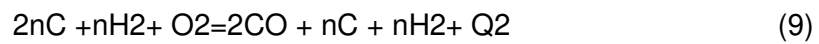
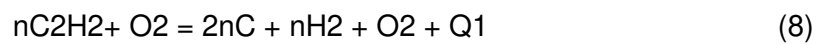
La llama neutra es la de mayor aplicación. Esta balancea correctamente las cantidades de oxígeno y acetileno, llegando a temperaturas de 3200 °C a una distancia de 2-4 mm del cono luminoso, y 400 °C en la punta extrema de la flama. [5]

La llama oxidante es similar a la llama neutra solo que su cono luminoso es más corto y su cono envolvente es más colorido, suele ser utilizada para soldar latón y bronce por fusión.

La llama reductora o carburante logra un color blanco entre el cono luminoso y el envolvente (zona reductora) cuya longitud aumenta en función del exceso de acetileno en la combustión, gracias a esto se obtiene un mayor depósito de carburos en la superficie

del metal a tratar, factor importante para el caso de estudio de la presente investigación.
[5]

Esta llama presenta una proporción de acetileno respecto a oxígeno mayor que 1, lo que genera átomos de carbono libres como productos de las reacciones químicas, los cuales pueden ser aprovechados en el proceso de carburización para endurecimiento de acero como se indica en las ecuaciones 8, 9 y 10.



El componente “nC” en la reacción (10) representa los átomos de carbono libres, que participarían en la carburización de la superficie del material base.

En la reacción (10) los componentes sobrantes roban calor durante la reacción por lo que la llama carburante es de menor temperatura que la llama neutra y oxidante.

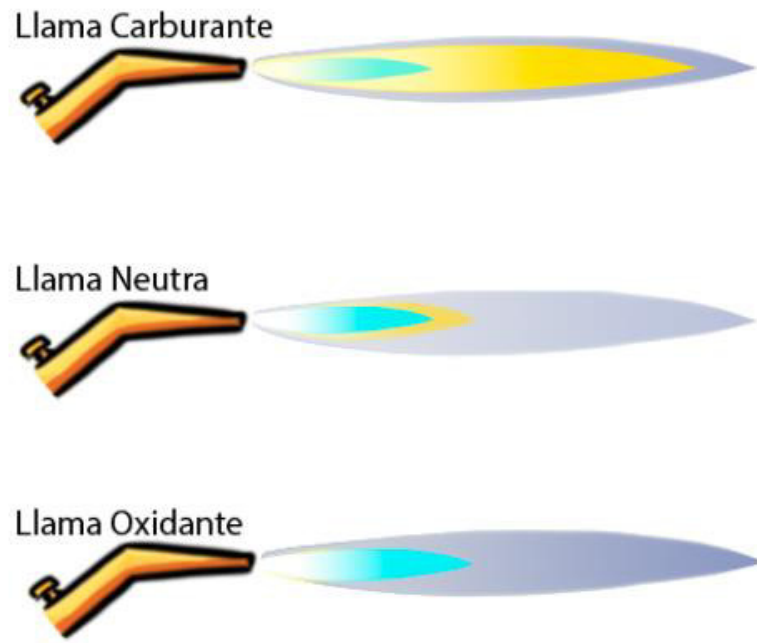


Figura 3 Esquema tipos de llama (Fuente propia)

1.4.5 Ensayo de dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell sirve como un método rápido utilizado en talleres de fabricación y laboratorios, para determinar la dureza o resistencia a la penetración de un material. Gracias a la combinación de cargas y diferentes tipos de penetradores o indentadores, se puede ensayar cualquier metal o aleación utilizando diferentes escalas. Y debido a las cargas altas que se emplean suele estar limitado a muestras de mayor tamaño.

Como nomenclatura para los resultados de este ensayo se emplea el identificador “HR” seguido de una letra correspondiente a la escala utilizada, a continuación del valor medido, ejemplo: 80HRB. [6]

Llegando a existir 30 escalas Rockwell diferentes dependiendo del material, penetrador y carga principal, para aceros suele utilizarse las siguientes escalas.

- Para materiales muy duros se utiliza una punta de diamante y una carga de 60 kg, se simboliza con HRA
- Para aceros de baja resistencia se utiliza una bola de acero extraduro y una carga de 100 kg, se simboliza con HRB
- Para aceros de alta resistencia se utiliza una punta de diamante y una carga de 150 kg, se simboliza con HRC

2 METODOLOGÍA

Con un enfoque cuantitativo se pretende analizar los efectos de aplicar una llama carburante sobre la superficie de un elemento, en este caso probetas cilíndricas de acero, esperando que dichos efectos se asemejen a los encontrados en los procedimientos de carburización o cementado realizado de forma regular en la industria para endurecer superficialmente en casos que el material lo solicitase.

2.1 Establecimiento de variables

Como se menciona en el marco teórico la carburización de un material, depende de la concentración de carbono del medio en el que se sumerja el elemento, por ende, una de las primeras y más importantes variables se relacionan directamente con la composición química de la llama con la que se ataca a las probetas, y al no poder controlar exactamente dichas proporciones, se ha recurrido a establecer un método simplificado de cuantificación de dicha composición a partir de la medida relativa de la zona carburante de la llama en relación con la longitud total de la flama detallada con "L", tal y como se puede observar en la figura 4.

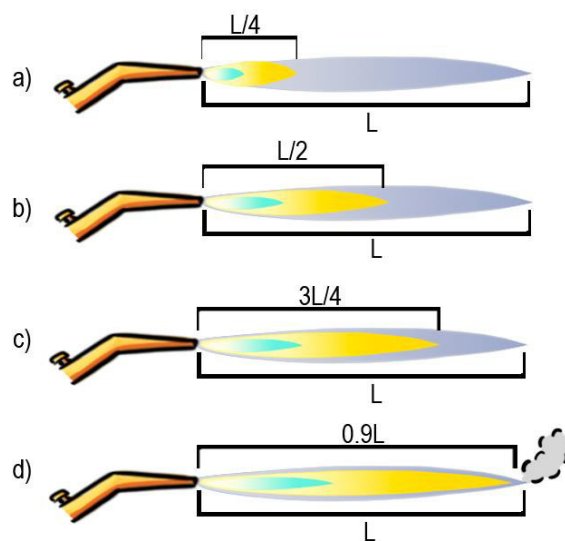


Figura 4 Relaciones para la composición de la llama carburante (Fuente propia)

La siguiente variable a tomar en cuenta es la relacionada con la velocidad de difusión del carbono en la superficie del material, para ello y al considerar que la velocidad de difusión será un factor que dependerá tanto del material base del elemento y del diferencial de concentración de carbono, es factible utilizar el tiempo de exposición como variable de análisis.

Un factor a tomar en cuenta dentro de este procedimiento, fue también, el tipo de temple al final del proceso de carburización, para ello se realizó probetas sin temple, con temple en agua y con temple en aceite, obteniendo mejores resultados con los dos tipos de temple.

2.2 Estudio preliminar

Se realizaron siete probetas para el estudio preliminar detalladas en la tabla 1, en estas se aplicó combinaciones de las variables anteriormente mencionadas, con el fin de determinar los factores que demuestren un aumento en la dureza superficial, estas probetas presentaron muchas complicaciones que sirvieron para descartar condiciones o variables del proceso que afectaban al mismo, estas complicaciones se reflejan en los resultados de tabla 6 en la sección de resultados, además de un sección con las complicaciones encontradas durante este proceso en el punto 3.2.

2.3 Procedimiento experimental

Es necesario un estudio previo de la dureza superficial del material base, para ello se realizó mediciones de dicha magnitud en el material recién adquirido, y al ver que la dureza no era típica de un material en bruto, de dicha composición se realizó un estudio de caracterización de la microestructura del mismo con el fin de determinar si el material presentaba un tratamiento superficial, o granos compactados trabajo en frío, procedimientos que podrían desviar el valor de dureza de nuestra referencia. Con el material recristalizado se puede obtener el valor de dureza que serviría en pasos

posteriores como punto de comparación con los valores de dureza que se obtengan al final del proceso de carburización.

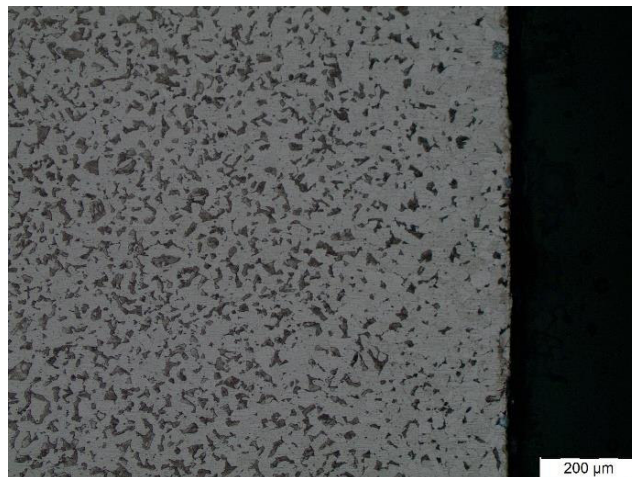


Figura 5 Probetas y microestructura original material base (Fuente propia)

La medición de dureza se realizará con el indentador y configuración para Rockwell B y C, dado que se espera que la muestra tenga valores iniciales que se encuentren en el rango de Rockwell B y dependiendo del porcentaje de aumento de esta propiedad se espera que llegue a la escala de Rockwell C, siguiendo en cada medición el procedimiento establecido en el laboratorio, con el fin de tener la mayor fiabilidad de los datos recolectados.



Figura 6 Medición de durezas (Fuente propia)

Para la aplicación de las llamas se escogió como material base cilindros antes que placas metálicas, dado que se cuenta con un torno para el agarre de las probetas y gracias a la rotación se puede aplicar de forma uniforme el tratamiento, la disposición de trabajo utilizada es la observada en la figura 7.

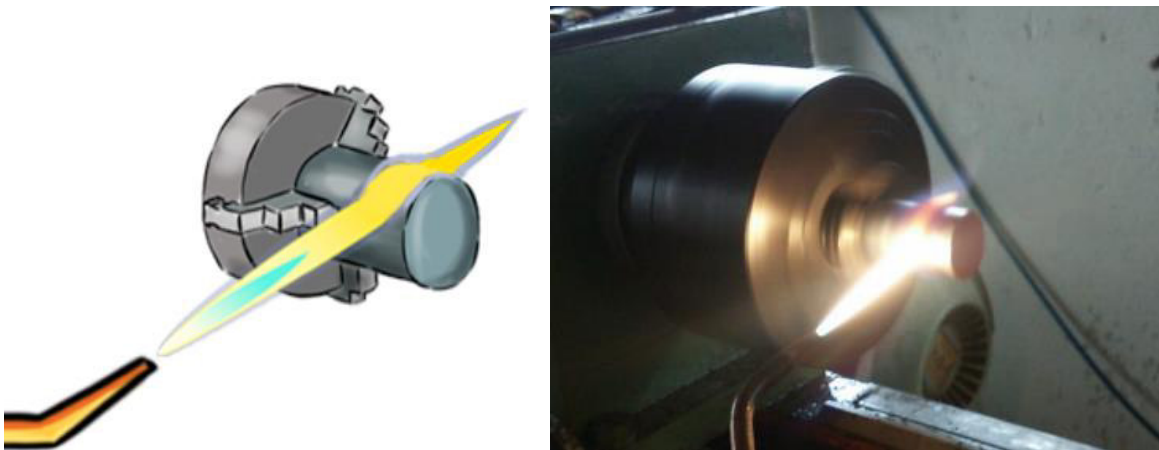


Figura 7 Disposición de trabajo en el torno (Fuente propia)

El procedimiento de aplicación estaría basado en los métodos de carburización realizados en la industria, donde la probeta es calentada previamente hasta una temperatura cercana a los 900 °C, temperatura propicia para que, en un ambiente rico en carbono, exista un nivel apropiado de difusión de carbono. Paso seguido se debe crear dicho ambiente con la llama oxiacetilénica en su modo carburante, y esta deberá atacar a la probeta durante un tiempo determinado, para que al final de dicho periodo, esta sea sumergida rápidamente en agua o aceite para que la superficie de la probeta que ahora es rica en carbono, sufra un temple y modifique sus propiedades.

Con lo descrito anteriormente, se deberá establecer un rango de tiempos de aplicación que permitan obtener una variación notable en la dureza superficial del material, para ello se ha propuesto exponer a 15 minutos y composición variable dos grupos de probetas, el primer grupo será templado en agua y el segundo en aceite, dos probetas extras no tendrán temple para contrastar resultados. Datos que pueden ser observados en a tabla 4 en la sección de resultados.

El método anterior permitió descartar ciertos parámetros donde encontramos dificultades tanto durante el proceso como al visualizar los resultados, y también ha permitido aislar una probeta cuyas condiciones son las apropiadas para el estudio, con la cual se ha determinado nuevos parámetros para las probetas que serán analizadas en pasos posteriores, estas probetas se encuentran detalladas en la tabla 5

Para la medición final de durezas se procede como en pasos posteriores con las probetas sometidas al procedimiento de carburización, los datos obtenidos tanto para los elementos detallados en la tabla 4 y los de la tabla 5, se ven reflejados en la tabla 6. de la sección de resultados.

2.4 Descripción de equipos

Para la medición de durezas se utiliza el durómetro análogo HARDROCKER HR150-A, disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica, con las escalas HRB para el material en su estado base y la escala HRC para el final del tratamiento, cada escala debe ser calibrada con sus respectivos bloques normalizados certificados por el fabricante, quien certifica que el durómetro está fabricado para funcionar bajo la norma ASTM E-18.

Tabla 1 Durómetro Hardrocker




Marca	HARDROCKER	
Modelo	HR150-A	
Capacidad de carga	60, 400, 150 kgf	
Indentadores	Punta de acero de 1/16 pulg Cono de diamante	

Figura 8 Durómetro utilizado [7]

Durante el proceso de flameado se utilizan dos tanques a presión, uno de oxígeno y uno de acetileno, cada uno con sus respectivos accesorios, como mangueras, válvulas y

acoples, dispuestos hacia una antorcha que permite al usuario regular la salida de los gases y mediante un mechero comenzar la combustión de los mismos. Este equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Tabla 2 Equipo de OAW

Elemento	Descripción	
Reguladores de oxígeno y acetileno	UNIWELD ANDINAS de una sola etapa con servicio mediano y pesado	
Tanques de presión	Tanques de oxígeno (Linde 10 lt) y acetileno (6.2 kg)	
Complementos	Mangueras de presión, soplete con válvulas y boquilla, pedernal o encendedor.	<p><i>Figura 9 Equipo para OAW (Fuente propia)</i></p>

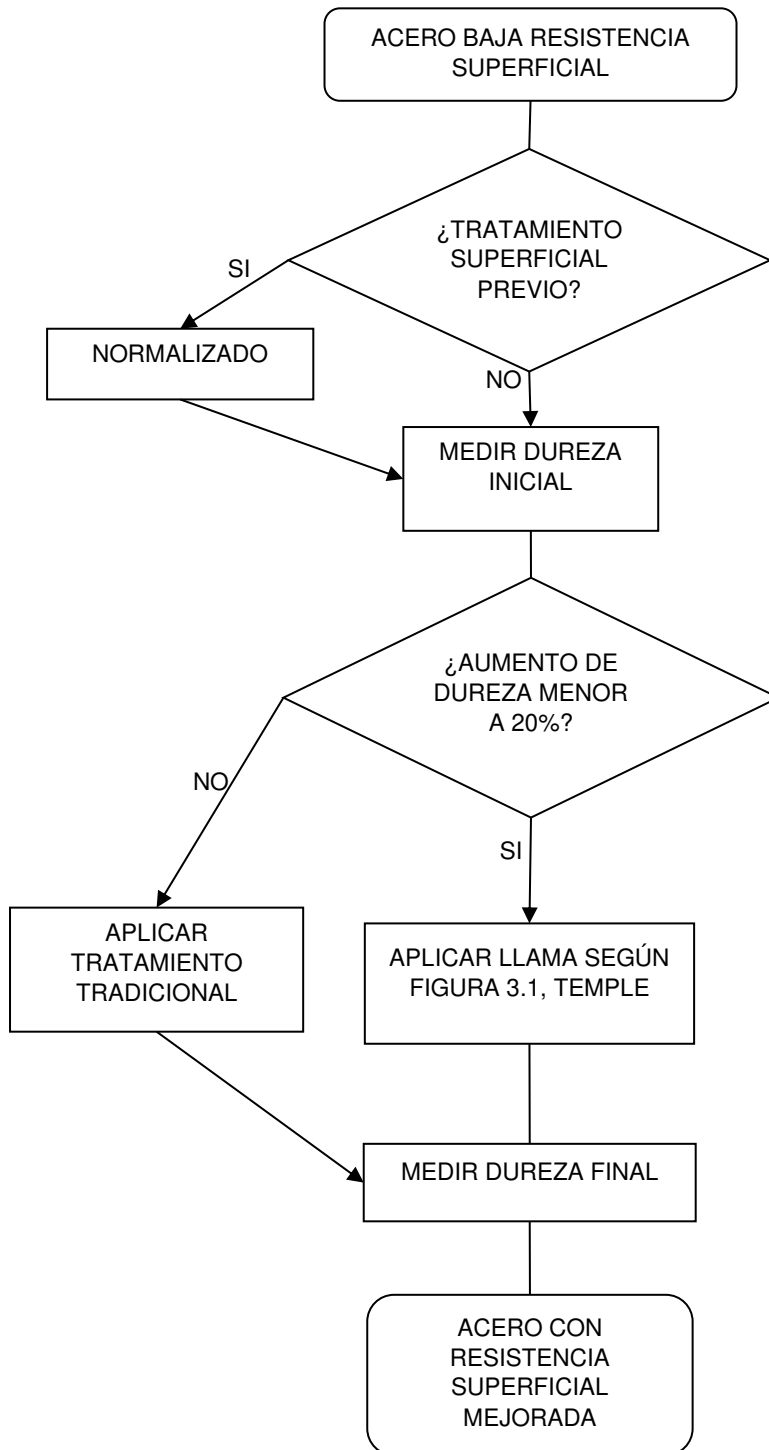
En el mismo laboratorio se encuentra el torno utilizado para la sujeción y rotación de las probetas (figura 10), el cual es de mucha utilidad en este proceso al contar con elementos cilíndricos, además gracias a la superficie de soporte que dispone se logró aumentar el grado de ergonomía de las tareas realizadas, el torno fue utilizado con una velocidad moderada en su posición media equivalente a 200 rev/min aproximadamente.

Tabla 3 Torno NODO

Marca	NODO	
Modelo	160 B x 1000	
Rango de velocidades	68 – 1427 rpm	
Velocidad utilizada	200 rpm aprox.	

Figura 10 Torno mecánico del laboratorio (Fuente propia)

2.5 Diagrama del proceso



3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En la tabla 4 se puede observar los parámetros de las probetas con las que se realizaron ensayos del procedimiento, con el fin de determinar variables que puedan representar efectivamente el proceso de cementado haciendo uso de las llamas oxiacetilénicas

Tabla 4 Parámetros de prueba

PROBETA	CARACTERISTICAS					OBSERVACIONES
	LLAMA	TIEMPO	TEMPLE AGUA	TEMPLE ACEITE	SIN TEMPLE	
P-01	L/2	15			X	
P-02	0,9 L	15			X	Capa de carbono
P-03	L/2	15		X		
P-04	3L/4	15		X		
P-05	3L/4	15	X			Mayor dureza
P-06	L/2	20			X	
P-07	L/2	20		X		

En la tabla 5 se puede observar las probetas basadas en los parámetros de la probeta P-05, donde se pretendía igualar la composición de las llamas y variar el tiempo de exposición a la llama carburante, con el fin de poder establecer una relación con el aumento de dureza superficial.

Tabla 5 Parámetros probetas finales

PROBETAS	CARACTERISTICAS			OBSERVACIONES
	LLAMA	TIEMPO	TEMPLE H20	
P-08	3L/4	10	x	
P-09	3L/4	15	x	Similar a P-05
P-10	3L/4	20	x	
P-11	3L/4	25	x	
P-12	3L/4	30	x	Mayor aumento de dureza

Los datos de dureza recolectados para las dos tablas previas fueron recolectados en la tabla 6, donde resalta que la variación máxima de dureza obtenida es del 23%.

Tabla 6 Resultados de dureza superficial

PROBETAS	DUREZA INICIAL	DUREZA FINAL	VARIACION %
P-01	82	58	-29
P-02	82	75	-9
P-03	82	82	0
P-04	82	83	1
P-05	82	98	20
P-06	82	74	-10
P-07	82	83	1
P-08	82	92	12,20
P-09	82	94	14,63
P-10	82	95	15,85
P-11	82	100	21,95
P-12	82	101	23,17

Con el fin de determinar parámetros de aplicación para este procedimiento se puede extraer los datos de la gráfica experimental y realizar una línea de tendencia que permita aproximar la variación de dureza que se puede obtener con un tiempo específico de flameado. Dichas curvas se observan en la figura 11 y responde a la ecuación 3.1.

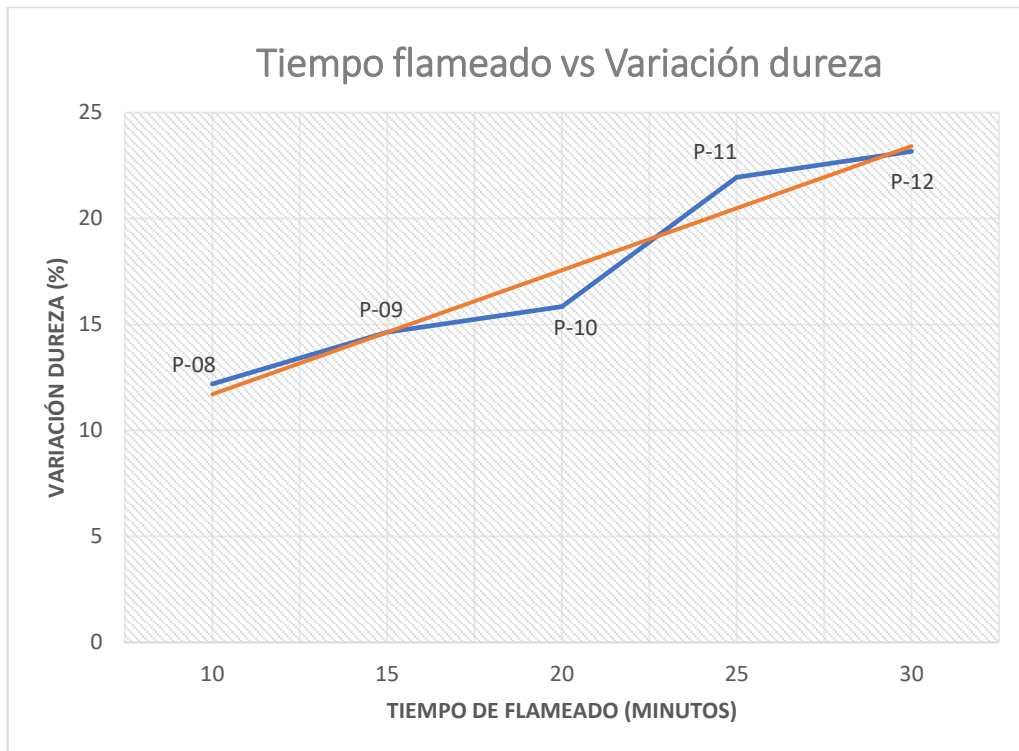


Figura 11 Resultados de dureza superficial y línea de tendencia (Fuente propia)

En la ecuación 3.1, la variable “y” representa la variación de dureza superficial medida en porcentajes, y la variable “x” el tiempo de flameado con las llamas carburantes medido en minutos. Importante mencionar que es una línea de tendencia aproximada, ya que se excluyen variables como la potencia de flujo de los gases utilizados.

$$y = 0.55x + 6.5$$

Ecuación 3.1. Línea de tendencia (Tiempo de flameado VS Variación dureza)

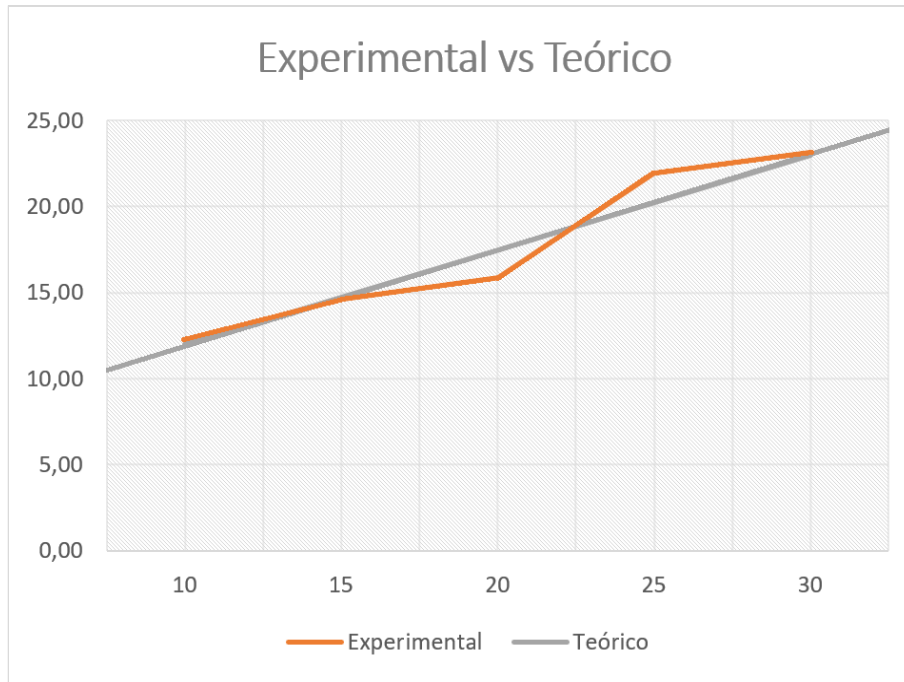


Figura 12 Dispersión entre datos experimentales y teóricos (Fuente propia)

Tabla 7 Error entre datos experimentales y teóricos

TIEMPO	VARIACION %		ERROR %
	Experimental	Teórico	
10	12,20	12,0	1,60
15	14,63	14,8	0,79
20	15,85	17,5	10,38
25	21,95	20,3	7,75
30	23,17	23,0	0,74

En la figura 12 y la tabla 7 se detallan las desviaciones encontradas entre el método experimental y los datos calculados en base a la línea de tendencia, dichas desviaciones no son significantes y se puede decir que la ecuación 3.1 representa el fenómeno fielmente, aunque es posible que esto detalle el fenómeno solo en tiempos relativamente bajos donde le comportamiento es aparentemente lineal, ya que la curva real es posible que tenga tendencia a un valor constante, presentando un comportamiento asintótico. Es importante

mencionar que un análisis de costos posterior, puede detallar el tiempo de aplicación máximo de este proceso, donde además de acercarse a incrementos de dureza superiores cada vez menos evidentes, se sobrepase el costo de aplicación y presente una clara desventaja frente a métodos tradicionales.

3.2 Comentarios, probetas preliminares

Al no existir referencias de procedimientos de carburización con llamas oxiacetilénicas carburantes, esto implicó desarrollar el proceso desde el establecimiento de variables esenciales que determinan las propiedades de la carburización tales como el tiempo de calentamiento, el tiempo de cementado, la potencia de la llama, la composición de la llama, entre otras.

Las probetas P-01 y P-02 que no recibieron temple al final del proceso de carburización ven disminuida su dureza superficial, ya que probablemente el material sufrió un revenido de esfuerzos gracias al calor suministrado.

La probeta P-02 presentó una complicación única, esta fue atacada con una concentración de carbono muy elevada, lo que generaba una capa de hollín que aumentaba muy rápido su espesor, aislando completamente a la pieza de las llamas, por ello se descartó esta relación de concentración, y además se optó por evitar atacar a la probeta en una distancia en la que sea máximo la concentración de carbono.



Figura 13 Llama completamente carburante y hollín en la probeta P-02. (Fuente propia)

Las probetas P-03 y P-04 presentan muy poco aumento en su dureza superficial, ambas fueron templadas en aceite, es probable que este no otorgue un enfriamiento lo suficiente brusco, además el aceite debe reposar un tiempo elevado para utilizarse de nuevo, lo que aumenta costos y tiempos de procesamiento para varias piezas.

Las probetas P-03 además del temple en aceite recibió un flujo con menor concentración de carbono.

La probeta P-05 presenta un aumento de dureza destacado, fue templada en agua y con un flujo con alto contenido de carbono, pero no excesivo.

La probeta P-05 sirvió de referencia para la especificación de las variables para las probetas P-08, P-09, P-10, P-11 y P-12, las cuales fueron sometidas a la misma relación de concentración en el flujo del gas, y tiempos que van desde los 10 a los 30 minutos, la potencia del flujo es una variable que no se controló, así que estas últimas probetas fueron procesadas consecutivamente para no afectar dicho parámetro en las bombonas.

Las probetas P-06 y P-07 fueron realizadas bajo las mismas condiciones de aporte, pero una tiene temple y la otra no, esto permitió fijar completamente el uso del temple en

el proceso, y con el bajo aumento de dureza de la probeta P-07 descartar el uso del aceite como medio para el templado.

3.3 Conclusiones

Es evidente que el tratamiento de carburización con las llamas del proceso OAW, es un método factible, para lograr aumentos moderados de dureza superficial en rangos relativamente bajos de tiempo, comparados con procesos tradicionales utilizados en la industria, donde se suele trabajar con tiempos superiores a 24 horas. En este procedimiento se consiguen aumentos de dureza significativos, incluso con 10 minutos de aplicación.

Con base en las micrografías obtenidas del material base, es evidente que el material presenta un trabajo en frío representado en la compactación de los granos a medida que se acerca a la superficie, por ello fue necesario que para obtener la dureza base del material en bruto, se le realice un normalizado para recuperar las propiedades del grano original.

Los resultados de variación de dureza omiten la potencia de las llamas utilizadas, por eso, se puede observar que la probeta P-05 obtiene una variación mayor a su semejante en el grupo de probetas finales, y es que esta primera, fue sometida a una llama que presentaba la misma relación de composición, pero mayor flujo de gases, y por ende mayor potencia y aporte de carbono.

Este método puede llegar a ser utilizado en talleres pequeños donde, por ejemplo, se requiera afilar una herramienta de corte y esta se vea afectada en su dureza superficial por el afilado, aprovechándose de las llamas oxiacetilénicas para devolverle su resistencia a la zona de corte.

El método resulta muy práctico para endurecimiento de ejes de máquinas que han sido maquinados y con este tratamiento se los puede devolver su condición original. Además, puede ser aplicado a superficies pequeñas donde sea fácil orientar la llama carburante, como por ejemplo en dientes de engranajes reparados y demás superficies sometidas a esfuerzos cíclicos.

La variable fundamental en este proceso es el tiempo de exposición y mediante el desarrollo de este proyecto se ha determinado que para aumentar en al menos 12 % de la dureza se requiere 10 minutos. Si se sube a 30 minutos se logró incrementar la dureza hasta un 23%.

Los valores de dureza pueden ser mejorados con la aplicación de un temple inmediatamente luego de la carburización, con lo cual se puede alcanzar durezas equivalentes a las conseguidas con métodos tradicionales.

3.4 Recomendaciones

Es importante que para alcanzar la temperatura óptima de carburización se aplique una llama neutra o incluso un poco carburante, ya que a altas temperaturas el oxígeno presente puede reaccionar fácilmente con la superficie del metal y generar óxidos, que perjudicarían el tratamiento. De la misma forma, la transición entre el precalentamiento y la aplicación de la llama carburante debe ser inmediata, para evitar que la probeta reaccione con el oxígeno ambiental y se produzcan los mismos inconvenientes.

No trabajar con una llama cuya relación de composición se acerque al valor de "1L" (Completamente carburante), dado que se acumula una capa de carbono en la superficie, que aísla por completo a la probeta del tratamiento que se le está aplicando.

El operador debe contar con los elementos de protección necesarios para evitar la inhalación de humos perjudiciales para la salud, además de gafas, guantes y demás indumentaria de prevención normalmente utilizada en el proceso OAW.

Aplicar este proceso en el torno facilita la uniformidad de la carburización en probetas cilíndricas, por ello es necesario que la velocidad de rotación no sea excesivamente alta

Durante la medición de dureza es necesario verificar que el durómetro se encuentre configurado para la escala que se desea medir y calibrado con los bloques normalizados para cada escala, recordando siempre seguir los consejos de la norma especificada.

Es importante recordad que este tratamiento entrega mejores resultados cuando es aplicado a materiales que no tienen un tratamiento térmico o mecánico que haya aumentado previamente su dureza superficial.

Mejorar el control de los parámetros para las llamas, en cuanto a concentración de los gases, ayudaría a conseguir mejores resultados en el aumento de dureza, ya que este factor no pudo ser controlado durante este estudio.

Mejorar el sistema de sujeción tanto para la pieza en cuestión como para la antorcha utilizada durante el proceso, para facilitar la aplicación de la misma, y evitar el calentamiento de los elementos de sujeción del torno como son el cabezal y el contrapunto.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Oberg, Machinery's Handbook, Connecticut : Industril Press, 2012.
- [2] J. F. Pablo Arcos, «Análisis comparativo de los procesos de corte por plasma, oxicorte y arc air aplicados a metales,» Quito, 2010.
- [3] Linde Group Ecuador, «Linde Gases Industriales,» [En línea]. Available: http://www.linde.ec/es/products_and_supply/gases_fuel/acetylene.html. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [4] West-Arco, Manual de soldadura, Bogotá : ESAB, 2015.
- [5] IPN México, «Procesos en soldadura 4to Semestre,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ipn.mx/assets/files/cecyl4/docs/estudiantes/aulas/guias/cuarto/vesperino/procesos/procesos-de-soldadura.pdf>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [6] Struers Ensuring Certainty, «Struers,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Rockwell#introduction>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [7] QUALITEST , «World of Test,» QUALITEST Inc., 2020. [En línea]. Available: <https://www.worldoftest.com/analog-rockwell-hardness-tester-hardrocker>. [Último acceso: 10 Diciembre 2021].

5 ANEXOS

ANEXO I. Informe de mapeo de durezas

ANEXO II. Hoja de procesos para el tratamiento

ANEXO I

MEDICIÓN DE DUREZAS

Quito, 18 de febrero de 2022

SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Galo Homero Barragán Campos

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de material metálico pertenecientes a los señores Luis Mina y Efrén Barriga para el Proyecto de Integración Curricular "PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE CARBURIZACIÓN DE ACEROS MEDIANTE EL PROCESO OAW". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. MUESTRAS

Doce (12) probetas cilíndricas de acero SAE 1018 para mapeo de durezas.

2. ENSAYO DE DUREZA



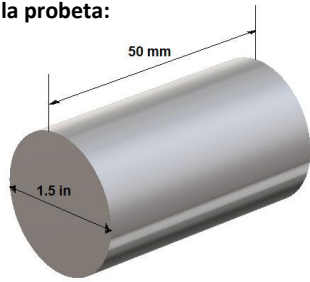
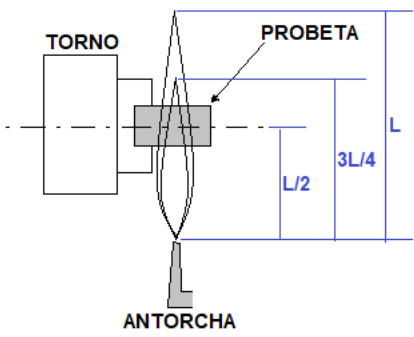
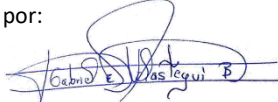

En la tabla 1 se presentan los resultados del mapeo de durezas realizado a las probetas cilíndricas de acero SAE 1018.

Tabla 1. Resultados del mapeo de durezas.

Id.	Escala	Dureza	Obs.
T-12	HRC	34	REALIZADO 20-12-2021 (PROBETA FINAL)
		34	
		28	
		22	
		25	
T-8	HRC	11	REALIZADO 20-12-2021 (PROBETA FINAL)
		14	
		15	
		15	
T-11	HRC	12	REALIZADO 20-12-2021 (PROBETA FINAL)
		29	
		28	
		29	
T-9	HRC	27	REALIZADO 20-12-2021 (PROBETA FINAL)
		22	
		15	
		13	
T-10	HRC	16	REALIZADO 20-12-2021 (PROBETA FINAL)
		17	
		14	
		14	
T-10	HRC	13	REALIZADO 20-12-2021 (PROBETA FINAL)
		14	



ANEXO II

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE SOLDADURA DE PRODUCCIÓN Y MANTENIMIENTO	
HOJA DE PROCESOS		
Institución: Escuela Politécnica Nacional Facultad: Ingeniería Mecánica Fecha: 08/02/2022	Elaborado por: Luis Mina, Efrén Barriga Revisado por: Ing. Gabriel Velastegui Aprobado por: Ing. Homero Barragán	
Descripción de la probeta Material: Acero SAE 1018 Distribuidor: Aceros Industriales HGB Dimensiones: Diámetro 1.5 in x 50 mm N. de probetas: 5 Tratamiento previo: Trabajo en frío (Requiere Normalizado) Dureza fabricante: 83 HRB Dureza medida: 82 HRB	Esquema de la probeta: 	
Pre calentamiento Temperatura: 900 °C Tiempo de aplicación: 5 min Tiempo transición: 0 min	Esquema del proceso: 	
VARIABLES DEL PROCESO Llama Oxiacetilénica: Carburante Rel. composición: 3L/4 Posición probeta: L/2 Tiempo aplicación: 10, 15, 20, 25, 30 min Temple: Agua Velocidad de giro: 200 rev/min		
Descripción del proceso <ol style="list-style-type: none"> 1. Medir la dureza superficial inicial de las probetas. 2. Sujetar la probeta en el torno y limar la superficie para remover una posible capa de óxido estable. 3. Abrir el paso de acetileno y oxígeno y encender la antorcha. 4. En llama neutra realizar el pre calentamiento de la pieza controlando la temperatura. 5. Inmediatamente cambiar a llama carburante con la relación de composición indicada. 6. Aplicar la llama carburante durante el tiempo requerido por probeta. 7. Inmediatamente, parar el torno, retirar la probeta del mismo y sumergir en agua para el templeado. 8. Medir la dureza superficial alcanzada con cada probeta. 		
OBSERVACIONES: Dureza inicial varía de la otorgada por el fabricante y el material presentaba tratamiento previo, por ende, se realizó un normalizado. La dureza final ha alcanzado un aumento mínimo de 12 % y un máximo de 23 %, resultados muy satisfactorios.		
Revisado por:  ING. GABRIEL VELASTEGUI	Aprobado por:  ING. HOMERO BARRAGÁN	