

**INFLUENCIA DEL NITROGENO COMO COMPONENTE DE LA ATMOSFERA  
EN UN PROCESO DE CEMENTACION GASEOSA DE ACEROS SAE 8620 Y  
SAE 1020 EN UN HORNO DE GOTEO DE ALCOHOL**

**DIANA CAROLINA BLANCO RUEDA  
PABLO ENRIQUE SAURITH DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOQUIMICA  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2010**

**INFLUENCIA DEL NITROGENO COMO COMPONENTE DE LA ATMOSFERA  
EN UN PROCESO DE CEMENTACION GASEOSA DE ACEROS SAE 8620 Y  
SAE 1020 EN UN HORNO DE GOTEO DE ALCOHOL**

**DIANA CAROLINA BLANCO RUEDA  
PABLO ENRIQUE SAURITH DIAZ**

**Proyecto de grado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Metalúrgico**

**Director**

**Fabio Alberto Garzón Gálvis**

**Coordinador de Tratamientos Térmicos IMATT Ltda.**

**Codirector**

**Orlando José Gómez Moreno**

**Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOQUIMICA  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2010**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo queremos darle infinitas gracias a nuestro Dios, que nunca nos abandona.

A nuestras familias, por la paciencia, el apoyo y la dedicación, en especial a nuestras madres Stella y Rocío.

A Maria Isabel Rueda por la oportunidad y la confianza.

A la empresa IMATT Ltda., y en especial al coordinador de Tratamientos Térmicos, el Ingeniero Fabio Alberto Garzón Gálvis, por la oportunidad, los conocimientos y la amistad brindada.

Al profesor Orlando José Gómez Moreno, por su apoyo, el tiempo, la asesoría y el conocimiento brindado.

A la Ingeniera María Liliana Meneses por la colaboración en las pruebas y demás actividades que realizamos en su laboratorio.

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCION	18
OBJETIVOS	20
1. MARCO TEORICO	21
1.1 TRATAMIENTOS TERMICOS	21
1.1.1 Temple	21
1.1.2 Normalizado	22
1.1.3 Revenido	22
1.1.4 Recocido	22
1.2 TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS	22
1.2.1 Cementación	23
1.2.2 Nitruración	23
1.2.3 Carbonitruración	23
1.3 CEMENTACION LIQUIDA	24
1.3.1 Reacciones químicas en el proceso de cementación líquida.	25
1.4 CEMENTACION GASEOSA	26
1.4.1 Efecto de la temperatura	28
1.4.2 Efecto del tiempo	29
1.4.3 Tipos de hornos empleados	30
1.5 NITROGENO	30

1.5.1 Nitrógeno + Hidrógeno	31
1.5.2 Nitrógeno + Metanol o Nitrógeno + Etanol	31
1.6 ATMOSFERAS CONTROLADAS PARA TRATAMIENTOS TERMICOS	31
1.6.1 Atmósferas basadas en nitrógeno	31
2. PLAN DE TRABAJO	33
2.1 METODOLOGIA	33
2.2 DEFINICIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS A UTILIZAR Y LAS PRUEBAS A REALIZAR	34
2.3 CERTIFICACION DE LAS MUESTRAS DE ACERO SAE 8620 Y SAE 1020	35
2.4 DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES Y PROPORCIONES MASICAS DE LAS MEZCLAS	36
2.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL	37
2.5.1 Pruebas de calentamiento y puesta a punto del horno	37
2.5.2 Proceso de cementación líquida	37
2.5.3 Proceso de cementación gaseosa	38
2.5.4 Pruebas de laboratorio	40
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	41
3.1 PRUEBAS DE CALENTAMIENTO Y PUESTA A PUNTO DEL HORNO	41
3.2 PROCESO DE CEMENTACIÓN LÍQUIDA	42
3.2.1 Contenido de cianuro sódico	42
3.2.2 Prueba de dureza vickers	43
3.3 PROCESO DE CEMENTACION GASEOSA	48
3.3.1 Mediciones de flujo	48
3.3.2 Prueba de dureza vickers	51

3.4 INFLUENCIA DEL NITROGENO EN LA VELOCIDAD DE CEMENTACIÓN	77
3.5 SEGUIMIENTO DE HOLLÍN	78
3.6 ANALISIS DE COSTOS	79
3.6.1 Proceso de cementación líquida	80
3.6.2 Proceso de cementación gaseosa	81
CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	87

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Composición de operación de los baños para cementación líquida.	24
Tabla 2. Composición química de los aceros.	36
Tabla 3. Porcentajes máxicos de mezclas (Valores en % peso).	36
Tabla 4. Pruebas de calentamiento.	41
Tabla 5. Contenido de cianuro sódico.	43
Tabla 6. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación líquida.	45
Tabla 7. Tiempo necesario durante la cementación líquida.	48
Tabla 8. Cantidad de gases en las atmósferas (Valores en % volumen)	49
Tabla 9. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	52
Tabla 10. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	55
Tabla 11. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	58
Tabla 12. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	61
Tabla 13. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	64
Tabla 14. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	67
Tabla 15. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.	70

Tabla 16. Constantes calculadas de la ecuación de Harris en el proceso de cementación gaseosa.	74
Tabla 17. Tiempos necesarios durante el proceso de cementación gaseosa.	75
Tabla 18. Cantidad de hollín en las piezas tratadas.	79
Tabla 19. Costo de los reactivos gastados por hora.	80
Tabla 20. Costo del consumo energético gastado por hora.	81
Tabla 21. Costo total del consumo de reactivos.	81
Tabla 22. Costo del consumo energético gastado por hora.	82
Tabla 23. Relación $\frac{V_{Cr/h}}{C}$ para los diferentes aceros en las mezclas.	82

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Efecto de los tratamientos térmicos.	21
Figura 2. Efectos de los tratamientos termoquímicos.	23
Figura 3. Diagrama de flujo del plan de trabajo.	33
Figura 4. Diseño de las probetas que se utilizan en los procesos.	34
Figura 5. Probetas de la prueba de calentamiento.	42
Figura 6. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	44
Figura 7. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	44
Figura 8. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	46
Figura 9. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020.	47
Figura 10. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620.	47
Figura 11. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	51
Figura 12. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	52
Figura 13. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	53
Figura 14. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de Etanol puro.	53
Figura 15. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de Etanol puro.	54
Figura 16. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	54
Figura 17. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	55
Figura 18. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	56

Figura 19. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 90% Etanol – 10% Nitrógeno.	56
Figura 20. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 90% Etanol – 10% Nitrógeno.	57
Figura 21. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	57
Figura 22. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	58
Figura 23. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	59
Figura 24. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 70% Etanol – 30% Nitrógeno.	59
Figura 25. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 70% Etanol – 30% Nitrógeno.	60
Figura 26. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	60
Figura 27. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	61
Figura 28. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	62
Figura 29. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de Metanol puro.	62
Figura 30. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de Metanol puro.	63
Figura 31. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	63
Figura 32. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	64
Figura 33. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	65
Figura 34. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 90% Metanol – 10% Nitrógeno.	65
Figura 35. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 90% Metanol – 10% Nitrógeno.	66
Figura 36. Perfil de dureza Acero 1020.	66
Figura 37. Perfil de dureza Acero 8620.	67

Figura 38. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	68
Figura 39. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 70% Metanol – 30% Nitrógeno.	68
Figura 40. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 70% Metanol – 30% Nitrógeno.	69
Figura 41. Perfil de dureza Acero SAE 1020.	69
Figura 42. Perfil de dureza Acero SAE 8620.	70
Figura 43. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.	71
Figura 44. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 50% Metanol – 50% Nitrógeno.	71
Figura 45. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 50% Metanol – 50% Nitrógeno.	72
Figura 46. Variación de K para los diferentes procesos.	76
Figura 47. Influencia del nitrógeno en la velocidad de cementación para el acero SAE 8620 y el acero SAE 1020.	77

## RESUMEN

### TITULO:

INFLUENCIA DEL NITROGENO COMO COMPONENTE DE LA ATMOSFERA EN UN PROCESO DE CEMENTACION GASEOSA DE ACEROS SAE 8620 Y SAE 1020 EN UN HORNO DE GOTEADO DE ALCOHOL\*.

### AUTORES:

BLANCO RUEDA, Diana Carolina  
SAURITH DÍAZ, Pablo Enrique\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Tratamientos térmicos, cementación, nitrógeno molecular, Etanol, Metanol.

### DESCRIPCION

Con este trabajo se desea obtener valores de profundidad de capa efectiva de cementación en aceros SAE 8620 y SAE 1020 en una atmósfera gaseosa. A la temperatura de trabajo usada en el proceso, el nitrógeno es completamente inerte. La atmósfera de cementación se genera por la disociación térmica de dos alcoholes, tales como el Etanol y el Metanol y la adición de nitrógeno molecular. Los alcoholes se suministran en forma líquida y a flujos constantes. Se evalúan siete mezclas diferentes de alcohol con nitrógeno en porcentaje másico de los componentes, a distintos tiempos de cementación. Las variables que se estudian son: la velocidad de penetración, la acumulación de hollín en la superficie de las piezas tratadas con base en estas mezclas y los costos de operación frente a la cantidad de tiempo, insumos y energía requeridos en los procesos. Paralelamente se comparan los resultados obtenidos en las mezclas estudiadas en el proceso de cementación gaseosa, con un proceso de cementación líquida estandarizado en la empresa IMATT Ltda.

El propósito final del presente estudio es buscar las condiciones óptimas para que el proceso de cementación gaseosa sea implementado en la empresa IMATT Ltda.

Esta nueva tecnología en sus procesos les permitirá tener un mejoramiento en las calidades del producto como también la disminución de costos de operación y así reafirmar el compromiso del metalúrgico de hoy en la interacción de la industria con el medio ambiente.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales. Director: Fabio Alberto Garzón Gálvis. Codirector: Orlando José Gómez Moreno.

## ABSTRACT

### TITLE:

NITROGEN INFLUENCE AS A COMPONENT OF THE ATMOSPHERE IN SAE 8620 AND SAE 1020 STEEL GASEOUS CEMENTATION PROCESS IN AN ALCOHOL DRIPPING FURNACE.\*

### AUTHORS:

BLANCO RUEDA, Diana Carolina  
SAURITH DÍAZ, Pablo Enrique \*\*

### KEY WORDS:

Thermal treatments, cementation, molecular nitrogen, ethanol, methanol.

### DESCRIPTION

With this project, it is pretended to obtain depth values of effective layer of SAE 8620 and SAE 1020 steel cementation in a gaseous atmosphere. The nitrogenous is completely inert to the temperature used in the process. The cementation atmosphere is generated by thermal disassociation of two alcohols such as the Ethanol and Methanol and the addition of molecular nitrogen. Alcohols are supplied in liquid form and in constant flows. Seven different mixtures of alcohol are evaluated with nitrogen in mass percentage of the components in different cementation times.

Variables studied are: penetration speed, soot accumulation in the surface of pieces treated with base of these mixtures, and operation costs with respect to time, consumables and energy required in the processes. Also, results obtained in the mixtures studied in the process of gaseous cementation are compared with a standardized liquid cementation process in the company IMATT Ltda.

The final purpose of the present project is to look for optimum conditions to implement the gaseous cementation process in the company IMATT Ltda. This new technology in their processes will let them to improve product quality and reduce operation costs, reaffirming in this way metallurgist's commitment in the interaction of the industry with the environment.

---

\* Graduation Project.

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineerings. Metallurgical Engineering and Material Science School . Director: Fabio Alberto Garzón Gálvis. Co-director: Orlando José Gómez Moreno.

## INTRODUCCION

IMATT Ltda., es una empresa del sector metalmeccánico dedicada a la fabricación de piezas, prestación de servicios de: Tratamientos Térmicos, mecanizado industrial y Laboratorio Metalográfico para la industria alimenticia, petrolera y automotriz.

Ante la globalización de la economía se deben mejorar los procesos y las tecnologías con el fin de ser más competitivos.

En los procesos de tratamientos térmicos a nivel regional, es necesario introducir metodologías con nuevos sistemas que reemplacen los medios sólidos o líquidos como medios para llevar a cabo procesos termoquímicos y de protección de las superficies a altas temperaturas.

Además, la necesidad de reemplazar las materias primas contaminantes del medio ambiente como el NaCN (Cianuro de Sodio) y el BaCl<sub>2</sub> (Cloruro de Bario) por otros productos menos impactantes como el mismo N<sub>2</sub> (Nitrógeno) y una serie de hidrocarburos como el CH<sub>3</sub>OH (Metanol) y el C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (Etanol).

En la actualidad el nitrógeno gracias a sus ventajas sobre los procesos convencionales está teniendo una aplicación cada vez mayor en la industria, debido a una reducción de costos, sin degradación en la calidad de la pieza y con mejores propiedades, por dicha razón se desea llegar a obtener un manejo de este insumo y realizar la verificación de las piezas tratadas para determinar las condiciones óptimas de trabajo.

En la implementación de tecnologías nuevas en la empresa, como es el caso del proceso de cementación gaseosa basado en atmósferas con nitrógeno, se busca obtener las mejores condiciones de trabajo teniendo en cuenta que se comienza a trabajar con reactivos desconocidos en el proceso de producción, como el nitrógeno, metanol y etanol. De esta manera del uso de estos reactivos en el proceso dependen los resultados de este estudio.

Por lo tanto, el presente proyecto es de vital importancia para la organización IMATT Ltda., con miras a enfrentar los nuevos retos de competitividad a nivel nacional e internacional.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia del nitrógeno como componente de la atmósfera en el proceso de cementación gaseosa de aceros SAE 8620 y SAE 1020.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

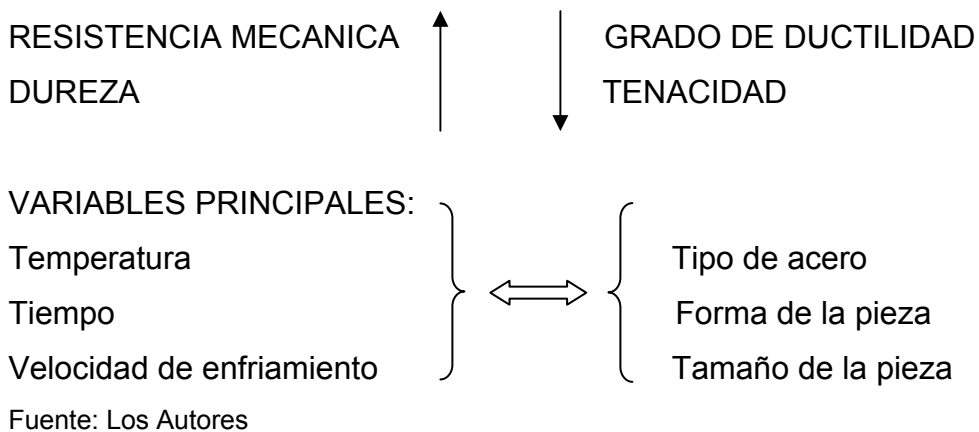
- Determinar la influencia del nitrógeno en la etapa de calentamiento.
- Medir la influencia del nitrógeno en la profundidad de capa cementada.
- Evaluar la influencia del nitrógeno según la cantidad de hollín en las piezas tratadas.

# 1. MARCO TEORICO

## 1.1 TRATAMIENTOS TERMICOS

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, y consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta forma, se modifica la estructura metalográfica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces hay también cambios en la composición del metal.

**Figura 1. Efecto de los tratamientos térmicos.**



Entre los tratamientos térmicos básicos se tienen:

**1.1.1 Temple.** El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua, aceite, etc.

**1.1.2 Normalizado.** Consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior Ac (900-950°C), seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. De esta forma, se deja al acero con una estructura y propiedades que se consideran como normales y características de su composición.

**1.1.3 Revenido.** Es un tratamiento que se da a las piezas de acero que han sido previamente templadas. Con este tratamiento, que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando el acero con la dureza o resistencia deseada.

**1.1.4 Recocido.** Consiste en calentamientos a temperaturas adecuadas, seguidos generalmente de enfriamientos lentos. Cuyo objetivo principal es ablandar el acero, ya sea a regenerar su estructura o eliminar tensiones internas.

## **1.2 TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS**

Se llama tratamiento termoquímico al aumento en la composición química superficial del acero por difusión de un elemento determinado (C, N, Al, Cr y otros) desde el medio exterior y a alta temperatura.

Requieren el uso de calentamiento y enfriamiento controlados en atmósferas especiales.

Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos están aumentar la dureza superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión.

**Figura 2. Efectos de los tratamientos termoquímicos.**



Fuente. [http://www.aimt-group.com/files/einsatzh\\_rten\\_spanisch.pdf](http://www.aimt-group.com/files/einsatzh_rten_spanisch.pdf)

Entre los tratamientos termoquímicos se encuentran:

**1.2.1 Cementación.** Consiste en carburar una capa superficial del acero, rodeándole de un producto carburante y calentándolo a temperatura adecuada. Después se temple y reviene la pieza, quedando con gran dureza superficial y buena tenacidad en el núcleo.

**1.2.2 Nitruración.** Es un tratamiento que tiene por objeto aportar nitrógeno en forma de nitruros de hierro a la capa superficial del acero, con lo que se consigue endurecerla extraordinariamente. No produce deformaciones en las piezas. Sólo se pueden nitrurar aceros especiales y es un tratamiento muy costoso.

**1.2.3 Carbonitruración.** Con el se consigue endurecer una capa superficial del acero por la acción simultánea de Carbono y Nitrógeno. También es conocido como cianuración gaseosa. Se utiliza un gas portador, vapor de agua y un gas activo que en este caso es amoníaco.

### 1.3 CEMENTACION LIQUIDA

La cementación líquida se hace manteniendo el acero en contacto con un baño de sales a una temperatura alrededor de 860° C, con el fin de introducir carbono y nitrógeno o carbono solo en el metal.

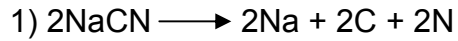
Los baños de baja temperatura del tipo cianuro son los que normalmente se utilizan en el rango de 845 a 900° C, producen capas entre 0,10 y 0,25 mm con cantidades apreciables de nitrógeno. Aunque para ciertos efectos específicos este rango se amplía de 790 a 925° C, estos baños son del tipo cianógeno acelerado (tabla 1), y difieren de los baños de cianuración en que la capa producida por un baño de baja temperatura contiene carbono predominantemente. Generalmente, se operan con una cubierta protectora.

**Tabla 1. Composición de operación de los baños para cementación líquida.**

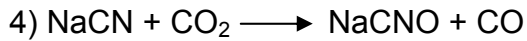
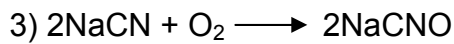
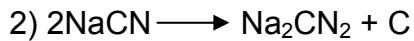
CONSTITUYENTE	CAPA FINA	CAPA GRUESA
	BAJA	ALTA
	TEMPERATURA 845	TEMPERATURA 900
	A 900° C	A 955° C
Cianuro de sodio	10-23%	6-16%
Cloruro de bario	0-40%	30-55%
Cloruro de calcio o estroncio	0-10%	0-10%
Cloruro de potasio	0-25%	0-20%
Cloruro de sodio	20-40%	0-20%
Carbonato de sodio	30% máximo	30% máximo
Otros aceleradores	0-5%	0-2%
Cianato de sodio	1% máximo	0,5% máximo
Densidad del baño	1,760 g/cm <sup>3</sup> a 900° C	2,000 g/cm <sup>3</sup> a 925° C

Fuente: VALENCIA, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Universidad de Antioquia: Previas, 1986. 353 p.

**1.3.1 Reacciones químicas en el proceso de cementación líquida.** Se sabe que el cianuro de sodio se descompone térmicamente así:



También ocurre el desplazamiento hacia la cianamida y la formación del cianato.



El cianato puede volver a oxidarse:

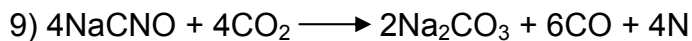
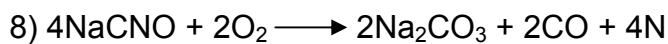
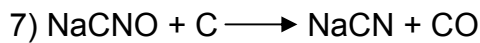


O descomponerse por acción del calor:



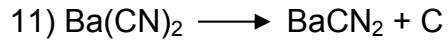
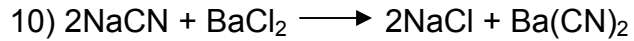
El CO puede cementar.

Otras reacciones que cambian el contenido de cianato son:



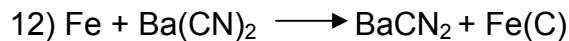
Las reacciones 8) y 9) disminuyen la actividad del baño y pueden hacer perder su efectividad carburizadora si no se renueva.

Aunque las reacciones mostradas para los baños de baja temperatura se aplican en cierta medida, la principal reacción es la formación de cianamida.



Estas reacciones se ven favorecidas por los contenidos corrientes de baños en  $\text{BaCl}_2$ , con lo que se crea una especie de estado de equilibrio y el potencial de carbono se hace casi constante.

En presencia de hierro, la reacción es:



Las capas producidas en estos baños contienen esencialmente carbono disuelto en hierro.

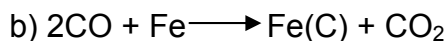
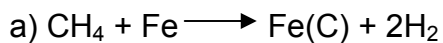
#### **1.4 CEMENTACION GASEOSA**

En la cementación gaseosa el agente carburante puede ser un hidrocarburo gaseoso, tal como gas natural o propano, o hidrocarburos líquidos tales como terpenos, benceno, alcoholes, glicoles o cetonas; en este último caso, el líquido se introduce en el horno haciéndolo gotear sobre una placa donde se evapora casi instantáneamente y es térmicamente dissociado en monóxido y dióxido de carbono, metano y vapor de agua.

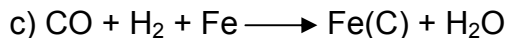
Además del agente carburante la atmósfera está constituida por un gas portador con el fin de aumentar el volumen y facilitar la circulación de la atmósfera, lo que promueve una mayor uniformidad de cementación.

El gas portador puede ser una atmósfera protectora (Nitrógeno). El nitrógeno en estado molecular no deteriora los aceros sino que es una atmósfera protectora conveniente. Este debe estar completamente seco cuando se le desea emplear ya que aún con pequeñas cantidades de vapor de agua pueden causar descarbonación de los aceros de alto carbono.

La cementación se puede realizar a partir de distintos gases que son constituyentes de las atmósferas, tanto el metano como el monóxido de carbono, que a temperaturas elevadas dan lugar a cementación de acuerdo con las siguientes reacciones:



Si en la atmósfera hay hidrógeno, la reacción de cementación ocurre preferiblemente de acuerdo con la siguiente reacción:



La composición del gas se puede determinar por análisis y se puede conocer el potencial de carbono. Hay una serie de métodos para medir y controlar continuamente el potencial de carbono, uno de ellos está basado en el uso de rayos infrarrojos para registrar la concentración de  $\text{CO}_2$  en el gas.

Otro método es midiendo la resistencia de un alambre de acero que se calibra para distintas concentraciones de carbono. La resistencia medida es proporcional a la concentración de carbono.

En principio hay cuatro medios de producir el gas:

- *Goteando un líquido carburante en el horno.* Este líquido generalmente es un hidrocarburo, un alcohol o una cetona. Cae sobre una placa dentro del horno, se dispersa y se evapora. Por este método se puede emplear un líquido que produce un gas portador con bajo potencial de carbono.
- *Admitiendo gas desde una unidad productora.* El gas se produce por combustión endotérmica. El gas inicial puede ser gas natural o propano, que se mezcla con aire en proporciones balanceadas y se quema en un lecho fluidizado para producir un gas portador con un potencial de carbono de 0,35-0,50%. Antes de que entre al horno, al gas portador se le hace una adición extra de propano ajustando el potencial de carbono al nivel requerido que normalmente es 0,8%.
- *Por admisión directa de gas y aire en el horno.* El gas cementante se produce en el horno mismo por la reacción entre el gas y el aire que se admiten en cantidades balanceadas.
- *Cementado en un horno al vacío.* Sólo se admiten hidrocarburos en el horno del que se ha evacuado al aire. Como no hay oxígeno no hay oxidación. El proceso se puede efectuar a temperaturas más altas que las normalmente usadas, permitiendo una cementación más rápida.

**1.4.1 Efecto de la temperatura.** La cementación se realiza a una temperatura a la cual el acero esté en fase austenítica, dado que la solubilidad del carbono es mayor que en la fase ferrita.

La velocidad en la cual el carbono se introduce en el acero aumenta al aumentar la temperatura, por esta razón se asegura una cementación rápida a temperaturas superiores a 900° C y menores a 950° C, sin mayor deterioro del horno.

Cuando se desea obtener capas cementadas delgadas se emplean temperaturas más bajas, mientras que se obtienen capas profundas a temperaturas más altas. A cada temperatura de cementación, la concentración del carbono en la superficie del acero está dada por el límite de solubilidad del carbono en la austenita a esa temperatura.

**1.4.2 Efecto del tiempo.** Con el fin de evaluar el tiempo y la temperatura para realizar la cementación, Harris<sup>[6]</sup> desarrolló una expresión con base en las leyes de la difusión en estado sólido. Esta es:

$$X = 660e^{-\frac{8287}{T}} \sqrt{t}$$

Donde la profundidad de capa X se expresa en milímetro, el tiempo t en horas y la temperatura T en grados kelvin.

Para temperaturas específicas de cementación, la expresión queda reducida a la siguiente forma sencilla:

$$X = K\sqrt{t}$$

K: Constante de Harris para determinada temperatura.

Para 925° C, K = 0,635; para 900° C, K = 0,533; para 870° C, K = 0,457.

En la mayoría de los casos un contenido de carbono en superficie igual al límite de solubilidad del carbono en la austenita, da superficies cuya dureza es baja, luego del temple, por la presencia de austenita retenida. Además, las capas de muy alto carbono se pueden desprender por efecto de las tensiones de temple.

Para disminuir el carbono en la superficie basta suprimir el agente carburante de la atmósfera poco antes de terminar la cementación.

**1.4.3 Tipos de hornos empleados.** Durante bastante tiempo la cementación gaseosa de piezas se ha efectuado casi exclusivamente en hornos rotativos, de eje casi horizontal (ligeramente inclinado) que todavía se emplean en la actualidad, cuando no hay peligro de que se deformen las piezas, por efecto de los continuos choques y movimientos a que están sometidas.

Posteriormente se comenzaron a emplear hornos continuos en los que las piezas son transportadas a través del horno de un extremo a otro por medio de bandejas o cadenas móviles.

Para este tratamiento también se emplean hornos estacionarios, en los que las piezas se colocan en cestas o colgadas con alambres, según su forma y tamaño, introduciéndolas dentro de un recipiente cerrado a través del cual circula gas carburante, que es agitado por un ventilador colocado en la parte superior del horno. Terminada la carburación se desplaza la cabeza o tapa del horno y se saca la cesta o dispositivo donde se hallan las piezas para ser llevadas rápidamente al horno o cámara de difusión que se encuentra a más baja temperatura y luego se pasan las piezas al baño de temple.

## **1.5 NITROGENO**

El nitrógeno es un gas inerte a las temperaturas convencionales de tratamiento. Una atmósfera 100% de nitrógeno limita la oxidación superficial. Es un gas de protección que frecuentemente se usa para romper el vacío en hornos de vacío, para purgas, como fluido de temple, entre otros.

**1.5.1 Nitrógeno + Hidrógeno.** Estas mezclas se utilizan para evitar la oxidación superficial de los metales durante su tratamiento térmico. El contenido de hidrógeno de estas atmósferas depende del tipo de material, la temperatura a que se llevará a cabo, condiciones de enfriamiento y punto de rocío del horno.

**1.5.2 Nitrógeno + Metanol o Nitrógeno + Etanol.** El uso de nitrógeno y alcohol produce en el horno de tratamiento térmico una atmósfera que contiene nitrógeno, monóxido de carbono e hidrógeno formando el gas soporte de la reacción.

La descomposición térmica del metanol puede tener lugar de varias formas:

- $2\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{H}_2$  Temperatura  $< 500^\circ \text{C}$
- $2\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{C} + 4\text{H}_2$  Temperatura  $500 > X < 700$
- $2\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 2\text{CO} + 4\text{H}_2$  Temperatura  $> 700^\circ \text{C}$

La descomposición térmica del etanol puede tener lugar:

- $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \longrightarrow \text{CO} + \text{C} + 3\text{H}_2$  Temperatura  $> 700^\circ \text{C}$

Con una pureza del 99,9% para poder trabajar con él.

## **1.6 ATMOSFERAS CONTROLADAS PARA TRATAMIENTOS TERMICOS**

**1.6.1 Atmósferas basadas en nitrógeno.** Recientemente se han desarrollado nuevos procesos de tratamiento térmico utilizando atmósferas basadas en nitrógeno. Tales atmósferas son adecuadas para procesos de cementación.

El uso de atmósferas basadas en nitrógeno y metanol, asegura una capa cementada homogénea, sin hollín y con control efectivo de la atmósfera, cualquiera que sea el tipo de horno de tratamiento térmico.

Las atmósferas a base nitrógeno presentan características muy especiales que las han hecho predominar sobre el resto de sistemas de generación:

**Calidad:** el nitrógeno generado por los procesos de destilación fraccionada es muy puro (menos de 10ppm de oxígeno) y muy seco (menos de 5ppm de vapor de agua). Elimina la oxidación y descarburación.

**Flexibilidad:** el nitrógeno sirve para generar atmósferas neutras y reductoras y por debajo de 1300° es totalmente inerte.

**Seguridad:** en todos los tratamientos térmicos es indispensable la purga del horno antes de iniciar el tratamiento. Esto se debe hacer con un gas inerte para evitar posibles reacciones explosivas.

**Confiabilidad:** en las atmósferas controladas a base de nitrógeno, no se necesita energía eléctrica y por lo tanto durante las paradas por falta de corriente las piezas pueden continuar siendo protegidas en el horno.

**Simplicidad:** la inyección de las atmósferas a base de nitrógeno no requieren equipo de generación y solo es indispensable la utilización de medidores de flujo.

**Productividad:** los ciclos pueden ser más cortos.

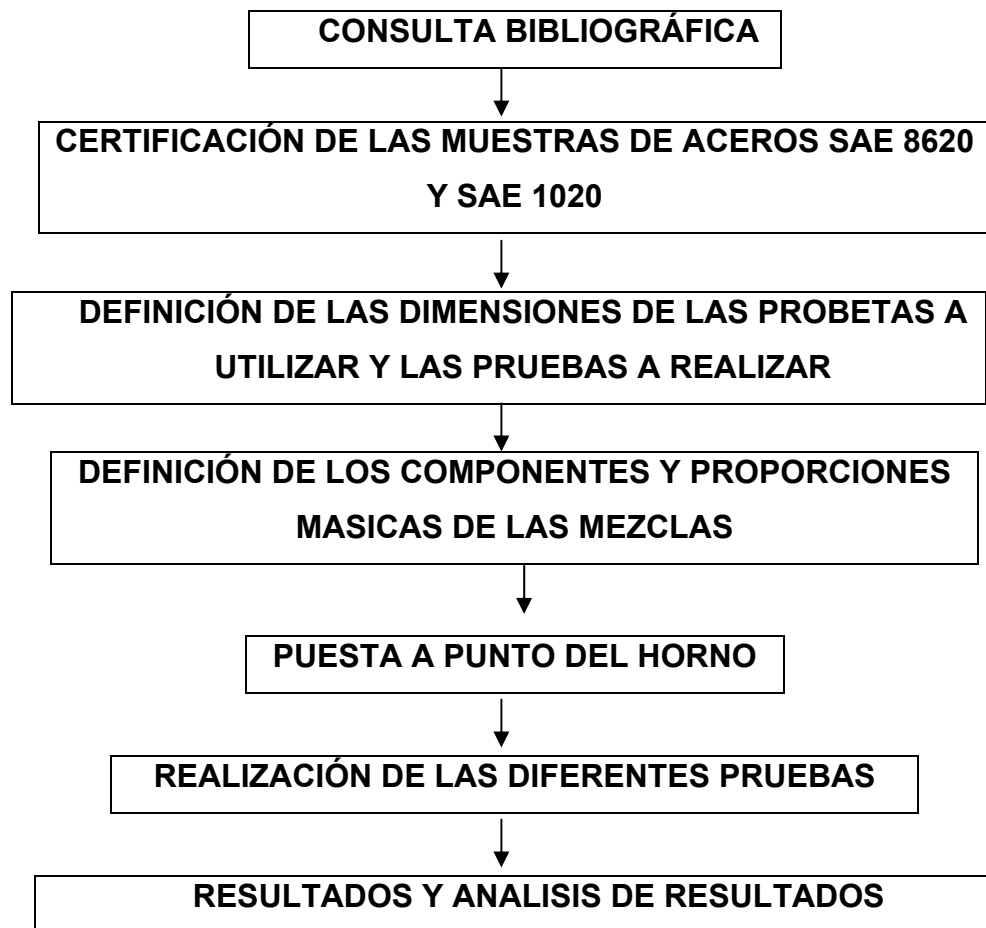
La función del nitrógeno dentro del horno no es simplemente neutral, ya que el incremento del nitrógeno reduce el hollinamiento y carburación cuando hay monóxido de carbono en exceso y disminuye o evita la descarburación cuando hay excedentes de dióxido de carbono.

## 2. PLAN DE TRABAJO

### 2.1 METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto se llevan a cabo las siguientes actividades, divididas en 7 etapas principales las cuales se realizan de forma consecutiva y simultánea.

Figura 3. Diagrama de flujo del plan de trabajo.



Fuente. Los Autores

## 2.2 DEFINICIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS A UTILIZAR Y LAS PRUEBAS A REALIZAR

- Se utilizan probetas de 2,1 cm de diámetro y 1,3 cm de espesor.

Debido al tipo de procedimiento que se lleva a cabo, estas dimensiones son las ideales para la entrada y salida por la chimenea del horno en cementación gaseosa, con esto se evita la entrada de cualquier gas de la atmósfera durante el proceso. Se utilizan las mismas dimensiones para la cementación líquida para tener condiciones similares en los procesos.

**Figura 4. Diseño de las probetas que se utilizan en los procesos.**



Fuente. Los Autores

Se realiza un rectificado para formar una cara plana, la función de esto es permitir la entrada y salida de las probetas por la chimenea con mayor facilidad.

El orificio en la parte inferior de la probeta mostrado en la figura 4 se realiza para el amarre de la misma, permitiendo así que la mayor parte superficial de la probeta esté expuesta a los cementantes.

- **Realización de las diferentes pruebas:**

- Pruebas relacionadas con la influencia del nitrógeno en la etapa de calentamiento.
- Pruebas relacionadas con la influencia del nitrógeno como componente de la mezcla en el proceso de cementación.

Se hacen pruebas de calentamiento, fijando la velocidad de éste, desde temperatura ambiente hasta temperatura de austenización con probetas del mismo tipo, utilizando diferentes flujos de nitrógeno, con purga y sin purga.

Con las probetas de los diferentes aceros (SAE 8620 y SAE 1020) se hace el proceso de cementación líquida, se fija la temperatura (860° C), composición del baño y medio de enfriamiento según el tipo de acero. Se varían los tiempos de mantenimiento y se mide el espesor de capa cementada basado en el perfil de microdureza Vickers.

Con las probetas de los mismos aceros y de las mismas dimensiones utilizadas, se hace el proceso de cementación gaseosa a temperatura constante (920° C), con diferentes mezclas gaseosas y diferentes tiempos de mantenimiento. Se fija el medio de enfriamiento según el tipo de acero y se evalúa el espesor de capa cementada por medio del perfil de microdureza vickers como el caso anterior.

### **2.3 CERTIFICACION DE LAS MUESTRAS DE ACERO SAE 8620 Y SAE 1020**

Se utilizan los aceros SAE 8620 y SAE 1020, debido a que su fabricación e importación de estos es mayor en la industria y son los más utilizados para el proceso de cementación en IMATT Ltda. Estos aceros a utilizar están debidamente certificados mediante análisis químico por espectrometría. Esta

técnica de análisis se realiza con un espectrómetro de emisión óptica marca Shimadzu, modelo: OES 5500, en la Universidad de Antioquia.

**Tabla 2. Composición química de los aceros.**

<b>SAE</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>
<b>1020</b>	0,199	0,202	0,577	0,018	0,022	0,132	0,086	0,019	0,005	0,222
<b>8620</b>	0,234	0,239	0,829	0,032	0,023	0,493	0,437	0,166	0,03	0,148

La composición se da en % peso

Fuente. Informe composición química, Universidad de Antioquia.

## **2.4 DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES Y PROPORCIONES MASICAS DE LAS MEZCLAS**

Se ve la importancia de realizar pruebas sin nitrógeno, con mezclas de él y variando con diferencias marcadas las cantidades de nitrógeno en cada prueba, para observar la condición superficial de las piezas.

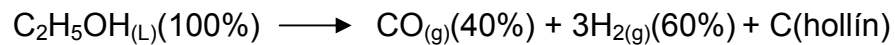
**Tabla 3. Porcentajes máxicos de mezclas (Valores en % peso)**

<b>Prueba</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Etanol</b>	<b>Metanol</b>
1	0%	100%	0%
2	10%	90%	0%
3	30%	70%	0%
4	0%	0%	100%
5	10%	0%	90%
6	30%	0%	70%
7	50%	0%	50%

Fuente. Los Autores

De acuerdo a los porcentajes máxicos de mezclas se realizan cálculos de disociación térmica para los alcoholes y a partir de esos cálculos se encuentra su porcentaje en volumen en la atmósfera generada, según sus ecuaciones de disociación química.

Se asume disociación completa debido a que se está trabajando a temperaturas de 920° C, y sin oxígeno:



## **2.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL**

**2.5.1 Pruebas de calentamiento y puesta a punto del horno.** Se fija la velocidad de calentamiento con diferentes flujos de nitrógeno, se toma la temperatura a diferentes tiempos, se evalúa el grado de descarburación con diferentes probetas y el consumo de nitrógeno.

**2.5.2 Proceso de cementación líquida.** El proceso de cementación líquida se comienza con la preparación del horno, que se basa en la observación del nivel de sales presentes en el horno de lecho fluidizado. Se prende el horno para llegar a una temperatura de 860° C, aproximadamente 3 horas antes de la prueba. Se sumergen las probetas en el baño de sales al llegar a la temperatura de 860° C. Se toma una muestra de las sales con un crisol al mismo tiempo en que se sumergen las probetas, dejando enfriar y posteriormente se realiza la determinación de cianuro sódico de la muestra. La duración del proceso es de 4 horas, cada hora se sacan dos probetas (una de cada acero) y se llevan a temple según el catálogo del fabricante.

- **Para realizar la cementación con sales se debe conocer el contenido en cianuro del baño.** Este procedimiento se comienza pulverizando la muestra con un mortero, se disuelven 2 g de la sal del baño de cementación en un matraz aforado de 250 ml lleno hasta la mitad de agua destilada hasta que se observe disolución completa y se afora.

Se filtra para remover residuos no solubles o impurezas que pueda tener el baño, se prepara una solución de yoduro potásico (disolviendo 6 g en 800 ml de agua destilada), se extrae una alícuota de 20 ml de la solución de sal del baño de cementación, se agregan dos gotas de solución indicadora de yoduro potásico a la alícuota de 20 ml. Se realiza el montaje para la titulación con nitrato de plata, se titula hasta que vire a color amarillo verdoso sin formación de precipitado, se anota el volumen y se realiza el procedimiento 3 veces.

Este procedimiento se lleva a cabo para el baño de sales de cementación antes y después del proceso de cementación líquida.

**2.5.3 Proceso de cementación gaseosa.** Se comienza con la preparación del horno (disponibilidad) en donde se adapta, revisa conexiones.

Se calibran los rotámetros para etanol o metanol, según la prueba a realizar, haciendo la medida de caudales para obtener valores reales a distintas lecturas en el rotámetro.

Se realizan cálculos necesarios de nitrógeno respecto a los flujos de alcohol, para saber si las escalas de los rotámetros están en los rangos de trabajo y así solucionar de forma inmediata algún imprevisto del proceso.

Se verifica la cantidad de etanol, metanol y nitrógeno antes de cada prueba, con el fin de que la prueba se realice completa, es decir, que no se acabe ni el alcohol ni

el nitrógeno durante el proceso. Es importante revisar el nivel en el tanque de alcohol, ya que a ciertos niveles puede haber entrada de aire en las válvulas.

Se verifica la condición de las válvulas y filtros de etanol, metanol y nitrógeno. De igual manera es importante que no haya fugas para evitar las pérdidas de alcohol y de nitrógeno, que pueden acabar con los reactivos o también pueden generar entrada de aire en el proceso.

Se comprueba que las probetas estén limpias, libres de humedad y grasa en la superficie para evitar componentes no deseados en la atmósfera del horno, se amarran las probetas con alambre dulce. Durante el amarre, las probetas se deben diferenciar mediante patrones o señales (arandelas de colores) para indicar el tiempo de proceso y el tipo de acero, con esto se logra saber la hora respectiva a la cual se debe sacar cada probeta y también diferenciar el medio de temple.

Se verifica la entrada en el horno de las piezas por la chimenea con amarre, introduciendo las probetas del ensayo con su respectivo amarre para saber si se pueden extraer de forma efectiva durante el proceso.

Se prende el horno hasta llegar a la temperatura de 920° C, una vez alcanzada ésta, se introducen las probetas, el alambre para verificación de hollín y de carburación y se abren las válvulas de nitrógeno y alcohol, para cronometrar el tiempo total de prueba.

De forma inmediata, se enciende la chimenea. La finalidad de este paso es eliminar los productos de la disociación del alcohol que se están desechando constantemente.

La combustión de CO y H<sub>2</sub> a la salida de la chimenea genera productos como el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, los cuales no son nocivos para la salud ni contaminantes.

Hay que considerar que durante los primeros 20 minutos se hace a caudales altos (40 unidades del rotámetro), tanto de alcohol como de nitrógeno debidamente proporcionados, esto se lleva a cabo para realizar purgas del horno. El tiempo restante se realiza a caudales menores (20 unidades del rotámetro) para regular el consumo.

Se sacan las diferentes probetas (SAE 1020 y SAE 8620) durante 1,2,3,4 horas respectivamente para después llevarlas a temple según el catálogo del fabricante.

**2.5.4 Pruebas de laboratorio.** Las pruebas de laboratorio incluyen corte de las muestras, montaje, pulido y toma de microdureza vickers.

Una vez las probetas salgan de las diferentes pruebas de cementación, se les realiza un corte con disco abrasivo, con las respectivas condiciones lubricantes y refrigerantes, según la norma ASTM E 3.

Se hace el montaje en baquelita, este procedimiento requiere de calor (aproximadamente 160° C) y presión (generalmente 4200 psi) durante el moldeo<sup>[2]</sup>.

Se pulen mecánicamente con lijas abrasivas de carburo de silicio desde la lija 80 hasta la lija 600 y finalmente se pasa por paño hasta llevarlas a espejo, siguiendo la norma ASTM E 3.

Se toman perfiles de microdureza con una carga de 500 gramos y un tiempo de 5 segundos, para medir la profundidad de capa cementada, según la norma ASTM E 92 - 82(2003).

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 PRUEBAS DE CALENTAMIENTO Y PUESTA A PUNTO DEL HORNO

Estas pruebas se realizan para conocer el consumo de nitrógeno en la fase de calentamiento, con el fin de obtener resultados de la velocidad de calentamiento en el horno a diferentes caudales de nitrógeno, y observar el grado de descarburación generado en las piezas tratadas.

**Tabla 4. Pruebas de calentamiento.**

<b>PURGA INICIAL</b>	<b>CAUDAL DE NITROGENO</b>	<b>VEL. DE CALENTAMIENTO</b>	<b>DESCARBURACION</b>	<b>CONSUMO DE NITROGENO</b>
No hubo	4L/min	8,5° C/min	0,1mm	472L
300L	3L/min	9,5° C/min	0,005mm	615L
600L	3L/min	11,9° C/min	No hubo	852L

Con estas pruebas se ven las condiciones a las cuales se debe trabajar con el horno a diferentes flujos de nitrógeno y purgas. Se observa que a flujos altos de nitrógeno el horno presenta menor velocidad de calentamiento. La implementación de purgas con nitrógeno disminuye la descarburación de las piezas tratadas. El aumento del volumen de purga no genera descarburación, dando como resultado mejores condiciones superficiales.

**Figura 5. Probetas de la prueba de calentamiento.**



a) Sin purga inicial.

b) Con purga de 300 L.

c) Con purga de 600 L.

Al realizar la purga se desplaza la cantidad de aire dentro de la cámara de tratamiento, lo cual asegura que la cantidad de oxígeno presente salga del horno.

Al aumentar el volumen de la purga se elimina de forma más eficiente la presencia de oxígeno en el horno, por tanto se elimina la descarburación.

### **3.2 PROCESO DE CEMENTACIÓN LÍQUIDA**

**3.2.1 Contenido de cianuro sódico.** Durante el proceso de cementación líquida se debe conocer el contenido en cianuro del baño.

**Tabla 5. Contenido de cianuro sódico.**

<b>Procedimiento</b>	<b>Titulación 1 (ml)</b>	<b>Titulación 2 (ml)</b>	<b>Titulación 3 (ml)</b>	<b>Promedio (ml)</b>
Sal inicial	1,4	1,6	1,5	1,5
Sal final	1,2	1,2	1,2	1,2

La titulación con nitrato de plata para una alícuota de 125 ml equivale al porcentaje de cianuro sódico en el baño de sales.

Como se utiliza una alícuota de 20 ml se hace la relación para obtener el porcentaje:

- Inicial:  $\left(\frac{125}{20}\right) \times 1,5 = 9,4\% \text{ NaCN}$
- Final:  $\left(\frac{125}{20}\right) \times 1,2 = 7,5\% \text{ NaCN}$

Lo anterior muestra la cantidad de cianuro que se utiliza en el proceso de cementación líquida en las piezas, arrojando un resultado de 1,9% gastado en la cementación.

**3.2.2 Prueba de dureza vickers** (ASTM E 92 - 82(2003)). Esta prueba se realiza con el fin de determinar el perfil de microdureza de los diferentes aceros, comenzando desde la superficie hacia el núcleo, con una distancia inicial de 0,05 mm, seguido de 0,1 mm y posteriormente se toman durezas en intervalos de 0,1 mm hasta llegar a una distancia de 1,5 mm.

Figura 6. Perfil de dureza Acero SAE 1020.

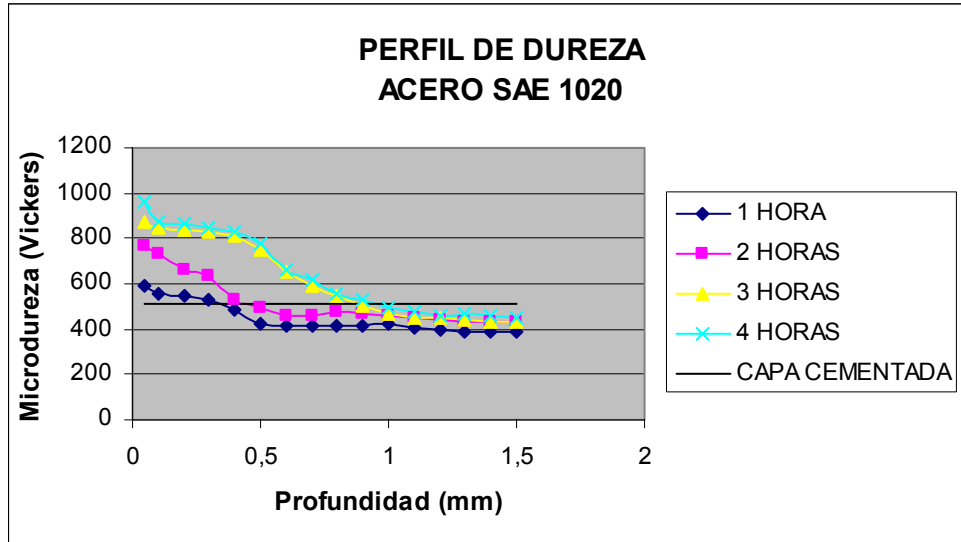
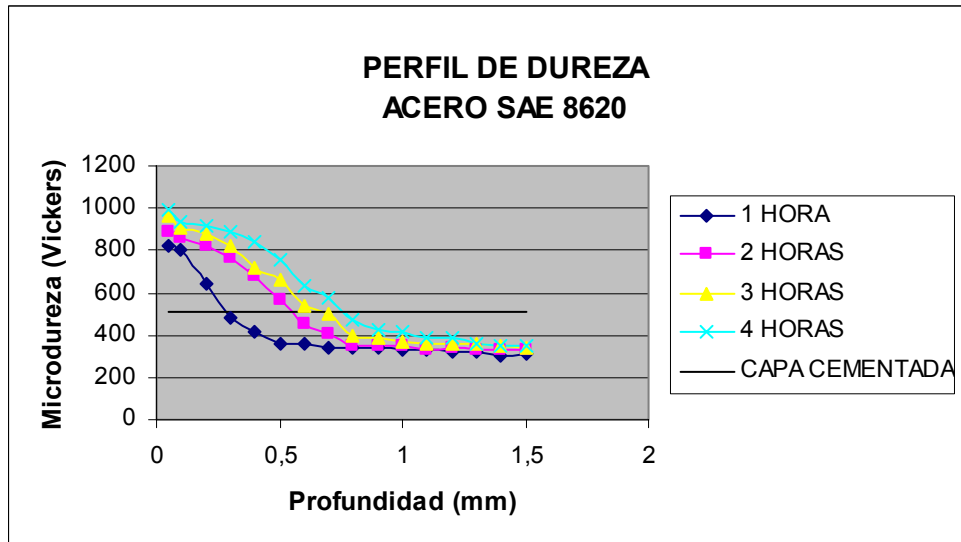


Figura 7. Perfil de dureza Acero SAE 8620.



En los perfiles de microdureza que se observan en las figuras 6 y 7 se da un desplazamiento de la curva de dureza en forma ascendente y de izquierda a derecha, definido como un aumento en la profundidad a la que penetra el carbono

en el acero, a medida que aumenta el tiempo durante el proceso de cementación líquida.

Esto muestra un aumento del contenido de carbono en la superficie del acero, que a su vez incrementa la dureza. Los valores de dureza en la superficie son hasta de 609-996 HV.

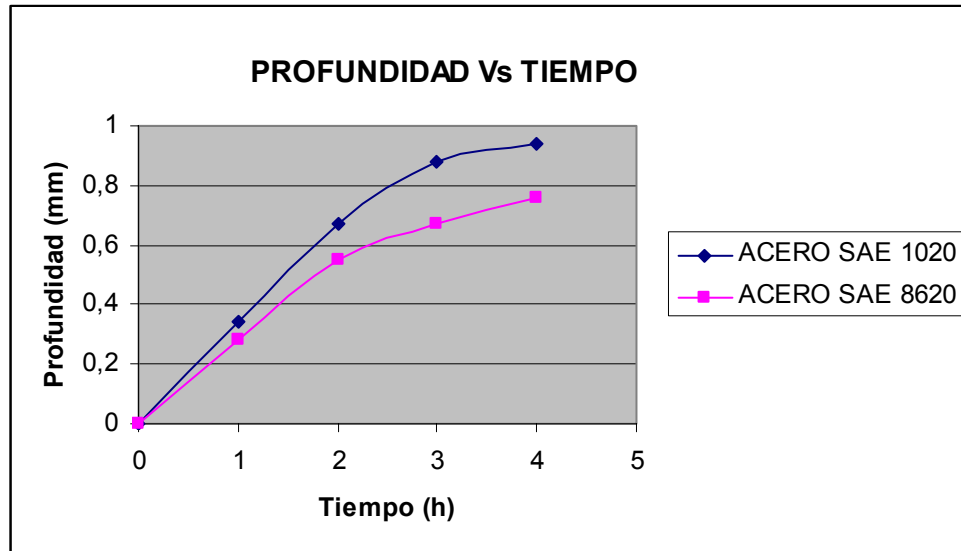
La profundidad de capa efectiva de cementación, se realiza a valores desde la superficie al núcleo que logran una dureza de 50 HRC en estado templado.

Este valor de dureza de 50 HRC equivalente a 513 HV es el valor que se toma como referencia<sup>[11]</sup>, de ahí se realiza una interpolación para determinar la profundidad de capa cementada entre los datos de frontera a la cual se logra esta dureza y de esta manera se obtiene una aproximación de la profundidad de capa cementada para los aceros.

**Tabla 6. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación líquida.**

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,34	0,28
2	0,67	0,55
3	0,88	0,67
4	0,94	0,76

**Figura 8. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.**



En la figura 8 se realiza una comparación de la profundidad de capa cementada para los aceros. La tendencia de la curva muestra que a medida que se aumenta el tiempo aumenta la profundidad y disminuye la pendiente (velocidad de cementación). Se observa que la mayor profundidad de cementación se presenta en el acero 1020.

Según la teoría se debe cumplir la ecuación de Harris:  $X = k\sqrt{t}$

Donde:

X: Profundidad de capa en milímetro.

t: Tiempo en horas.

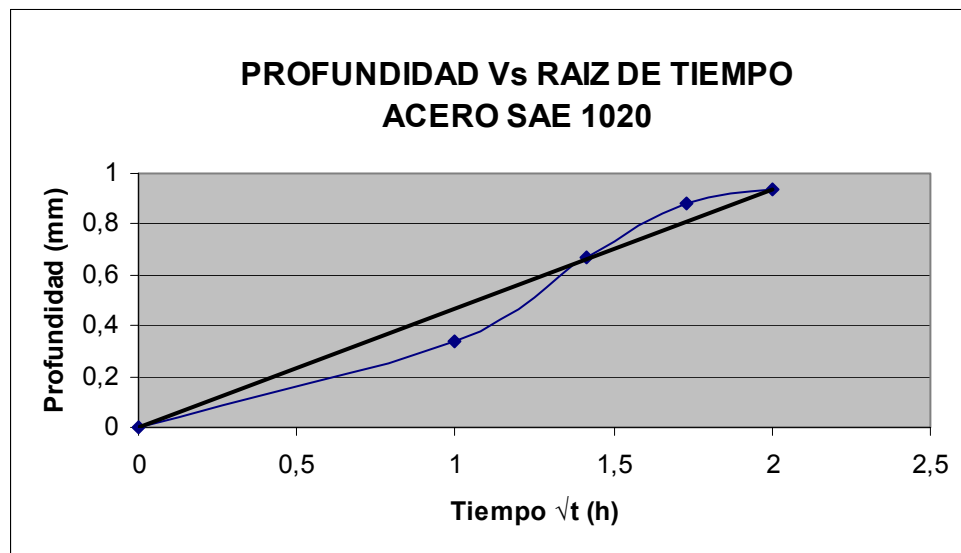
T: Temperatura en grados kelvin.

K: Constante de Harris para determinada temperatura.

Los datos obtenidos se pueden relacionar con dicha ecuación, según las figuras 9 y 10, sabiendo que:  $y = \sqrt{t}$

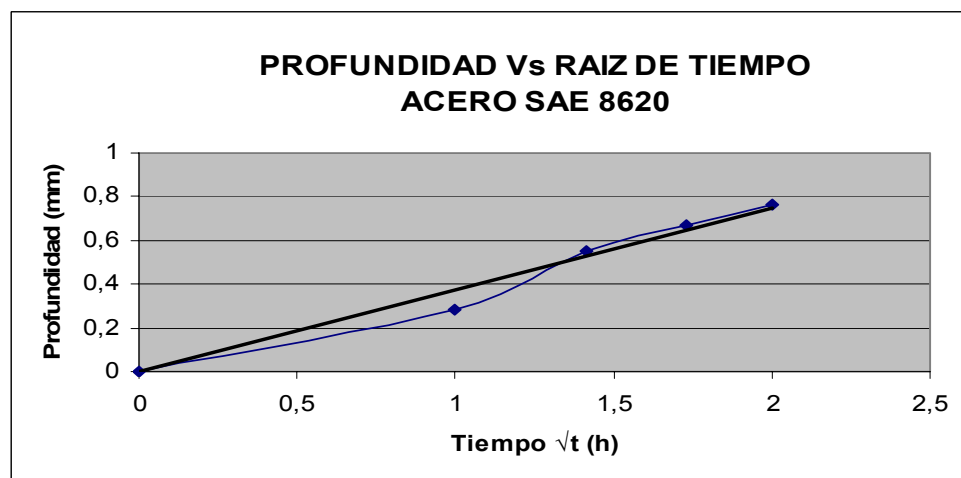
Este procedimiento se realiza con el fin de graficar los datos como una recta y obtener las ecuaciones de profundidad de cementación en función del tiempo.

**Figura 9. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020.**



$$x = 0,4692y$$

**Figura 10. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620.**



$$x = 0,3738y$$

De las ecuaciones obtenidas en las gráficas, se realiza una estandarización del proceso, con el cual se determinan los valores de tiempo al que deben someterse las piezas bajo las condiciones de los hornos de cementación líquida en IMATT Ltda.

**Tabla 7. Tiempo necesario durante la cementación líquida.**

PRUEBA	ACERO SAE 1020	ACERO SAE 8620
Cementación líquida	$t = \frac{x^2}{0,2201}$	$t = \frac{x^2}{0,1397}$

### 3.3 PROCESO DE CEMENTACION GASEOSA

**3.3.1 Mediciones de flujo.** Para realizar este proceso se mide la cantidad de alcohol que se usa para determinadas unidades del rotámetro.

Para el metanol:

20 unidades del rotámetro  $\longrightarrow$   $28,75 \frac{ml}{min} CH_3OH$

40 unidades del rotámetro  $\longrightarrow$   $78,5 \frac{ml}{min} CH_3OH$

Para el etanol:

20 unidades del rotámetro  $\longrightarrow$   $15,6 \frac{ml}{min} C_2H_5OH$

40 unidades del rotámetro  $\longrightarrow$   $59,6 \frac{ml}{min} C_2H_5OH$

Tomando en cuenta que las densidades son:

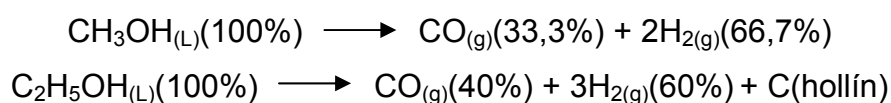
$$\rho_{N_2} = 1,25 \times 10^{-3} \frac{g}{cm^3} = 1,25 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho \text{ CH}_3\text{OH} = 0,7918 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 791,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH} = 0,7890 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 789,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Los cálculos se realizan con base a los flujos del rotámetro para los diferentes alcoholes, basados en la tabla 3 para obtener los valores de masa de nitrógeno. Posteriormente se pasan a volumen.

Los cálculos de la cantidad de gases en las atmósferas se realizan de forma estequiométrica según las ecuaciones de disociación térmica:



En la tabla 8 se muestra la cantidad de gases en cada prueba, basada en la anterior consideración.

**Tabla 8. Cantidad de gases en las atmósferas (Valores en % volumen)**

Prueba	VN <sub>2</sub>	VCO	VH <sub>2</sub>	Vtotal	%N <sub>2</sub>	%CO	%H <sub>2</sub>
1	0	6,411817	9,6177265	16,0295435	0	39,9999975	60,0000025
2	1,09355	6,411817	9,6177265	17,1230935	6,38640442	37,4454359	56,1681597
3	4,217998	6,411817	9,6177265	20,2475417	20,8321497	31,6671381	47,5007121
4	0	15,934975	31,86995	47,804925	0	33,3333333	66,6666667
5	2,022	15,934975	31,86995	49,826925	4,05804693	31,980651	63,961302
6	7,801	15,934975	31,86995	55,605925	14,0290805	28,6569732	57,3139463
7	18,202	15,934975	31,86995	66,006925	27,5758945	24,1413685	48,282737

Donde:

Prueba 1: Etanol puro.

Prueba 2: 90% Etanol – 10% Nitrógeno.

Prueba 3: 70% Etanol – 30% Nitrógeno.

Prueba 4: Metanol puro.

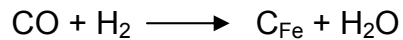
Prueba 5: 90% Metanol – 10% Nitrógeno.

Prueba 6: 70% Metanol – 30% Nitrógeno.

Prueba 7: 50% Metanol – 50% Nitrógeno.

La tabla 8 muestra las condiciones de trabajo durante todo el proceso, ya que dichas proporciones se mantienen constantes, debido a que los flujos de alcohol y nitrógeno son constantes durante los procesos.

Teóricamente el potencial de carbono es directamente proporcional al porcentaje de monóxido de carbono, como también al porcentaje de hidrógeno según la reacción de cementación gaseosa:



### **ACTIVIDAD DE CARBONO**

$$a_c = \left( \frac{[\% \text{CO}][\% \text{H}_2]}{[\% \text{H}_2\text{O}]x100} \right) (K)$$

Donde:

K: Constante de equilibrio.

$$\log K = -7.494 + 7130/T^{[9]}$$

De lo anterior se obtiene el orden consecutivo de los potenciales de mayor a menor según las mezclas:

1. Etanol puro.
2. Metanol puro.
3. 90% Etanol – 10% Nitrógeno.
4. 90% Metanol – 10% Nitrógeno.
5. 70% Metanol – 30% Nitrógeno.
6. 70% Etanol – 30% Nitrógeno.
7. 50% Metanol – 50% Nitrógeno

**3.3.2 Prueba de dureza vickers** (ASTM E 92 - 82(2003). La toma de dureza vickers en el proceso de cementación gaseosa al igual que en el proceso de cementación líquida se realiza con el fin de determinar el perfil de microdureza de los diferentes aceros y en este caso en las diferentes mezclas estudiadas.

### ETANOL PURO

**Figura 11. Perfil de dureza Acero SAE 1020.**

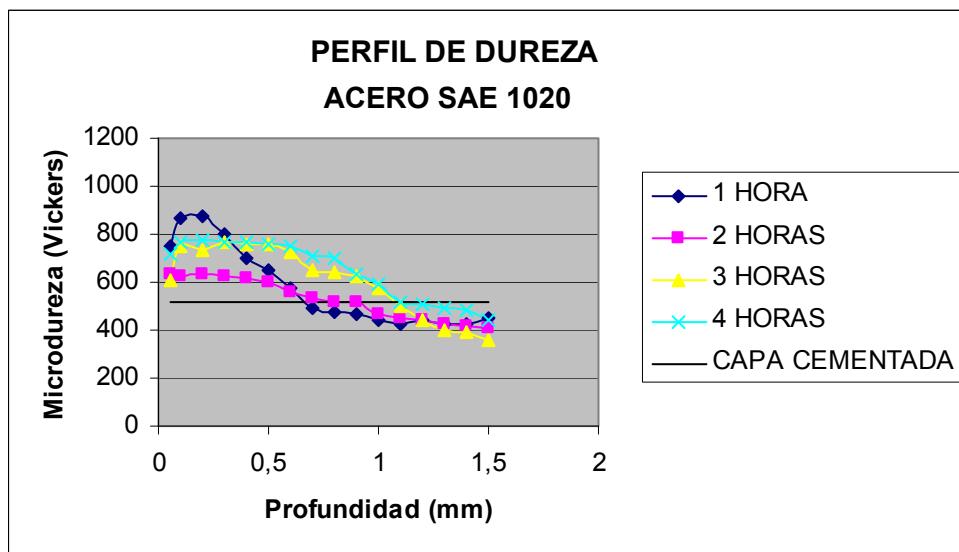


Figura 12. Perfil de dureza Acero SAE 8620.

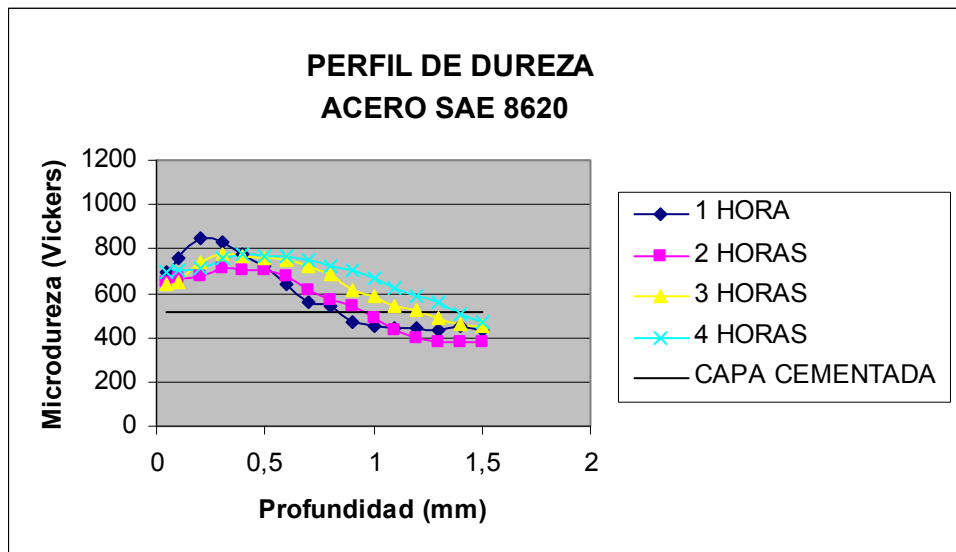


Tabla 9. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,68	0,82
2	0,91	0,98
3	1,08	1,26
4	1,21	1,38

Figura 13. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

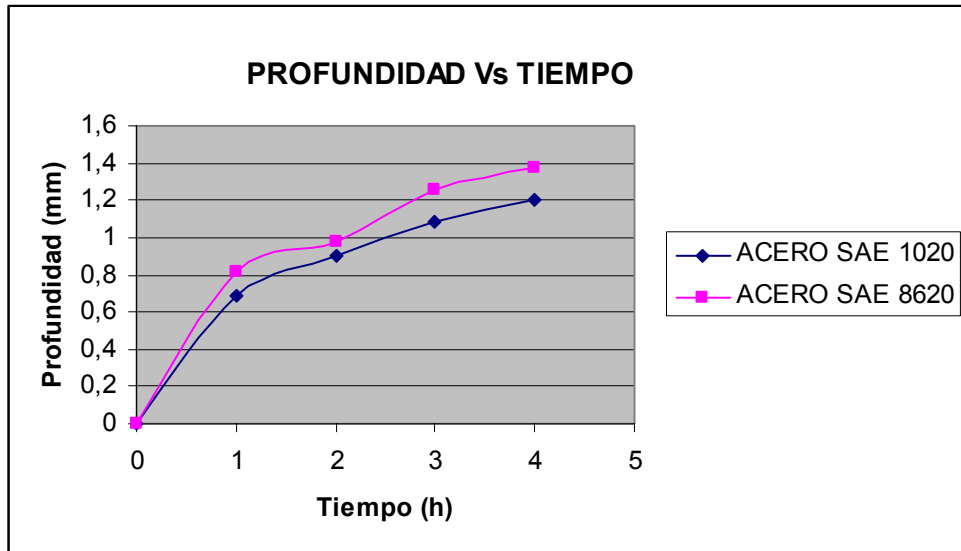
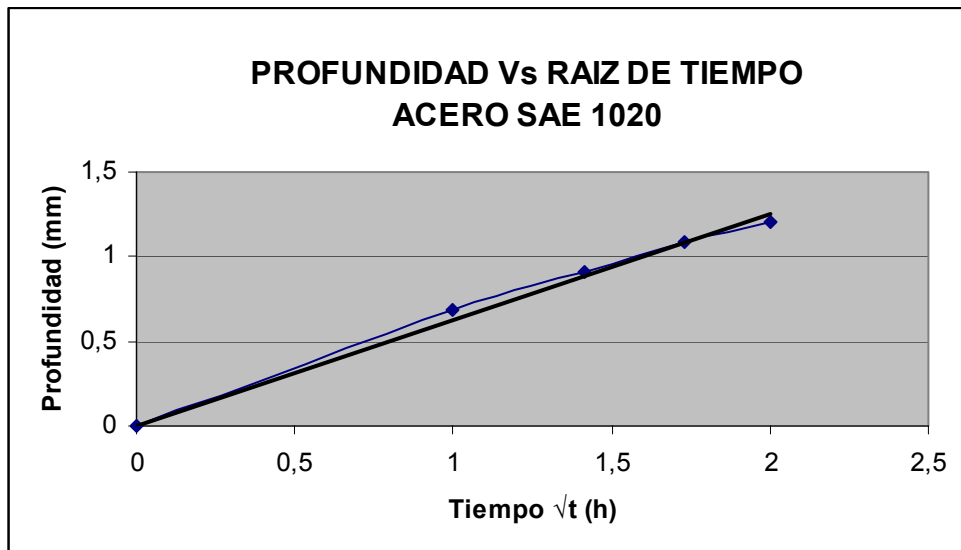
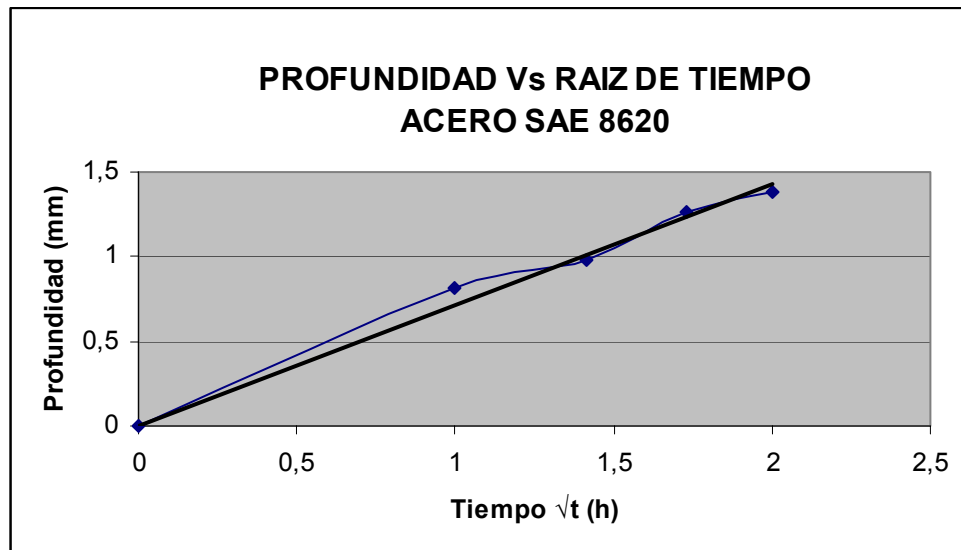


Figura 14. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de Etanol puro.



$$x = 0,6252y$$

Figura 15. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de Etanol puro.



$$x = 0,7142y$$

**90% ETANOL – 10% NITRÓGENO**

Figura 16. Perfil de dureza Acero SAE 1020.

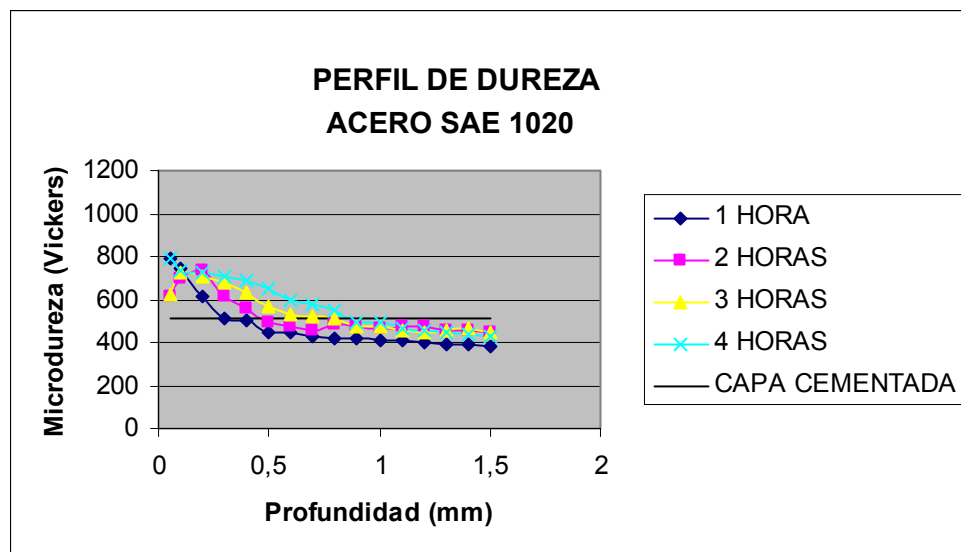


Figura 17. Perfil de dureza Acero SAE 8620.

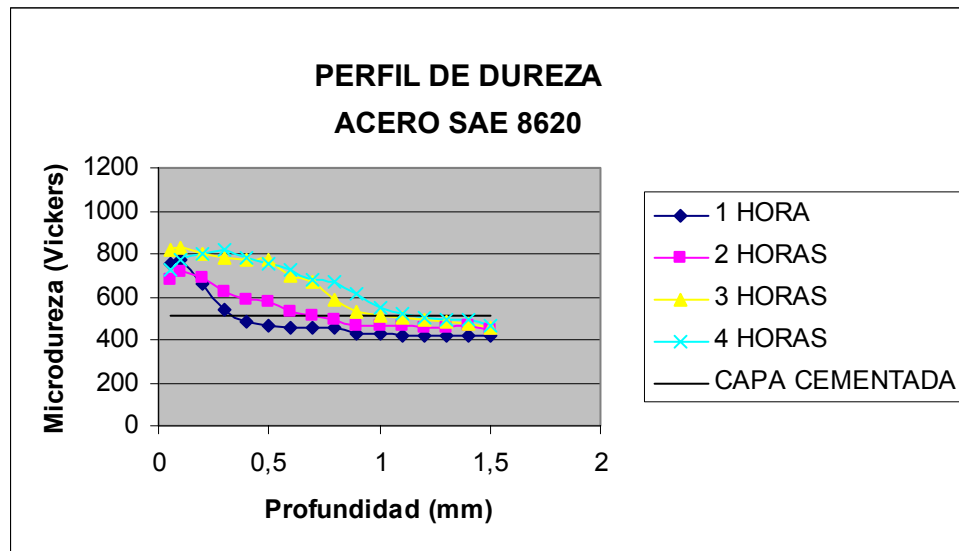


Tabla 10. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,30	0,35
2	0,48	0,70
3	0,75	1,00
4	0,87	1,14

Figura 18. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

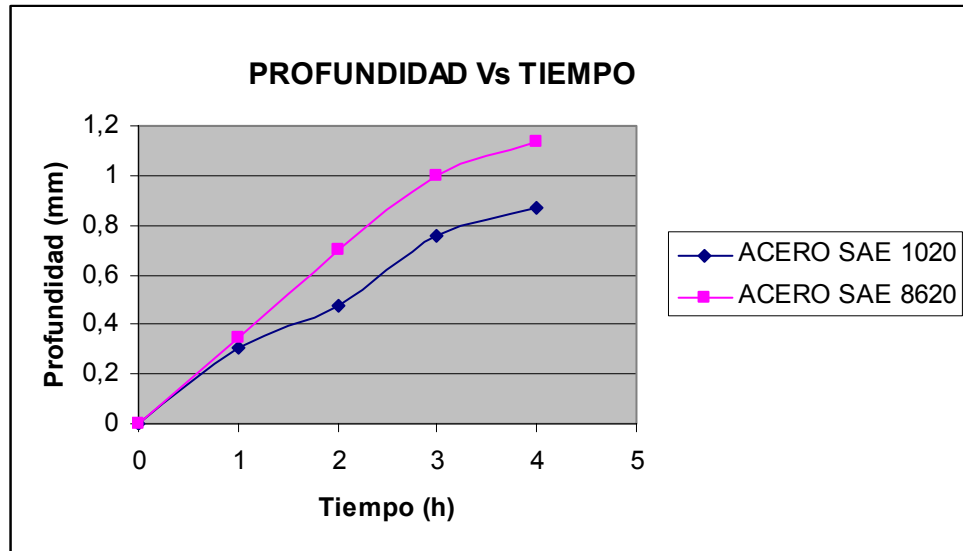
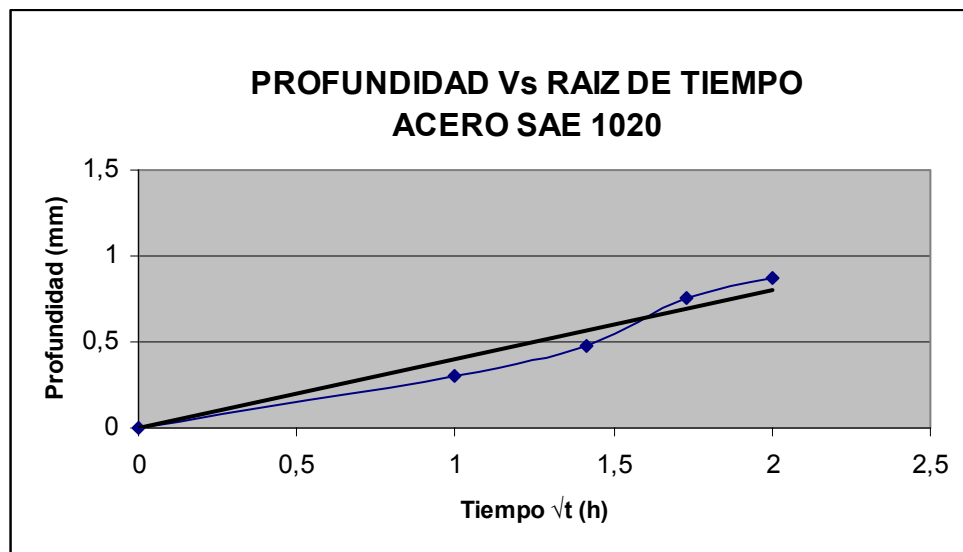
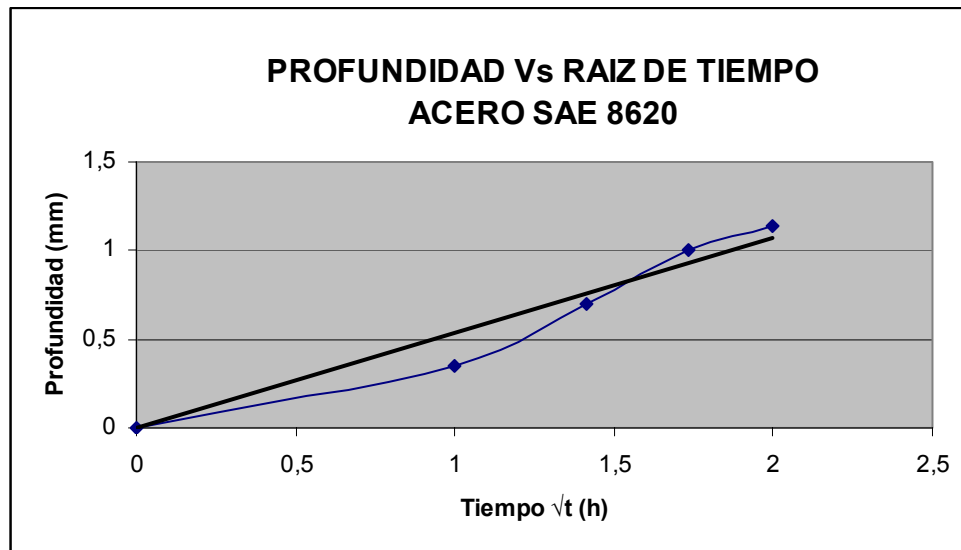


Figura 19. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 90% Etanol – 10% Nitrógeno.



$$x = 0,4023y$$

Figura 20. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 90% Etanol – 10% Nitrógeno.



$$x = 0,5347y$$

70% ETANOL – 30% NITRÓGENO

Figura 21. Perfil de dureza Acero SAE 1020.

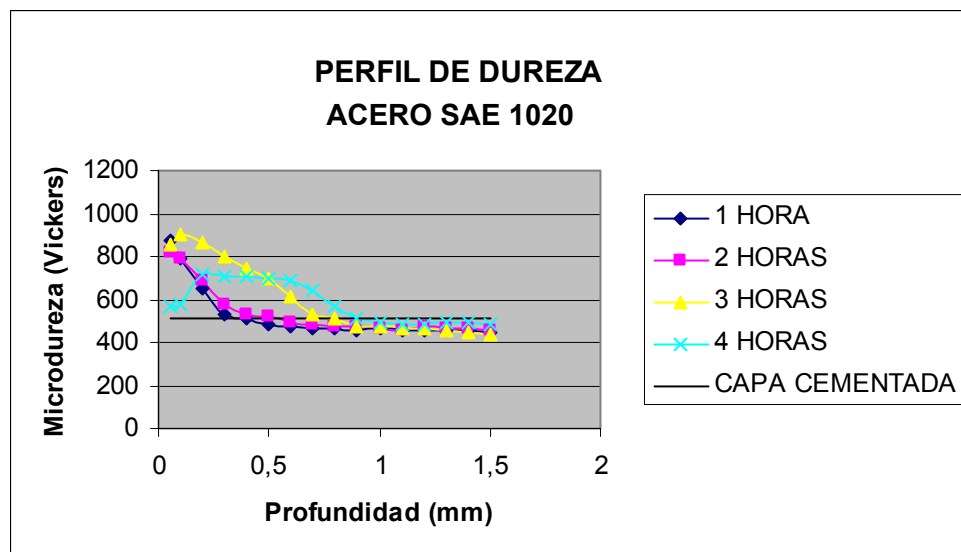


Figura 22. Perfil de dureza Acero SAE 8620.

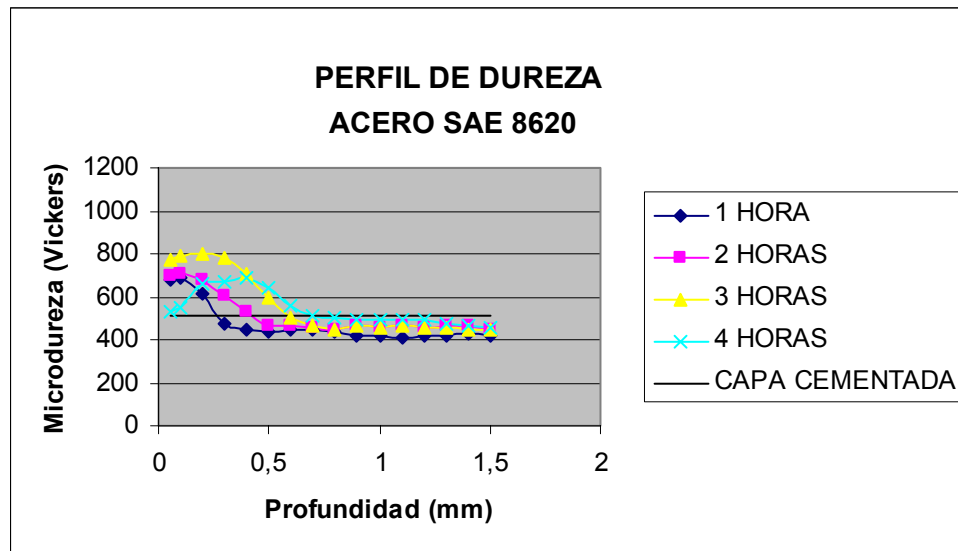


Tabla 11. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,37	0,27
2	0,52	0,43
3	0,78	0,59
4	0,89	0,69

Figura 23. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

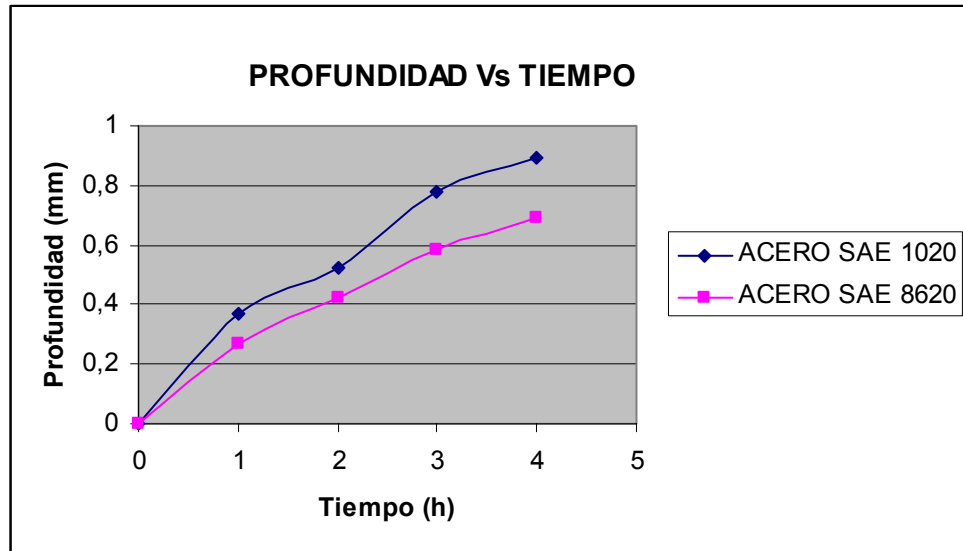
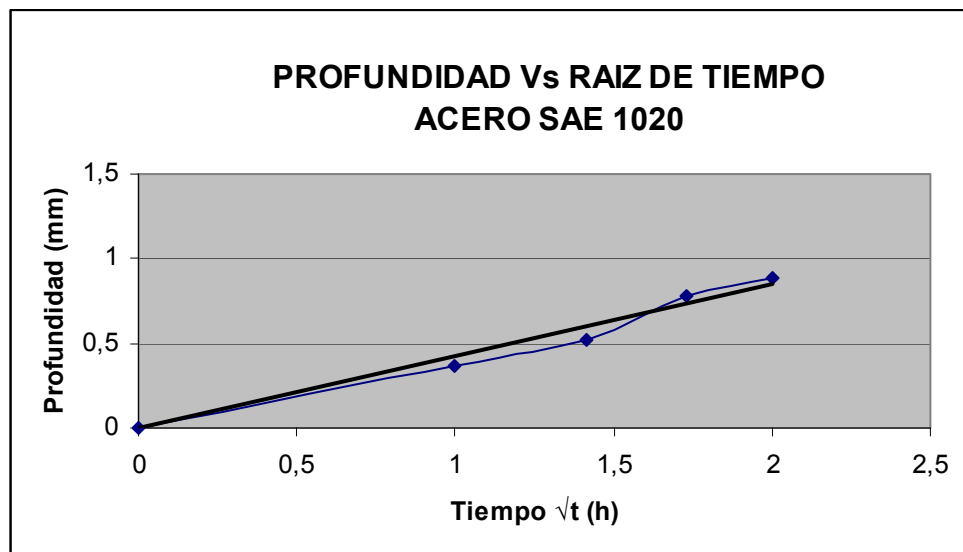
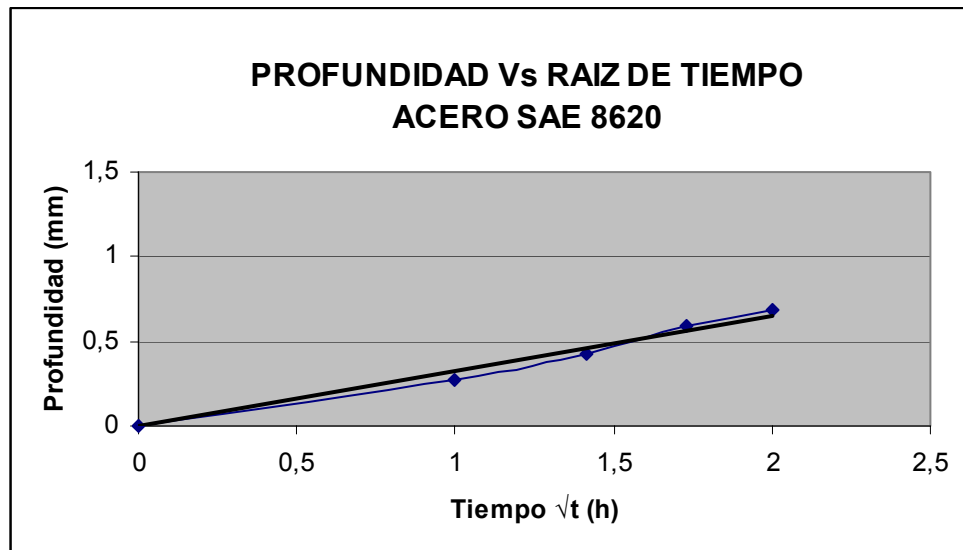


Figura 24. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 70% Etanol – 30% Nitrógeno.



$$x = 0,4233y$$

Figura 25. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 70% Etanol – 30% Nitrógeno.



$$x = 0,3263y$$

### METANOL PURO

Figura 26. Perfil de dureza Acero SAE 1020.

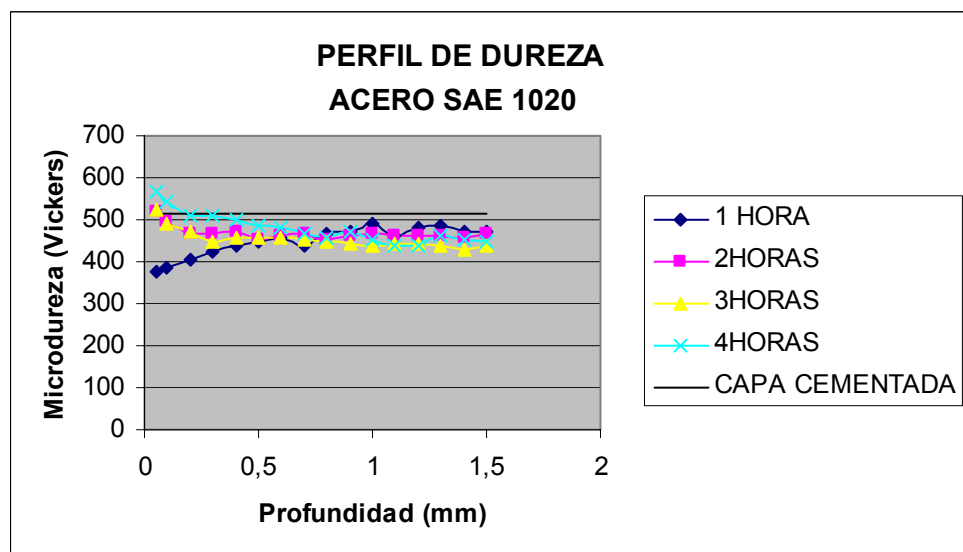


Figura 27. Perfil de dureza Acero SAE 8620.

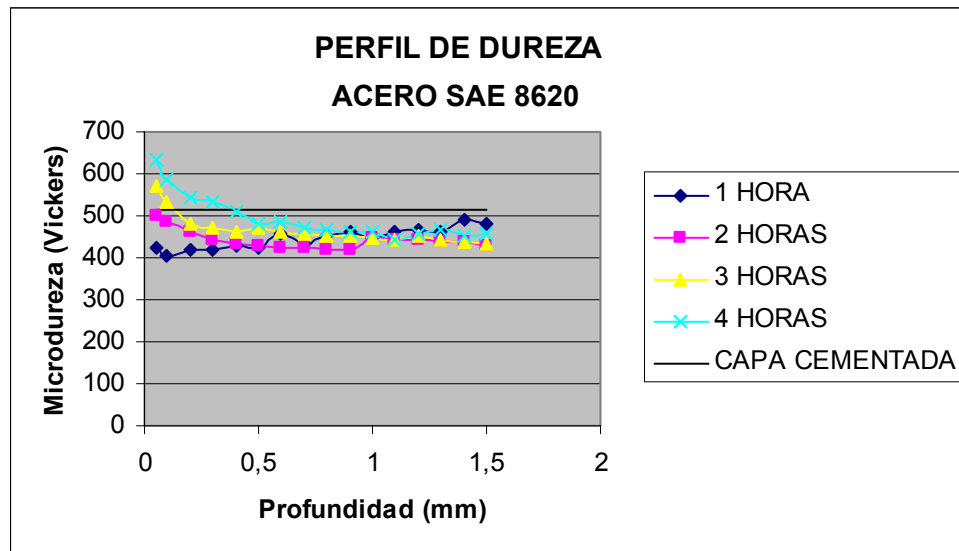


Tabla 12. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0	0
2	0,06	0
3	0,12	0,16
4	0,18	0,38

Figura 28. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

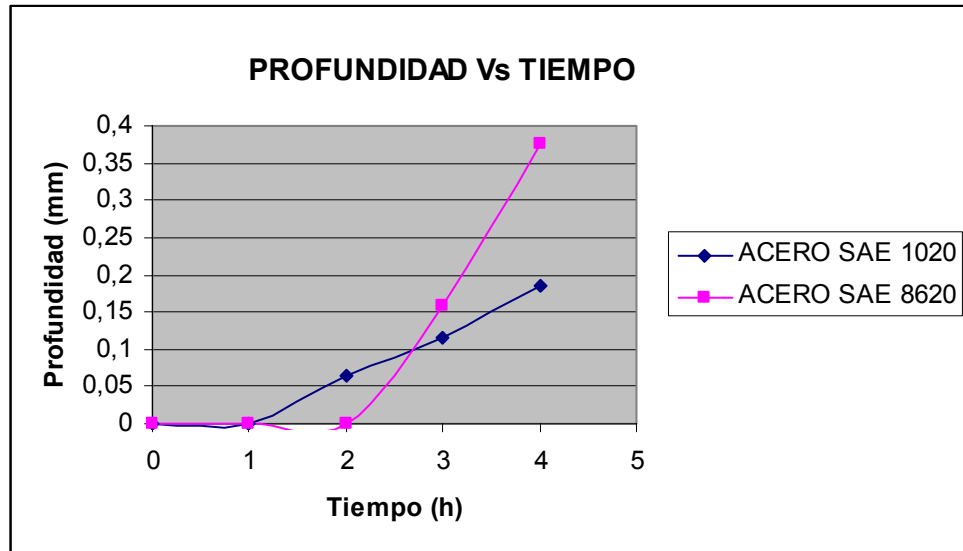


Figura 29. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de Metanol puro.

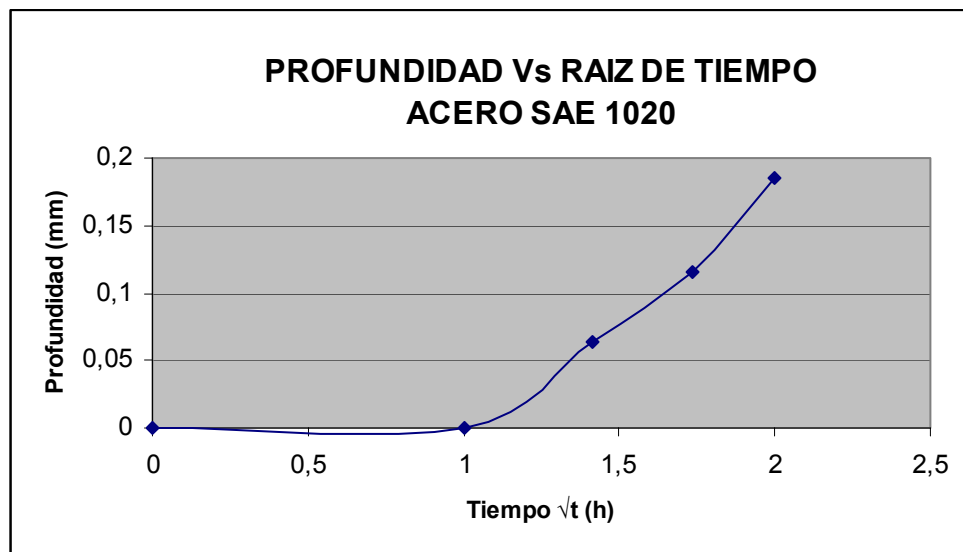
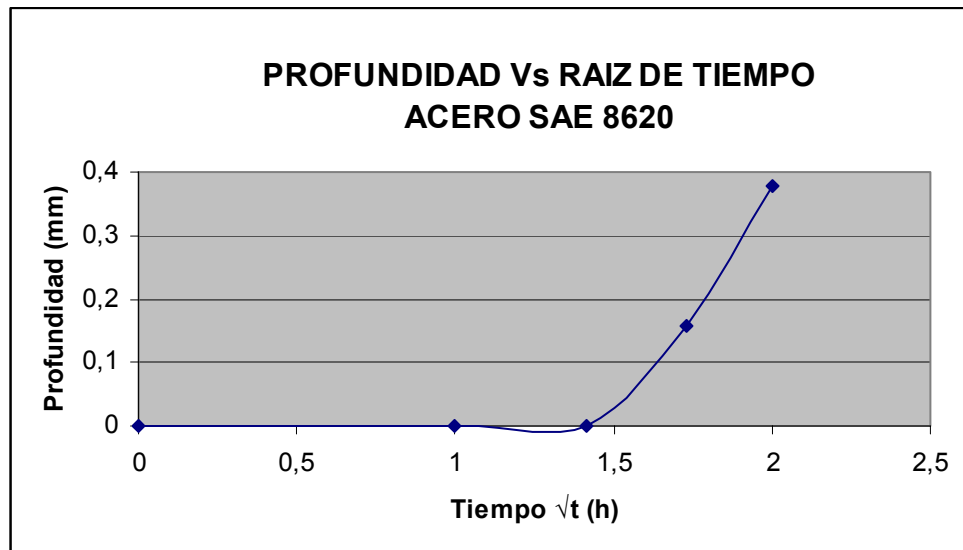


Figura 30. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de Metanol puro.



90% METANOL – 10% NITRÓGENO

Figura 31. Perfil de dureza Acero SAE 1020.

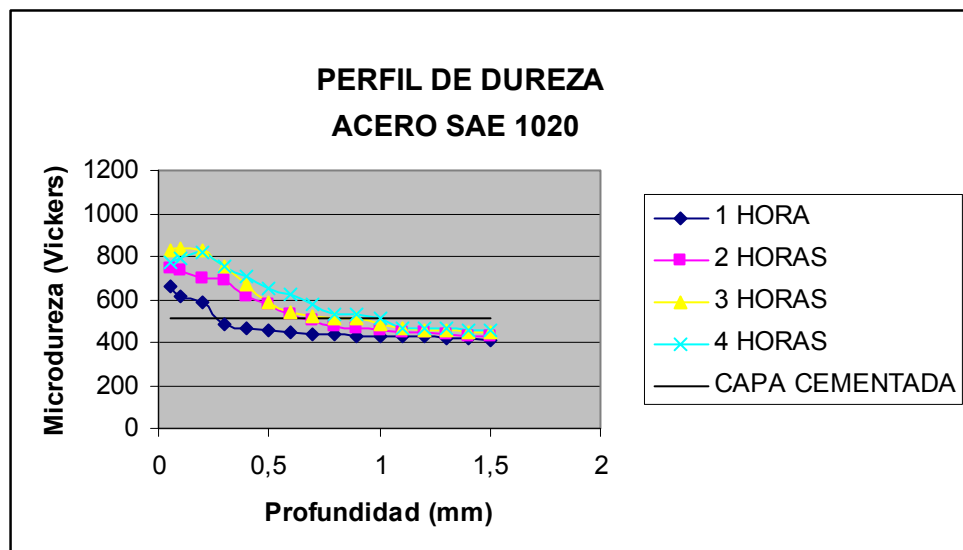


Figura 32. Perfil de dureza Acero SAE 8620.

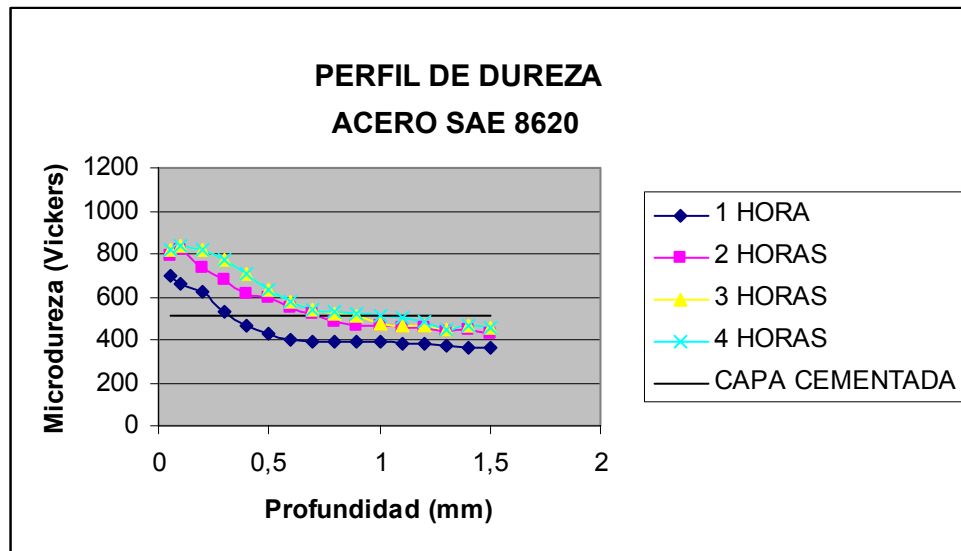


Tabla 13. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,27	0,33
2	0,66	0,72
3	0,81	1,00
4	1,00	1,24

Figura 33. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

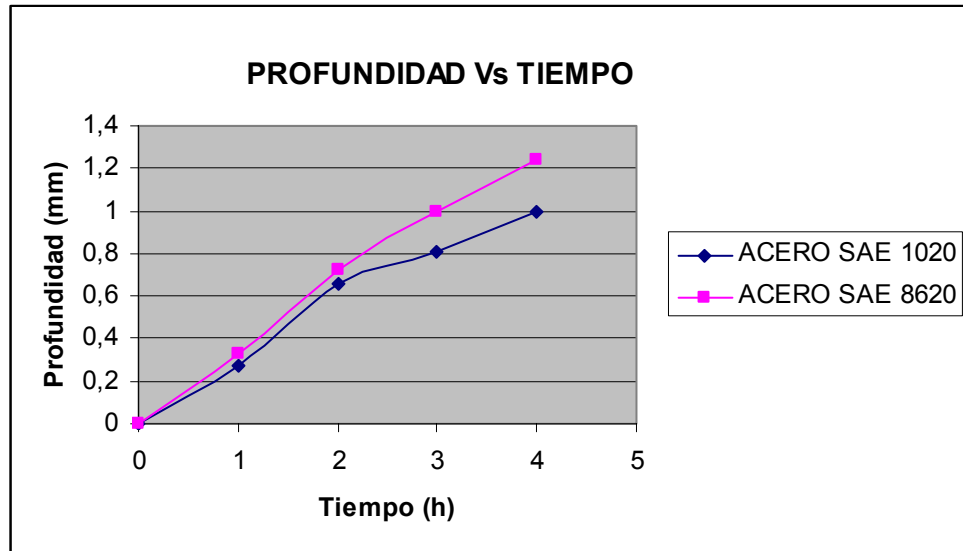
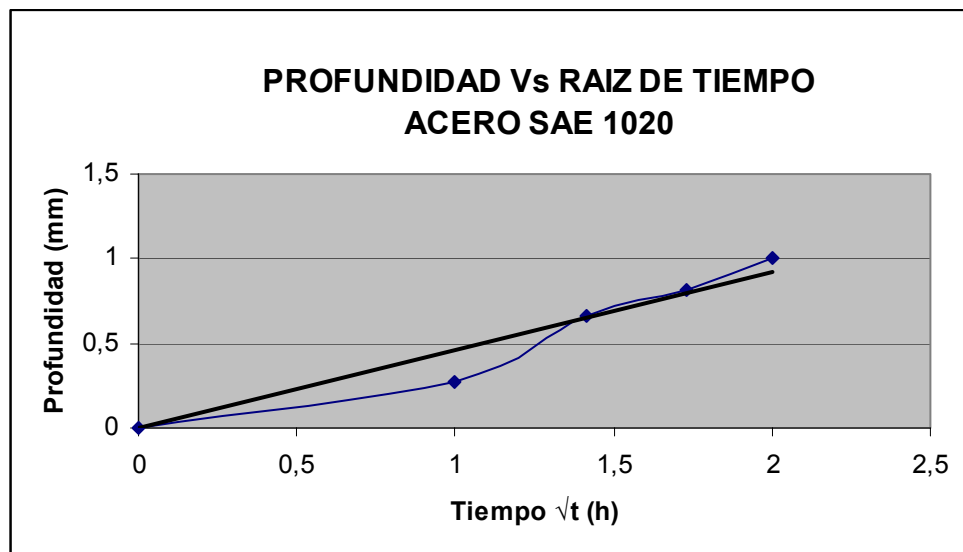
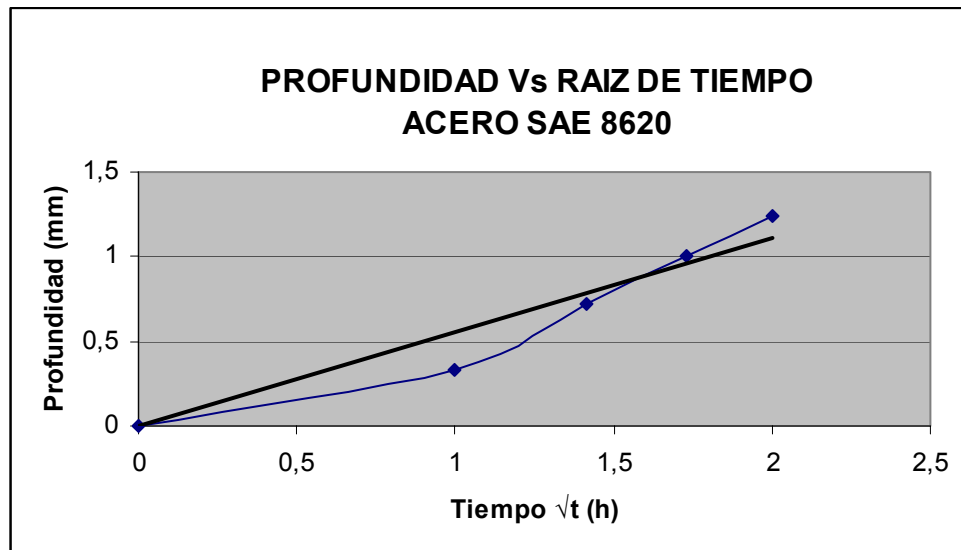


Figura 34. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 90% Metanol – 10% Nitrógeno.



$$x = 0,4607y$$

Figura 35. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 90% Metanol – 10% Nitrógeno.



$$x = 0,555y$$

70% METANOL – 30% NITRÓGENO

Figura 36. Perfil de dureza Acero 1020.

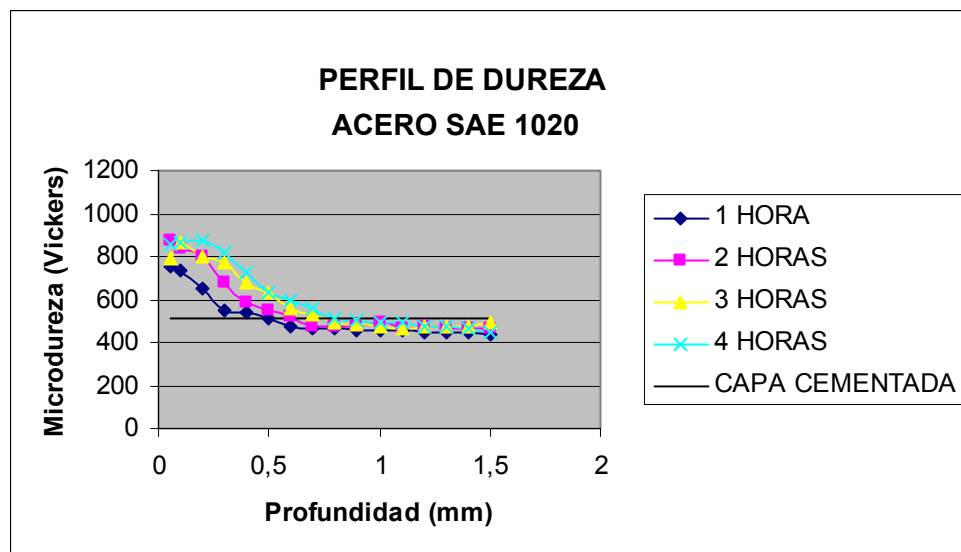


Figura 37. Perfil de dureza Acero 8620.

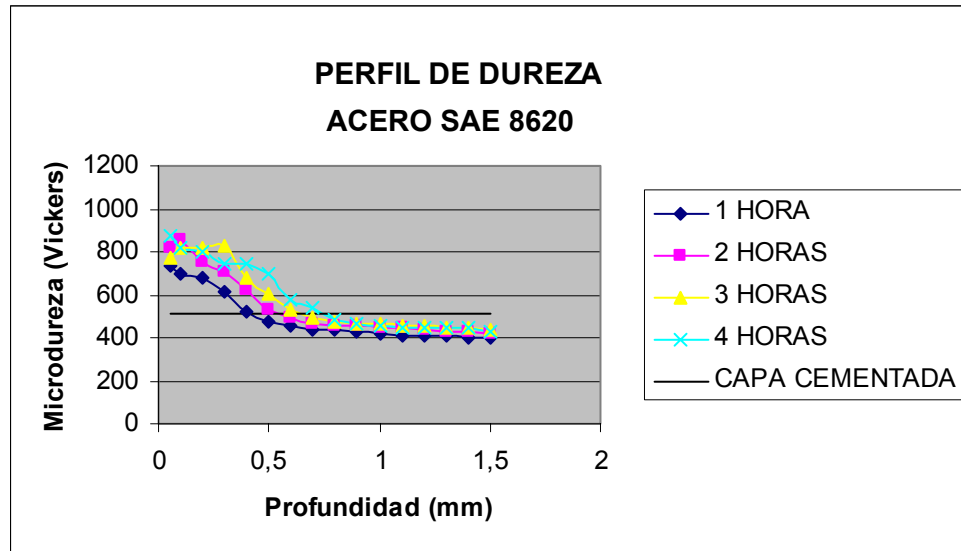


Tabla 14. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,48	0,42
2	0,62	0,54
3	0,73	0,65
4	0,79	0,73

Figura 38. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

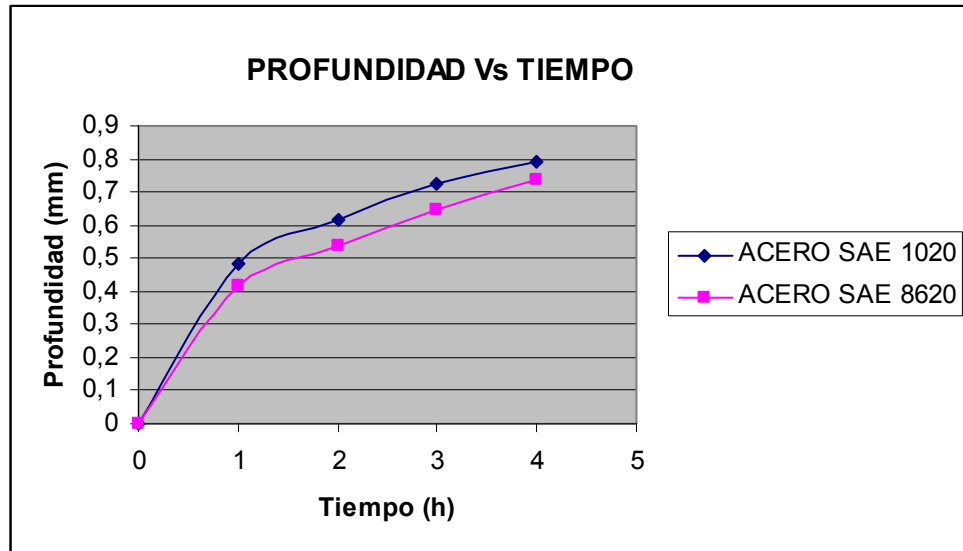
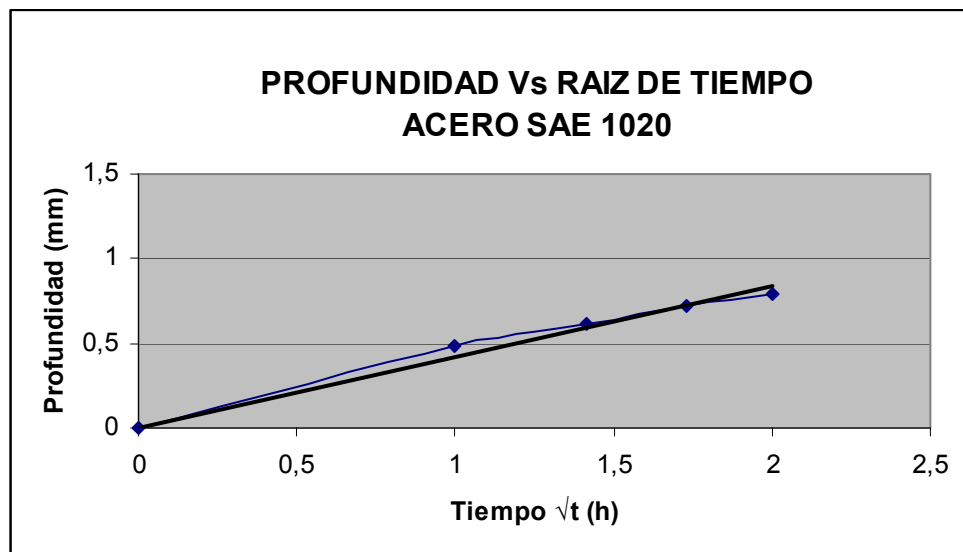
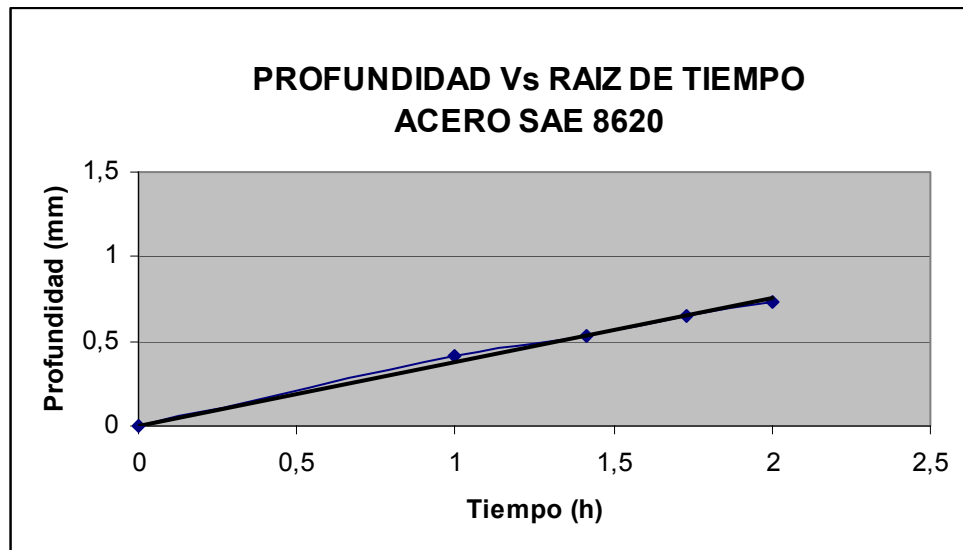


Figura 39. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 70% Metanol – 30% Nitrógeno.



$$x = 0,4191y$$

Figura 40. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 70% Metanol – 30% Nitrógeno.



$$x = 0,3759y$$

50% METANOL – 50% NITRÓGENO

Figura 41. Perfil de dureza Acero SAE 1020.

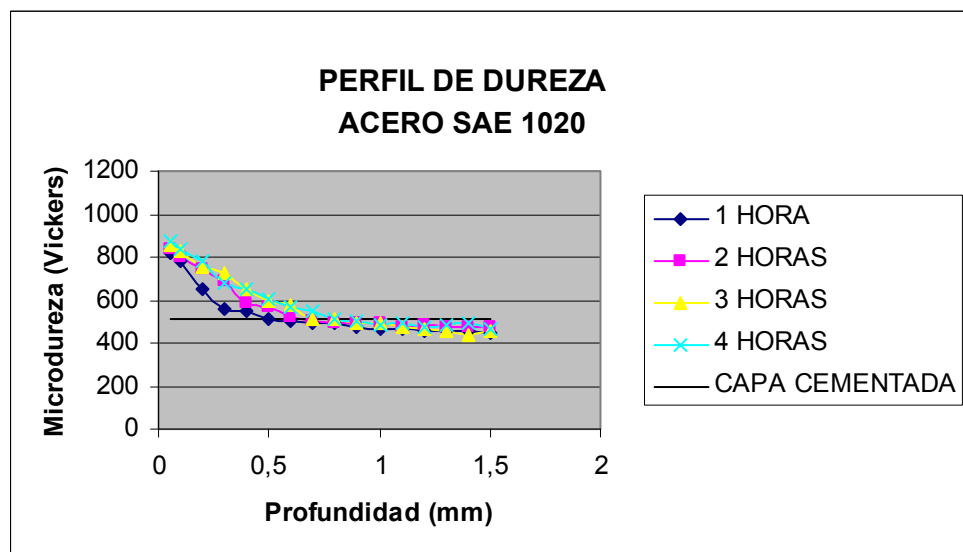


Figura 42. Perfil de dureza Acero SAE 8620.

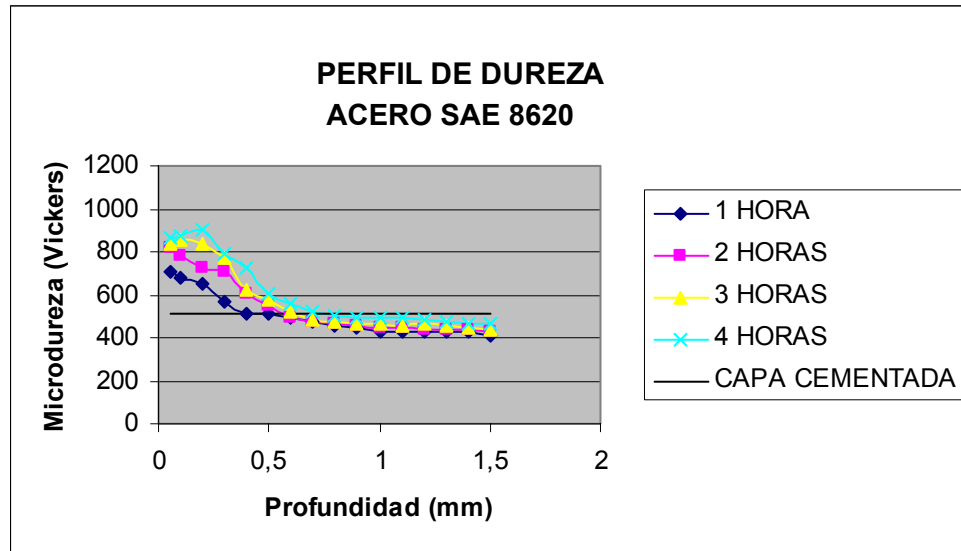


Tabla 15. Profundidad de capa cementada para los Aceros SAE 8620 y SAE 1020 a diferentes tiempos de cementación gaseosa.

Tiempo (h)	Profundidad (mm)	
	Acero SAE 1020	Acero SAE 8620
0	0	0
1	0,49	0,41
2	0,64	0,55
3	0,71	0,65
4	0,80	0,74

Figura 43. Profundidad de capa cementada Vs Tiempo.

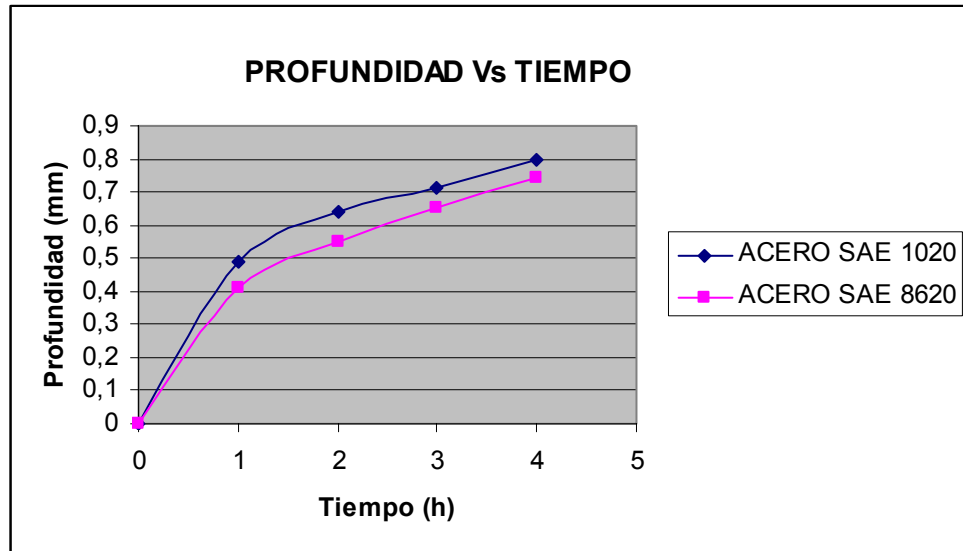
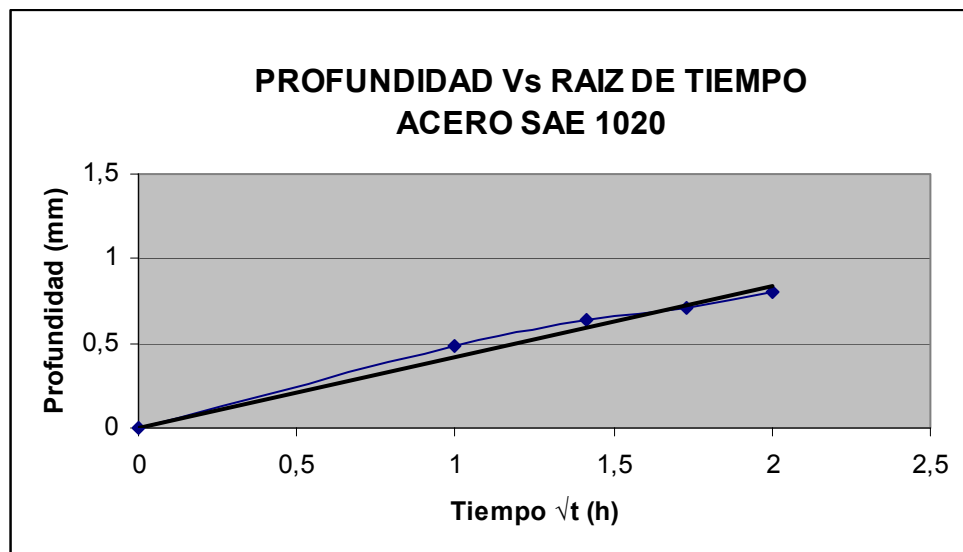
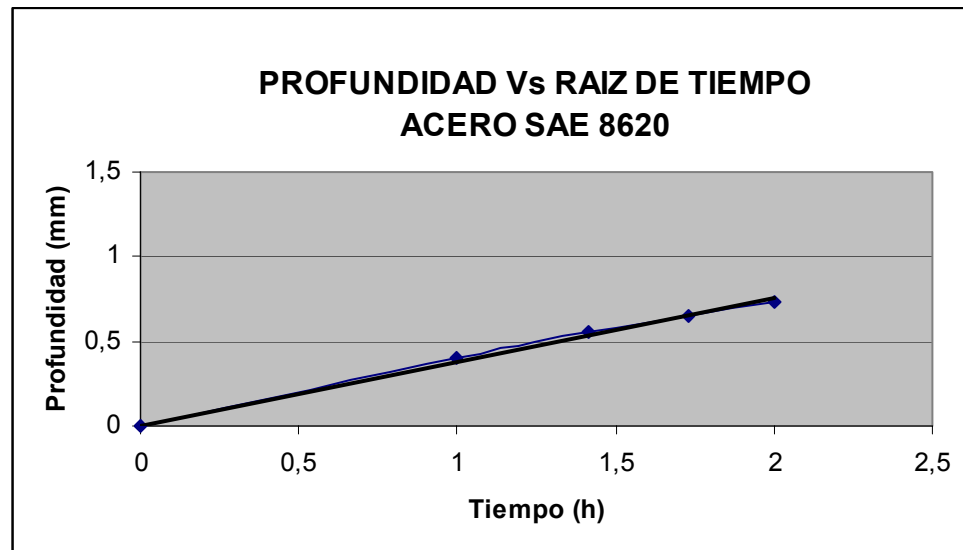


Figura 44. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 1020 en una atmósfera de 50% Metanol – 50% Nitrógeno.



$$x = 0,4214y$$

**Figura 45. Profundidad de capa cementada Vs Raíz de tiempo, Acero SAE 8620 en una atmósfera de 50% Metanol – 50% Nitrógeno.**



$$x = 0,3782y$$

En los resultados obtenidos en el proceso de cementación gaseosa en las diferentes pruebas realizadas se puede observar que:

El acero SAE 1020 tiene mayor profundidad de capa cementada con respecto al acero SAE 8620 en atmósferas generadas por:

- 70% Etanol – 30% Nitrógeno.
- 70% Metanol – 30% Nitrógeno.
- 50% Metanol – 50% Nitrógeno.

Esto puede ser debido a que son las mezclas gaseosas de menor actividad de carbono, según la actividad de carbono de la reacción de cementación<sup>[9]</sup>.

El acero SAE 8620 tiene mayor profundidad de capa cementada con respecto al acero SAE 1020 en atmósferas generadas por:

- Etanol puro.
- 90% Etanol – 10% Nitrógeno.
- Metanol puro.
- 90% Metanol – 10% Nitrógeno.

Esto puede ser debido a que son las mezclas gaseosas de mayor actividad de carbono, según la actividad de carbono de la reacción de cementación<sup>[9]</sup>.

Para atmósferas generadas con mezclas de Etanol:

- A medida que se aumenta la cantidad de nitrógeno disminuye la profundidad de cementación para cualquiera de los dos aceros.

Para atmósferas generadas con mezclas de Metanol:

- En la prueba donde se utiliza metanol puro, la profundidad de cementación es muy baja y su tendencia es a formar una atmósfera neutra. Se puede observar que no se cumple la Ecuación de Harris, en el proceso realizado en IMATT Ltda., por lo tanto, no se estandariza el proceso con esta atmósfera.
- La atmósfera generada por la mezcla de 90% Metanol – 10% Nitrógeno, aumenta la cementación en un grado superior para los dos aceros, en comparación con la atmósfera sin nitrógeno. Se observa que a un tiempo de 4 horas para el acero SAE 1020 la cementación aumenta 5,5 veces más y para el acero SAE 8620 la cementación aumenta 3,2 veces más.

- Para atmósferas generadas por las mezclas de 70% Metanol – 30% Nitrógeno y 50% Metanol – 50% Nitrógeno, los valores de profundidad con respecto al tiempo tienden a ser constantes.

En la tabla 16, se muestran las diferentes constantes calculadas de la ecuación de Harris de los aceros, obtenidas de las figuras de profundidad de capa cementada Vs raíz de tiempo, durante el proceso de cementación gaseosa.

**Tabla 16. Constantes calculadas de la ecuación de Harris en el proceso de cementación gaseosa.**

ATMOSFERA	K (mmxh <sup>-1/2</sup> )	K (mmxh <sup>-1/2</sup> )
	ACERO SAE 1020	ACERO SAE 8620
Etanol puro	0,6252	0,7142
90% Etanol – 10% Nitrógeno	0,4023	0,5347
70% Etanol – 30% Nitrógeno	0,4233	0,3263
90% Metanol – 10% Nitrógeno	0,4607	0,555
70% Metanol – 30% Nitrógeno	0,4191	0,3759
50% Metanol – 50% Nitrógeno	0,4214	0,3782

Una vez sean obtenidas estas ecuaciones, se realiza una estandarización del proceso, con el cual se determinan los valores de tiempo al que deben someterse las piezas bajo las condiciones de los hornos de cementación gaseosa en IMATT Ltda., como se muestra en la tabla 17.

**Tabla 17. Tiempos necesarios durante el proceso de cementación gaseosa.**

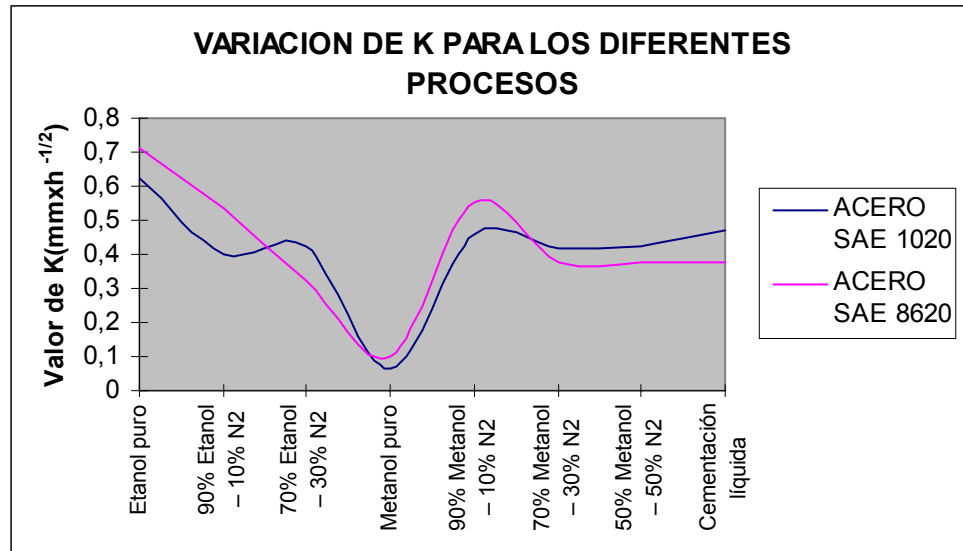
<b>ATMOSFERA</b>	<b>ACERO SAE 1020</b>	<b>ACERO SAE 8620</b>
Etanol puro	$t = \frac{x^2}{0,3908}$	$t = \frac{x^2}{0,51008}$
90% Etanol – 10% Nitrógeno	$t = \frac{x^2}{0,1618}$	$t = \frac{x^2}{0,2859}$
70% Etanol – 30% Nitrógeno	$t = \frac{x^2}{0,1791}$	$t = \frac{x^2}{0,1064}$
90% Metanol – 10% Nitrógeno	$t = \frac{x^2}{0,2122}$	$t = \frac{x^2}{0,3080}$
70% Metanol – 30% Nitrógeno	$t = \frac{x^2}{0,1756}$	$t = \frac{x^2}{0,1413}$
50% Metanol – 50% Nitrógeno	$t = \frac{x^2}{0,1775}$	$t = \frac{x^2}{0,1430}$

Los resultados mostrados en la tabla 17 son de vital importancia para la empresa IMATT Ltda., ya que debido a esto, pueden tener los tiempos reales para la implementación de cualquiera de las mezclas estudiadas en el proceso de cementación gaseosa.

#### **Comparación de los procesos de cementación en IMATT Ltda.**

En la figura 46 se pueden observar los procesos de cementación realizados en IMATT Ltda., con el propósito de hacer una comparación en cuanto a la profundidad de capa cementada.

Figura 46. Variación de K para los diferentes procesos.



La constante K se convierte en el parámetro más importante para poder comparar los procesos, a mayor valor de K mayor profundidad de capa cementada en menor tiempo. Se observa que en los procesos con:

- 70% Etanol – 30% Nitrógeno.
- 70% Metanol – 30% Nitrógeno.
- 50% Metanol – 50% Nitrógeno.
- Cementación líquida.

La tendencia es más o menos constante. La diferencia entre las constantes de Harris no es muy marcada, por tanto trabajan de forma similar.

Mientras que en los procesos con:

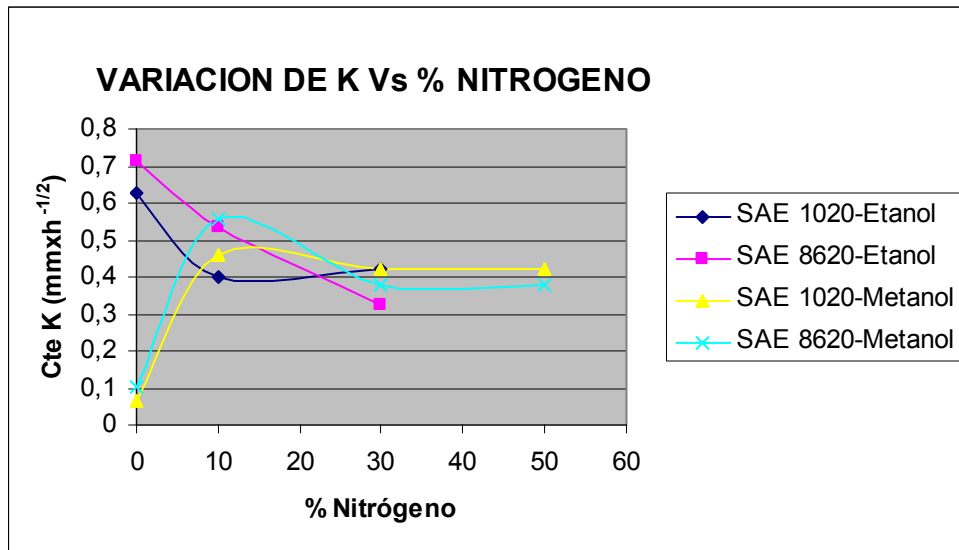
- Etanol puro.
- 90% Metanol – 10% Nitrógeno.
- 90% Etanol – 10% Nitrógeno.

Se obtiene la mayor profundidad de capa cementada en menores tiempos, dado el orden mostrado de mayor a menor.

En la atmósfera generada por metanol puro la profundidad de cementación es demasiado baja, y se ve la necesidad de realizar mezclas con nitrógeno para mejorar el proceso, ya que al parecer este actúa como catalizador y ayuda a la cementación.

### 3.4 INFLUENCIA DEL NITROGENO EN LA VELOCIDAD DE CEMENTACIÓN

**Figura 47. Influencia del nitrógeno en la velocidad de cementación para el acero SAE 8620 y el acero SAE 1020.**



El tiempo de cementación es inversamente proporcional al cuadrado de la constante K según:

$$t = \frac{x^2}{k^2}$$

Por tanto, a mayor valor de K menor tiempo de cementación.

La variación de la constante K a medida que aumenta el nitrógeno tiende a disminuir.

En las atmósferas generadas por metanol puro acompañado de nitrógeno, este último sirve como catalizador de la reacción, ya que aumenta la constante K en relación con una atmósfera formada por metanol puro.

En el proceso de cementación gaseosa, a diferentes composiciones de nitrógeno, se observa que a medida que se aumenta el nitrógeno disminuye la profundidad de capa cementada, exceptuando un intervalo de composiciones para mezclas con metanol (0% a 10% Nitrógeno).

A porcentajes mayores del 30% y menores del 50% se observa una tendencia constante en la profundidad de cementación. Se espera que a porcentajes mayores del 50% de nitrógeno la atmósfera tenga una tendencia neutral, debido a que el potencial de carbono disminuye.

### **3.5 SEGUIMIENTO DE HOLLÍN**

La cantidad de hollín se verifica de forma constante en cada prueba, esto se hace con alambres que se introducen por la chimenea y que son retirados durante cada hora del proceso. Bajo apreciación subjetiva se califica de acuerdo a la presencia como alta, baja y escasa.

Según los cálculos estequiométricos realizados en la disociación térmica de los alcoholes, sólo el etanol produce carbono grafitico (hollín) a la temperatura de trabajo.

La cantidad formada para los distintos caudales de alcohol es:

Para el etanol:

20 unidades del rotámetro  $\longrightarrow 3,43490232 \frac{g}{\min}$  Carbono grafitico

40 unidades del rotámetro  $\longrightarrow 13,12308838 \frac{g}{\min}$  carbono grafitico

Para el metanol:

No hay formación de hollín grafitico a la temperatura de trabajo.

**Tabla 18. Cantidad de hollín en las piezas tratadas.**

MEZCLA	PRESENCIA DE HOLLIN
Etanol puro	Alta
90% Etanol – 10% Nitrógeno	Baja
70% Etanol – 30% Nitrógeno	Baja
Metanol puro	Escasa
90% Metanol – 10% Nitrógeno	Escasa
70% Metanol – 30% Nitrógeno	Escasa
50% Metanol – 50% Nitrógeno	Escasa

### 3.6 ANALISIS DE COSTOS

La forma de hallar el costo del consumo es la siguiente:

Costo ciclo = Costo consumo de reactivos + Costo funcionamiento del horno.

- Costo consumo de reactivos =  $\sum_i^n \left( \frac{L}{hora} \times \frac{\$}{L} \right)_i (\Delta t + t_{cement})$
- Costo funcionamiento del horno =  $\frac{\$horno}{hora} + \frac{\$operario}{hora}$

Para poder evaluar los costos de los procesos de cementación se analiza lo siguiente:

$$V_P = V_{Cr/h}(t)$$

$$V_T = V_{Cr/h}(t) + V_{Ce/h}(t)$$

Donde:

$t = x^2/C$  , los valores de t son obtenidos de la tabla 7 para cementación líquida y de la tabla 17 para cementación gaseosa.

$V_P$  = Costo total de reactivos en el proceso.

$V_T$  = Costo total del proceso.

$V_{Cr/h}$  = Costo de los reactivos del proceso por hora obtenidos de la tabla 19 para cementación líquida y de la tabla 21 para cementación gaseosa.

$V_{Ce/h}$  = Costo de consumo energético por hora obtenido de la tabla 20 para cementación líquida y de la tabla 22 para cementación gaseosa.

**3.6.1 Proceso de cementación líquida.** En la tabla 19 se puede observar el costo de los reactivos por hora en el proceso de cementación líquida.

**Tabla 19. Costo de los reactivos gastados por hora.**

REACTIVOS	Costo \$/Kg	Consumo Kg/h	Costo \$/h
Cianuro sódico	6500	0,22	1430
Cloruro de bario	8475	0,091	771,225
Cloruro de sodio	500	0,55	275
<b>TOTAL</b>			<b>2476,225</b>

**Tabla 20. Costo del consumo energético gastado por hora.**

<b>Proceso</b>	<b>Consumo energético \$/h</b>
Cementación líquida	83252,7786

**3.6.2 Proceso de cementación gaseosa.** En la tabla 21 se puede observar el costo del consumo de reactivos por hora en el proceso de cementación gaseosa para las diferentes mezclas. Esto con el fin de ver la viabilidad de uso entre ellas según los resultados.

**Tabla 21. Costo total del consumo de reactivos.**

<b>Prueba</b>	<b>Costo Alcohol gastado \$/h</b>	<b>Costo Nitrógeno gastado \$/h</b>	<b>Costo total de consumo \$/h</b>
Etanol puro	7727,031936	0	7727,031936
90% Etanol – 10% Nitrógeno	7727,031936	1110,373392	8837,405328
70% Etanol – 30% Nitrógeno	7727,031936	4282,873633	12009,90557
Metanol puro	6676,15572	0	6676,15572
90% Metanol – 10% Nitrógeno	6676,15572	1114,316467	7790,472187
70% Metanol – 30% Nitrógeno	6676,15572	4298,087472	10974,24319
50% Metanol – 50% Nitrógeno	6676,15572	10028,8702	16705,02592

El costo de consumo energético por hora es un valor promedio, el cual es el mismo para todos los procesos de cementación gaseosa. Por tanto, para evaluar los costos entre los procesos de cementación gaseosa, este valor es despreciable.

**Tabla 22. Costo del consumo energético gastado por hora.**

Proceso	Consumo energético \$/h
Cementación gaseosa	38427,2

Para obtener los valores que determinan el proceso más eficiente con relación a la profundidad de capa Vs costos, se debe cumplir lo siguiente:

$$V_P = V_{Cr/h} \left( x^2 / C \right)$$

La relación  $\frac{V_{Cr/h}}{C}$  entre más pequeña sea, menor es el costo total de los reactivos para un proceso eficiente. En la tabla 23 se muestra el cálculo de esta relación para las distintas mezclas.

**Tabla 23. Relación  $\frac{V_{Cr/h}}{C}$  para los diferentes aceros en las mezclas.**

Prueba	C	C	$V_{Cr/h}$	$\frac{V_{Cr/h}}{C}$	$\frac{V_{Cr/h}}{C}$
	Acero 1020	Acero 8620		Acero 1020	Acero 8620
Etanol puro	0,3908	0,51008	7727,0319	19772,3437	15148,6668
90% Etanol – 10% N <sub>2</sub>	0,1618	0,2859	8837,4053	54619,316	30910,8266
70% Etanol – 30% N <sub>2</sub>	0,1791	0,1064	12009,905	67056,9825	112875,052
Metanol puro	0,00435	0,01056	6676,1557	1532634,46	632211,716
90% Metanol – 10% N <sub>2</sub>	0,2122	0,308	7790,4721	36712,8755	25293,7409
70% Metanol – 30% N <sub>2</sub>	0,1756	0,1413	10974,243	62495,6901	77666,2646
50% Metanol – 50% N <sub>2</sub>	0,1775	0,143	16705,025	94112,8221	116818,363

Según los resultados en la tabla 23 se puede ver el orden consecutivo de mayor a menor efectividad de los diferentes aceros relacionado con los costos:

1. Etanol puro.
2. 90% Metanol – 10% Nitrógeno.
3. 90% Etanol – 10% Nitrógeno.
4. 70% Metanol – 30% Nitrógeno.
5. 70% Etanol – 30% Nitrógeno.
6. 50% Metanol – 50% Nitrógeno
7. Metanol puro.

Al hacer la comparación de los costos en los procesos de cementación líquida y gaseosa para un mismo volumen de producción se tiene lo siguiente:

**Para cementación líquida:**

$$V_T = 2476,225(t) + 83252,7786(t)$$

$$V_T = 85729,0036(t)$$

**Para cementación gaseosa:**

$$V_T = V_{Cr/h}(t) + 38427,2(t)$$

$V_{Cr/h}$  queda en función de los reactivos utilizados en el proceso de cementación gaseosa y t en función de la profundidad de cementación requerida.

En la evaluación de costos, se puede observar que el mayor gasto con respecto al consumo de energía del horno, se da en el proceso de cementación líquida, el cual es 2,16 veces mayor que en el proceso de cementación gaseosa.

Por tanto, todas las pruebas de cementación gaseosa exceptuando la mezcla de metanol puro, son viables por encima de la cementación líquida.

El proceso de cementación gaseosa basado en atmósfera generada por metanol puro no es viable debido a que los tiempos de cementación son demasiado largos.

## CONCLUSIONES

De este estudio se concluye que:

- Las atmósferas nitrogenadas de cementación tienen la capacidad de carburar con la adición de alcoholes tales como el Etanol y el Metanol.
- Las atmósferas con 100% de nitrógeno no producen descarburación.
- El nitrógeno es fiable y flexible según su manipulación, ya que permite un cambio de la atmósfera de forma inmediata evitando deterioro en las piezas.
- El nitrógeno se puede usar como medio de protección para las piezas, ya sea por paradas no programadas debidas a fallas técnicas o accidentes que obliguen a suspender los flujos de alcohol.
- A medida que se aumenta el volumen de purga con nitrógeno se disminuye la descarburación en la fase de calentamiento.
- A medida que se aumenta el porcentaje de nitrógeno se disminuye la profundidad de capa cementada y la formación de hollín para atmósferas nitrogenadas mezcladas con etanol.
- A medida que se aumenta el porcentaje de nitrógeno se disminuye la profundidad de capa cementada para atmósferas nitrogenadas mezcladas con metanol.

- Las atmósferas nitrogenadas con un porcentaje mayor o igual al 30% de nitrógeno, generan que la profundidad de capa cementada de aceros SAE 1020 sea mayor que la de los aceros SAE 8620.
- Las atmósferas nitrogenadas con un porcentaje menor o igual al 10% de nitrógeno, generan que la profundidad de capa cementada de aceros SAE 8620 sea mayor que la de los aceros SAE 1020.
- Las atmósferas nitrogenadas para cementación con metanol en la mezcla producen buena profundidad de cementación.
- La atmósfera de cementación generada por metanol puro produce poca profundidad de capa cementada y escasa formación de hollín, además, no puede usarse en el proceso de producción ya que tiene costos muy altos.
- La atmósfera de cementación generada por etanol puro produce alta profundidad de capa cementada y alta formación de hollín sobre las piezas.
- El proceso óptimo en relación a costos, profundidad de capa cementada y formación escasa de hollín sobre las piezas tratadas es 90% de metanol con 10% de nitrógeno.
- El proceso óptimo en relación a costos y profundidad de capa cementada es el uso de etanol puro.
- Los menores costos de proceso en la empresa IMATT Ltda., se dan en la cementación gaseosa con respecto a la líquida para el mismo volumen de producción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. APRAIZ BARREIRO, José. Tratamientos térmicos de los aceros. 8 ed. Madrid: Dossat.
2. ASM, Handbook. Metallography and microestructures. 9 ed. Vol 9, 1985. 28-32p.
3. CARDONA GRANADOS, Afranio. Selección de aceros. Bucaramanga: Editorial UIS. Bucaramanga, 1992.
4. Catálogo Siderúrgica del Pacifico S.A “Sidelpa”. Producción y comercialización de aceros especiales para maquinaria.
5. COMPAÑIA GENERAL DE ACEROS. Catálogo técnico. Bogotá D.C.
6. DE GRINBERG, Dra. Maria K. Tratamientos térmicos de aceros y sus prácticas de laboratorio. México: Limusa, 1986. 166 p.
7. KARABELCHTCHIKOVA, Olga. Fundamentals of Mass Transfer in Gas Carburizing. A Dissertation Submitted to the Faculty of the worcester polytechnic institute. In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Materials Science and Engineering, 2007.
8. KEHL, George L. Fundamentos de la práctica metalográfica. Madrid, España: Aguilar, 1963.
9. Linde Gas Division. Furnace atmospheres N°1. Gas Carburizing and carbonitriding. Germany. 11p.

10. Manual de aceros BOHLER. Guía práctica para la adecuada selección y procesamiento de aceros especiales.

11. Metals handbook. Heat treating. American Society for metals. 9 ed. Vol 4, 1981. 277 p.

12. Primer encuentro Nacional sobre Tratamientos Térmicos. Medellín, noviembre 26 y 27 de 1992. SIMEDUA, atmósferas controladas para tratamientos térmicos, Guillermo Hoyos.

13. Principes de la cementation gazeuse et de recuit en atmosphere protectrice; U. Wyss, Reveu de metallurgie, juin 1963.

14. Segundo encuentro Nacional sobre Tratamientos Térmicos. Medellín, junio 3 y 4 de 1994. SIMEDUA, cementación gaseosa, Dan Baciú.

15. Traitement thermique; procedes e traitements thermique sous atmospheres a base et de methanol; M. Kostelitz, C. Pavee et A. Guimer.

16. VALENCIA, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. 2 ed. Medellín: Universidad de Antioquia, 1992.

## **NORMAS**

ASTM E 3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

ASTM E 92 - 82(2003) Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.