

**CARBONITRURACIÓN DE ACEROS AISI-SAE 8620, 1020 EN ATMÓSFERAS
DE AMINAS MEZCLADAS CON ALCOHOL PARA LA EMPRESA IMATT SAS.**

NANCY LILIANA RIBERO RUGELES



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2013

**CARBONITRURACIÓN DE ACEROS AISI-SAE 8620, 1020 EN ATMÓSFERAS
DE AMINAS MEZCLADAS CON ALCOHOL PARA LA EMPRESA IMATT SAS.**

NANCY LILIANA RIBERO RUGELES

**Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERA METALÚRGICA**

DIRECTOR:

FABIO ALBERTO GARZÓN GALVIS
Ingeniero Metalúrgico.

CO DIRECTORA:

SANDRA JUDITH GARCÍA VERGARA
Ingeniera Metalúrgica, Dra.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2013

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado primero que todo a Dios, por permitirme culminar esta etapa y aunque sé que todavía faltan muchas más, sé que con la ayuda de él no hay nada imposible. Gracias Señor porque siempre estás ahí, me has convertido en una profesional, me has dado sabiduría y valor para culminar este sueño; Sé que tienes grandes cosas para mí y para mis seres queridos, y sé que con mi fe y tú luz siempre saldré adelante ante cualquier obstáculo que se me presente.

Un gran triunfo dedicado a mi hermosa familia, quienes significan todo en mi vida, quienes son la mayor motivación, por quienes quiero luchar cada día por ser una mejor persona y quienes me alientan todos los días para creer en mí y poder alcanzar este y todos los sueños que tengo en mi vida. A mi mamita linda BETTY RUGELES REY y a mi papito HUMBERTO RIBERO TOBÓN, por traerme al mundo, por hacer de mí una persona de bien, por reprenderme cuando lo necesitaba y enseñarme que en la vida las cosas y sueños se consiguen con esfuerzo, por el gran ejemplo que me dan día a día porque son las personas más luchadoras que conozco en mi vida y les debo todo lo que soy y seré, los admiro y cada logro en mi vida se los debo a ustedes quienes han creído siempre en mí y en mis capacidades, gracias por su incondicionalidad. A mi hermano, DANIEL HUMBERTO RIBERO RUGELES, por ser ese amigo que siempre está ahí, por escucharme cuando más lo necesitaba, por alentarme cada día, porque a pesar de que a veces soy dura con él, porque quiero que sea el mejor en todo lo que haga en su vida, sin embargo él siempre tiene una palabra de aliento y siempre está en los momentos que más lo necesito porque más que mi hermano siempre es mi confidente. A todos mis tíos por ser un gran apoyo y unos grandes consejeros. A mis abuelitos y abuelitas que aunque mis abuelitos estén en el cielo sé que desde allá me mandan la fuerza cada día para seguir luchando y a mis dos viejitas que aunque tengan alzheimer y quizá no recuerden todo son la ternura que mi vida necesita, solo con una mirada llenan mi vida de paz y tranquilidad porque son el ejemplo de amor incondicional. A mi tío DARIO RUGELES REY, que desde que nací siempre ha estado a mi lado en mis buenos y malos momentos, porque siempre me cargaba para todos lados como si fuese su hija, gracias por creer en mí siempre y por estar ahí en cada momento de mi vida, por apoyarme en esta etapa de mi vida en la cual aprendí mucho.

A ERMINSSON TIRADO DELGADO, que aunque en estos momentos no estemos juntos siempre fue una persona incondicional durante mi carrera, con la cual compartí los mejores momentos; fue de gran ayuda en los momentos más difíciles de mi carrera, fue esa personita que me alentó a seguir adelante y me hizo creer que todo lo podía, gracias por tantas cosas bonitas que compartiste a mi lado, siempre existirá un cariño muy grande el cual me permite agradecerle por haberme apoyado en los momentos que estuvo conmigo y siempre le desearé lo mejor del mundo.

Difícilmente podría nombrar a todas las personas que contribuyeron de una u otra forma con la realización de este proyecto, sin embargo, agradezco a todas aquellas personas que hicieron parte no solo de este proyecto sino también de mi formación profesional:

A mi director de proyecto, el Ing. FABIO ALBERTO GARZÓN GÁLIVIZ, por brindarme todos sus conocimientos y apoyo incondicional; además por darme su confianza y ánimo para culminar exitosamente esta etapa en mi vida.

A mi codirectora, Dra. SANDRA JUDITH GARCÍA, quien desde que fue mi profesora de Tratamiento Térmicos, me brindo todos sus conocimientos y le agradezco demasiado porque es de las personas que se esmeran porque uno aprenda, gracias por la gran labor que haces, por la paciencia y por hacer parte de este gran sueño.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por su paciencia y ayuda a lo largo de la carrera y la realización de este proyecto, pero especialmente a JUAN DOMINGO quien fue una ayuda muy grande para la culminación de este proyecto, gracias por ser una mano amiga.

A los profesores los cuales ayudaron en mi formación profesional y quienes con sus conocimientos hicieron que cada día me enamorara más y más de mi carrera.

Al laboratorio de Difracción de Rayos X, de manera muy especial al profesor Henao y a los auxiliares Jhon y José Luis, por su interés y contribución en la realización de las pruebas.

Al laboratorio de Microscopía electrónica (SEM), en especial a Carlos y Carolina, por su paciencia, interés y gran ayuda en la realización de las pruebas.

A la empresa IMATT SAS por permitirme realizar la práctica empresarial, por la confianza y conocimiento brindado, porque crecí como profesional y como persona, gracias por el gran apoyo para la culminación de esta etapa en mi vida.

A los operarios de la empresa IMATT SAS y todos sus trabajadores: a la gerente, la señora MARIA ISABEL, a CAROLINA, MANUEL, ALBERTO, FRANK, DANIEL, porque de cada uno aprendí grandes cosas, gracias por su gran colaboración en esta etapa de mi vida.

Finalmente, a todos mis amigos, con quienes compartí alegrías y tristezas durante toda la carrera y más que amigos se convirtieron en hermanos; gracias por brindarme su AMISTAD, no olviden que este es el regalo más perdurable y valioso que conservaremos siempre en nuestros corazones.

Dios, es uno de los momentos más felices de mi vida, uno de mis mayores sueños y no tengo sino palabras de agradecimiento para todas las personas que estuvieron conmigo en las buenas y en las malas, todas esas personas con las que gocé, reí, lloré, gracias amigos (as). Gracias compañeros sin ustedes jamás hubiera llegado hasta acá.

Gracias a mi amiga y hermana NATHALIA ALEJANDRA NIÑO, porque me enseñó el valor de la amistad y estuvo conmigo en cada etapa de mi vida, gracias por todo tu cariño, siempre estuviste dispuesta a darme la mano. A Diana Pabón que fue una gran compañía, gracias por tu paciencia. A Martha Mancilla, Edwin Blanco, Luz Adriana, Mafe, Dianita y a mis compañeros los cuales siempre fueron un apoyo a Albert que se convirtió en un gran amigo, a Cindy, Ronald, Elvis, Andersson, Ángel, Oscar, Caro, Yuly, Linda y en general a todos aquellos que han compartido conmigo y que en estos momentos se me escapan, muchas Gracias ...

Nancy Liliana Ribero Rugeles

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1. DEFINICIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO	20
2.1.1. TRATAMIENTO TÉRMOQUIMICO.....	20
2.1.2. CARBONITRURACIÓN.	21
2.1.2.1. ACEROS PARA CARBONITRURACIÓN.....	22
2.1.3. TEMPLE.....	22
2.1.4. REVENIDO.....	23
2.2. ACEROS.....	23
2.2.1. ACERO AISI-SAE 1020.....	23
2.2.2. ACERO AISI-SAE 8620	24
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	26
3.1. SELECCIÓN DE ACEROS AISI SAE 1020 Y 8620.	27
3.2. DEFINICIÓN DE LAS MEZCLAS Y SU COMPOSICIÓN.....	27
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO.....	28
3.3.1. Análisis de Composición química.	28
3.3.2. Dureza.	29
3.4. PROCESO DE CARBONITRURACIÓN.....	29
3.4.1. Horno de Atmósfera Controlada (Carbonitruración).....	31
3.4.2. Software Simatic Win CC Flexible.....	32
3.4.3. Temple.....	35
3.4.4. Revenido.	35
3.5. EVALUACIÓN DE LA CAPA ENDURECIDA.....	35

3.5.1.	Análisis Metalográfico.	35
3.5.2.	Ensayo de Microdureza	36
3.5.3.	Difracción de rayos X.....	37
3.6.	ESTUDIO COMPARATIVO	37
4.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	38
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	38
4.1.1.	Composición Química.....	38
4.1.2.	Dureza	39
4.2.	EVALUACIÓN DE LA CAPA ENDURECIDA.....	40
4.2.1.	Análisis Metalográfico	40
4.2.2.	Ensayo de Microdureza	47
4.2.3.	Difracción de Rayos X.....	62
4.3.	ESTUDIO COMPARATIVO	63
5.	CONCLUSIONES	68
6.	RECOMENDACIONES	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	76
	ANEXOS.....	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Barras de acero y piezas de acero AISI-SAE 1020.	24
Figura 2. Barras y engranajes en acero AISI-SAE 8620.	25
Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento experimental seguido.	26
Figura 4. Puntos para la toma de dureza Brinell en la probeta de referencia.	29
Figura 5. Horno de atmósfera controlada utilizado en la empresa IMATT SAS.	31
Figura 6. Visualización Pantalla para Configuración de hornos.	33
Figura 7. Visualización Pantalla de mando Software Simatic Win CC Flexible.	33
Figura 8. Visualización Pantalla de mando Software Simatic Win CC Flexible lista de hornos de tratamiento.	34
Figura 9. Visualización Pantalla Control del proceso de tratamiento térmico Software Simatic Win CC Flexible.	34
Figura 10. Visualización Pantalla Gráfica del proceso de tratamiento térmico Software Simatic Win CC Flexible.	34
Figura 11. Muestra de acero en baquelita con protección de borde	36
Figura 12. Microdurómetro Shimadzu Tipo M.	37
Figura 13. Aceros AISI-SAE 8620 y 1020 con tiempo de carbonitruración de 1 hora. Con atmosfera del 5% de amoniaco. 100X.	41
Figura 14. Aceros AISI-SAE 8620 y 1020 con tiempo de carbonitruración de 4 horas. Con atmosfera del 15% de trietanolamina. 100X.	42
Figura 15. Aceros AISI-SAE 8620 y 1020 con tiempo de carbonitruración de 1 hora. Con atmosfera del 5% de amoniaco.	43
Figura 16. Acero AISI-SAE 8620 y1020 con tiempo de carbonitruración 1 hora. Con atmosfera del 5% de trietanolamina	44
Figura 17. Acero AISI-SAE 8620 y1020 con tiempo de carbonitruración 4 horas. Con atmosfera del 15% de Amoniaco.	45

Figura 18. Acero AISI-SAE 8620 y1020 con tiempo de carbonitruración 4 horas. Con atmosfera del 15% de Trietanolamina	46
Figura 19. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 5% de amoniaco a diferentes tiempos	49
Figura 20. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 10% de amoniaco a diferentes tiempos	50
Figura 21. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 15% de amoniaco a diferentes tiempos	50
Figura 22. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 5% de trietanolamina a diferentes tiempos	51
Figura 23. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 10% de trietanolamina a diferentes tiempos	52
Figura 24. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 15% de trietanolamina a diferentes tiempos	52
Figura 25. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 4 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	53
Figura 26. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 4 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	54
Figura 27. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 3 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	54

Figura 28. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 3 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	55
Figura 29. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 2 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	55
Figura 30. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 2 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	56
Figura 31. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 1 hora con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	56
Figura 32. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 1 hora con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.	57
Figura 33. Gráficas de profundidad de capa efectiva (50 HRc) vs el porcentaje de amina en la mezcla, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 1 hora de proceso.	58
Figura 34. Gráficas de profundidad de capa efectiva (50 HRc) vs el porcentaje de amina en la mezcla, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 4 horas de proceso.	58
Figura 35. Gráficas de porcentaje de amina en la mezcla vs la dureza superficial (HRc), para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 1 hora de proceso.	59
Figura 36. Perfil de microdureza obtenido en función del porcentaje de amina en la mezcla y la dureza superficial (HRc), para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 4 horas de proceso.	60
Figura 37. Perfil de microdureza obtenido en función de la profundidad de capa carbonitrurada para los aceros AISI- SAE 1020 y 8620 a diferentes tiempos de proceso, con un 5 % amina en la mezcla.	61

Figura 38. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 15% de trietanolamina a diferentes tiempos63

Figura 39. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 cementados con etanol.....64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química Acero AISI SAE 1020.	24
Tabla 2. Composición química Acero AISI SAE 8620.	25
Tabla 3. Composición química de los aceros AISI – SAE 1020 y 8620.....	38
Tabla 4. Resultados ensayo de dureza Brinell.	39
Tabla 5. Resumen datos de microdurezas superficiales en vickers	47
Tabla 6. Resumen datos de dureza superficial y espesores de capa endurecida para las diferentes pruebas realizadas	48
Tabla 7. Profundidad de capa carbonitrurada en función del tiempo.....	62
Tabla 8. Costo total del consumo de reactivos para carbonitruración gaseosa con diferentes aminas.....	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DIAGRAMAS DE FASES INVOLUCRADAS EN LA CARBONITRURACIÓN.	81
ANEXO B. MECANISMO DE FORMACIÓN DE CAPA CARBONITRURADA.	83
ANEXO C. REACTIVOS.....	87
ANEXO D. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN	89

RESUMEN

TÍTULO: CARBONITRURACIÓN DE ACEROS AISI-SAE 8620, 1020 EN ATMÓSFERAS DE AMINAS MEZCLADAS CON ALCOHOL PARA LA EMPRESA IMATT SAS.*

AUTORA: RIBERO RUGELES NANCY LILIANA**

PALABRAS CLAVES: Carbonitruración, trietanolamina, amoniaco, tratamiento termoquímico, microdureza Vickers, Difracción de rayos X.

DESCRIPCIÓN: En el presente estudio se realizó la comparación de dos aceros AISI-SAE 1020 y 8620, tratados termoquímicamente mediante el proceso de carbonitruración gaseosa usando dos atmósferas carbonitrurantes: amoniaco - etanol y trietanolamina - etanol. El tratamiento se realizó en un horno de atmosfera controlada en la empresa IMATT SAS. La carbonitruración de estos aceros se hizo a una temperatura constante de 870°C, variando tiempos de proceso y composiciones de la mezcla.

Se realizó la caracterización de ambos aceros después del tratamiento y se evaluó la profundidad de la capa mediante perfiles de microdureza, analizando los diferentes tiempos del proceso y porcentajes de amina en la mezcla.

Las conclusiones de este estudio fue la obtención de un incremento de dureza y profundidad de capa en todas las muestras carbonitruradas, sin embargo, se determinó que el mejor tratamiento fue el que se realizó a una temperatura de 870°C, durante 4 horas y 15% de trietanolamina, donde se obtuvo una dureza máxima de 67 HRc para el acero 1020 y de 64 HRc para el acero 8620 y profundidades de capa de 1.55 mm y 1.4 mm respectivamente; lo que confiere muy buenas propiedades superficiales a estos aceros, minimizando el desgaste de los mismos.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Ing. Fabio Alberto Garzón Galvis. Codirectora Dra. Sandra Judith García Vergara.

ABSTRACT

TITLE: AISI-SAE 8620 STEEL CARBONITRIDING, 1020 IN AMINES ATMOSPHERES MIXED WITH ALCOHOL FOR IMATT S.A.S FACTORY. *

AUTHOR: RIBERO RUGELES NANCY LILIANA**

KEYWORDS: Carbonitriding, Triethanolamine, ammonia, Thermochemical treatment, Vickers micro-hardness, X rays diffraction.

DESCRIPTION: In this study I performed a comparison between stainless steel AISI-SAE 1020 and 8620, which were treated thermo-chemically through the carbonitriding process, using two carbonitriding atmospheres: ammonia/ethanol and triethanolamine/ethanol. The treatment was performed in a controlled atmosphere furnace at IMATT S.A.S factory. The carbonitriding was done at a constant temperature of 870°C, varying both process times and mixture compound.

After the treatment, a characterization of both types of steel was done, and the depth of the carbonitrided layer was evaluated through micro-hardness cross-sections, analyzing the various processes' times and amine percentages in the compound.

The results of this study were an observed increase in hardness and depth of the carbonitrided layer of all samples. It was concluded that the treatment that increased the hardness and depth of the carbonitrided layer the most was the one performed at a temperature of 870°C for a period of 4 hours and with 15% of triethanolamine. The obtained hardness was 67 HRc for stainless steel 1020 and 64 HRc for stainless steel 8620, depths of the carbonitrided layer were 1.55 mm y 1.4 mm respectively. In conclusion, the carbonitriding process improves the properties of stainless steel AISI-SAE 1020 and 8620, helping reduce their wear.

* Research Work

** Physical Chemistry Engineering Faculty. Metallurgical Engineering School. Director Ing. Fabio Alberto Garzón Galvis. Codirectora Dra. Sandra Judith García Vergara.

INTRODUCCIÓN

La labor de mejorar las propiedades de funcionamiento de los materiales metálicos utilizados en la maquinaria actual está relacionada en gran parte con el desarrollo de nuevas técnicas para el mejoramiento de las propiedades superficiales de los materiales.

Una de estas técnicas es el proceso de carbonitruración gaseosa que consiste en la incorporación de Carbono y Nitrógeno en la superficie del acero por absorción y difusión, cuando este se encuentra por encima de la zona de transformación, para obtener una capa dura, proporcionándole a los materiales mejores propiedades tribológicas, dándole un amplio rango de aplicación.

En la actualidad a nivel industrial para el proceso de carbonitruración se usa principalmente amoníaco para la difusión de nitrógeno en la capa superficial del material, lo que hace el proceso altamente contaminante para el ambiente.

Lo novedoso de este estudio es la utilización de aminas que sean amigables con el medio ambiente como la Trietanolamina. Los equipos y materias primas usadas son de producción nacional, no contaminantes y de bajos costos en el mercado. Además se requieren de temperaturas más bajas que el proceso tradicional de carburación, lo que conlleva a disminución de tiempos y por ende menores costos, logrando así grandes beneficios para la empresa IMATT SAS.

Este proceso de Carbonitruración gaseosa con una nueva atmósfera se desea implementar no sólo por la reducción de costos, si no por las propiedades que se logran dar a las piezas, como lo son mayor resistencia al desgaste, a la fatiga, a la corrosión, entre muchas otras que brinda este proceso, logrando mayor profundidad de capa endurecida y mayor estabilidad de la dureza durante el

proceso de revenido, otra ventaja dada por el nitrógeno atómico absorbido en el proceso es que este disminuye la velocidad crítica de temple del acero, haciendo mucho más fácil el temple de estos aceros y disminuyendo la distorsión en los mismos, ampliando así el campo de aplicación de estos aceros que son económicos y de fácil adquisición en la industria.

El presente estudio propone como objetivo determinar la mejor mezcla alcohol - amina, teniendo en cuenta el espesor de la capa dura en función del tiempo del proceso. Para esto se diseñó un tratamiento termoquímico de carbonitruración en atmosferas de amoníaco/alcohol y trietanolamina/alcohol a una temperatura de 870 °C, variando tiempo y composición. Evaluando la capa mediante perfiles de microdurezas, pruebas de composición química, caracterización metalográfica del espesor de la capa carbonitrurada, difracción de rayos X verificando la presencia de nitruros en la superficie del acero.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- ❖ Realizar el proceso de Carbonitruración de aceros AISI-SAE 8620, 1020 en atmósferas de aminas mezcladas con alcohol para la empresa IMATT SAS.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Determinar la mejor mezcla alcohol - amina, teniendo en cuenta el espesor de la capa dura en función del tiempo del proceso.
- ❖ Caracterizar la capa endurecida mediante ensayos de metalografía y perfiles de microdureza.
- ❖ Calcular los costos del proceso de carbonitruración propuesto y compararlo con el proceso de cementación utilizado actualmente por la empresa IMATT SAS.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. DEFINICIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO

El Tratamiento Térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. No modifican la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas. Los factores fundamentales que influyen en el tratamiento térmico son la temperatura, el tiempo la atmósfera del horno y la velocidad de enfriamiento. [1]

2.1.1. TRATAMIENTO TÉRMOQUIMICO

Los tratamientos termoquímicos son procesos de endurecimiento superficial por difusión. En los cuales se modifica la composición química de la superficie de la pieza mediante un proceso termoquímico, el cual necesita calor para promover la difusión de una especie endurecedora hacia la superficie y regiones subsuperficiales de la pieza a tratar. Este proceso de difusión modifica la composición química de la superficie de la pieza, formando una capa dura. [2].

Estos tratamientos requieren el uso de calentamientos y enfriamientos controlados en atmósferas especiales, por esto se desarrollará el estudio de dos atmósferas para el análisis de las propiedades que proveen estas a los aceros a estudiar. Entre los objetivo más comunes de estos tratamientos están aumentar la dureza

superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, disminuir el rozamiento aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a la fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión.[3].

2.1.2. CARBONITRURACIÓN.

Este tratamiento termoquímico consiste en endurecer superficialmente el acero, promoviendo el enriquecimiento superficial mediante la difusión de carbono y nitrógeno, con el objetivo de obtener superficies extremadamente duras y un núcleo tenaz, sumado a otras propiedades mecánicas como resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste. Se efectúa a temperatura superior de A_{c1} , pero, en determinados casos, puede realizarse a temperaturas ligeramente inferiores a A_{c1} . Las temperaturas usuales de carbonitruración oscilan entre unos 750 y 950°C. [4]

Una de las ventajas de este proceso es que presenta muy poca deformación debido a que el nitrógeno absorbido en el proceso disminuye la velocidad crítica de temple del acero. En este proceso se consiguen capas hasta de 1,5 mm, en hornos de atmósfera controlada. [5]

Los campos de aplicación son los mismos que en el caso de la cementación, ya que son procesos muy parecidos que proporcionan piezas con características similares. Básicamente se aplica en piezas que requieran una gran ductilidad y tenacidad (aportadas por el núcleo) a la vez que una gran resistencia al desgaste (aportada por la capa exterior). Algunos ejemplos son piñones, coronas, ejes, levas, guías, chavetas, etc.

2.1.2.1. ACEROS PARA CARBONITRURACIÓN

La Carbonitruración es un tratamiento con el que se consigue endurecer una capa superficial de los aceros por la absorción simultánea de carbono y nitrógeno. Esta operación es parecida a la que ocurre en la cementación, pero la temperatura de proceso es menor y los compuestos que se forman en la superficie del acero mejoran su templabilidad permitiendo con esto enfriamientos menos severos en el temple. Así se disminuyen los riesgos de agrietamiento y distorsión de las piezas.

Por el efecto del mejoramiento de la templabilidad en los aceros, la carbonitruración permite el uso de aceros de menor calidad, los cuales a veces presentan el inconveniente de que después del temple que sigue a la cementación ordinaria, aparecen puntos blandos en la capa dura, problema que no suele presentarse en la carbonitruración. [28]

2.1.3. TEMPLE

Es un tratamiento térmico que al hacer un calentamiento y enfriamiento a una velocidad controlada, varía las características mecánicas del acero como es el aumentar la dureza y resistencia al desgaste, al mismo tiempo que modifica sus propiedades físicas y químicas.

Este tratamiento consiste en calentar el acero hasta una temperatura de austenización, seguido de un tiempo de sostenimiento a esta temperatura para que ocurra la transformación de la estructura que posee el acero a temperatura ambiente, y después se somete a un enfriamiento a una velocidad crítica que es proporcionada por el medio de enfriamiento que se utilice. Con este proceso se busca principalmente endurecer el acero. [6]

2.1.4. REVENIDO

Es un tratamiento complementario del temple, que regularmente sigue a éste. A la unión de los dos tratamientos también se le llama "bonificado". El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero seguido del normalizado o templado , a una temperatura menor a Ac_1 , seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se deseen resultados elevados en tenacidad ,o lento , para reducir al máximo las tensiones térmicas que puedan formar deformaciones. [1]

2.2. ACEROS

2.2.1. ACERO AISI-SAE 1020

Es un acero clasificado en el grupo de los aceros de bajo carbono. Su composición química le permite entregar un mejor desempeño en sus propiedades mecánicas, soldabilidad y maquinabilidad que otros aceros del mismo grupo. Al ser sometido a un tratamiento térmico de cementación se puede obtener una superficie dura con centro tenaz y al ser estirado en frío mejora su resistencia mecánica y maquinabilidad. Por su contenido de carbono estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas estructurales o de maquinaria de mediana resistencia con una gran tenacidad. Es fácilmente soldable con soplete o al arco.

Se usa principalmente para partes de maquinaria que no estén sometidas a grandes esfuerzos mecánicos como ejes, eslabones para cadenas, pasadores, bujes cementados, tornillería corriente, bridas, piñones para transmisión de cadena a bajo esfuerzo, clavos para ferrocarril, grapas, etc.[9]

Análisis químico según Norma Nacional NMX B-300 (% en peso):

Tabla 1. Composición química Acero AISI SAE 1020.

% C	% Mn	% P máx.	% S máx.	% Si máx.
0.18 – 0.23	0.3 – 0.6	0.04	0.05	0.15 – 0.3

Fuente: Ref. [9].

Figura 1. Barras de acero y piezas de acero AISI-SAE 1020.



Fuente: Ref. [9].

2.2.2. ACERO AISI-SAE 8620

Es un acero aleado al cromo – níquel – molibdeno muy utilizado para cementación y posee aceptable templabilidad. Este acero al ser cementado y templado ofrece una buena dureza superficial y gran tenacidad en el núcleo. Presenta una dureza uniforme o ausencia de zonas blandas en la capa cementada y baja distorsión después del tratamiento térmico. La presencia de níquel y molibdeno en el acero

AISI – SAE 8620 juega un papel definitivo en el balance de todas las propiedades que presenta este material y su efecto cobra mayor importancia con el aumento del tamaño de la pieza.

Es utilizado en la fabricación de engranajes, piñones, mordazas, coronas, moldes para la industria del plástico y satélites entre muchos otros; normalmente estos aceros se encuentran en barra redonda, cuadrada, hexagonal, soleras laminadas o forjadas en caliente, peladas o maquinadas.[10]

Análisis químico según Norma Nacional NMX B-300 (% en peso):

Tabla 2. Composición química Acero AISI SAE 8620.

% C	% Mn	%P máx.	%S máx.	% Si	% Cr	% Ni	% Mo
0.18 – 0.23	0.70 – 0.90	0.035	0.040	0.15 – 0.35	0.40 – 0.60	0.40 - 0.70	0.15 – 0.25

Fuente: Ref. [10].

Figura 2. Barras y engranajes en acero AISI-SAE 8620.



Fuente: Ref. [10]

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El presente estudio se desarrolló siguiendo el esquema mostrado en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento experimental seguido.



Fuente: Autora.

3.1. SELECCIÓN DE ACEROS AISI SAE 1020 Y 8620.

El material de estudio fue proporcionado por la empresa IMATT SAS. Y se seleccionó de acuerdo a su uso en la industria y la facilidad de adquirirlo en el mercado local; buscando aceros económicos pero con buenas propiedades para el proceso, se escogió uno con elementos aleantes como lo es el acero AISI-SAE 8620 con elementos formadores de nitruros como lo son el Cr y Mo. Luego se seleccionó un acero al carbono AISI-SAE 1020, para conocer su comportamiento en el proceso, siendo este acero uno de los más usados en nuestro medio, por su facilidad de adquisición y bajo costo. Las muestras son dos ejes de 18 mm de diámetro y 300 mm de largo. De las cuales se cortaron y maquinaron 25 probetas de cada acero, las cuales fueron de 18 mm de diámetro y 7 mm de espesor. De estas 25 probetas, 24 fueron usadas para el proceso de carbonitruración y una se dejó como probeta de referencia para realizar la respectiva caracterización de cada material. Fueron cortadas tomando en cuenta que no pertenezcan al borde de la barra sino a 10 mm como mínimo del final de la barra; después fueron pulidas para quitar la zona oxidada.

3.2. DEFINICIÓN DE LAS MEZCLAS Y SU COMPOSICIÓN.

La elección de las mezclas a utilizar se realizó, por las propiedades que estas aportan a los metales mediante el proceso de carbonitruración, por su fácil adquisición en el mercado, que sean económicos, que no sean peligrosos en cuanto a toxicidad y que sean amigables con el medio ambiente. Para este proceso se utilizaron como aportadores de nitrógeno, el amoniaco y la trietanolamina, el amoniaco porque es uno de los compuestos más usados en la industrial y el cual da excelentes resultados. Y la trietanolamina se escogió porque

presenta un buen aporte tanto de nitrógeno como de carbono, es de fácil adquisición, económica y amigable con el medio ambiente.

La trietanolamina, puede ser utilizada en carbonitruración a temperatura elevada, ya que aporta simultáneamente carbono y nitrógeno aptos para la incorporación.

La temperatura de carbonitruración tiene una influencia decisiva en la relación entre las proporciones de ambos elementos incorporados. Cuando la temperatura de tratamiento es elevada, existe normalmente un predominio de la proporción de carbono incorporado respecto a la de nitrógeno. Por ello hay tendencia a considerar la carbonitruración a temperatura alta como una variante del proceso de cementación. [29]

En el caso de la carbonitruración a temperatura elevada, entre 780 y 950 °C, las proporciones de amoníaco que habitualmente se emplean son relativamente pequeñas. Generalmente su proporción, respecto del gas portador, no es superior al 10%. Por esta razón para este estudio se escogieron proporciones del 5%, 10% y 15% de la amina aportadora del nitrógeno, tomando valores por encima y por debajo de las proporciones usadas generalmente en la industria.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO.

La caracterización del material de estudio, se realizó en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander y de la empresa IMATT SAS, mediante ensayos de composición química y dureza.

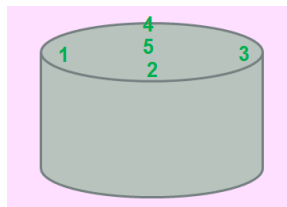
3.3.1. Análisis de Composición química.

La composición química del acero se determinó mediante un espectrómetro de emisión óptica, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E 415-08 [22]; se realizaron varias pruebas para garantizar la veracidad de los resultados.

3.3.2. Dureza.

Se realizaron ensayos de dureza a los dos aceros, mediante un durómetro marca Wilson. Debido a que la probeta es circular las medidas de la dureza fueron tomadas en los cuatro extremos de la misma y en el centro, como lo muestra la Figura 4.

Figura 4. Puntos para la toma de dureza Brinell en la probeta de referencia.



Fuente: Autora.

3.4. PROCESO DE CARBONITRURACIÓN.

Durante el proceso de Carbonitruración se variaron tanto las composiciones de la atmósfera como el tiempo del tratamiento los cuales se realizaron para 1, 2, 3 y 4 horas para obtener diferencias en las propiedades superficiales del material. La temperatura del proceso en todos los casos fue de 870 °C.

Para cada prueba se realizó el mismo procedimiento para la puesta en marcha del proceso de carbonitruración:

Se empezó con la preparación del horno, donde se revisa, calibra y programa. Al mismo tiempo se revisan los flujómetros y el tanque, verificando que no posean fugas que puedan contaminar la atmósfera o que puedan generar alguna entrada de aire que interfiera con el proceso.

Luego son marcadas las probetas según el acero, tiempo, composición de la mezcla y amina utilizada. Se comprobó que las probetas estuvieran limpias, libres de humedad y grasa en la superficie para evitar compuestos indeseados en la atmósfera del horno. Se amarran las probetas con alambre dulce y se diferenciaran mediante arandelas, indicando el tiempo del proceso y el tipo de acero para saber la hora de sacado y el medio de temple.

Se encendió el tablero general y se activó el control del horno 3, por medio del Software Simatic Win CC Flexible para tener controlado todo el proceso.

Se le realizó una purga al horno durante 35 min con un flujo de 14 L/min de N₂, para crear una atmósfera neutra dentro del horno.

Se realizó la prendida del horno y empezó el calentamiento del horno bajando el flujo de N₂ a 8 L/min y colocando el controlador de la temperatura en el *Software Simatic Win CC Flexible* a 870 °C.

Cuando se llegó a 800 °C se cambió el N₂ por la mezcla (trietanolamina/alcohol; amoníaco/alcohol) a razón de 30 mL/min durante 20 min y de ahí en adelante se baja a 20 mL/min.

Cuando se llegó a 850 °C se introdujo el primer alambre para verificar que la atmósfera este carbonitrurando y se templó el mismo a los 30 minutos; cuando el alambre rompe de forma frágil quiere decir que el proceso está funcionando y por esto se empezaron a introducir las probetas.

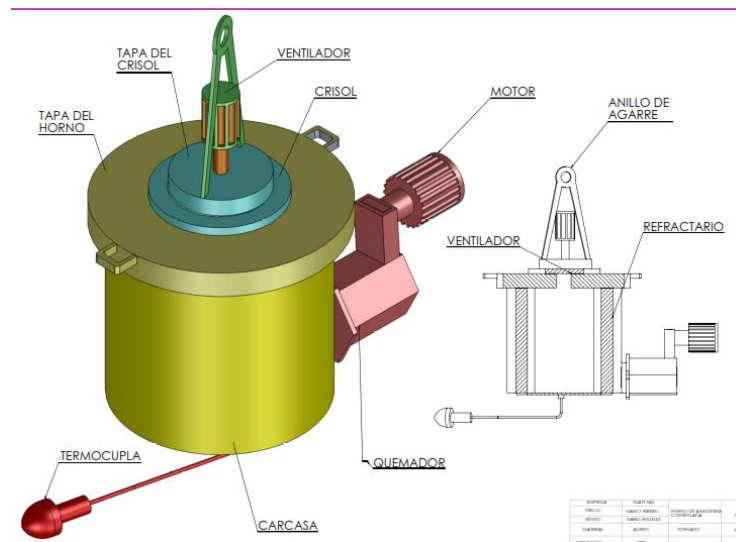
Apenas se introdujeron las probetas se empezó a contar el tiempo para cada prueba.

Desde que se empezó a contar el tiempo a la hora se sacaron las 2 primeras probetas y así cada hora, hasta sacar las últimas probetas a las 4 horas.

3.4.1. Horno de Atmósfera Controlada (Carbonitruración)

El horno que se va a utilizar está compuesto por una cámara cilíndrica de acero inoxidable con una altura de 860 mm, diámetro de 950 mm y un volumen de aproximadamente 157881 cm³. Posee un ventilador en su interior el cual permite homogenizar la mezcla gaseosa, un flujómetro por el cual se alimentaran los líquidos para producir las diferentes atmósferas deseadas; este es el encargado de que los depósitos de alimentación de líquidos de goteo trabajen a presión constante y otro flujómetro para la alimentación de nitrógeno al horno para crear una atmósfera neutra y realizar la purga respectiva. La salida de gases se encuentra en la tapa superior donde se encuentra un mechero que se enciende durante el proceso. Para ser encendido se genera una chispa por medio del calentador la cual al estar en contacto con el gas natural y el aire generan la llama para empezar el calentamiento. Este horno posee en uno de sus lados una chimenea por la cual van a salir los gases producidos por la combustión del gas natural y el aire.

Figura 5. Horno de atmósfera controlada utilizado en la empresa IMATT SAS.



Fuente: Autora.

3.4.2. Software Simatic Win CC Flexible

Este software hace parte del sistema de automatización en la planta de IMATT SAS, el cual es el encargado de manipular y controlar el proceso de los 7 hornos que posee la empresa.

Este software fue implementado con el fin de aprovechar al máximo todos los potenciales de optimización debido a que los procesos optimizados permiten reducir costos y mejorar la calidad en la producción.

Este sistema es el encargado de tomar la señal de la temperatura y realizar un control de temperatura vs tiempo durante todo el proceso, este monitorea continuamente cada uno de los procesos que se llevan a cabo en los diferentes hornos, este software recopila los datos y produce una visualización de cada uno de los tratamientos térmicos que se realizarán.

Para el análisis se realizarán los procesos de Carbonitruración, temple y revenido los cuales se monitorearan y controlaran por medio del Software Simatic Win CC Flexible, en el cual se visualizaran los parámetros de operación y registro de cada una de las variables del proceso por medio de tablas con valores que serán registrados continuamente por el set point y gráficas que constantemente representaran cada proceso.

La visualización de las pantallas y procesos del Software Simatic Win CC Flexible se observarán a continuación.

Figura 6. Visualización Pantalla para Configuración de hornos.

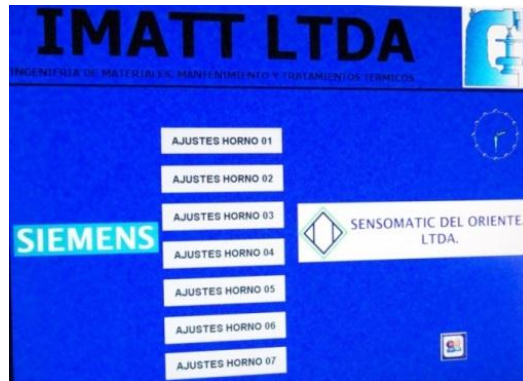


Figura 7. Visualización Pantalla de mando Software Simatic Win CC Flexible.



Figura 8. Visualización Pantalla de mando Software Simatic Win CC Flexible lista de hornos de tratamiento.



Figura 9. Visualización Pantalla Control del proceso de tratamiento térmico Software Simatic Win CC Flexible.



Figura 10. Visualización Pantalla Gráfica del proceso de tratamiento térmico Software Simatic Win CC Flexible.



3.4.3. Temple.

Seguido al proceso de carbonitruración se realizó un temple. La probeta de acero AISI-SAE 1020 se templó en agua y la de acero AISI-SAE 8620 en aceite debido a los elementos aleantes presentes en este, este proceso se realizó cada hora a las 2 probetas que se sacaban para cada concentración.

3.4.4. Revenido.

Luego de realizado el proceso de carbonitruración y temple para todas las probetas a cada concentración se efectuó un revenido a 200°C durante una hora para aliviar las tensiones producidas por el temple de las mismas.

3.5. EVALUACIÓN DE LA CAPA ENDURECIDA.

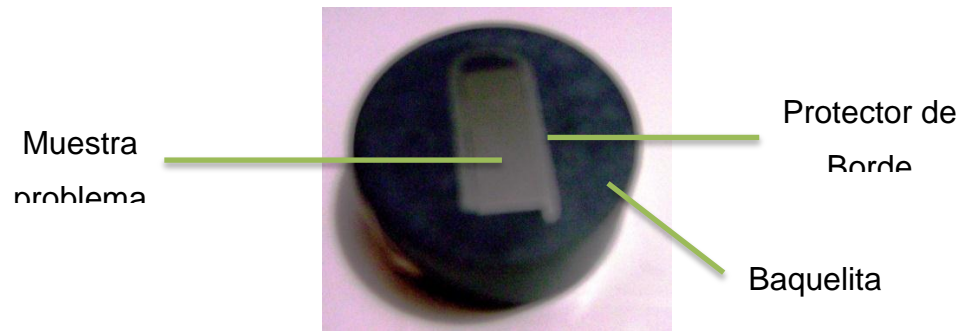
Para el estudio a profundidad de la capa endurecida se realizaron las siguientes pruebas: Ensayos de Microdureza que se realizó en los laboratorios de la empresa IMATT SAS, análisis Metalográfico y difracción de rayos X que fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander.

3.5.1. Análisis Metalográfico.

Después de ser extraídas y enfriadas las muestras fueron cortadas transversalmente, en una cortadora de disco de titanio. Posteriormente, las muestras fueron montadas en baquelita. En el momento del montaje, alrededor de las muestras se puso un protector de borde (figura 11) el cual, consiste en un pequeño alambre de dureza mayor al de las muestras, con el fin de evitar que los

bordes se redondearán, limitando el posterior análisis de la capa superficial y para evitar que al pulir la capa carbonitrurada llegue a ser retirada.

Figura 11. Muestra de acero en baquelita con protección de borde



Fuente: Autora.

3.5.2. Ensayo de Microdureza

Se realizaron ensayos de microdureza mediante un microdurómetro Shimadzu Tipo M, que consta de un penetrador Vickers (figura 12), utilizando una carga de 500 gramos-fuerza con un tiempo de aplicación de 10 segundos, escogido con base en pruebas preliminares. Se realizaron medidas de microdureza a diferentes distancias, tomando como referencia la superficie de la muestra.

Estos ensayos se basaron en la norma ASTM E 384-05^a [24], para evaluar el cambio de la dureza superficial del material debido al tratamiento de Carbonitruración.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

Después de la realización de los ensayos, pruebas y procedimientos planteados en la metodología, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación:

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

4.1.1. Composición Química

En la Tabla 3 se muestran los resultados de composición química de los dos aceros utilizados, obtenidos por espectrometría de emisión óptica.

De esta manera se confirmó la composición de los aceros a estudiar.

Tabla 3. Composición química de los aceros AISI – SAE 1020 y 8620.

Elemento Químico	Resultados Experimentales*	Valores Estándar.	Resultados Experimentales*	Valores Estándar.
	ACERO 8620	ACERO 8620	ACERO 1020	ACERO 1020
C	0.229	0.18 – 0.23	0.218	0.18 - 0.23
Si	0.264	0.15 – 0.35	0.180	0.15 – 0.3
Mn	0.789	0.70 – 0.90	0.591	0.3 – 0.6
P	0.0050	0.035	0.011	0.04
S	0.015	0.040	0.015	0.05
Cr	0.516	0.40 – 0.60	0.047	-----

Mo	0.152	0.15 – 0.25	0.010	-----
Ni	0.411	0.40 – 0.70	0.036	-----
Cu	0.175	-----	0.111	-----
Al	0.017	-----	0.0050	-----

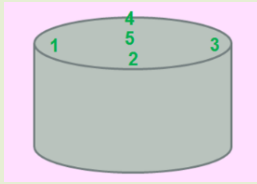
*Los valores experimentales que están tabulados son el resultado promedio de las tres pruebas realizadas a las muestras de estudio.

Fuente: Laboratorio de Espectroscopia Atómica y Molecular. UIS.

4.1.2. Dureza

Los resultados obtenidos del ensayo de dureza fueron tomados en escala Rockwell A y convertidas posteriormente a escala Brinell, estas fueron realizadas en los cuatro extremos de cada muestra y en el centro, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados ensayo de dureza Brinell.

Puntos		ACERO 8620 (Brinell)	ACERO 1020 (Brinell)
	1	190	168
	2	195	162
	3	188	166
	4	191	160

	5	194	161
	Promedio	191.6	163.4

Fuente: Autora.

Analizando los datos obtenidos en los dos aceros, se nota que estos presentan una distribución de dureza relativamente homogénea a través de la superficie, tanto en el núcleo, como en la zona exterior.

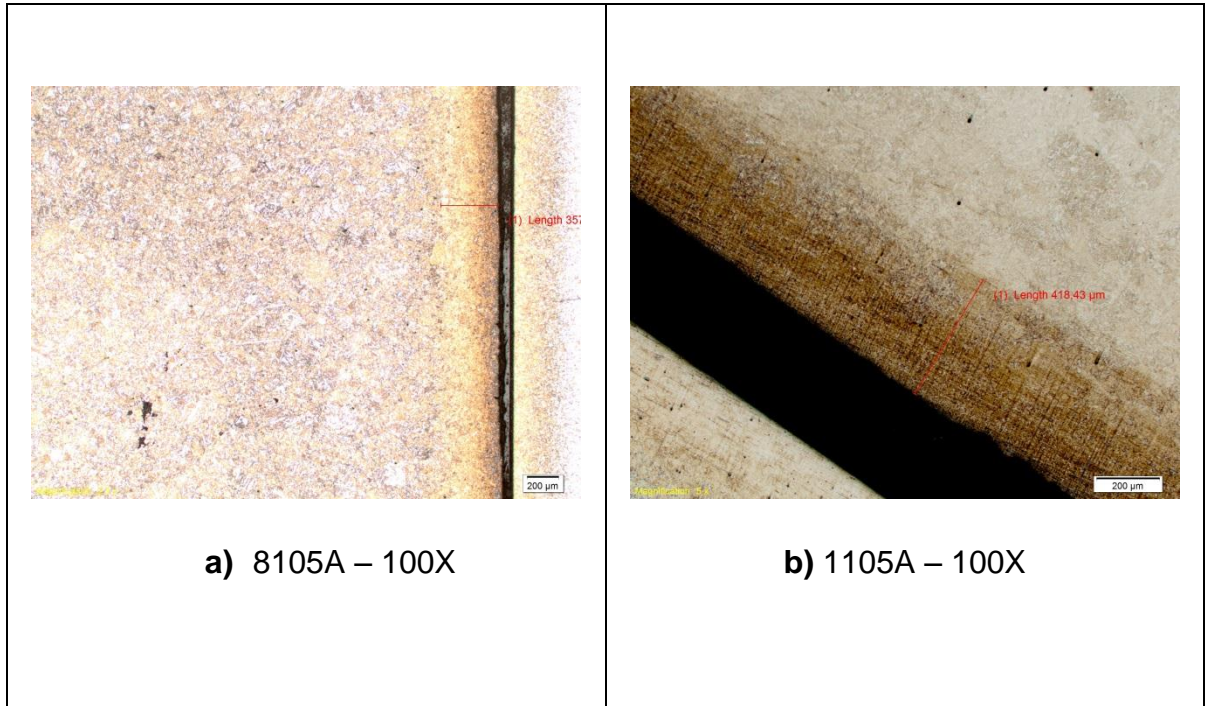
4.2. EVALUACIÓN DE LA CAPA ENDURECIDA

4.2.1. Análisis Metalográfico

A continuación se presenta el análisis metalográfico realizado con microscopio óptico de las probetas carbonitruradas de acero AISI SAE 1020 y 8620, las cuales fueron atacadas químicamente con nital al 2%, bajo el cumplimiento de los estándares establecidos en la norma ASTM E407-07 [30].

Para este análisis se escogieron las probetas expuestas a las condiciones límites del tratamiento como lo son las de menor concentración de amina (5%) y tiempo (1 hora) y el extremo que son las de mayor concentración de amina (15%) y tiempo (4 horas).

Figura 13. Aceros AISI-SAE 8620 y 1020 con tiempo de carbonitruración de 1 hora. Con atmosfera del 5% de amoniaco. 100X.

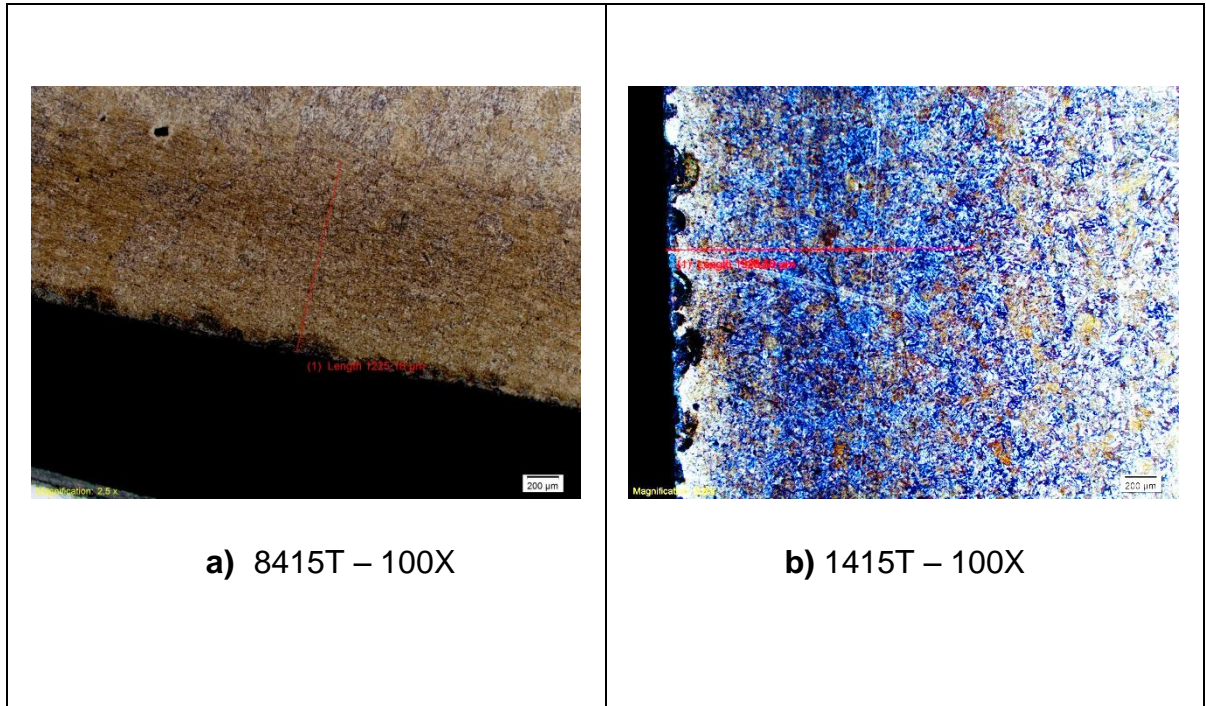


Fuente: Autora.

- a) Micrografía de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 8620 realizada a 870°C durante 1 hora utilizando etanol y amoniaco (5%). El enfriamiento se realizó en aceite. Se observa el cambio de microestructura y el espesor de la capa.

- b) Micrografía de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 1020 realizada a 870°C durante 1 hora utilizando etanol y amoniaco (5%). El enfriamiento se realizó en agua. Se observa el cambio de estructura y el espesor de la capa.

Figura 14. Aceros AISI-SAE 8620 y 1020 con tiempo de carbonitruración de 4 horas. Con atmosfera del 15% de trietanolamina. 100X.

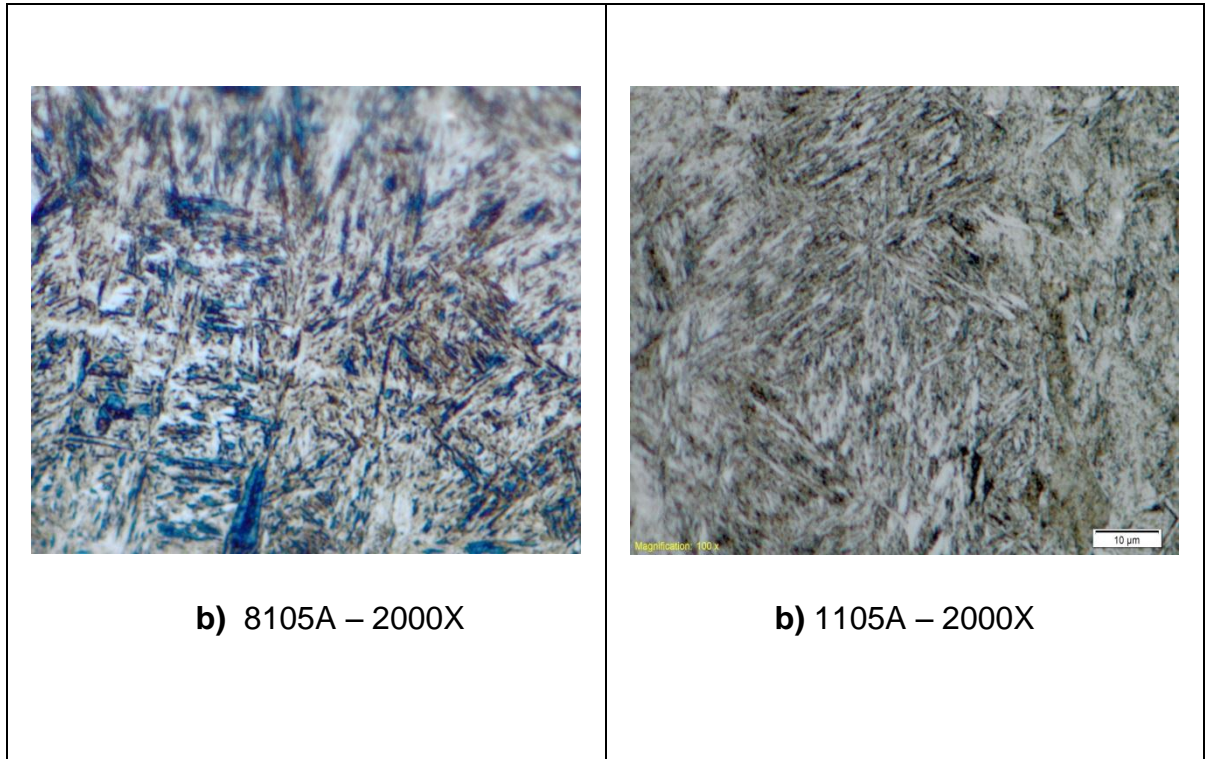


Fuente: Autora.

- a) Micrografía de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 8620 realizada a 870°C durante 4 horas utilizando etanol y trietanolamina (15%). El enfriamiento se realizó en aceite. Se observa el cambio de microestructura y el espesor de la capa.

- b) Micrografía de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 1020 realizada a 870°C durante 4 horas utilizando etanol y trietanolamina (15%). El enfriamiento se realizó en agua. Se observa el cambio de estructura y el espesor de la capa.

Figura 15. Aceros AISI-SAE 8620 y 1020 con tiempo de carbonitruración de 1 hora. Con atmosfera del 5% de amoniaco.

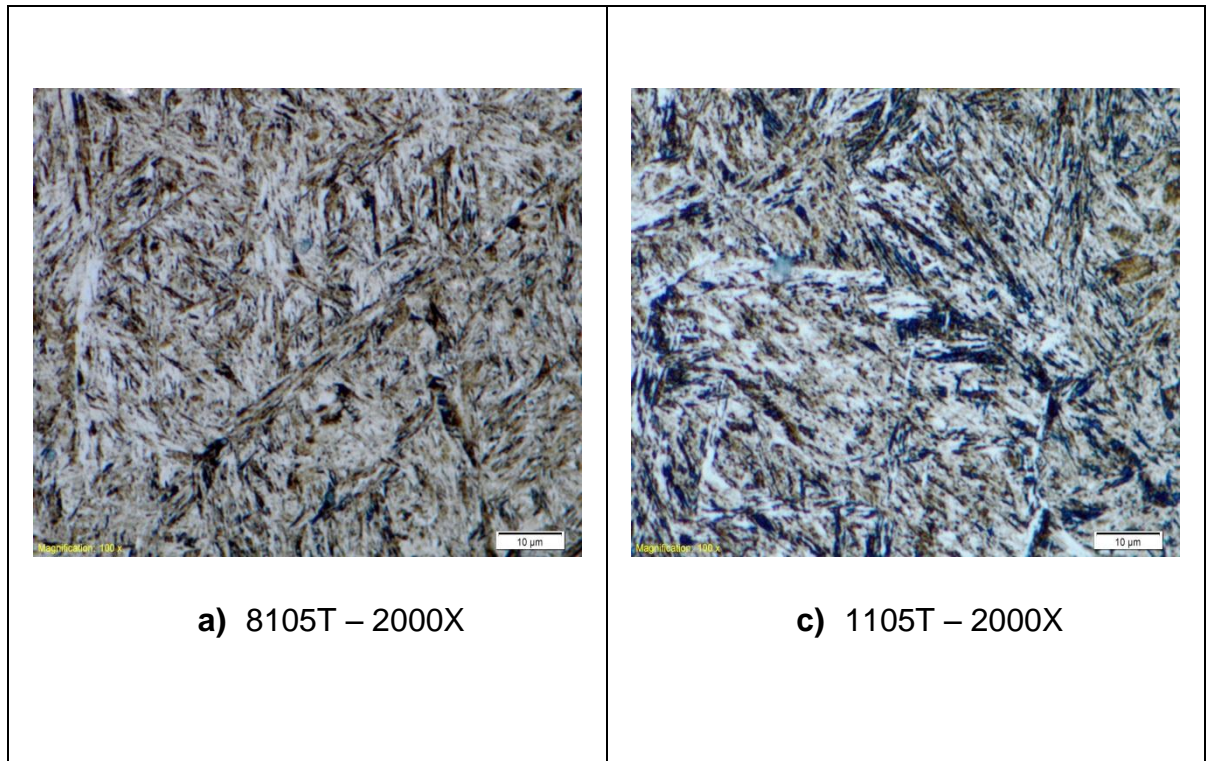


Fuente: Autora.

- b)** Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 8620 realizada a 870°C durante 1 hora utilizando etanol y amoniaco (5%). El enfriamiento se realizó en aceite. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 0.35 mm.

- c)** Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 1020 realizada a 870°C durante 1 hora utilizando etanol y amoniaco (5%). El enfriamiento se realizó en agua. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 0.45 mm.

Figura 16. Acero AISI-SAE 8620 y1020 con tiempo de carbonitruración 1 hora.
Con atmosfera del 5% de trietanolamina

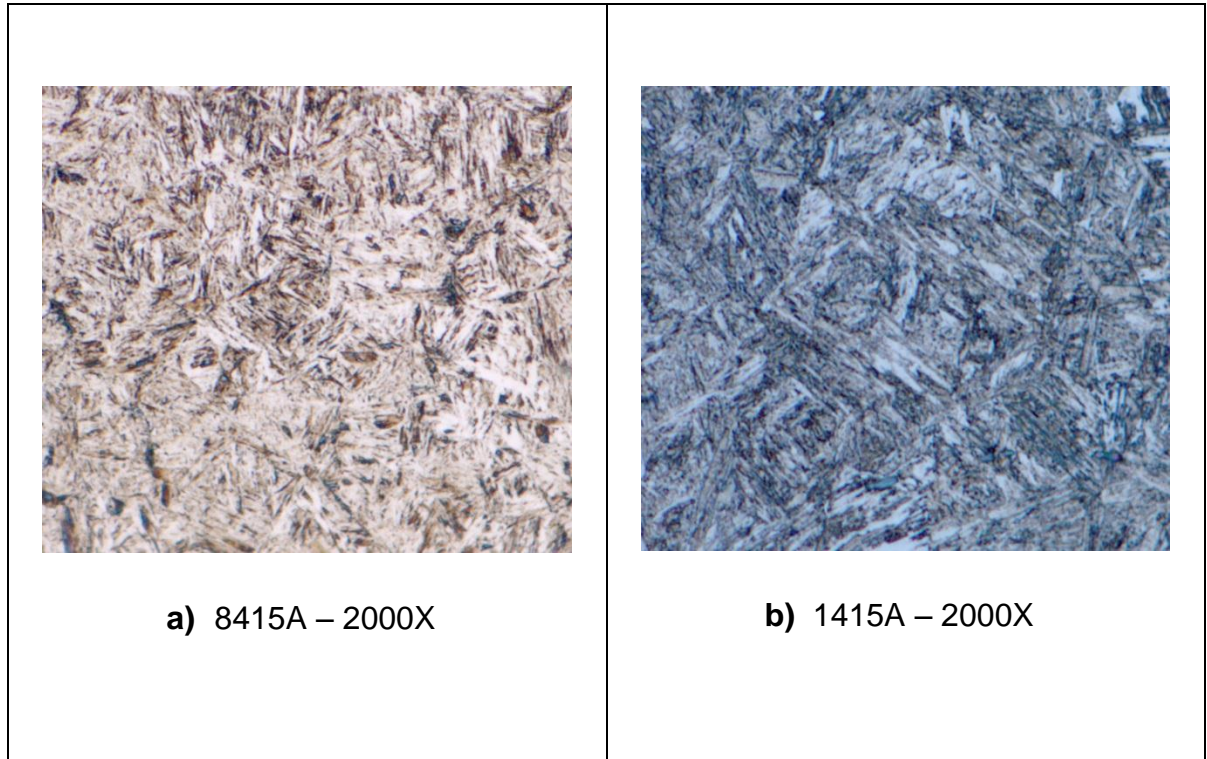


Fuente: Autora.

- a) Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 8620 realizada a 870°C durante 1 hora utilizando etanol y trietanolamina (5%). El enfriamiento se realizó en aceite. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 0.6 mm.

- b) Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 1020 realizada a 870°C durante 1 hora utilizando etanol y trietanolamina (5%). El enfriamiento se realizó en agua. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 0.9 mm.

Figura 17. Acero AISI-SAE 8620 y1020 con tiempo de carbonitruración 4 horas.
Con atmosfera del 15% de Amoniaco

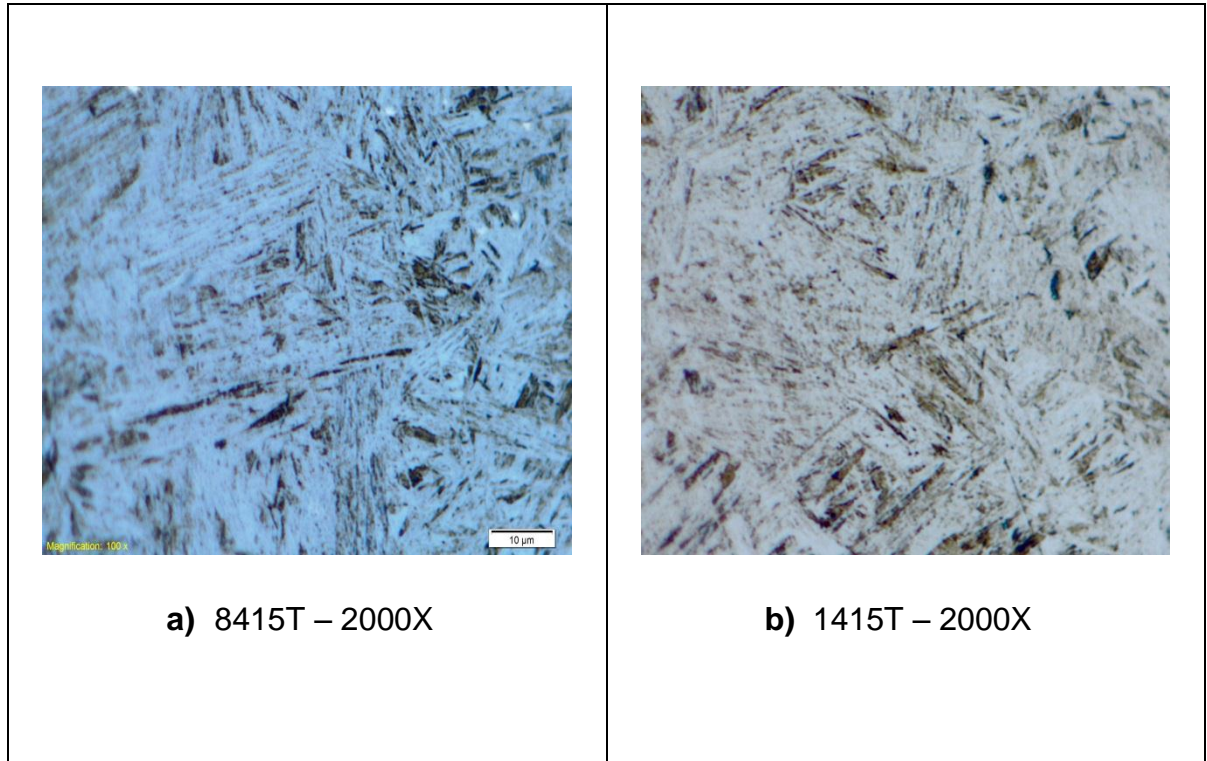


Fuente: Autora.

- a) Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 8620 realizada a 870°C durante 4 horas utilizando etanol y Amoniaco (15%). El enfriamiento se realizó en aceite. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 1.3 mm.

- b) Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 1020 realizada a 870°C durante 4 horas utilizando etanol y Amoniaco (15%). El enfriamiento se realizó en agua. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 1.4 mm.

Figura 18. Acero AISI-SAE 8620 y1020 con tiempo de carbonitruración 4 horas.
Con atmosfera del 15% de Trietanolamina



Fuente: Autora.

- a) Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 8620 realizada a 870°C durante 4 horas utilizando etanol y trietanolamina (15%). El enfriamiento se realizó en aceite. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 1.4 mm.

- b) Microestructura de la capa carbonitrurada en un acero AISI-SAE 1020 realizada a 870°C durante 4 horas utilizando etanol y trietanolamina (15%). El enfriamiento se realizó en agua. Se observa que la estructura del borde es una matriz de martensita revenida. Espesor de la capa 1.55 mm.

4.2.2. Ensayo de Microdureza

Las siguientes gráficas y tabla muestran los resultados obtenidos en los ensayos de microdureza para las diferentes variantes del proceso de carbonitruración.

Para todas las muestras, se tomaron diferentes valores de microdureza en Vickers y su equivalencia en Rockwell C, tomadas en línea recta desde el borde hasta la dureza efectiva de la capa.

El criterio para la medición de la capa efectiva carbonitrurada se efectuó mediante la norma ANSI/AGMA 6004-F88 [31]. En la que se especifica que la profundidad efectiva del casco se define como la profundidad del casco que tiene una dureza mínima de 50 HRc.

Tabla 5. Resumen datos de microdurezas superficiales en vickers

% AMINA	TIEMPO	ACERO AISI-SAE 8620	ACERO AISI-SAE 1020	TIEMPO	ACERO AISI-SAE 8620	ACERO AISI-SAE 1020
		Microdureza (vickers)	Microdureza (vickers)		Microdureza (vickers)	Microdureza (vickers)
5	1	677.2827	677.2827	1	715.4321	735.727
	2	677.2827	677.2827	2	715.4321	778.996
	3	677.2827	695.9655	3	756.898	905.4687
	4	695.9655	695.9655	4	778.996	802.076
10	1	677.2827	677.2827	1	735.727	756.898
	2	677.2827	677.2827	2	756.898	770.042
	3	695.9655	695.9655	3	778.996	770.042

	4	695.9655	695.9655	4	802.076	802.076
15	1	695.9655	695.9655	1	802.076	802.076
	2	715.4321	756.898	2	802.076	861.838
	3	695.9655	756.898	3	802.076	802.076
	4	756.898	756.898	4	802.076	905.469

Fuente: Autora.

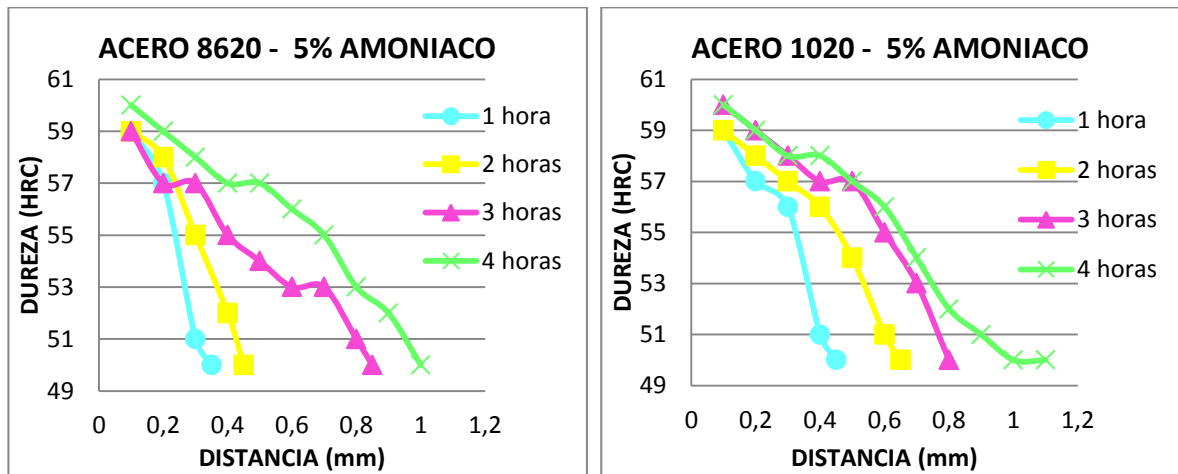
Tabla 6. Resumen datos de dureza superficial y espesores de capa endurecida para las diferentes pruebas realizadas

% AMI NA	TIEM PO	ACERO AISI- SAE 8620		ACERO AISI- SAE 1020		TIEM PO	ACERO AISI- SAE 8620		ACERO AISI- SAE 1020	
		Dureza sup. (HRc)	Espesor (mm)	Dureza sup. (HRc)	Espesor (mm)		Dureza sup. (HRc)	Espesor (mm)	Dureza sup. (HRc)	Espesor (mm)
5	1	59	0.35	59	0.45	1	61	0.6	61	0.9
	2	59	0.45	59	0.65	2	61	1	63	1
	3	59	0.85	60	0.8	3	62	1.2	67	0.85
	4	60	1	60	1.1	4	63	1.5	64	1.4
10	1	59	0.45	59	0.5	1	61	0.9	62	0.9
	2	59	0.7	59	0.7	2	62	1	63	1.1
	3	60	0.9	60	0.9	3	63	1.2	63	1.2

	4	60	1.1	60	1.2	4	64	1.4	64	1.5
15	1	60	0.7	60	0.9	1	64	0.8	64	0.95
	2	61	0.7	62	1	2	64	1	66	1.2
	3	60	1.1	62	1.2	3	64	1.2	64	1.4
	4	62	1.3	62	1.4	4	64	1.4	67	1.55

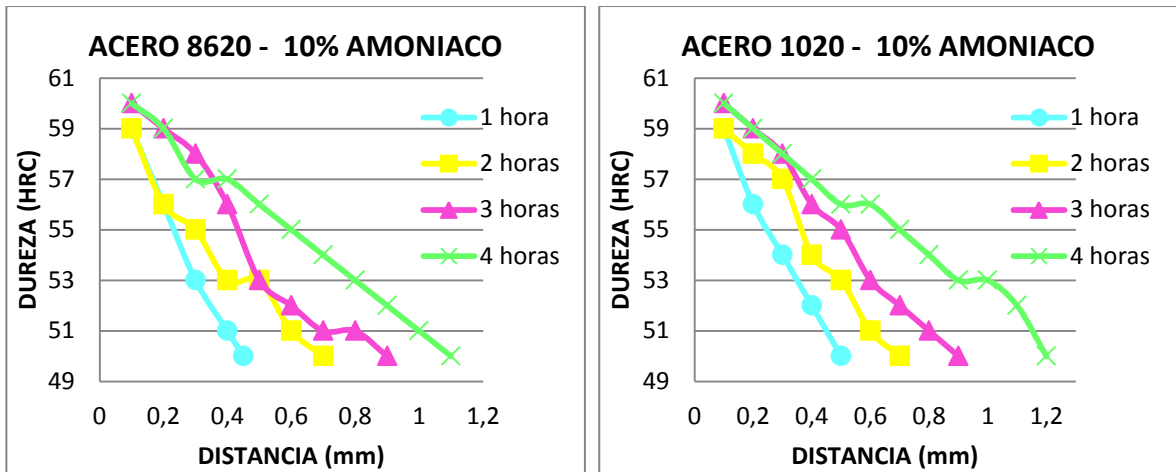
Fuente: Autora.

Figura 19. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 5% de amoníaco a diferentes tiempos



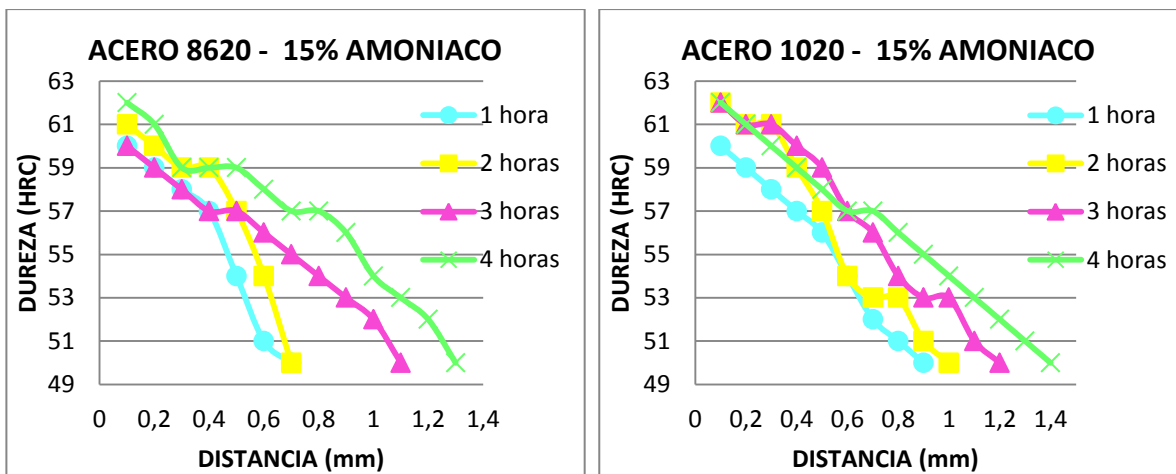
Fuente: Autora.

Figura 20. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 10% de amoniaco a diferentes tiempos



Fuente: Autora.

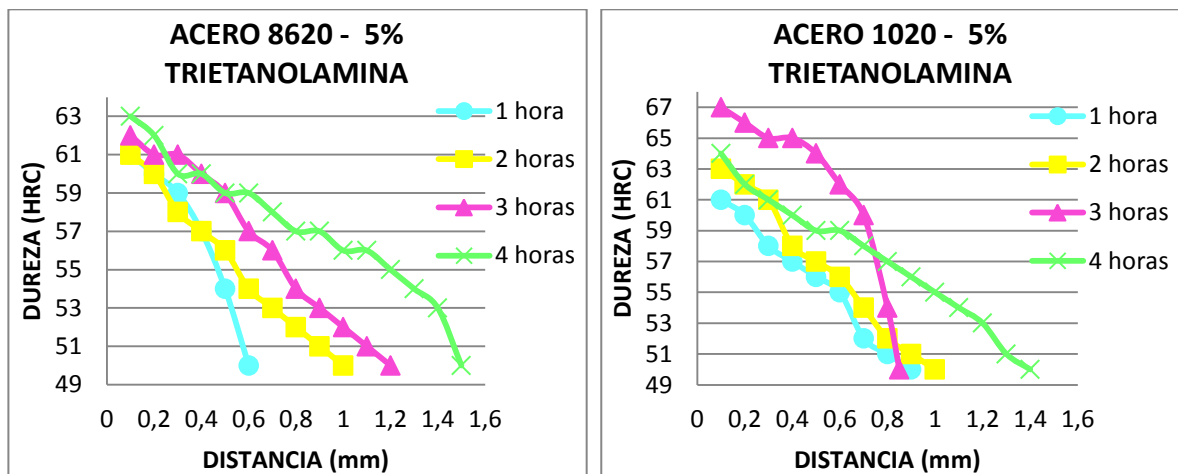
Figura 21. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 15% de amoniaco a diferentes tiempos



Fuente: Autora.

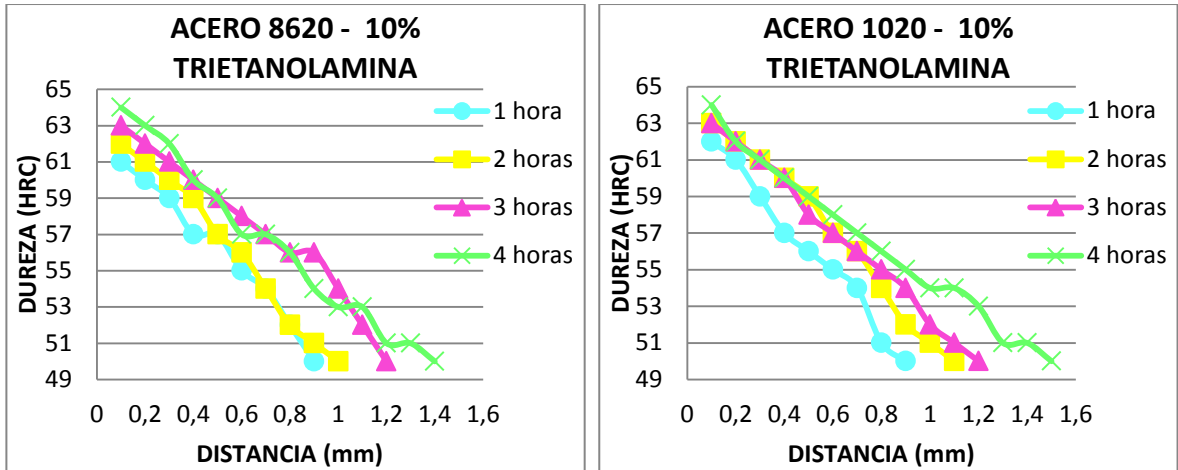
En los perfiles de microdureza mostrados en la Figura 19,20 y 21 se observa un desplazamiento constante de las curvas de dureza en forma ascendente y de izquierda a derecha, lo que representa un mayor grado de penetración de la dureza en ambos aceros, gracias a la influencia del tiempo en el proceso. También se puede observar que para la mayoría de tiempos existe una mayor profundidad de capa en el acero 1020. Se puede notar que la dureza superficial en todas las concentraciones de amoniaco fue más o menos igual, pero al comparar las diferentes concentraciones se observa un aumento bastante notorio en las profundidades de capa en ambos aceros.

Figura 22. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 5% de trietanolamina a diferentes tiempos



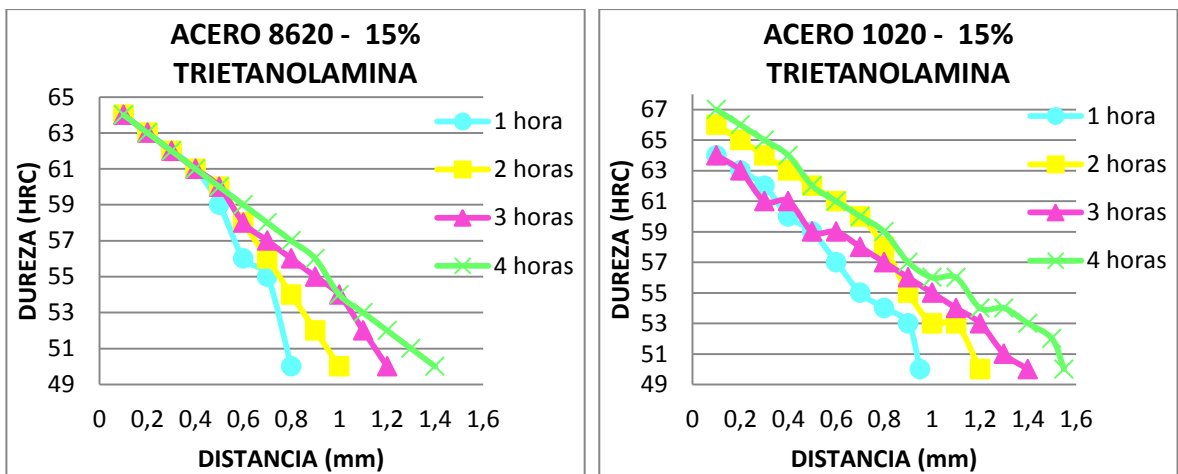
Fuente: Autora.

Figura 23. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 10% de trietanolamina a diferentes tiempos



Fuente: Autora.

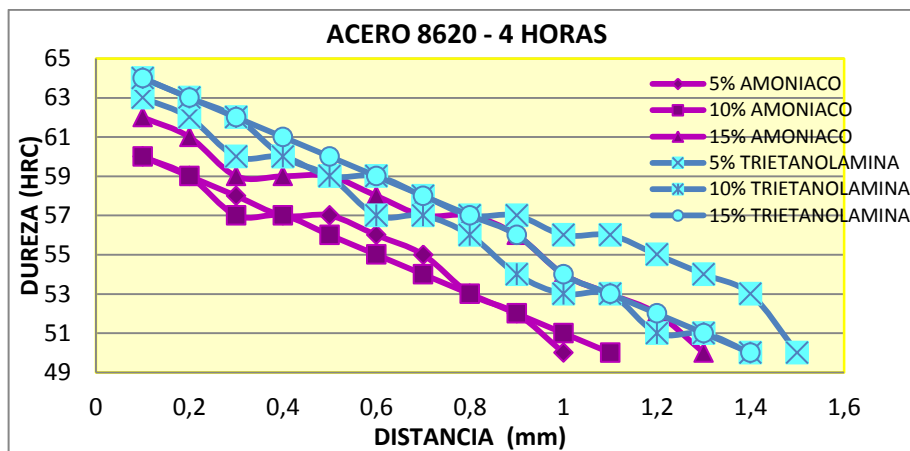
Figura 24. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 15% de trietanolamina a diferentes tiempos



Fuente: Autora.

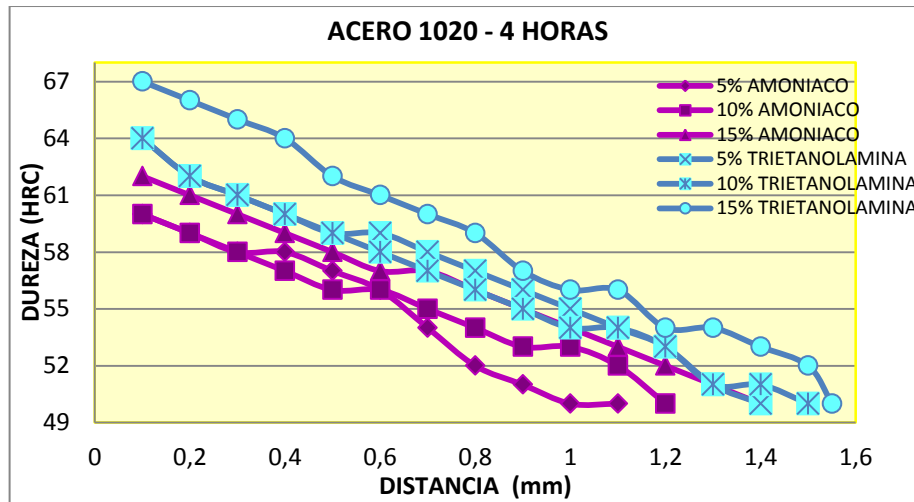
Al analizar los perfiles de microdureza mostrados en la Figura 22,23 y 24 se observa al igual que en con el amoniaco un desplazamiento de las curvas de dureza en forma ascendente y de izquierda a derecha, gracias a la influencia del tiempo en el proceso. Pero existen algunas excepciones como lo es el caso de la figura 24 del acero 8620 donde la dureza en la superficie fue constante en los diferentes tiempos del proceso. Se observa que con la trietanolamina al igual que con el amoniaco para la mayoría de tiempos existe una mayor profundidad de capa en el acero 1020. Al comparar la trietanolamina con el amoniaco se puede notar que con la trietanolamina se obtuvieron tanto durezas como profundidades de capa mayores que con el amoniaco. Pero hubo un caso particular como se puede observar en la figura 22 para el acero 1020 con un tiempo de 3 horas, donde se presentó una dureza bastante grande (67 HRc) y la dureza cayo rápidamente, teniendo una profundidad de capa bastante pequeña, al compararla con los demás casos. Esto se debe a que la templabilidad de los aceros o también pudo haber sido producto de algún error durante el proceso, debido a que no se controló el potencial de carbono y nitrógeno en la atmósfera del horno.

Figura 25. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 4 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



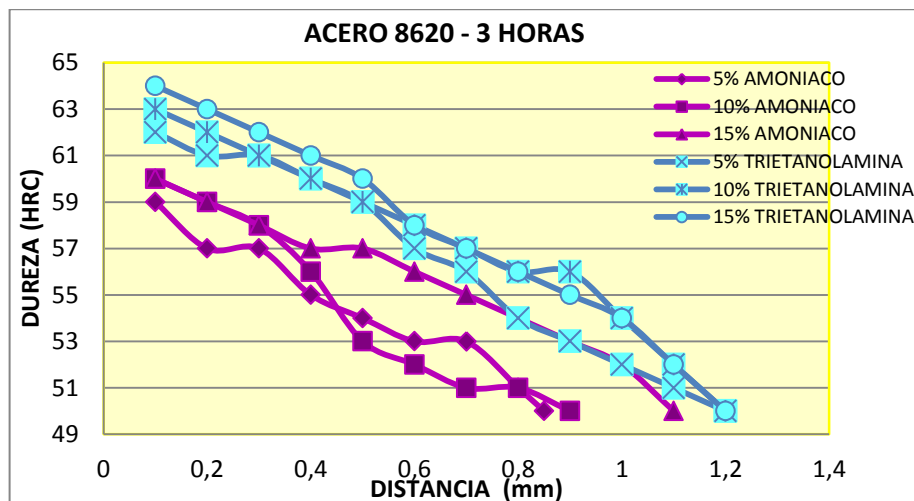
Fuente: Autora.

Figura 26. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 4 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



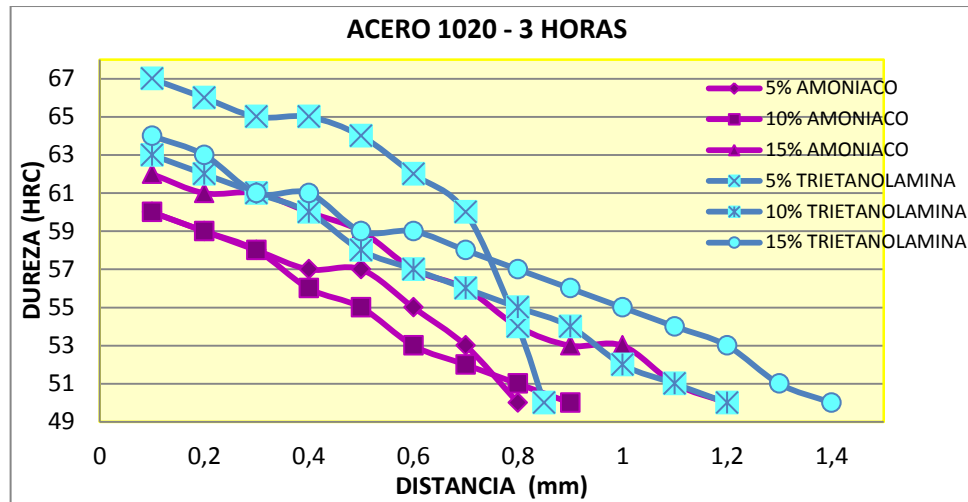
Fuente: Autora.

Figura 27. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 3 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



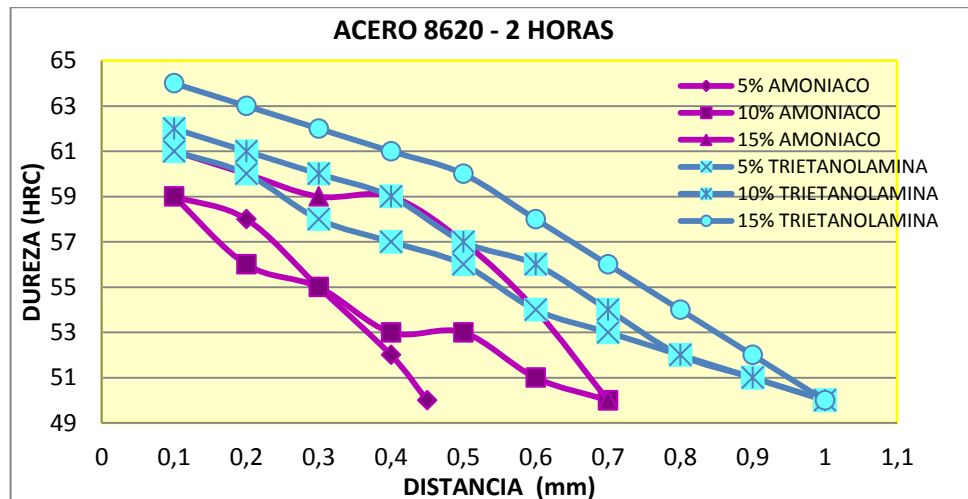
Fuente: Autora.

Figura 28. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 3 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



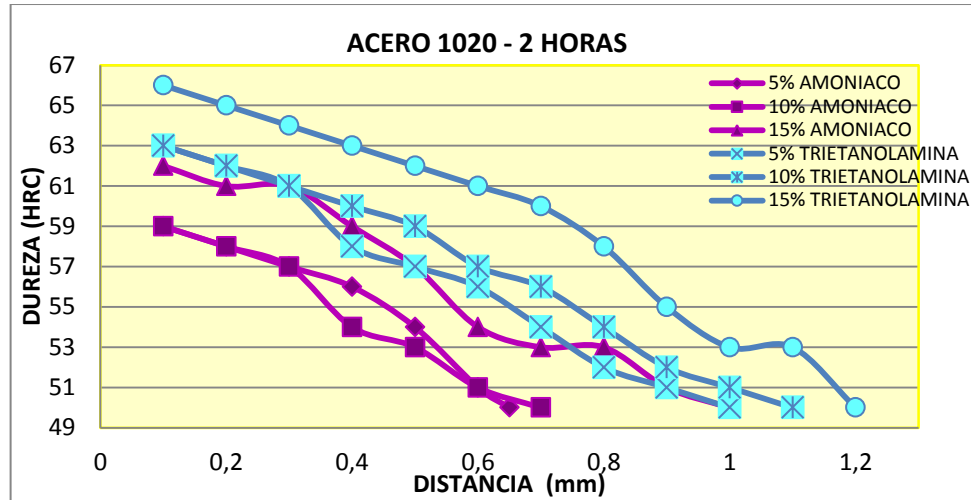
Fuente: Autora.

Figura 29. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 2 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



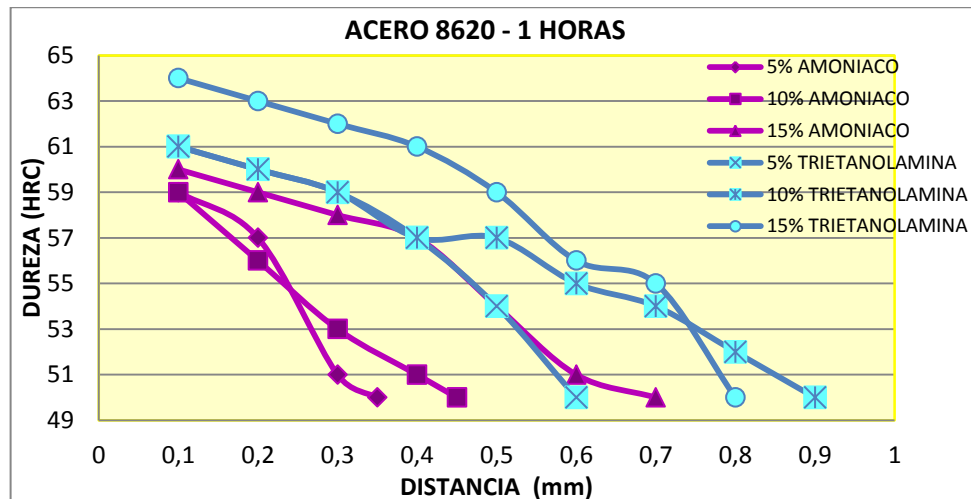
Fuente: Autora.

Figura 30. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 2 horas con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



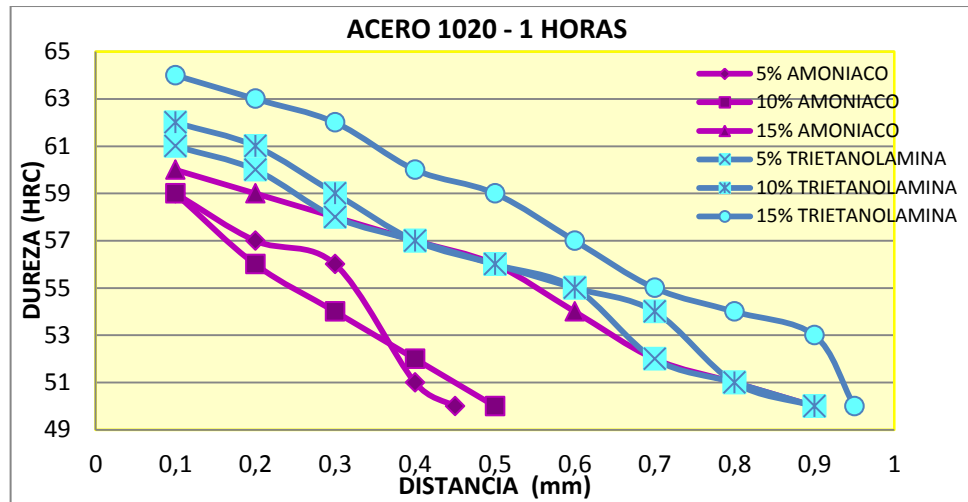
Fuente: Autora.

Figura 31. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 8620 carbonitrurado, por 1 hora con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



Fuente: Autora.

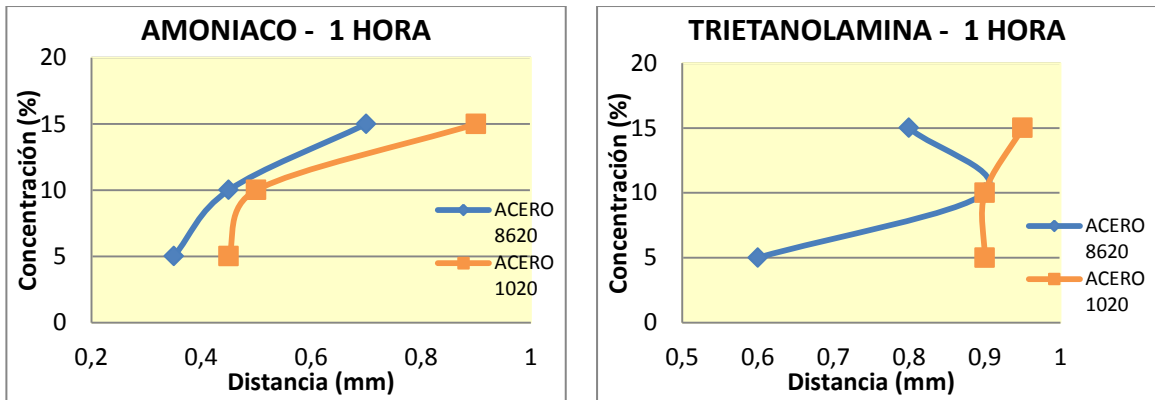
Figura 32. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para el acero AISI-SAE 1020 carbonitrurado, por 1 hora con diferentes aminas y concentraciones de las mismas.



Fuente: Autora.

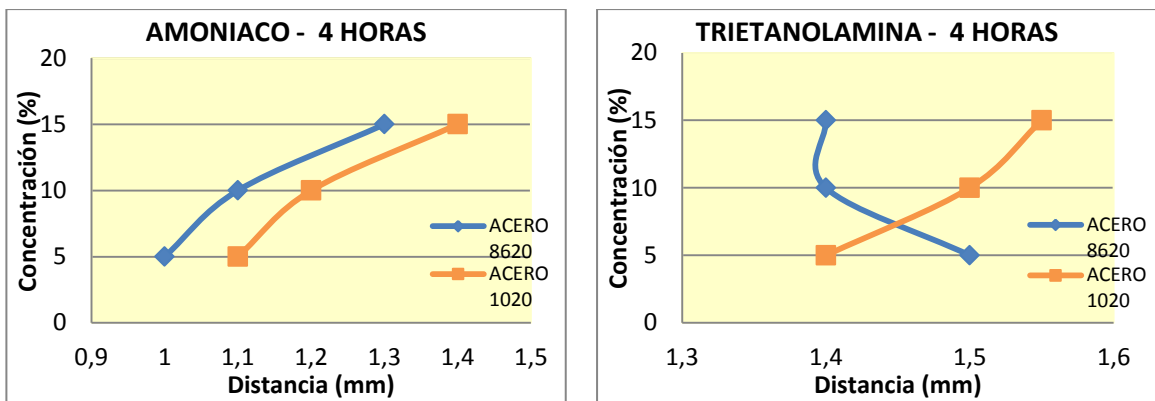
Al comparar las figuras 25 a la 32, se observó que el grado de penetración de la dureza y la dureza superficial es mayor en las muestras que se realizaron a mayores tiempos de tratamiento y a mayores concentraciones tanto en el amoníaco como en la trietanolamina, pero se presenta una excepción al observar el acero 8620 tratado durante 4 horas en la figura 25, donde se observa que aunque la dureza superficial aumenta a mayores concentraciones, la profundidad de capa es menor. Esto puede ser ocasionado porque al tener tiempos largos de proceso y alto porcentaje de trietanolamina en la atmósfera se originan barreras que impiden que se continúe con la difusión debido a los elementos de aleación presentes en el acero 8620 y a que la trietanolamina no solo aporta nitrógeno sino carbono a la atmósfera.

Figura 33. Gráficas de profundidad de capa efectiva (50 HRc) vs el porcentaje de amina en la mezcla, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 1 hora de proceso.



Fuente: Autora.

Figura 34. Gráficas de profundidad de capa efectiva (50 HRc) vs el porcentaje de amina en la mezcla, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 4 horas de proceso.

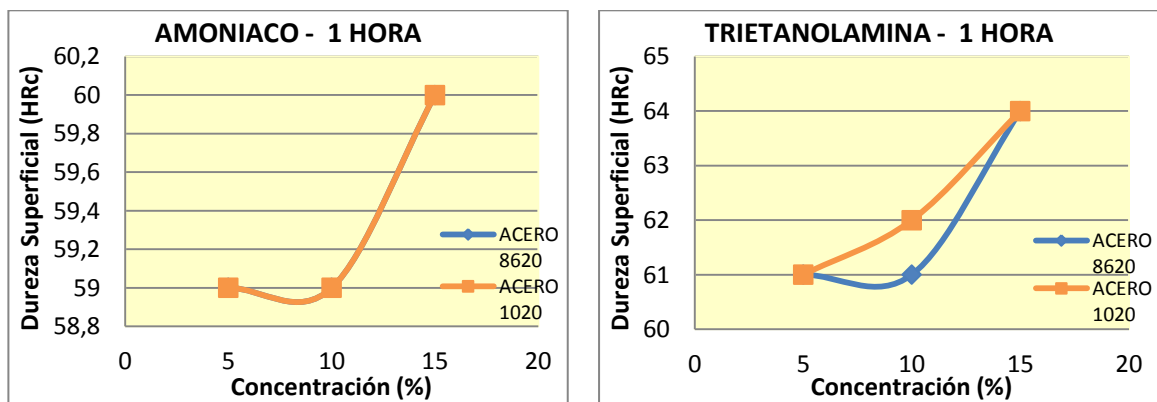


Fuente: Autora.

Al analizar las figuras 33 y 34 se pudo observar que para el acero 1020 se producen profundidades de capa mayores que en el acero 8620, se puede ver que

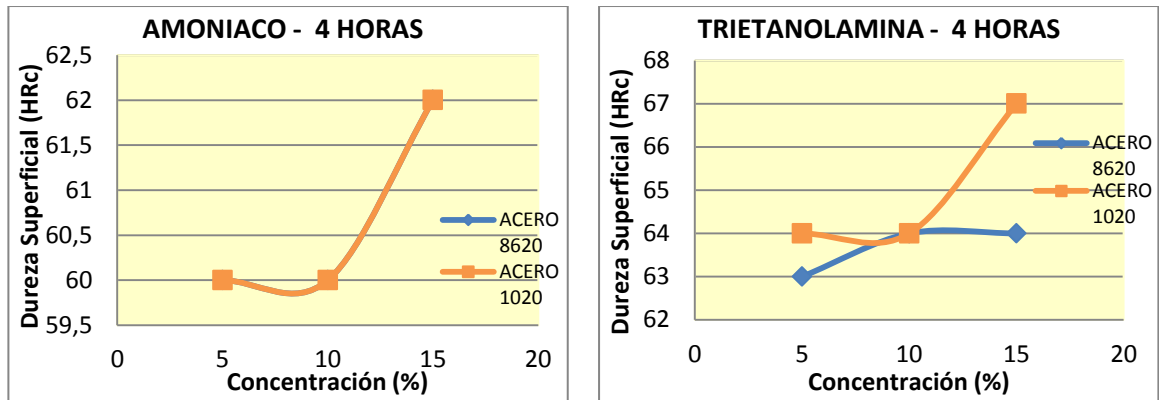
las curvas se encuentran desplazadas a la derecha en todos los casos tanto en el extremo inferior del proceso con 1 hora de tratamiento, como en el máximo con 4 horas de tratamiento. También se puede ver que a mayores concentraciones el espesor de capa va aumentando, pero como se puede observar en la figura 34, en el acero 8620 tratado durante 4 horas con trietanolamina, se produce una excepción ya que en este caso a medida que aumenta la concentración la profundidad de capa efectiva disminuye, debiéndose esto quizá a que la trietanolamina al producir carbono y nitrógeno atómico en la mezcla, producirá más cantidad de carburos los cuales pueden en ese tiempo difundirse tanto en la superficie que producen una barrera que no permita que la difusión continúe. Al introducir en la atmósfera más porcentaje de trietanolamina mayor será el porcentaje de nitrógeno y carbono que tratara de difundirse en el acero. También pudo deberse a que el acero 8620 posee elementos aleantes formadores de nitruros.

Figura 35. Gráficas de porcentaje de amina en la mezcla vs la dureza superficial (HRc), para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 1 hora de proceso.



Fuente: Autora.

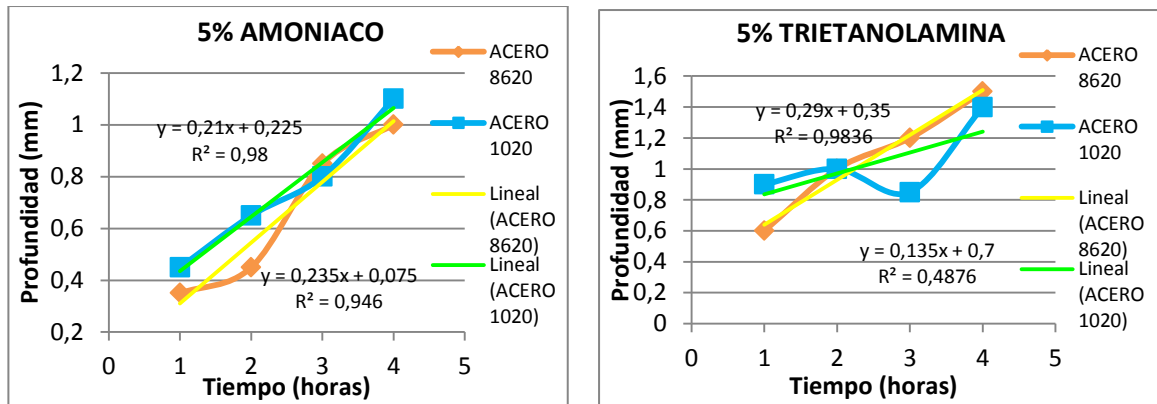
Figura 36. Perfil de microdureza obtenido en función del porcentaje de amina en la mezcla y la dureza superficial (HRc), para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados con 4 horas de proceso.



Fuente: Autora.

Al observar las gráficas 35 y 36 se puede notar que para el amoniaco tanto en el extremo mínimo del proceso de una hora, como en el máximo de 4 horas al aumentar la concentración de la amina aumenta su dureza superficial y esta es mayor para un proceso de 4 horas, sin embargo es importante observar que tanto en la gráfica 35 como en la 36 para el amoniaco las gráficas se superponen, mostrando que para ambos aceros el comportamiento de la dureza superficial es el mismo; a diferencia de la trietanolamina en la que se puede observar claramente que en los diferentes tiempos del proceso se producen mayores durezas superficiales en el acero 1020, notándose también que para el proceso de 4 horas aumenta notablemente la dureza superficial con respecto al de 1 hora de proceso.

Figura 37. Perfil de microdureza obtenido en función de la profundidad de capa carbonitrurada para los aceros AISI- SAE 1020 y 8620 a diferentes tiempos de proceso, con un 5 % amina en la mezcla.



Fuente: Autora.

En la figura 37 se realizó una comparación de los valores de profundidad de capa carbonitrurada para los aceros AISI-SAE 1020 y 8620, en los diferentes tiempos de tratamientos y con las 2 atmósferas utilizadas. La tendencia de las curvas muestra que a medida que se aumenta el tiempo, aumenta la profundidad de la capa carbonitrurada. Se observa que la mayor profundidad de capa para esta concentración es de 1.5 mm y se produce en el acero 8620, con 4 horas de proceso y utilizando trietanolamina.

Este procedimiento se realiza con el fin de graficar los datos como una recta y obtener las ecuaciones de profundidad de carbonitruración y cementación en función del tiempo. Estas mismas graficas se realizaron para los diferentes porcentajes de amina en la mezcla; obteniéndose las diferentes ecuaciones para la estandarización del proceso, con el cual se pueden determinar los valores de profundidad de capa que se obtienen en un determinado tiempo, al someter las piezas a las condiciones del horno de carbonitruración gaseosa en la empresa IMATT SAS.

Tabla 7. Profundidad de capa carbonitrurada en función del tiempo

PRUEBA	ACERO 8620	ACERO 1020
5% AMONIACO	$X = 0.235t + 0.075$	$X = 0.21t + 0.225$
5% TRIETANOLAMINA	$X = 0.29t + 0.35$	$X = 0.135t + 0.7$
10% AMONIACO	$X = 0.215t + 0.25$	$X = 0.23t + 0.25$
10% TRIETANOLAMINA	$X = 0.17t + 0.7$	$X = 0.19t + 0.7$
15% AMONIACO	$X = 0.22t + 0.4$	$X = 0.17t + 0.7$
15% TRIETANOLAMINA	$X = 0.2t + 0.6$	$X = 0.2t + 0.775$
CEMENTACIÓN	$X = 0.145t + 0.7$	$X = 0.17t + 0.45$

Fuente: Autora.

Dónde:

X = Espesor de capa [mm].

T = tiempo [horas].

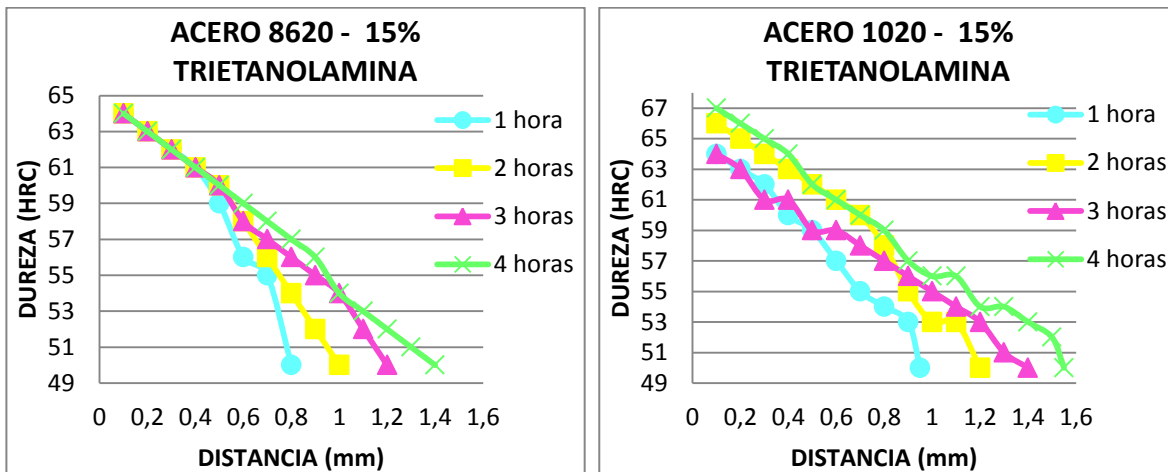
4.2.3. Difracción de Rayos X

Esta prueba se realizó con el fin de analizar la capa carbonitrurada y comprobar la presencia de nitruros en la misma, sin embargo, no se obtuvieron resultados significativos en los cuales se pudiera evidenciar la presencia de nitruros.

4.3. ESTUDIO COMPARATIVO

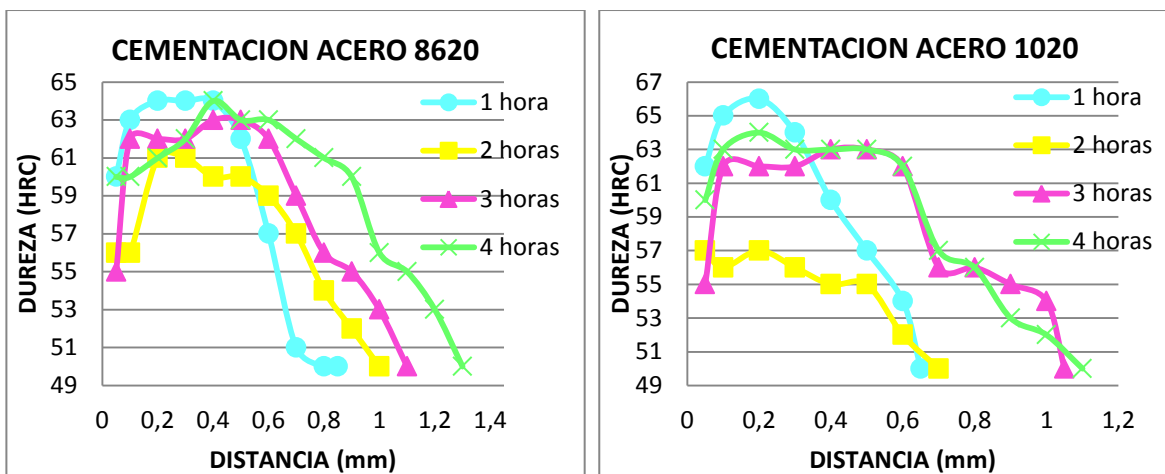
Este estudio comparativo se realizó entre el proceso de carbonitruración y el de cementación gaseosa mediante perfiles de microdureza. Para esta comparación se escogió el porcentaje de amina y tiempo de proceso que presentó mayores valores tanto de dureza como de profundidad de capa en el proceso de carbonitruración y se comparó con el proceso de cementación gaseosa previamente investigado.

Figura 38. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 carbonitrurados, con 15% de trietanolamina a diferentes tiempos



Fuente: Autora.

Figura 39. Perfil de microdureza obtenido en función de la distancia a la superficie y su conversión a HRC, para los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 cementados con etanol



Fuente: Autora.

Al comparar las figuras 38 y 39, se pudo observar que para la carbonitruración no existen cambios tan drásticos en la dureza como en la cementación, se producen mayores durezas superficiales a menores tiempos y capas más profundas mediante el proceso de carbonitruración, lo que va a significar una disminución de costos para la empresa IMATT SAS, debido a que el proceso de carbonitruración se realiza a temperaturas más bajas y si el proceso se realiza con trietanolamina está es de fácil adquisición y bastante económica.

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

$$\text{Costo ciclo} = \text{Costo consumo de reactivos} + \text{Costo funcionamiento del horno}$$

- Costo consumo de reactivos = $\sum_i^n \left(\frac{L}{hora} * \frac{\$}{L} \right)$
- Costo funcionamiento del horno $\frac{\$ \text{ horno}}{hora} + \frac{\$ \text{ operario}}{hora}$

El costo energético (\$/h) tanto del proceso de carbonitruración como el de cementación es de 40348.56 \$/h.

El costo total del consumo de reactivos para la cementación gaseosa, realizada con etanol es de 8113.3835 \$/h.

Los costos del consumo de reactivos para la carbonitruración gaseosa en las diferentes aminas, se escogieron los porcentajes más altos de reactivos gastados y estos son:

Tabla 8. Costo total del consumo de reactivos para carbonitruración gaseosa con diferentes aminas

PRUEBA	Costo etanol gastado (\$/h)	Costo amoniaco gastado (\$/h)	Costo trietanolamina gastada (\$/h)	Costo total consumo (\$/h)
15% AMONIACO	6696.37	90000.00	-----	96696.37
15% TRIETANO LAMINA	6896.37	-----	5753.9683	12650.33825

Fuente: Autora.

Al analizar el consumo energético por hora de los dos procesos, el cual es el mismo para ambos; los costos de funcionamiento del horno y los costos de los reactivos se podría decir que el proceso de cementación sería mucho más económico que el de carbonitruración y al comparar el proceso de carbonitruración se puede decir que el proceso resulta más económico al utilizar como amina, la trietanolamina. Pero este análisis puede ser erróneo o despreciable ya que no tienen en cuenta la relación de la profundidad de la capa Vs costos, ni la temperatura del proceso.

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

$$V_p = \frac{V_{Cr}(t)}{h}$$

Dónde:

$V_{Cr/h}$ = Costos de los reactivos del proceso por hora obtenidos de la tabla 8 para carbonitruración gaseosa.

t = Los valores de t son obtenidos de la tabla 7.

Al hacer la comparación de los costos del proceso de cementación gaseosa con el proceso de carbonitruración con las diferentes aminas, se puede observar que para obtener un determinado espesor de capa los tiempos disminuyen en el proceso de carbonitruración con respecto al de cementación, utilizando cualquiera de las dos aminas ya que el tiempo de la carbonitruración con amoniaco es 1.23 veces menor al de cementación y el tiempo de la carbonitruración con trietanolamina es 1,7 veces menor al de cementación gaseosa.

Al analizar los costos tanto de cementación como de carbonitruración gaseosa, se observa que la carbonitruración resulta más económica por que disminuye tiempos y temperaturas de proceso, produciendo espesores de capa mayores que los producidos por cementación gaseosa. También al comparar las aminas utilizadas

en el proceso de carbonitruración es importante decir que con la amina que reduce muchos más costos para la empresa IMATT SAS es la trietanolamina, debido a que esta es mucho más económica y de fácil adquisición en el mercado local que el amoníaco y producen espesores de capa mayores o iguales a los obtenidos con el amoníaco.

5. CONCLUSIONES

De este estudio se concluye que:

- Es de gran importancia el tiempo y la selección del acero para la carbonitruración, como se observó en los perfiles de microdureza, al aumentar el tiempo, el grado de profundidad de la dureza también aumenta, tanto en el acero AISI-SAE 1020 como en el AISI-SAE 8620, lo cual permite que estos tengan mayor resistencia al desgaste.
- La trietanolamina es la amina más efectiva, en el tratamiento de carbonitruración, ya que produce espesores de capa y durezas superficiales mayores a las obtenidas con el amoníaco en menores tiempos de proceso.
- A medida que se aumenta el porcentaje de amina en la mezcla, la dureza superficial es mayor para el amoníaco.
- El proceso de carbonitruración propuesto al compararlo con el proceso de cementación utilizado actualmente por la empresa IMATT SAS, evidencia una gran disminución de costos, gracias a que este proceso se realiza a menores tiempos que la cementación y presenta mayores profundidades de capa. Aparte de esto la trietanolamina es un producto de fácil adquisición en el mercado, económico y poco tóxico.

- El mejor tratamiento de carbonitruración para endurecer superficialmente los aceros AISI-SAE 8620 y 1020 fue realizada a 870°C, durante 4 horas de carbonitruración y 15% de trietanolamina, donde se obtuvo una dureza máxima de 67 HRc para el acero 1020 y de 64 HRc para el acero 8620 y profundidades de capa de 1.55 mm y 1.4 mm respectivamente; lo que confiere muy buenas propiedades superficiales a estos aceros, minimizando el desgaste de los mismos.

6. RECOMENDACIONES

- Evaluar mediante otras técnicas de análisis composicionales que permitan cualificar y cuantificar el porcentaje de carbono y nitrógeno en la capa carbonitrurada, así como las fases formadas de nitruros y carbonitruros.
- Llevar a cabo tratamientos a diferentes temperaturas para observar el comportamiento de la dureza y profundidad de capa, con el fin de encontrar la temperatura efectiva para el proceso de carbonitruración.
- Adecuar un sistema de control en el interior del horno que minimice la presencia e gases contaminantes en el proceso.
- Implementar un control para verificar el potencial de carbono y nitrógeno que se encuentra en la atmosfera, durante todo el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] TRATAMIENTOS TÉRMICOS, Curso de Materiales, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Edición 2008.

[2] PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL. Ciencia de los Materiales. Departamento de Tecnología. Universidad Nacional de Lujan. Ingeniería Industrial. 2012.

[3] BLOG DE TECNOLOGÍA. Bonitatem et Disciplinam et Scientiam Doce Me. [En línea]. Disponible en <<http://tecnotic.wordpress.com/2009/11/08/tratamientos-termicos-y-termoquimicos/>>.

[4] CARBONITRURACIÓN. Revista CENIM año 1975. Vol. 11. N.5. Pág. 248.

[5] SUDOSILO S.A. Tratamientos térmicos, Ingeniería de Superficies. [En línea]. Disponible en <http://www.sudosilo.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=101&Itemid=228>.

[6] TRATAMIENTOS TÉRMICOS. [En línea]. Disponible en <www.tratar.com.co/descargas/tratamientos.pdf>.

[7] METALOGRAFÍA. Universidad Tecnológica de Pereira. [En línea]. Disponible en < <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/28/5-5-diagrama-hierro-carbono-puntos-criticos-y-ejemplos-de-regla-de-la-palanca-2-2/#diagrama-hierro-carbono>>.

[8] UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS. "SHEILA CÓRDOVA VALENCIA". Proceso de nitruración gaseosa en los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045. E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica. Lima-Perú 2003.

[9] CATÁLOGO TÉCNICO. Cia. General de Aceros S.A. Disponible en <<http://www.slideshare.net/nano0018/ficha-1045-10201>>.

[10] Catálogo técnico. Cia. General de Aceros S.A.

[11] FICHA TÉCNICA TRIETANOLAMINA. Disponible en <http://geiic.com/index.php?option=com_fichas&Itemid=83&tasko=viewo&task=view2&id=98>.

[12] IDESA petroquímica, TRIETANOLAMINA. Disponible en <<http://www.idesapetroquimica.com/es/content/trietanolamina>>.

[13] AMONIACO (NH₃). Disponible en <www.profeblog.es/jose/wo-content/.../12/Alvaro_Castillo_NH3.pdf>.

[14] AMONIACO. Disponible en <www.slideshare.net/StepManiaco/grupos-funcionales-expo>.

[15] Alvaro Castro, Germán melendez. Universidad Nacional de Colombia (UNC). Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas INEA. Caracterización de la superficie Carbonitrurada del acero 8620.

[16] J. M, Belló Berbegal y B. J. Fernández González. Sección de Tratamientos Térmicos del CENIM. Control y regulación de las atmósferas para carbonitruración.

[17] Carlos Bohórquez A. y Álvaro Castro P. UNC. [2005]. Universidad Nacional de Colombia. Nitrocarburation Austenítica del Acero AISI-SAE 1020 con alcoholes y trietanolamina.

[18] Bohórquez Ávila C. A. Pontificia Universidad Católica del Perú. Nitrocarburation Austenítica de los aceros AISI SAE 1020 y 8620 mediante el empleo de alcoholes y nitrurantes líquidos.

[19] Comparison of carbonitriding and nitrocarburing on size and shape distortion of plain carbon SAE 1010 steel. V. Campagna*1, R. Bowers1, D. O. Northwood1,X.C.Sun2 and P. Bauerle2.

[20] VALENCIA, G. Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales.

[21] METALS HANDBOOK. Heat Treating. Ninth edition. ASM International, vol. 4.Ohio.

[22] ASTM E415 – 2008. Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel.

[23] ASTM E3 – 2001. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

[24] ASTM E 384-05a (2005). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

[25] ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO. M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. CUAUTITLÁN IZCALLI 2007. Departamento de ingeniería. Laboratorio de Tecnología de Materiales.

[26] Lajtin Yu (1987), “Tratamiento Químico Térmico de los Metales”, Editorial Mir., Moscú.

[27] Askeland Donald, (1985), “La Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Ed. Iberoamericana, México.

[28] Artículo técnico. Aplicación de los tratamientos térmicos en procesos de fabricación. José Domingo Guerra. Jefe de Producción TRATAR S.A.

[29] J. M, Belló Berbegal y B. J. Fernández González. Sección de Tratamientos Térmicos del CENIM. Carbonitruración. Vol. 11. N 5. Año 1975.

[30] ASTM E407-2007. ASTM E407 - 07e1 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

[31] ANSI/AGMA 6004 – F88. ANSI AGMA 6004-F88-1988 Gear Power Rating for Cylindrical Grinding Mills Kilns Coolers and Dryers.

[32] INFLUENCIA DEL NITROGENO COMO COMPONENTE DE LA ATMOSFERA EN UN PROCESO DE CEMENTACION DE ACEROS SAE 8620 Y SAE 1020 EN UN HORNO DE GOTEIO DE ALCOHOL. Universidad Industrial de Santander. 2010. Pablo E. Saurith. Diana C. Blanco.

BIBLIOGRAFÍA

Alvaro Castro, Germán melendez. Universidad Nacional de Colombia (UNC). Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas INEA. Caracterización de la superficie Carbonitrurada del acero 8620.

AMONIACO. Disponible en <www.slideshare.net/StepManiaco/grupos-funcionales-expo>.

AMONIACO (NH₃). Disponible en <www.profeblog.es/jose/wo-content/.../12/Alvaro_Castillo_NH3.pdf>.

ANSI/AGMA 6004 – F88. ANSI AGMA 6004-F88-1988 Gear Power Rating for Cylindrical Grinding Mills Kilns Coolers and Dryers.

Artículo técnico. Aplicación de los tratamientos térmicos en procesos de fabricación. José Domingo Guerra. Jefe de Producción TRATAR S.A.

Askeland Donald, (1985), “La Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Ed. Iberoamericana, México.

ASTM E3 – 2001. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

ASTM E 384-05a (2005). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

ASTM E407-2007. ASTM E407 - 07e1 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

ASTM E415 – 2008. Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel.

BLOG DE TECNOLOGÍA. Bonitatem et Disciplinam et Scientiam Doce Me. [En línea]. Disponible en <<http://tecnotic.wordpress.com/2009/11/08/tratamientos-termicos-y-termoquimicos/>>.

Bohórquez Ávila C. A. Pontificia Universidad Católica del Perú. Nitrocarburation Austenítica de los aceros AISI SAE 1020 y 8620 mediante el empleo de alcoholes y nitrurantes líquidos.

CARBONITRURACIÓN. Revista CENIM año 1975. Vol. 11. N.5. Pág. 248.

Carlos Bohórquez A. y Álvaro Castro P. UNC. [2005]. Universidad Nacional de Colombia. Nitrocarburation Austenítica del Acero AISI-SAE 1020 con alcoholes y trietanolamina.

Catálogo técnico. Cia. General de Aceros S.A.

CATÁLOGO TÉCNICO. Cia. General de Aceros S.A. Disponible en <http://www.slideshare.net/nano0018/ficha-1045-10201>>.

Comparison of carbonitriding and nitrocarburising on size and shape distortion of plain carbon SAE 1010 steel. V. Campagna*1, R. Bowers1, D. O. Northwood1, X.C. Sun2 and P. Bauerle2.

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO. M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. CUAUTITLÁN IZCALLI 2007. Departamento de ingeniería. Laboratorio de Tecnología de Materiales.

FICHA TÉCNICA TRIETANOLAMINA. Disponible en http://geiic.com/index.php?option=com_fichas&Itemid=83&tasko=viewo&task=view2&id=98>.

IDESA petroquímica, TRIETANOLAMINA. Disponible en <http://www.idesapetroquimica.com/es/content/trietanolamina>>.

INFLUENCIA DEL NITROGENO COMO COMPONENTE DE LA ATMOSFERA EN UN PROCESO DE CEMENTACION DE ACEROS SAE 8620 Y SAE 1020 EN UN HORNO DE GOTEADO DE ALCOHOL. Universidad Industrial de Santander. 2010. Pablo E. Saurith. Diana C. Blanco.

J. M, Belló Berbegal y B. J. Fernández González. Sección de Tratamientos Térmicos del CENIM. Carbonitruración. Vol. 11. N 5. Año 1975.

J. M, Belló Berbegal y B. J. Fernández González. Sección de Tratamientos Térmicos del CENIM. Control y regulación de las atmósferas para carbonitruración.

Lajtin Yu (1987), "Tratamiento Químico Térmico de los Metales", Editorial Mir., Moscú.

METALOGRAFÍA. Universidad Tecnológica de Pereira. [En línea]. Disponible en <<http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/28/5-5-diagrama-hierro-carbono-puntos-criticos-y-ejemplos-de-regla-de-la-palanca-2-2/#diagrama-hierro-carbono>>.

METALS HANDBOOK. Heat Treating. Ninth edition. ASM International, vol. 4.Ohio.

PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL. Ciencia de los Materiales. Departamento de Tecnología. Universidad Nacional de Lujan. Ingeniería Industrial. 2012.

SUDOSILO S.A. Tratamientos térmicos, Ingeniería de Superficies. [En línea]. Disponible en

<http://www.sudosilo.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=101&Itemid=228>.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS, Curso de Materiales, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Edición 2008.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS. [En línea]. Disponible en <www.tratar.com.co/descargas/tratamientos.pdf>.

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS. "SHEILA CÓRDOVA VALENCIA". Proceso de nitruración gaseosa en los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045. E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica. Lima-Perú 2003.

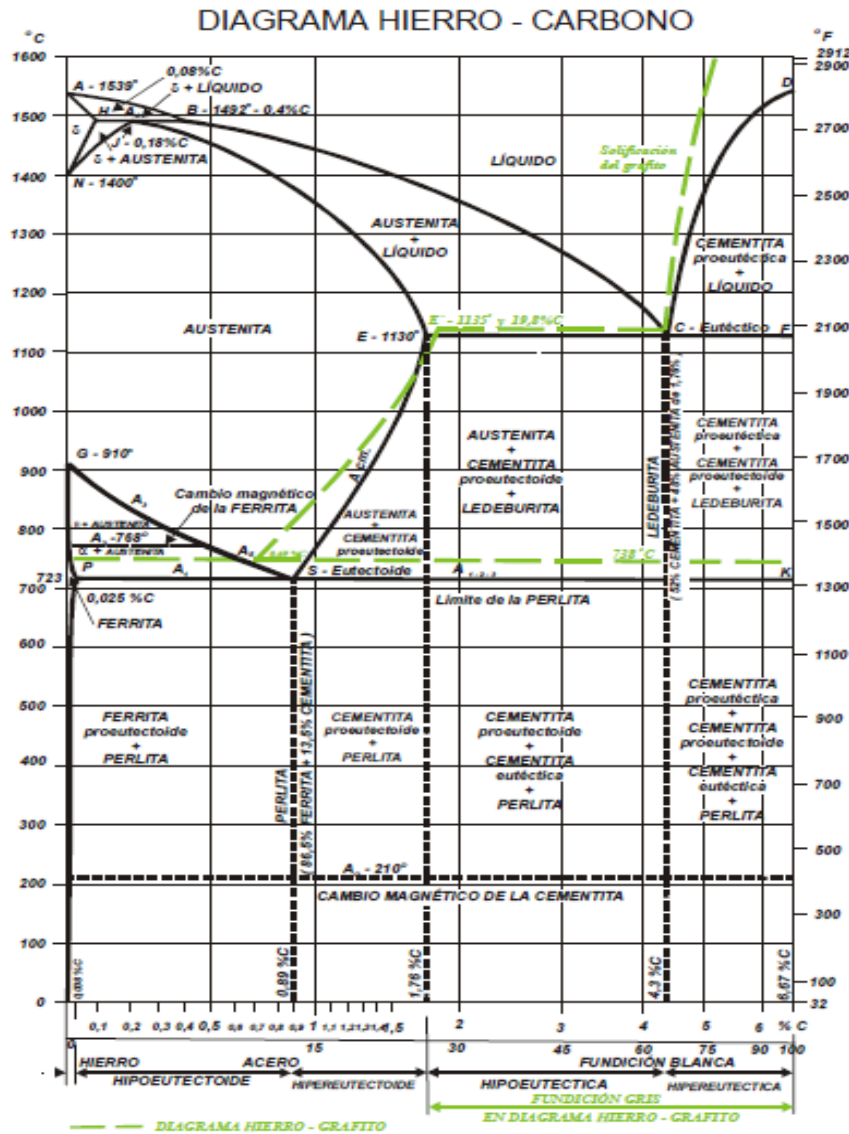
VALENCIA, G. Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales.

ANEXOS

ANEXO A. DIAGRAMAS DE FASES INVOLUCRADAS EN LA CARBONITRURACIÓN.

Diagrama hierro carbono (Fe-C).

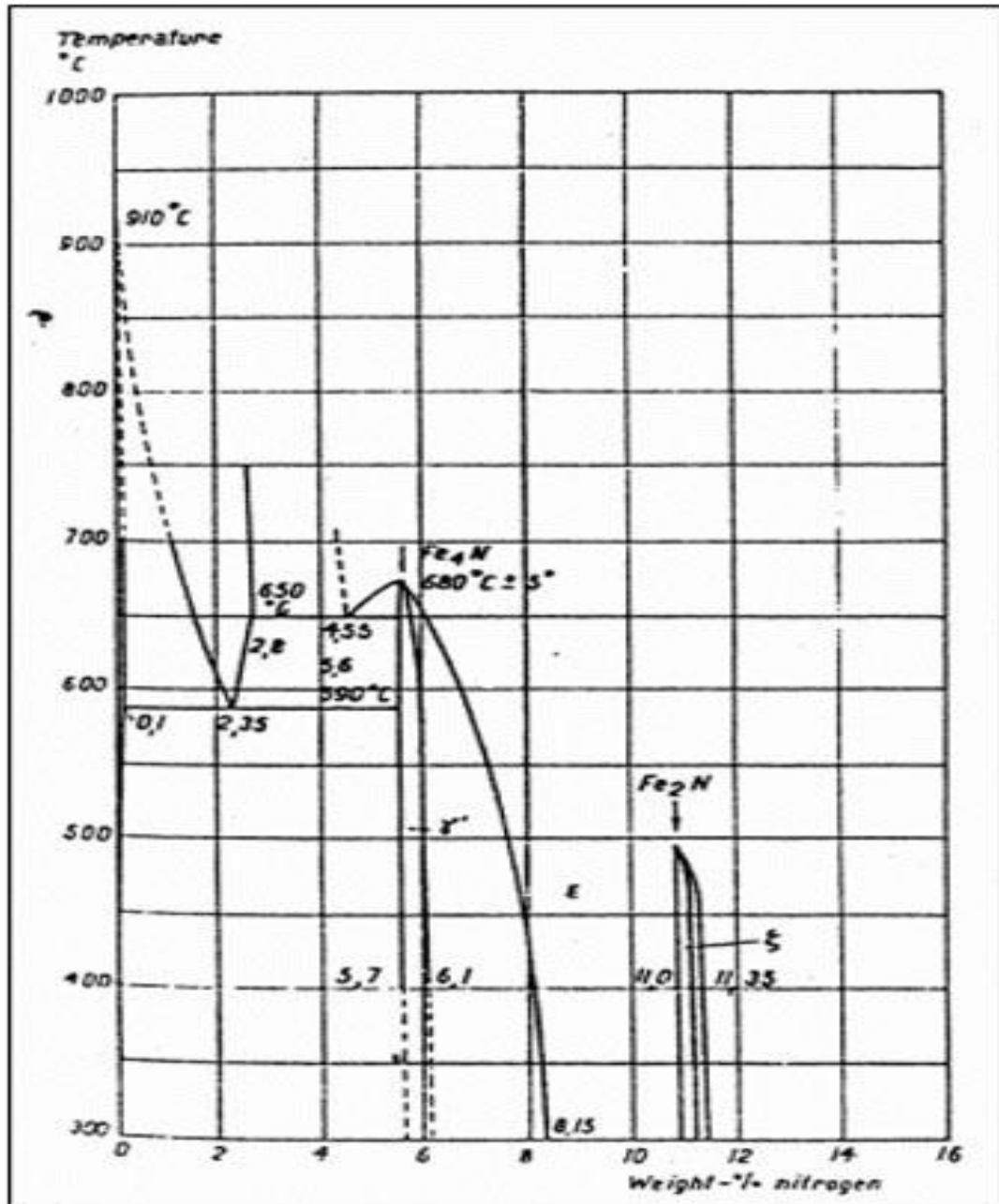
Figura 1. Diagrama Fe - Fe₃C.



Fuente: Ref. [7].

Diagrama de fases de Fe - N.

Figura 2. Diagrama de equilibrio para el Fe-N.



Fuente: Ref. [26]

ANEXO B. MECANISMO DE FORMACIÓN DE CAPA CARBONITRURADA.

La Teoría de la Difusión.

La difusión se entiende como el movimiento de átomos. A nivel atómico, la difusión consiste en la emigración de los átomos de un sitio de la red a otro sitio. En los materiales sólidos, los átomos están en continuo movimiento, cambian rápidamente de posición. La movilidad atómica exige dos condiciones:

Un lugar vecino vacío.

El átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento.

Esta energía es de naturaleza vibratoria. A una temperatura determinada, alguna pequeña fracción del número total de átomos es capaz de difundir debido a la magnitud de su energía vibratoria. Esta fracción aumenta al ascender la temperatura. [8]

Difusión en los metales

Por difusión se entiende el desplazamiento de los átomos en el cuerpo cristalino a distancias que superan las medias interatómicas de la sustancia dada. En la industria los más usados son los procesos de tratamiento termoquímico basados en la difusión en el hierro de los no metales C, N, B. Estos elementos cuyo radio atómico es pequeño, forman con el hierro soluciones sólidas intersticiales.

La temperatura ejerce gran influencia en los coeficientes y en las velocidades de difusión.

Para llevar a cabo un fenómeno elemental de difusión el átomo debe vencer una barrera de energía.

La probabilidad de que el átomo de saltos de una posición de equilibrio a otra se determina por la frecuencia con la cual surgen las fluctuaciones que superan la energía de activación. El tiempo relativo durante el cual el átomo tiene la energía necesaria para vencer la barrera es proporcional a $\exp(-Q/RT)$. [26].

La ley de influencia de la temperatura sobre el coeficiente de difusión primero fue establecida experimentalmente (Ley de Arrhenius) y después argumentada teóricamente sobre la base de la teoría atómica de la difusión y se describe:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

Dónde:

D = es la difusibilidad o coeficiente de difusión.

D_0 = factor de frecuencia independiente de la temperatura (m^2/s)

Q = energía de activación (J/mol)

R = Cte. de gases $8,31 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{K}$, $1987 \text{ cal/mol} \cdot ^\circ\text{k}$ ó $8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/átomo}$.

T = temperatura absoluta ($^\circ\text{K}$).

d.- La Segunda Ley de Fick

La segunda ley de Fick es una ecuación en derivadas parciales, para la solución unívoca de la cual es indispensable prefijar las condiciones iniciales y de frontera a los que debe satisfacer la concentración del elemento difundido.

La mayoría de las situaciones prácticas de difusión son en estado no estacionario. En una zona determinada del sólido, el flujo de difusión y el gradiente de difusión varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden. [8].

Ecuación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

Si el coeficiente de difusión es independiente de la composición, lo cual deberá comprobarse para cada situación particular de difusión, la Ecuación se simplifica:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

En la práctica una solución importante es la de un sólido semiinfinito cuya concentración superficial se mantiene constante. Aquí la concentración de las especies difusoras C varía con la distancia x, tiempo t y la difusividad D. La ecuación resultante es:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{F er} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Dónde:

C_s = Es una constante de concentración de los átomos que se difunden en la superficie del material.

C_0 = Es la concentración uniforme inicial de los átomos en el material.

C_x = Es la concentración del átomo que se difunde a la posición X debajo de la superficie después de un tiempo t.

Fer = Es una función de error y puede determinarse a partir de la tabla 1, o de la figura 3.

En la cual la función Fer (z) es la integral normalizada de probabilidad o función gaussiana de error.

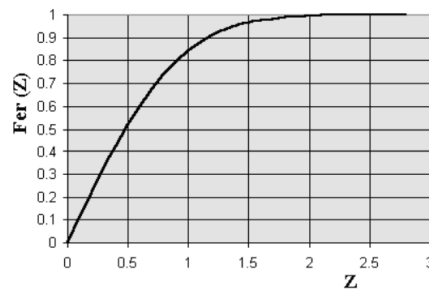
De esta manera, Se puede calcular la concentración de muestras cercanas a la superficie del material como una función del tiempo y la distancia, siempre y cuando el coeficiente de difusión D permanezca constante y las concentraciones de átomos difundidos en la superficie C_S y dentro del material C_0 permanezcan sin cambios. [25]

Tabla 1. Función de error.

$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)	$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)	$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)	$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	Fer (z)
0	0	0.40	0.4284	0.85	0.7707	1.6	0.9763
0.023	0.0282	0.45	0.4755	0.90	0.7970	1.7	0.9838
0.05	0.0564	0.50	0.55205	0.95	0.8209	1.8	0.9891
0.10	0.1125	0.55	0.5633	1.0	0.8427	1.9	0.9928
0.15	0.1680	0.60	0.6039	1.1	0.8802	2.0	0.9953
0.20	0.2227	0.65	0.6420	1.2	0.9103	2.2	0.9981
0.25	0.2763	0.70	0.6778	1.3	0.9340	2.4	0.9993
0.30	0.3286	0.75	0.7112	1.4	0.9523	2.6	0.9998
0.35	0.3794	0.80	0.7421	1.5	0.9661	2.8	0.9999

Fuente: Ref. [25]

Figura 3. Representación gráfica de la función de error $Fer(z)$.



Fuente: Ref. [25]

ANEXO C. REACTIVOS

Para producir una buena Carbonitruración es indispensable crear una atmósfera apropiada, la cual es formada por un gas endotérmico que contiene Trietanolamina o amoniaco y etanol los que se descomponen y proporcionan Nitrógeno y Carbono a la superficie del material.

TRIETANOLAMINA

Esta sustancia orgánica fue utilizada en este estudio para producir la atmósfera deseada proporcionando el Nitrógeno requerido para el proceso de Carbonitruración, esta se descompone por encima de 500 °C dando como resultado 5.5 %N, 33.5 %CO 22% CH₄ y 39% H₂. Es un compuesto químico orgánico derivado del amoniaco el cual es una amina terciaria, su fórmula química es C₆H₁₅NO₃. Se presenta como un líquido higroscópico viscoso (aunque cuando es impuro puede presentarse como un sólido, dependiendo de la temperatura), incoloro o de color amarillo pálido, y volátil, totalmente soluble en agua y miscible con la mayoría de los solventes orgánicos oxigenados. Posee un olor amoniacal suave. [11].

Se utiliza como aditivo antiestático en la molienda de cemento y en la construcción como aditivo para el concreto ya que reduce el tiempo de secado e incrementa la resistencia al agrietamiento por baja temperatura. También se utiliza en la fabricación de intermediarios cosméticos, en aditivos para lubricantes, farmacéuticos, líquidos automotrices, pigmentos y colorante, poliuretanos, purificación de gas, tratamiento de agua, aditivo para textiles, herbicidas e insecticidas, gel para cabello, como agente surfactante(en gran variedad de jabones, detergentes y shampoos), es un ajustador de pH, entre otros. [12].

AMONIACO

Este reactivo fue usado en este estudio en el proceso de Carbonitruración para crear una de las atmósferas gaseosas deseadas para la generación de Nitrógeno requerido en la capa superficial debido a que este difunde el nitrógeno atómico al interior del acero. El amoníaco es un compuesto químico cuya molécula consiste en un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H) de acuerdo con la fórmula NH_3 .

El amoníaco, a temperatura ambiente, es un gas incoloro de olor muy penetrante y nauseabundo. Se produce naturalmente por descomposición de la materia orgánica y también se fabrica industrialmente. Es fácilmente soluble y se evapora rápidamente. Generalmente se vende en forma líquida. [13].

ETANOL

Este alcohol se utiliza como gas portador para producir la atmósfera deseada en el proceso de Carbonitruración, el cual genera en gran parte el carbono requerido para obtener la capa superficial deseada y este genera una atmósfera adecuada al encontrarse con una pureza del 95% y a temperaturas elevadas entre 850 y 950 °C. Este alcohol se presenta en condiciones normales de presión y temperatura como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78 °C. Mezclable con agua en cualquier proporción; a la concentración de 95% en peso se forma una mezcla azeotrópica. [14].

ANEXO D. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN

La presencia de los elementos de aleación y del carbono cambia la cinética de formación de la capa carbonitrurada, con el crecimiento de las interfases saturadas, se forma al mismo tiempo los nitruros de los elementos de adición CrN, MoN, así como los carbonitruros del tipo Fe₃(C,N), la alta dureza se debe más a los nitruros de los elementos de aleación que a los del Fe. [8]

De los elementos de aleación comúnmente usados en los aceros comerciales el aluminio, cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno son beneficiosos en carbonitruración porque ellos forman nitruros. Otros elementos de aleación tales como el níquel, cobre, silicio y manganeso tienen pequeño efecto sobre las características de nitruración.

Puesto que a temperaturas adecuadas todos los aceros son capaces de formar nitruros en presencia de nitrógeno naciente, los resultados de carbonitruración son más favorables en los aceros que contienen uno o más de los mejores elementos de aleación para la formación de nitruros.

a.- El carbono.- El contenido de carbono de todos estos aceros de carbonitruración no influye en la dureza, ni en la profundidad de la capa carbonitrurada, utilizándose diversos porcentajes de acuerdo con las características mecánicas que se quieren obtener en el núcleo.

Hay que evitar en las piezas descarburizaciones superficiales, eliminando por mecanizado las que hubiera antes de la carbonitruración, porque en las zonas donde el porcentaje de carbono es muy bajo, se forman capas con nitruros de hierro que son muy frágiles y pueden ocasionar el desprendimiento de las capas superficiales.

b.- El molibdeno.- El molibdeno aumenta la dureza de la capa exterior, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad de Krupp, que suelen presentar los

aceros sin molibdeno al permanecer durante mucho tiempo a temperaturas de 580°C esto es el caso de los aceros que hayan sido previamente templados y revenidos.

c.- El cromo.- El cromo es un intenso formador de carburos y estrecha la región gamma. Cuando se añade para incrementar la resistencia a la corrosión, se debe disolver totalmente en la matriz y no debe formar carburo alguno.

El cromo aminora en proporción importante, la velocidad crítica de enfriamiento para el temple, por lo que los aceros que contienen más del 12% de Cr. Templan incluso por enfriamiento al aire.

Este elemento, incrementa la resistencia a la tracción el límite elástico, la resistencia mecánica en caliente, la dureza, la templabilidad, la resistencia a la fatiga, la resistencia al desgaste, la tenacidad, la resistencia al calor, la resistencia a la corrosión, a la formación de cascarilla, a la remanencia y a la fuerza coercitiva.

Por las mejoras que produce al acero, se le emplea en los aceros para cementar, templar, revenir y para carbonitrurar, por ser altamente favorecedor de la formación de nitruros. El Cromo ayuda a incrementar la capa dura y la influencia del aluminio y del molibdeno.