

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
INGENIERIA METALURGICA

Estudio microestructural de acero Cold Rolled Templado y
Revenido después de ser cementado en sólido, utilizando
endocarpio de coco calcinado como cementante.

Modalidad: Proyecto de Investigación.

Alumno: Beristain Trejo Carlos Eduardo

Matricula: 2112045111

Asesor: Sandoval Pérez Francisco

Grado académico: Maestría.

Co-asesor: Altamirano Torres Alejandro

Grado académico: Maestría.

Trimestre lectivo: 22-O

09-enero-2023

AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA METALÚRGICA

PI-A-MET

Trimestre en que se autoriza la propuesta: Fecha: PI-A-MET

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Matrícula:

Correo personal:

[Firma]

Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa:

No. económico: Adscripción/Departamento/Sección:

Área de investigación:

Correo institucional:

[Firma]

Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal:

No. económico/Teléfono: Adscripción/Puesto:

Área de investigación/Departamento:

Correo electrónico:

[Firma]

Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

☐ Proyecto tecnológico ☒ Proyecto de investigación ☐ Estancia profesional ☐ Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Estudio microestructural de acero Cold Rolled Templado y Revenido después de ser cementado en sólido, utilizando endocarpio de coco calcinado como cementante.

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: ☐ No ☐ Si Clave (2):

OBJETIVO GENERAL

Realizar tratamiento térmico de Temple y Revenido a un acero Cold Rolled cementado en sólido en dos etapas, utilizando endocarpio de coco calcinado como cementante para obtener un acero con una superficie endurecida y un núcleo tenaz.

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100119	Proyecto de Integración en Ingeniería Metalúrgica I	☒	Inicio
1100129	Proyecto de Integración en Ingeniería Metalúrgica II	☐	22P
1100139	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Metalúrgica	☐	Término
			22O

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

[Firma]

Dra. Ma. Elizabeth Refugio García



Sello de la Coordinación de Estudios

Yo, **Sandoval Pérez Francisco**, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Asesor:

Mtro. Sandoval Pérez Francisco

Yo, **Altamirano Torres Alejandro**, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Co-Asesor

Yo, **Beristain Trejo Carlos Eduardo**, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Beristain Trejo Carlos Eduardo

Dedicatoria a:

Mis Padres

Por ser parte importante en mi vida, que a pesar de todo jamás han dejado de creer en mí, que en todo momento han confiado en que puedo lograr esto y mucho más y por brindarme todo el apoyo necesario para llegar hasta donde estoy.

Mis hermanos

Siempre están presentes en los buenos y malos momentos, que cuando necesito apoyo puedo contar con ellos y que, aunque no somos los más cariñosos sabemos de todo el amor que nos tenemos.

Universidad Autónoma Metropolitana.

No solo es una universidad, es mi segunda casa, la que formó una persona de bien, que gracias al personal docente me permiten ser no solo un profesionista, si no, un ingeniero metalúrgico que espera llenar de orgullo a su familia y universidad

Agradecimientos a:

Papá:

Amado Beristain Cid

Eres la persona que más confío en mí, que desde el momento que se enteró que fui aceptado en la universidad se llenó de alegría. Siempre buscaste la manera de sacar adelante a mis hermanos y a mí, que, aunque sé que no somos los más cariñosos ni los más expresivos, sé que nos tienes un inmenso amor y cariño. Eres una gran persona, que mientras puedas, tratas apoyar no solo a tu familia si no a quien lo necesite, talvez la gente piense que son acciones pequeñas o que estás mal al hacerlas, pero para mí son acciones que me dan un gran ejemplo de la persona que quiero ser.

A pesar de que tu educación y vida fue muy diferente a la mía, nunca quisiste ser como tu papá ni como alguien más, siempre quisiste ser mejor y estoy seguro que lo eres.

Mamá:

Ana Isabel Trejo Allende

Eres la más dura de toda la familia, la que no esperaba a que pasaran las cosas, más bien la que en vez de esperar, me alentaba a que pensara en cosas grandes como una carrera universitaria.

Sé que todo lo haces por mí y por mis hermanos, que talvez lo que haces y nos dices lo sentíamos y lo sentimos como regaño, pero estoy seguro que al final te lo vamos a agradecer. Aunque a veces pareciera que somos una familia muy difícil, siempre nos tenemos en las buenas y en las malas, extendiendonos la mano uno al otro y aunque no lo diga yo ni mis hermanos, te amamos.

Eres una parte fundamental en mi vida que me ayudó y forjó para llegar a ser lo que soy y lo que seré como profesionista y por eso te agradezco infinitamente.

Hermana:

Areli Gabriela Beristain Trejo

No todos pueden decir que tienen una gran persona como hermana, agradezco todo lo que haces por mí, todo el apoyo me brindas. Han sido tantos años de risas, enojos, llantos, pero son muchos más los grandes momentos que compartimos. No somos los hermanos más amorosos, pero si unos muy confiables, somos los hermanos que no dan un abrazo para dar a conocer cuánto se aman, somos los hermanos que con sus acciones hacen saber que nunca estamos solos y que contamos uno con el otro.

Nuevamente agradezco todo el apoyo que me brindas, todo que lo hiciste y haces para que pueda salir adelante. Sé que no es mucho, pero quiero ser, si no un ejemplo, si una referencia para Iker, que no se necesitan grandes cosas para salir adelante, se necesitan grandes acciones propias y así como tú me apoyaste en todo momento, yo quiero y espero ser un gran apoyo para él.

Hermano:

Brian Beristain Trejo

Pareciera que eres el más duro y menos expresivo de todos, pero es todo lo contrario, eres una persona muy expresiva y sentimental. Agradezco las veces que me haces saber lo que piensas de mí y de todos, que confías en lo mucho que podemos lograr y que tratas de apoyarnos con lo mucho o poco que tienes.

Al igual que con Iker, trataré de ser una persona de bien para que Eva vea una referencia y apoyo en mí para que el día de mañana sea una gran persona.

Abuela:

Eva Cid Cid

La persona más noble que conozco, mi abuela, la que jamás me juzgo, la que en todo momento vio por mí, no tengo un mal recuerdo de ella, fue la persona más dulce conmigo y con todos a su alrededor.

Ya no estás con nosotros, me hubiera encantado que estuvieras conmigo por muchos años más. Aunque ya no estas físicamente, todos los días te tengo presente, a poco más de un año de tu partida te sigo llorando y recordando con gran amor. Sé que estarías muy orgullosa de mí y de todo lo que he logrado.

Asesor:

Sandoval Pérez Francisco

Solo tengo palabras de admiración y respeto para usted ya que gustoso acepto ser mi asesor de proyecto. En el todo momento que se lo pedí, sacrifico su tiempo para apoyarme a realizar este proyecto.

Agradezco por compartir conmigo sus conocimientos, sabiduría y tiempo. También le agradezco su paciencia y apoyo incondicional, ya que este proyecto fue muy tardado y, sin embargo, jamás renunció a este ni dejó de creer en que si podía sacarlo adelante. Es algo que le agradeceré por siempre.

Co-Asesor:

Altamirano Torres Alejandro

Muy agradecido con usted por todo el apoyo mostrado no solo en el proyecto, si no a lo largo de la carrera ya que muchas veces me acerque con usted y muy amable se dio el tiempo de atender mis dudas. Un profesor bien preparado, capaz y empático que con la manera y gusto con que da sus clases, indirectamente me ayudo a decidir que es a lo que quiero dedicarme, ya lo tenía en mente, pero no estaba seguro. Gracias a usted estoy convencido de que quiero dedicarme a la docencia.

Resumen

En la presente investigación se muestran los resultados de realizar el proceso de cementación sólida en dos etapas en un acero Cold Rolled a diferentes temperaturas de cementación y a diferentes tiempos de este tratamiento termoquímico, empleando endocarpio de coco calcinado como cementante.

Se demostró que el endocarpio de coco calcinado es un cementante efectivo para el tratamiento termoquímico de cementación sólida ya que bajo las condiciones planteadas en este proyecto se verifica que hay una capa saturada de carbono en el acero cementado.

El tratamiento termoquímico de cementación sólida en dos etapas permitió tener un acero endurecido superficialmente con presencia de martencita acicular y un núcleo dúctil con presencia de granos de ferrita más perlita fina, además de que con este tratamiento termoquímico se evita la formación de ferrita tipo Widmanstätten la cual no es deseada por fragilizar los aceros y es común encontrar esta fase al realiza cementación sólida en una etapa.

Índice

1.1 Introducción	- 1 -
1.2 Antecedentes	- 2 -
1.3 Justificación	- 5 -
2. Objetivos	- 6 -
2.1 Objetivos General	- 6 -
2.2 Objetivos Específicos	- 6 -
3 Marco Teórico	- 7 -
3.1 Difusión	- 7 -
3.2 Mecanismo de Difusión	- 7 -
3.2.1 Mecanismo de difusión por vacancias o sustitucional.	- 7 -
3.2.2 Mecanismo de difusión intersticial	- 8 -
3.3 Energía de activación	- 8 -
3.4 Difusión en estado estacionario.	- 9 -
3.4.1 Primera ley de Fick	- 9 -
3.5 Difusión en estado no estacionario	- 9 -
3.5.1 Segunda ley de Fick	- 10 -
3.6 Factores que afectan la difusión	- 10 -
3.6.1 Tipo de mecanismo de difusión	- 10 -
3.6.2 Temperatura a la cual ocurre la difusión	- 10 -
3.6.3 Estructura cristalinas.	- 10 -
3.6.4 Imperfecciones cristalinas.	- 10 -
3.6.5 Concentración de componentes	- 11 -
3.7 Endurecimiento superficial	- 11 -
3.8 tratamientos Termoquímicos	- 12 -
3.8.1 Cementado	- 12 -
3.8.2 Niturado	- 12 -
3.8.3 Borurado	- 13 -
3.8.4 Carbonitrurado	- 13 -
3.9 Cementación sólida.	- 13 -
3.10 Temple y revenido a aceros cementados.	- 14 -
3.11 Aceros cementables	- 15 -

3.12 Acero Cold Rolled.....	- 15 -
3.13 Formado de acero Cold Rolled.....	- 15 -
4 Desarrollo experimental.	- 16 -
4.1 Recolección de cascaras de coco.	- 16 -
4.2 Obtención de endocarpio.	- 16 -
4.3 Calcinación y trituración de cascara de coco.....	- 16 -
4.4 Preparación del cementante	- 16 -
4.5 Obtención de probetas de acero Cold Rolled.....	- 17 -
4.6 Tratamiento termoquímico de Cementación Solida.	- 17 -
4.7 Montaje de probetas	- 17 -
4.8 Análisis microestructural de aceros cementados.	- 17 -
4.9 Tratamiento térmico de temple a aceros cementados	- 18 -
4.10 Tratamiento térmico de revenido a aceros templados.	- 18 -
4.11 Análisis microestructural de acero templados y revenidos.....	- 18 -
4.12 Perfil de durezas.	- 19 -
5 Resultados.	- 20 -
5.1 Micrografías de aceros cementados.....	- 20 -
5.1.1 Cementación a 850°C por 4 horas	- 20 -
5.1.2 Cementación a 850°C por 6 horas	- 22 -
5.1.3 Cementación a 850°C por 8 horas	- 23 -
5.1.4 Cementación a 850°C por 10 horas	- 25 -
5.1.5 Cementación a 950°C por 4 horas	- 26 -
5.1.6 Cementación a 950°C por 6 horas	- 28 -
5.1.7 Cementación a 950°C por 8 horas	- 29 -
5.1.8 Cementación a 950°C por 10 horas	- 31 -
5.2 Micrografías de aceros cementados, templados y revenidos	- 32 -
5.2.1 Cementación a 850°C por 4 horas	- 32 -
5.2.2 Cementación a 850°C por 6 horas	- 34 -
5.2.3 Cementación a 850°C por 8 horas	- 35 -
5.2.4 Cementación a 850°C por 10 horas	- 37 -
5.2.5 Cementación a 950°C por 4 horas	- 38 -
5.2.6 Cementación a 950°C por 6 horas	- 40 -

5.2.7 Cementación a 950°C por 8 horas	- 41 -
5.2.8 Cementación a 950°C por 10 horas	- 43 -
5.3 Perfil de durezas de aceros templados y revenidos.	- 45 -
5.3.1 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 4 horas, templado y revenido.	- 45 -
5.3.2 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 6 horas, templado y revenido.	- 46 -
5.3.3 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 8 horas, templado y revenido.	- 47 -
5.3.4 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 10 horas, templado y revenido.	- 48 -
5.3.5 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 4 horas, templado y revenido.	- 49 -
5.3.6 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 6 horas, templado y revenido.	- 50 -
5.3.7 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 8 horas, templado y revenido.	- 51 -
5.3.8 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 10 horas, templado y revenido.	- 52 -
6 Análisis de resultados.....	- 54 -
7 Conclusiones.....	- 57 -
8 Referencias bibliográficas	- 58 -
9 iThenticate.....	- 60 -
Anexo 1	- 64 -

INDICE DE IMAGENES

Figura 1.- Difusión por <u>vacancia o sustitucional</u>	- 8 -
Figura 2.- Difusión intersticial.....	- 8 -
Figura 3.- Primera ley de <u>Fick</u>	- 9 -
Figura 4.- segunda ley de <u>Fick</u>	- 10 -
Figura 5.- Relación temperatura-tiempo para profundidad de capa cementada.....	- 12 -
Figura 6.- Cambio <u>microestructural</u> de acero cementado en solido dependiendo del contenido de carbono.....	- 14 -
Figura 7.- representación de tratamiento termoquímico a) cementación convencional y b) cementación en dos etapas.....	- 15 -
Figura 8.- Horno tipo mufia.....	- 16 -
Figura 9.- Endocarpio de coco calcinado y triturado.....	- 17 -
Figura 10.- Montadora de probetas en caliente <u>Buehler</u>	- 18 -
Figura 11.- Probetas, montadas en caliente en baquelita e identificadas.....	- 18 -
Figura 12.- Microscopio óptico <u>Olimpus</u>	- 18 -
Figura 13.- Durómetro <u>Vicker</u>	- 19 -
Figura 14.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 4 horas y enfriado al aire.....	- 20 -
Figura 15.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 4 horas y enfriado al aire.....	- 21 -
Figura 16.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 4 horas y enfriado al aire.....	- 21 -
Figura 17.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 6 horas y enfriado al aire.....	- 22 -
Figura 18.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 6 horas y enfriado al aire.....	- 22 -
Figura 19.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 6 horas y enfriado al aire.....	- 23 -
Figura 20.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 8 horas y enfriado al aire.....	- 23 -
Figura 21.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> tratado térmicamente a 850°C por 8 horas y enfriado al aire.....	- 24 -

Figura 22.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C por 8 horas y enfriado al aire.	- 24 -
Figura 23.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C por 10 horas y enfriado al aire.	- 25 -
Figura 24.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C por 10 horas y enfriado al aire.	- 25 -
Figura 25.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C por 10 horas y enfriado al aire.	- 26 -
Figura 26.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 4 horas y enfriado al aire.	- 26 -
Figura 27.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 4 horas y enfriado al aire.	- 27 -
Figura 28.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 4 horas y enfriado al aire.	- 27 -
Figura 29.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 6 horas y enfriado al aire.	- 28 -
Figura 30.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 6 horas y enfriado al aire.	- 28 -
Figura 31.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 6 horas y enfriado al aire.	- 29 -
Figura 32.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 8 horas y enfriado al aire.	- 29 -
Figura 33.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 8 horas y enfriado al aire.	- 30 -
Figura 34.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 8 horas y enfriado al aire.	- 30 -
Figura 35.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 10 horas y enfriado al aire.	- 31 -
Figura 36.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 10 horas y enfriado al aire.	- 31 -
Figura 37.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C por 10 horas y enfriado al aire.	- 32 -
Figura 38.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C por 4 horas, templado y revenido.	- 32 -

Figura 39.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 4 horas, templado y revenido.	- 33 -
Figura 40.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 4 horas, templado y revenido.	- 33 -
Figura 41.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 6 horas, templado y revenido.	- 34 -
Figura 42.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 6 horas, templado y revenido.	- 34 -
Figura 43.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 6 horas, templado y revenido.	- 35 -
Figura 44.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 8 horas, templado y revenido.	- 35 -
Figura 45.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 8 horas, templado y revenido.	- 36 -
Figura 46.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 8 horas, templado y revenido.	- 36 -
Figura 47.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 10 horas, templado y revenido.	- 37 -
Figura 48.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 10 horas, templado y revenido.	- 37 -
Figura 49.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 850°C por 10 horas, templado y revenido.	- 38 -
Figura 50.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 950°C por 4 horas, templado y revenido.	- 38 -
Figura 51.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 950°C por 4 horas, templado y revenido.	- 39 -
Figura 52.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 950°C por 4 horas, templado y revenido.	- 39 -
Figura 53.- Micrografía de capa cementada de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 950°C por 6 horas, templado y revenido.	- 40 -
Figura 54.- Micrografía del núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 950°C por 6 horas, templado y revenido.	- 40 -
Figura 55.- Micrografía de capa-núcleo de acero <u>Cold Rolled</u> cementado a 950°C por 6 horas, templado y revenido.	- 41 -

Figura 56.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 8 horas, templado y revenido.....	- 41 -
Figura 57.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 8 horas, templado y revenido.....	- 42 -
Figura 58.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 8 horas, templado y revenido.....	- 42 -
Figura 59.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 10 horas, templado y revenido.....	- 43 -
Figura 60.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 10 horas, templado y revenido.....	- 43 -
Figura 61.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 10 horas, templado y revenido.....	- 44 -

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 4 horas a 850°C. ...	- 45 -
Grafica 2.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 6 horas a 850°C. ...	- 46 -
Grafica 3.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 8 horas a 850°C. ...	- 47 -
Grafica 4.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 10 horas a 850°C. ...	- 48 -
Grafica 5.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 4 horas a 950°C. ...	- 49 -
Grafica 6.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 6 horas a 950°C. ...	- 50 -
Grafica 7.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 8 horas a 950°C. ...	- 51 -
Grafica 8.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado 10 horas a 950°C. ...	- 52 -
Grafica 9.- Durezas de aceros Cold Rolled cementado a 850°C a diferentes tiempos.....	- 53 -
Grafica 10.- Durezas de aceros Cold Rolled cementado a 950°C a diferentes tiempos.....	- 53 -
Grafica 11.- Espesor de capa para acero cementado a 850°C	- 55 -
Grafica 12.- Espesor de capa para acero cementado a 950°C	- 56 -

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Clasificación de los procesos de endurecimiento por difusión (procesos termoquímicos)...	11 -
Tabla 2.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 4 horas a 850°C	45 -
Tabla 3.- Micro durezas en acero Cold Rolled	46 -
Tabla 4.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 8 horas a 850°C	47 -
Tabla 5.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 10 horas a 850°C	48 -
Tabla 6.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 4 horas a 950°C	49 -
Tabla 7.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 6 horas a 950°C	50 -
Tabla 8.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 8 horas a 950°C	51 -
Tabla 9.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por 10 horas a 950°C	52 -
Tabla 10.- Registro de capa endurecida efectiva de aceros cementados, templados y revenidos.	55 -

1.1 Introducción

Actualmente se sabe que existen diferentes procesos para realizar endurecimientos superficiales en aceros, estos procesos son conocidos como tratamientos termoquímicos. Uno de los tratamientos termoquímicos más utilizados a nivel industrial es la cementación sólida que es utilizada para aceros bajo carbono.

La cementación sólida es un proceso en el que por medio de altas temperaturas (superiores a A_{c3}), el carbono difunde a través de la red cristalina del acero para formar una capa saturada de carbono la cual modificará las propiedades mecánicas del acero, se tendrá un acero con una alta dureza superficial.

Se conoce como “Cementación en dos etapas” al proceso de realizar un tratamiento termoquímico de cementado y dejar enfriar lentamente al aire para después realizar un tratamiento térmico de temple y un posterior revenido para obtener un núcleo tenaz y una superficie endurecida.

En los últimos años, la alta contaminación del medio ambiente ha obligado a buscar nuevas alternativas o procesos industriales más amigables con el planeta.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar experimentalmente si es posible que un acero Cold Rolled cementado en sólido pueda obtener una alta dureza superficial y un núcleo dúctil y tenaz por medio de un tratamiento térmico de temple y revenido. La variante o innovación de este proyecto es que el carbono utilizado como cementante es obtenido de la calcinación del endocarpio de coco.

Este proyecto no solo tendría un impacto innovador, sino que también económico y ambiental ya que, al utilizar la basura del coco como cementante, podemos disminuir la contaminación ocasionada por estas cascavas, además de que podrían bajar los costos de producción del tratamiento termoquímico de cementación.

1.2 Antecedentes

Actualmente, ha crecido la demanda de avances tecnológicos e industriales en materiales metálicos para obtener características y propiedades específicas con el fin de cumplir con un servicio. Por ejemplo, el endurecimiento superficial de aceros mediante tratamientos termoquímicos.

Los aceros cold rolled son aceros con bajos contenidos de carbono, los cuales son conformados por estirado en frío o laminados en frío.

Existen tres enfoques claramente diferentes para los diversos métodos de endurecimiento de superficies

- “Métodos de difusión termoquímica: Son aquellos que modifican la composición química de la superficie con especies endurecedoras como carbono, nitrógeno y boro. Los métodos de difusión permiten el endurecimiento efectivo de toda la superficie de una pieza y se utilizan generalmente cuando un gran número de piezas se van a endurecer superficialmente. Los tratamientos más comunes en la industria son carburización, nitruración, carbonitruración y borurización.
- Métodos energéticos o térmicos aplicados: Son los que no modifican la composición química de la superficie, sino que mejoran sus propiedades alterando la metalurgia superficial, es decir, producen una superficie templada dura sin especies de aleación adicionales.
- Recubrimientos de superficie o métodos de modificación de superficies: Son aquellos que impliquen la acumulación intencional de una nueva capa sobre el sustrato de acero o, en el caso de la implantación iónica, alteren la composición química del sub-superficial.” (Ortiz, y otros, 2020)

Tratamientos termoquímicos

“Los tratamientos termoquímicos son los procesos utilizados para modificar la estructura, forma y tamaño de los granos o transformar los constituyentes de los metales o aleaciones. Estos son tratamientos de recubrimiento superficial en los cuales interviene un elemento químico como Boro, Carbono y Nitrógeno que se producen por un proceso de difusión en la superficie de un material. Algunos de estos métodos son:” (López, 2011)

- “Cementación (C). Aumenta la dureza superficial de una pieza de acero dulce, aumentando la concentración de carbono en la superficie. Se consigue teniendo en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. El tratamiento logra aumentar el contenido de carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temple y revenidos, una gran dureza superficial, resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.
- Nitruración (N). Al igual que la cementación, aumenta la dureza superficial, aunque lo hace en mayor medida, incorporando nitrógeno en la composición de la superficie de la pieza. Se logra calentando el acero a temperaturas comprendidas entre 400°C y 525 °C

aproximadamente, dentro de una corriente de gas amoníaco, más nitrógeno.” (Revista Digital Para Profesionales Enseñanza., 2011)

- Borurado (B). “Es el recubrimiento de una capa superficial del acero con boro, adquiriendo una alta dureza, (unidades Vickers) en el rango de 1800 a 2000 HV, (lo que está ligado, en el caso de los aceros, a la formación de boruros FeB y/o Fe₂B), además, es resistente al desgaste y a la corrosión en distintos medios.” (Herrera, 2016)
- “Cianuración (C+N). Endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero. Se utilizan baños con cianuro, carbonato y cianato sódico. Se aplican entre 750°C y 950°C aproximadamente.
- Carbonitruración (C+N). Al igual que la cianuración, introduce carbono y nitrógeno en una capa superficial, pero con hidrocarburos como metano, etano o propano, amoníaco (NH₃) y monóxido de carbono (CO). En el proceso se requieren temperaturas de 650 a 850°C aproximadamente, y es necesario realizar un temple y un revenido posterior.
- Sulfinización (S+N+C). Aumenta la resistencia al desgaste por acción del azufre. El azufre se incorpora al metal por calentamiento, a la temperatura de 565°C aproximadamente, en un baño de sales.” (Revista Digital Para Profesionales Enseñanza., 2011)

Cementación solida

“Es el procedimiento más antiguo utilizado para enriquecer con carbono la superficie del acero. En este caso, las piezas, después de su elaboración preliminar, se limpian quitándoles la herrumbre, la suciedad y la grasa. Se utilizan diversos materiales para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación que se mezclan con carbonatos de bario, calcio y sodio. El carbón sólo, no se emplea porque con él no se suelen conseguir concentración de carbono en la periferia del acero, superiores a 0.65% de C, mezclándola a cambio con carbonatos alcalinos o alcalino-térreos, se alcanza hasta 1.20% de carbono. Durante mucho tiempo se creyó que la cementación de los aceros de muy bajo carbono se verificaba, al penetrar el carbono del cementante sólido a través de la superficie del acero y difundirse luego hacia el interior. Pero se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero, se verifica siempre por medio de los gases que se desprenden al calentarse las mezclas cementantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el monóxido de carbono el principal agente carburante.” (MONTAÑO, 2014)

“La creciente preocupación mundial sobre la conservación del medio ambiente y la necesidad de desarrollo de procesos industriales ambientalmente amigables, ha sido uno de los campos más importante para los diferentes ámbitos de la investigación científica y tecnológica. (MIRANDA & LAURA, 2016)”. Por lo que se han buscado alternativas en material prima para desarrollar los mismos procesos industriales con materiales reciclables; por ejemplo:

“Realizar un cementante con carbono vegetal con conchas marinas mediante la utilización de una mezcla adecuada de carbón vegetal y las conchas marinas como material cementante, se logra la difusión de átomos de carbono hacia el interior del acero de bajo carbono SAE: 1020 cuando se carburiza a 960°C por 6 horas. El correcto control de la temperatura y tiempo del proceso; permitirá un incremento de átomos de carbono en la superficie, la cual después de un temple en agua; mejora la dureza superficial y mantiene un núcleo tenaz.” (MIRANDA & LAURA, 2016)

Por otra parte, (EDIMNZON, 2016) logró realizar un tratamiento térmico de cementación sólida con cascara de huevo obtenido resultados favorables.

“Es posible endurecer superficialmente el acero SAE: 1020, aplicando el tratamiento termoquímico de Cementación sólida empleando una mezcla optima cementante constituida por 64% carbón vegetal, 36% cascara de huevo molida a una temperatura de cementación de 950°C, en un tiempo de cementación de 4 horas. Empleando esta composición de mezcla y para esta condición de cementación se consigue una dureza superficial después del temple de 65.5 HRC y una tenacidad igual a 7.8 Jouls.

La formación de una capa cementada, fue observada en todas las muestras ensayadas, determinándose que existe una capa cementada endurecida y con espesores que van desde 0.42 hasta 0.70 mm.” (HUAMANI FLORES, 2016)

Se utilizan diferentes materiales para cumplir la función de cementantes, Las materias primas que pueden sobresalir son los huesos calcinados y el cuero entre otros las cuales se deben de mezclar con carbonatos para que se lleve correctamente la difusión hacia el acero.

1.3 Justificación

Científica: En muchas ocasiones los aceros bajo carbono presentan propiedades mecánicas que limitan su uso en la industria, pero con un tratamiento termoquímico como el de Cementación Solida podemos mejorar las propiedades mecánicas del acero bajo carbono logrando propiedades similares a las de otros aceros o metales de mayor costo. Además, al usar como cementante materia prima reutilizable, como la fibra de coco, podemos reducir aún más los costos de producción para fabricar un acero cementado con alta dureza y núcleo tenaz.

Social: En la actualidad el uso de materiales metálicos se ha incrementado exponencialmente por su uso en procesos industriales, la automatización de los mismos o en la fabricación de productos para la vida diaria, exigiendo una mejor calidad en los materiales y de ser posible a un menor costo.

Ambiental: utilizar la fibra de coco calcinada como cementante en el tratamiento termoquímico de cementación tiene un impacto ambiental positivo ya que comúnmente la cáscara del coco es desechada a la basura sin saber realmente cuál es su destino, reutilizando esta fibra se obtiene materia prima (carbono) para el proceso de Cementación Solida, pero principalmente evitamos que esta cascara se vuelva un contaminante.

2. Objetivos

2.1 Objetivos General

Realizar tratamiento térmico de Temple y Revenido a un acero Cold Rolled cementado en sólido en dos etapas, utilizando endocarpio de coco calcinado como cementante para obtener un acero con una superficie endurecida y un núcleo tenaz.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar tratamiento termoquímico de Cementación Solida a un acero Cold Rolled utilizando endocarpio calcinado (fibra del coco) como cementante, realizar a las temperaturas de 850°C y 950°C durante 4, 6, 8, y 10 horas respectivamente.
- Realizar un corte transversal a las probetas cementadas y someter a desbaste, pulido y ataque químico para obtener micrografía del acero Cold Rolled después del tratamiento termoquímico.
- Someter los aceros cementados a tratamiento térmico de Temple a una temperatura de entre 850°C durante 1 hora y un posterior Revenido a una temperatura de 250°C durante 1 hora.
- Realizar desbaste, pulido y ataque químico a probeta templada y revenida para obtener micrografías de la capa cementada, núcleo y la interface capa cementada-núcleo. Obtener micrografías por medio del microscopio óptico.
- Realizar el análisis microestructural de la capa cementada, el núcleo y de la interface capa cementada-núcleo del acero después de ser templado y revenido.
- Medir el espesor de la capa cementada del acero Cold Rolled mediante un software llamado "Image Pro Plus".
- Realizar un perfil de durezas para cada una de las probetas templadas y revenidas (8 probetas) con ayuda de un durómetro Vickers.

3 Marco Teórico

3.1 Difusión

“Difusión es el transporte o movimiento de la materia dentro de la materia. La difusión está promovida por la existencia de gradientes composicionales dentro de la materia. Igual que cuando existe un gradiente de T el calor fluye desde la zona más caliente a la más fría hasta que ambas zonas se igualan en la temperatura y el sistema alcanza el equilibrio térmico, lo mismo ocurre con otros parámetros o variables del sistema. Cuando existe un gradiente composicional, si los átomos tienen suficiente energía para moverse, se moverán con el fin de anular dicho gradiente composicional y alcanzar el equilibrio.

En un sistema en el que hay un gradiente de concentración de un elemento dado entre dos zonas, si los átomos pueden moverse, lo harán para igualar la concentración del elemento en todos sus puntos. Para ello, los átomos se moverán desde donde tienen mayor concentración hacia donde se encuentran en menor concentración. A este movimiento se le conoce como difusión.” (García Romero & Monasterio Guisasola, 2018)

3.2 Mecanismo de Difusión

“A nivel atómico, la difusión consiste en la migración de los átomos de un sitio de la red a otro. En los materiales sólidos, los átomos están en continuo movimiento y cambian rápidamente de posición. La movilidad atómica exige dos condiciones: 1) un lugar vecino vacío, y 2) que el átomo deba 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 y esta fracción aumenta al ascender la temperatura. Se han propuesto varios modelos diferentes para este movimiento atómico, pero para la difusión en metales predominan dos.” (Callister, Jr. & Rethwisch, 2016)

3.2.1 Mecanismo de difusión por vacancias o sustitucional.

“En la Figura 1 se representa un mecanismo de difusión que implica el intercambio de un átomo desde una posición reticular estable a una vacante o lugar reticular vecino vacío. Este mecanismo recibe el nombre de difusión por vacantes. Naturalmente, este proceso necesita de la presencia de vacantes y las posibilidades de la difusión de las vacantes es función del número de estos defectos. A temperatura elevada el número de vacantes de un metal es significativo. Puesto que en el movimiento difusivo los átomos y las vacantes intercambian posiciones, el movimiento de los átomos en la difusión va en sentido opuesto al de las vacantes. La autodifusión y la interdifusión ocurren mediante este mecanismo; en la interdifusión los átomos de impurezas se sustituyen por átomos de disolvente, que son los átomos de la red inicial.” (Callister, Jr. & Rethwisch, 2016).

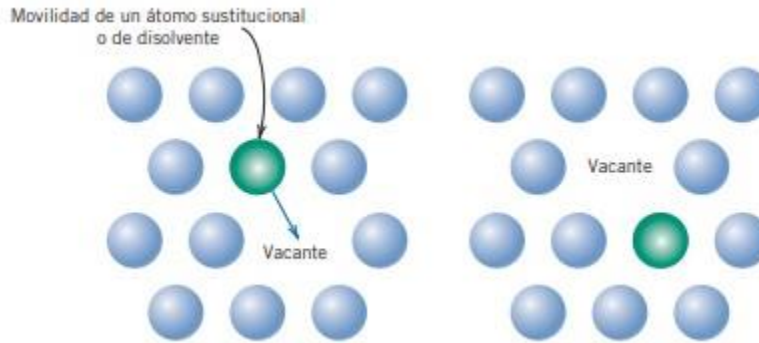


Figura 1.- Difusión por vacancia o sustitucional.

Nota: adaptada de CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES (p.183), por Callister, Jr. W. D.

3.2.2 Mecanismo de difusión intersticial

“El segundo tipo de difusión implica a átomos que van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada. El mecanismo tiene lugar por interdifusión de átomos de soluto, como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que tienen átomos pequeños, idóneos para ocupar posiciones intersticiales. Este fenómeno se denomina difusión intersticial, como se observa en la Figura 2. Los átomos de soluto sustitucionales raramente ocupan posiciones intersticiales y no difunden por este mecanismo.

En la mayoría de las aleaciones, la difusión intersticial ocurre más rápidamente que la difusión por vacantes, ya que los átomos intersticiales son más pequeños que las vacantes y tienen mayor movilidad. Teniendo en cuenta que hay más posiciones intersticiales vacías que vacantes, la probabilidad de movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes”. (Callister, Jr. & Rethwisch, 2016)

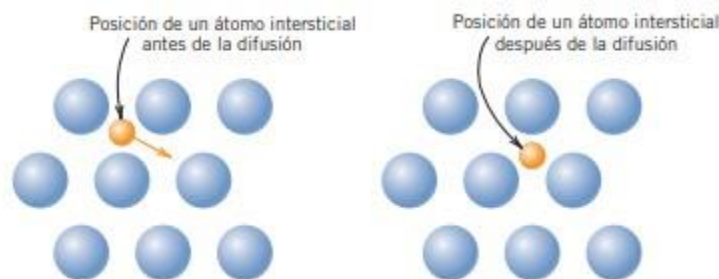


Figura 2.- Difusión intersticial.

Nota: adaptada de CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES (p.183), por Callister, Jr. W. D.

3.3 Energía de activación

“Muchos de los procesos involucrados en la producción y utilización de los materiales de ingeniería tienen relación con la velocidad a que los átomos se mueven en estado sólido. En muchos de estos procesos tienen lugar reacciones en estado sólido que implican reacomodos espontáneos de los átomos a posiciones atómicas nuevas y más estables. Para que estas reacciones tengan lugar desde el estado inicial hasta el estado final, los átomos reaccionantes deben tener suficiente energía para

superar una barrera de energía de activación. La energía adicional requerida por encima de la energía media de los átomos se llama energía de activación Q, y se mide generalmente en julios/mol o en calorías/mol.” (García Romero & Monasterio Guisasola, 2018)

3.4 Difusión en estado estacionario.

“Considerando una mezcla binaria en un medio en reposo de las especies químicas A y B, en donde el número de moléculas de A en un volumen dado en una región, es mayor que en otra región vecina, entonces tendrá lugar la migración de moléculas de A a través de B, es decir desde la zona de mayor concentración hacia la de menor concentración.

El estado estacionario se verifica si consideramos la difusión del soluto en la dirección z. Supongamos que, tras un periodo de tiempo, las concentraciones en z1 y z2 se mantienen constantes C1 y C2 respectivamente. Estas condiciones de difusión se conocen como estado estacionario.” (Rodríguez Espinoza, Alfaro Cruz, & Jamanca González, 2017)

3.4.1 Primera ley de Fick

“La velocidad de difusión de los átomos en un material dado, en una dimensión (z), está regida por la Primera Ley de Fick, la cual se muestra en la Figura 3. La misma determina el flujo de partículas, ya sean átomos, moléculas o iones.

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta z}$$

Figura 3.- Primera ley de Fick.

Donde:

J=flujo de átomos ($\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \text{s}}$)

D=Difusividad o coeficiente de difusión ($\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$)

$\Delta C / \Delta z$ =Gradiente de concentración ($\frac{\text{átomos}}{\text{cm} \cdot \text{cm}^3}$)

Donde J es el flujo de las partículas (flujo de difusión) y C su concentración. El signo negativo indica la dirección opuesta entre el flujo de difusión y el gradiente de concentración. La difusión es un proceso que conduce a una igualdad de concentraciones. El factor de proporcionalidad D, es el llamado coeficiente de difusión” (Quille Ramos, 2016)

3.5 Difusión en estado no estacionario

“El estado estacionario, en el cual las condiciones permanecen invariables con el tiempo, no se encuentra con facilidad entre los problemas de ingeniería. En la mayoría de los casos, se da la difusión en estado no estacionario, en el cual la concentración del soluto en cualquier punto del material cambiará con el tiempo. Supongamos el caso de que una especie química A se difunde en otra especie química B. A medida que el tiempo progresa, la concentración del soluto en cualquier punto del sólido en la dirección z aumentará, como se indica en los tiempos t1 y t2.” (Rodríguez Espinoza, Alfaro Cruz, & Jamanca González, 2017)

3.5.1 Segunda ley de Fick

“La segunda ley de Fick o la ecuación de difusión, fue deducida usando la Primera Ley de Fick y la ecuación de continuidad. Esta segunda ley de Fick, se muestra en la Figura 4, describe el estado dinámico de la difusión de las partículas, cuya solución depende de las condiciones de frontera para una solución en particular.

Desde el punto de vista matemático la segunda ley de Fick es una ecuación diferencial parcial de segundo orden. Si D depende de la concentración C esta ecuación no es lineal, y por lo tanto no puede ser resuelta analíticamente. Pero si la difusividad es independiente de la concentración, la expresión anterior se simplifica a:” (Quille Ramos, 2016)

$$\frac{\Delta C}{\Delta z} = \frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2}$$

Figura 4.- segunda ley de Fick.

3.6 Factores que afectan la difusión.

3.6.1 Tipo de mecanismo de difusión.

“El hecho de que la difusión sea intersticial o sustitucional afectará la difusividad. Los átomos pequeños pueden difundirse intersticialmente en la red cristalina de átomos mayores del solvente. De esta manera los átomos de carbono se difunden intersticialmente en la red BCC o FCC. Los átomos de cobre pueden difundirse sustitucionalmente en una red de aluminio siempre y cuando los átomos de cobre y aluminio sean aproximadamente iguales.

3.6.2 Temperatura a la cual ocurre la difusión.

La temperatura afecta en gran manera el valor de la difusividad. Si aumenta la temperatura la difusividad también se ve incrementada para los sistemas FCC Y BCC y los metales no ferrosos, por comparación de los valores a 500°C y con valores a 1000°C.

3.6.3 Estructura cristalinas.

La estructura cristalina BCC que posee un factor de empaquetamiento de 0.68 ayuda que la difusividad sea mayor que una red FCC que posee un factor de empaquetamiento de 0.74. De esta manera los átomos de carbono se pueden difundir más fácilmente en una red de hierro BCC que una red FCC.

3.6.4 Imperfecciones cristalinas.

La mayoría de las estructuras abiertas permiten una difusión más rápida de los átomos. Por ejemplo, la difusión tiene lugar más rápidamente a lo largo de los límites de grano que en la matriz del mismo, en metales y cerámicos. Las vacantes en exceso incrementarán las velocidades de difusión en metales y aleaciones.

3.6.5 Concentración de componentes.

Es importante, ya que mayores concentraciones de los átomos de soluto que difunden aumentarían el coeficiente de difusión. Este aspecto de la difusión en estado sólido es muy complejo.” (HUAMANI FLORES & VIZCARDO HUAYNA, 2016)

3.7 Endurecimiento superficial

“El endurecimiento superficial es un término general que abarca una amplia variedad de técnicas, todas ellas con el mismo objetivo:

aumentar la dureza superficial de la pieza, incrementando la resistencia al desgaste y conservando la tenacidad en el interior de esta. En algunas aplicaciones se busca, además, incrementar la resistencia a la fatiga.

Esta combinación de superficie dura y resistencia al impacto, dos propiedades en general opuestas entre sí, es útil en piezas tales como engranajes, ejes y piezas sometidas al desgaste mecánico. Hay tres enfoques diferentes a los diversos métodos de endurecimiento superficial. Estos son: Procesos Termoquímicos, Procesos Térmicos y Revestimientos. Las principales diferencias entre ellos se muestran en la Tabla 1. En este apunte sólo se tratarán los Procesos Termoquímicos” (MIRANDA QUICANA & CRISTOBAL RAUL, 2016)

Tabla 1.- Clasificación de los procesos de endurecimiento por difusión (procesos termoquímicos).
Referencia: Lisandro Ferrero, Procesos Termoquímicos de Endurecimiento Superficial. Departamento de Tecnología y Ciencias de los Materiales. Universidad Nacional de Luján, 2012

Procesos Termoquímicos Se modifica la composición química de la superficie. Se introducen especies endurecedoras al acero (Por ej: C, N, B) en un proceso de Difusión.	Carburización
	Nitruración
	Carbonitruración
	Nitrocarburación
	Boronizado
	Sulfinización
Procesos Térmicos No se modifica la composición química de la superficie. Se modifica la microestructura superficial sin la adición de especies endurecedoras	Endurecimiento por llama
	Endurecimiento por inducción
	Endurecimiento por láser
	Endurecimiento por haz de electrones
Revestimientos / modificaciones superficiales Se deposita una nueva capa sobre el sustrato de acero. Se modifica la composición química subsuperficial	Cromado duro (Hard chromium plating)
	Recubrimiento de Ni autocatalítico (Electroless Nickel Plating)
	Thermal Spraying
	Soldadura de Recargue (Weld hardfacing)
	Deposición Química en Fase Vapor (QVD)
	Deposición Física en Fase Vapor (PVD)
	Implantación Iónica
	Laser Surface Processing

3.8 tratamientos Termoquímicos.

“Son procesos de endurecimiento superficial por difusión. En este caso, 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. La profundidad de la capa dura posee la siguiente relación temperatura tiempo, como se observa en la Figura 5:

$$\text{Profundidad de capa} = K\sqrt{\text{Tiempo}}$$

Figura 5.- Relación temperatura-tiempo para profundidad de capa cementada.

En donde la constante de difusividad, K, depende de la temperatura, la composición química de la pieza y del gradiente de concentración de la especie endurecedora. En términos de temperatura, la constante de difusividad se incrementa exponencialmente con la temperatura absoluta. El gradiente de concentración depende de la cinética superficial y reacciones del proceso en particular.” (MIRANDA QUICAÑA & CRISTOBAL RAUL, 2016).

Existen diferentes tratamientos termoquímicos para lograr un endurecimiento superficial en los aceros.

3.8.1 Cementado

“En aceros de bajo carbono (0.15-0.20 %C) se endurece la superficie externa originando un núcleo dúctil y tenaz. El elemento involucrado es el carbono y permite aumentar la cantidad de éste en aceros con bajo contenido de carbono antes de ser endurecidos. Al incrementar el contenido de carbono en la fase austenita y aprovechar la transformación a la fase martensita, se mejoran las propiedades superficiales de una forma gradual. Los carburos, por lo tanto, aumentan la dureza y resistencia al desgaste en la superficie después de templar y revenir (100-200°C).

El carbono se agrega al calentar al acero a su temperatura crítica, dentro de la región austenítica, mientras se encuentra en contacto con un material carbonoso. Los tres métodos de cementación más comunes son: empacado para carburación, baño líquido y gas.” (López Tapia, 2011)

3.8.2 Nitruado

“El nitruado es un proceso que enriquece la superficie de una matriz con nitrógeno y formación de nitruros, esto confiere mayor dureza superficial y resistencia al desgaste. Este tratamiento se utiliza para piezas que son sometidas frecuentemente a grandes fuerzas de rozamiento y carga, ejemplos de esto son camisas de cilindros, rodamientos, moldes, correderas y baleros por mencionar algunas. En estos casos se busca tenacidad en el núcleo para absorber golpes y vibraciones, mientras que la superficie requiere de dureza para resistir fricción y desgaste.

La mayoría de los aceros se pueden nitrurar, estos son los aceros comunes; sin embargo, si se trata de aceros inoxidable, disminuye la resistencia contra la corrosión por lo que no es recomendable nitrurar aceros resistentes a la corrosión. Además, las piezas nitruradas pueden ser sometidas hasta 500°C-550°C ya que es en esta temperatura cuando comienza a disociarse los nitruros y el nitrógeno a “escaparse”; eliminando los efectos de la nitruración, a decir, la dureza.

Existen diferentes procedimientos para realizar una nitruración. Dentro de los procedimientos se puede mencionar la nitruración iónica, líquida y gaseosa.” (López Tapia, 2011)

3.8.3 Borurado

“El borurado es un proceso termoquímico de endurecimiento superficial que puede ser aplicado a una gran variedad de materiales ferrosos, no ferrosos y cermets. El borurado consiste en incorporar boro en la superficie formando boruros de dureza elevada. Involucra calentar el material en un rango de 700 a 1000°C preferiblemente entre 1 a 12 horas en contacto con un medio de Boro en polvo sólido, pasta, líquido o gaseoso. Las piezas tratadas deberán templarse y revenirse después del tratamiento.

Durante el borurado, la difusión y la subsecuente absorción de átomos de boro en la red metálica de la superficie compuesta, se forman componentes intersticiales. La capa resultante puede consistir tanto de una sola fase o un sistema multifásico. La morfología, crecimiento y composición de los boruros puede estar influenciada por los elementos aleantes del material. Por otro lado, la microdureza de los boruros depende en gran parte de la composición y estructura de la capa y del material base. Las capas boruradas alcanzan valores muy altos de microdureza entre 1450 a 5000HV.” (López Tapia, 2011)

3.8.4 Carbonitrurado

“Es un proceso de endurecimiento en el que los aceros y otras aleaciones son sometidos a elevadas temperaturas (generalmente arriba del rango de transformación) en una atmósfera gaseosa de la cual absorbe carbono y nitrógeno simultáneamente, para después ser enfriadas a temperatura ambiente a la velocidad en que se deseen las propiedades básicas o el caso deseado.

El carbonitrurado es un proceso modificado del carburizado más que del nitrurado. La modificación consiste en introducir amoníaco a la atmósfera de gas carburante para añadir nitrógeno. Se manejan bajas temperaturas (704°C a 900°C) y por tiempos cortos en comparación con el carburizado. El objetivo primordial del carbonitrurado es impartir dureza y resistencia al desgaste con profundidades de capa de 0.076 a 0.76 mm de profundidad.” (López Tapia, 2011)

3.9 Cementación sólida.

“El tratamiento termoquímico de cementación sólida es una operación muy importante en el ciclo tecnológico de preparación de muchas piezas sometidas a esfuerzos, desgaste, fricción y tenacidad. Solamente con ayuda del tratamiento térmico se pueden obtener altas propiedades mecánicas del acero que garanticen un trabajo normal de los elementos modernos de las máquinas y herramientas.

La cementación sólida o cementación en caja, posee tres características importantes que controlan el proceso:

- * Cambio alotrópico del grafito a carbono.
- * Absorción de carbono en la superficie del acero.
- * Velocidad de difusión del carbono al interior del acero.

Los factores descritos anteriormente se ven favorecidos por catalizadores como el carbonato de bario y sodio, los cuales son parte del compuesto cementante.

La cementación sólida se efectúa en un recipiente metálico cerrado (comúnmente de acero inoxidable o un acero aleado), el cual contiene la pieza a cementar rodeada de la rebaba de hierro gris más el catalizador, que es adicionado en un rango de 10 a 20%. El tamaño de las partículas de la mezcla cementante rebaba de hierro gris-catalizador es variable, sin embargo, es común que se encuentren desde el tamiz 10 (2.0mm de abertura) al tamiz 40 (0.42mm de abertura) especificación ASTM E-11. Las temperaturas empleadas en el proceso oscilan entre 815 y 955°C.” (Luna Álvarez, 2014)

Los aceros cementados presentan diferentes microestructuras en la superficie y en el núcleo, este debido a la saturación de carbono que presenta la superficie, como se observa en la Figura 6, dependiendo de las condiciones empleadas para realizar el tratamiento termoquímico. Este cambio microestructural se da de la superficie del acero hacia el centro de este.

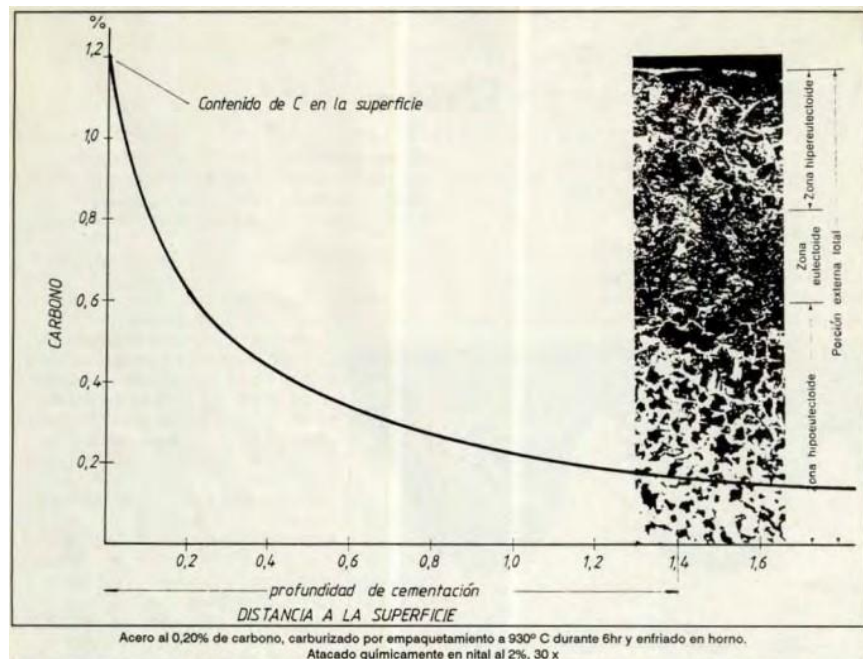


Figura 6.- Cambio microestructural de acero cementado en sólido dependiendo del contenido de carbono.

Referencia: Adaptada de Informador Técnico (p. 18) por LUIS FERNANDO GOMEZ

3.10 Temple y revenido a aceros cementados.

Después del tratamiento termoquímico de cementado, los aceros suelen ser sometidos a un tratamiento térmico de temple y revenido, esto dependiendo el uso o destino que tenga el acero. El temple y revenido al acero cementado se puede aplicar de diferentes maneras. Por ejemplo:

1.- Tratamiento térmico de cementación, temple directo desde la temperatura de cementación y posteriormente un revenido final, se conoce como “Cementación Convencional”. (Figura 7a).

2.- Tratamiento térmico de cementación con un enfriamiento lento dentro del horno, templar desde una temperatura entre Ac_1 Y Ac_3 y posteriormente un revenido final.

3.- Tratamiento térmico de cementación con un enfriamiento lento dentro del horno, templar a una temperatura ligeramente superior a Ac_3 y posteriormente realizar un revenido final. Este último proceso se conoce como “Cementación en Dos etapas” (figura 7b).

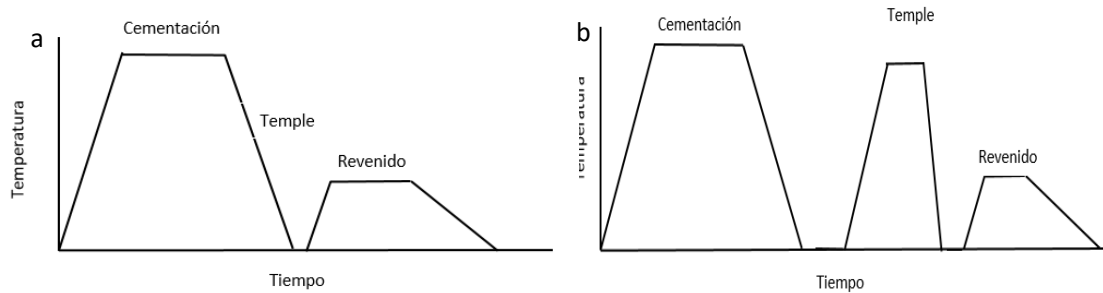


Figura 7-. representación de tratamiento termoquímico a) cementación convencional y b) cementación en dos etapas.

3.11 Aceros cementables

“Los aceros suelen tener un contenido en carbono del orden de 0.2%; por tanto, su microestructura característica sería ferrítica y perlítica, y tendría una buena tenacidad, pero su resistencia no sería muy elevada, en muchas aplicaciones se requiere que la zona de contacto sea capaz de soportar grandes cargas, para lo cual se cementa la superficie para conseguir concentraciones de carbono en la misma que habitualmente se encuentra entre el 0.8% y 1% de carbono. No obstante, también se usan aceros con una buena templabilidad para evitar gradientes grandes entre superficie y núcleo que pudieran generar microgrietas en la superficie.” (GONZÁLEZ VIVAS, 2016)

3.12 Acero Cold Rolled

Los aceros cold rolled son aceros con bajos contenidos de carbono, los cuales son conformados por estirado en frío o laminados en frío.

3.13 Formado de acero Cold Rolled

“De forma general el proceso de cold rolled consiste en estirar una varilla o barra de acero de forma longitudinal, para reducir el diámetro y mejorar el límite elástico. El proceso se lleva a cabo sin calentar previamente el metal y las barras se estiran de forma individual.

Para entender mejor el proceso, el cold rolled comienza desde la obtención de rollos de acero laminados o de barras rectas laminadas.

Estos rollos son colocados en una desenrolladora utilizando una grúa con ganchos para levantar de forma segura. El acero se filtra por rodillos preenderezadores, tanto horizontales como verticales, para después colocarlo en la chorreadora y quitar cualquier residuo de óxido.

El siguiente paso es introducirlo por una matriz y en una máquina trefiladora para que el acero se endurezca continuamente.” (Redacción Aceromafe, 2022)

4 Desarrollo experimental.

4.1 Recolección de cascaras de coco.

Acudir a empresas, negocios y/o mercados donde trabajen con coco para pedir las cascaras que son desechadas después de utilizar el fruto.

4.2 Obtención de endocarpio.

Una vez que se tiene la cáscara de coco, separar el endocarpio de toda la cáscara de coco, ya que la preparación del cementante solo será con el endocarpio, se necesitan entre 20 y 25 kilos.

4.3 Calcinación y trituration de cascara de coco.

Se introdujo a un horno tipo mufla de la marca Lindberg, como el que se muestra en la Figura 8, el endocarpio de coco a una temperatura de 1000°C x 1hr, para su deshidratación y calcinación. transcurrido el tiempo, sacar del horno y dejar enfriar.



Figura 8.- Horno tipo mufla.

Una vez calcinado el endocarpio de coco, se trituró con ayuda de un mortero y pistilo hasta obtener partículas finas del material calcinado, como se observa en la Figura 9.



Figura 9.- Endocarpio de coco calcinado y triturado.

4.4 Preparación del cementante.

Al polvo de endocarpio de coco obtenido, se agregó carbonato de calcio (20% del peso total de polvo de endocarpio de coco) el cual funcionara como sal activadora durante el proceso de cementación.

4.5 Obtención de probetas de acero Cold Rolled.

De una barra de acero Cold Rolled se cortaron 9 probetas de 1.5cm x 1.5cm, una probeta será la testigo y las 8 restantes fueron sometidas al tratamiento termoquímico de cementación sólida en dos etapas.

4.6 Tratamiento termoquímico de Cementación Solida.

En un contenedor cilíndrico de acero inoxidable 304, se agregó una cama del cementante preparado anteriormente y se colocaron 4 probetas sobre el cementante (separadas entre sí y de las paredes del contenedor), una vez que las probetas están sobre el cementante, se agregó más cementante de tal forma que se cubrieran las probetas. Se introdujo el recipiente al horno tipo mufla a una temperatura de 850°C. Después de 4 horas se retiró una de las probetas y se dejó enfriar al aire. Se retiraron las 3 probetas restantes después de 6, 8 y 10 horas respectivamente. Se repitió el procediendo anterior a una temperatura de 950°C.

4.7 Montaje de probetas

Se montaron las 9 probetas con ayuda de una montadora de probetas en caliente Buehler, como se observa en la Figura 10, esto es para facilitar el posterior desbaste y pulido de las probetas.



Figura 10.- Montadora de probetas en caliente Buehler

4.8 Análisis microestructural de aceros cementados.

Una vez que se montaron las probetas en baquelita y se identificaron (Figura 11), se realizó desbaste, pulido y ataque químico con nital al 2% a cada una de las probetas cementadas y a la probeta testigo para obtener micrografías en microscopio óptico metalográfico marca Olympus, como el mostrado en la Figura 12, a diferentes aumentos de la capa cementada y de la interface núcleo-capa cementada.



Figura 11.- Probetas, montadas en caliente en baquelita e identificadas.



Figura 12.- Microscopio óptico Olympus

4.9 Tratamiento térmico de temple a aceros cementados.

Se desmontaron las probetas de la baquelita y se introdujeron a un horno tipo mufla las 8 probetas cementadas (4 probetas cementadas a 850°C y 4 probetas cementadas 950°C), a 850°C x 1 hr, y posteriormente se realizó el enfriamiento en agua.

4.10 Tratamiento térmico de revenido a aceros templados.

Se introdujo a un horno tipo mufla las 8 probetas cementadas y templadas a 250°C x 1 hora y posteriormente se dejaron enfriar al aire libre.

4.11 Análisis microestructural de los aceros templados y revenidos.

Una vez más, se montaron las probetas en baquelita y se identificaron, se realizó desbaste, pulido y ataque químico con nital al 2% a cada una de las probetas cementadas, templadas y revenidas para obtener micrografías con ayuda de un microscopio óptico metalográfico a diferentes aumentos de la capa cementada y de la interfaz núcleo-capa cementada.

4.12 Perfil de durezas.

Se realizó un perfil de durezas de los aceros cementados, templados y revenidos, utilizando un durómetro Vickers marca Buehler modelo Tukon 1102, como el mostrado en la Figura 13. El número de indentaciones durante el mapeo dependerá del tamaño de la huella que deje el indentador sobre la superficie del acero y del espesor de la capa cementada.



Figura 13.- Durómetro Vickers

5 Resultados.

5.1 Microestructuras de los aceros cementados

Micrografías del acero cold Rolled, con tratamiento de cementación y enfriamiento al aire. Atacadas con nital al 2%.

5.1.1 Cementación a 850°C x 4 hrs.

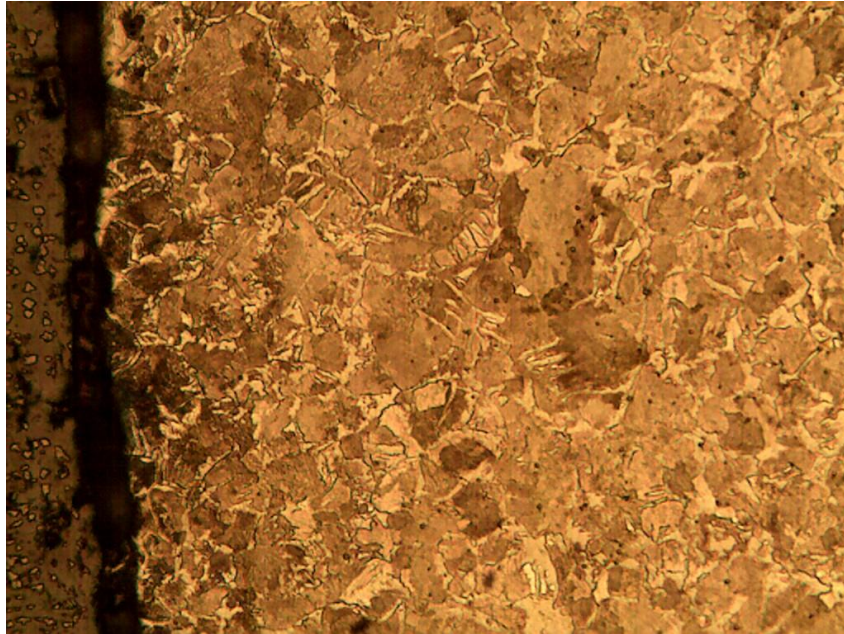


Figura 14.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 4hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe₃C precipitada en los límites de grano.

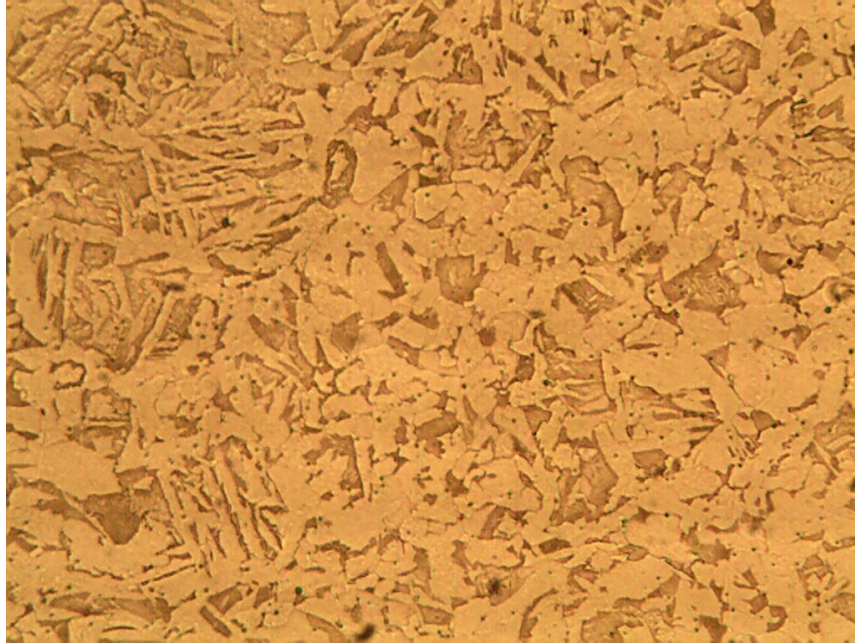


Figura 15.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 4hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstatten.

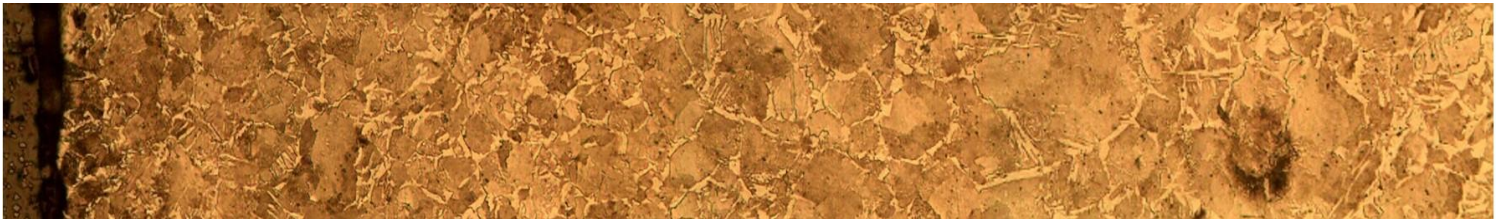


Figura 16.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled, tratado térmicamente a 850°C x 4hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20X.

5.1.2 Cementación a 850°C x 6 hrs.

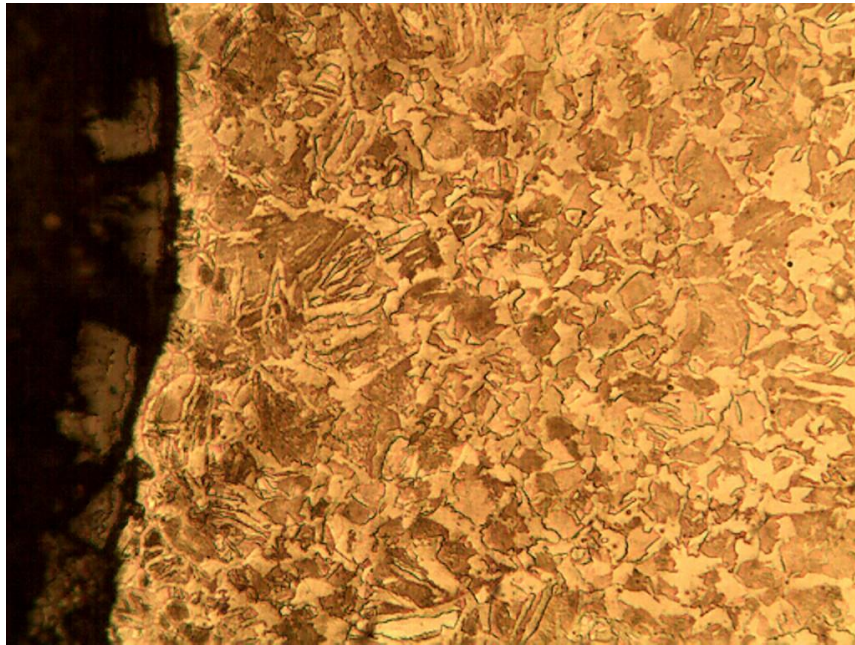


Figura 17.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 6hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe_3C precipitada en los límites de grano.

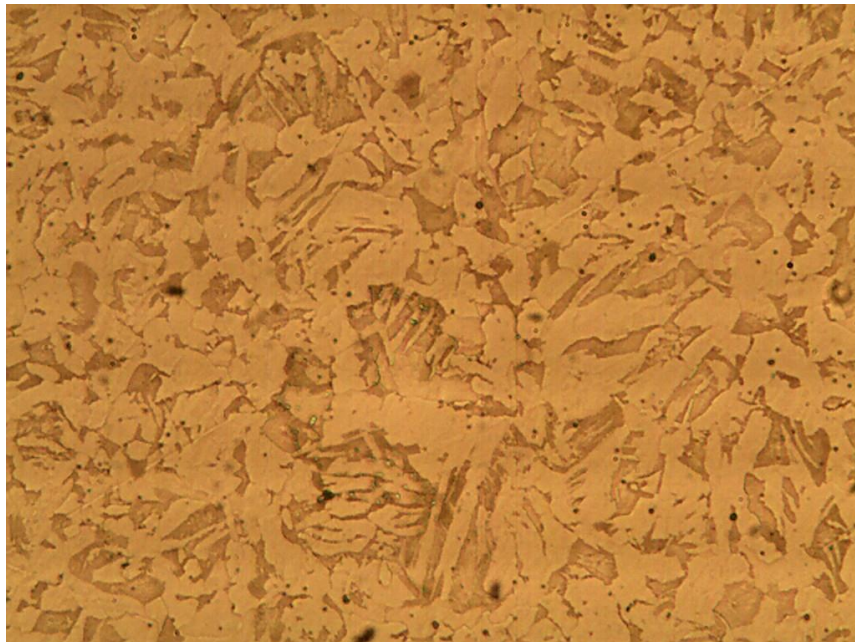


Figura 18.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 6hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstatten.



Figura 19.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 6hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.1.3 Cementación a 850°C x 8 horas



Figura 20.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 8hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe_3C precipitada en los límites de grano.

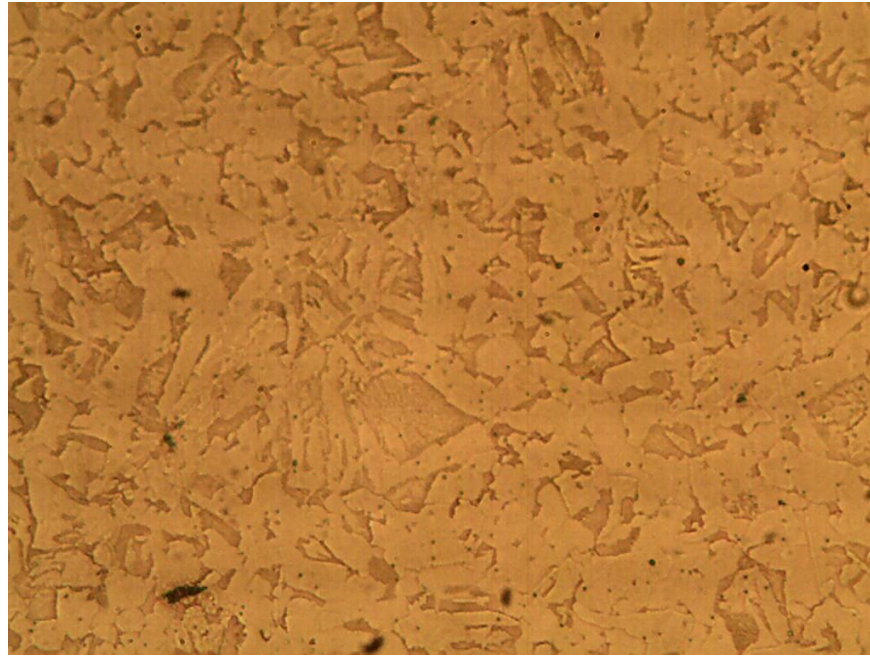


Figura 21.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 8hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstätten.



Figura 22.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 8hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.1.4 Cementación a 850°C x 10 horas

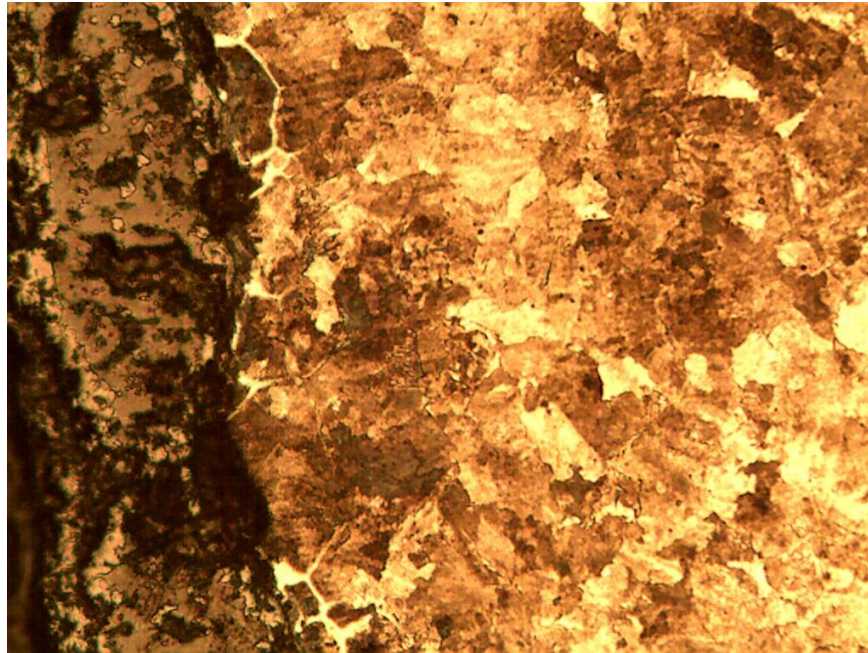


Figura 23.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 10hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe_3C precipitada en los límites de grano.



Figura 24.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 10hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstätten.

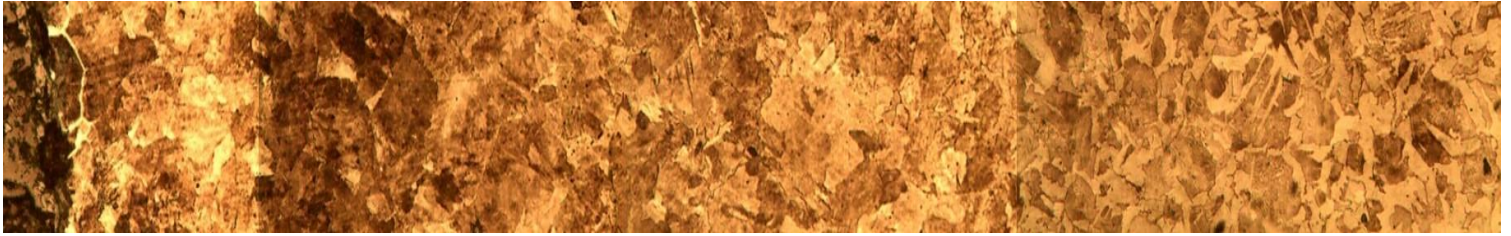


Figura 25.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 850°C x 10hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.1.5 Cementación a 950°C x 4 horas

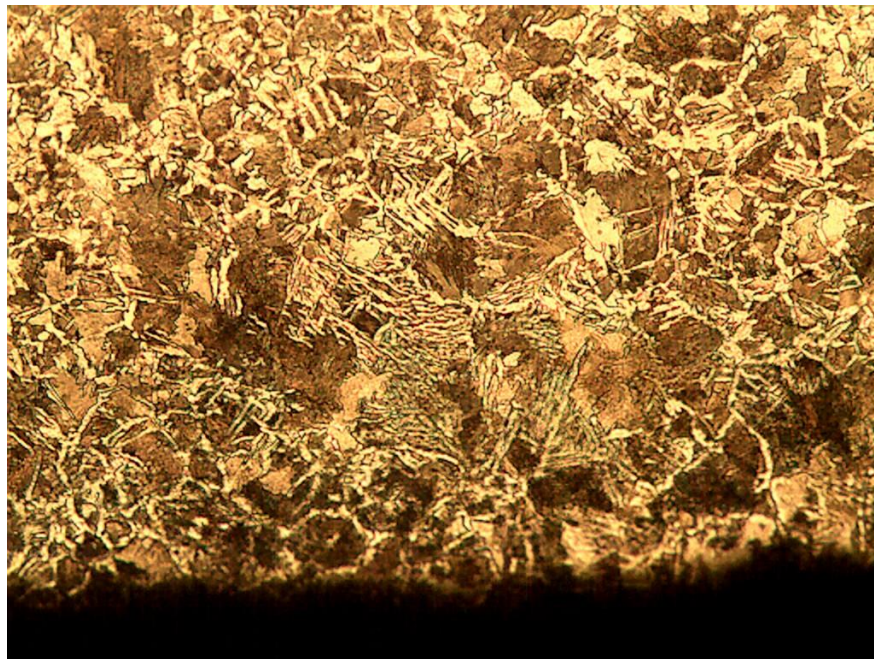


Figura 26.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 4hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe_3C precipitada en los límites de grano.

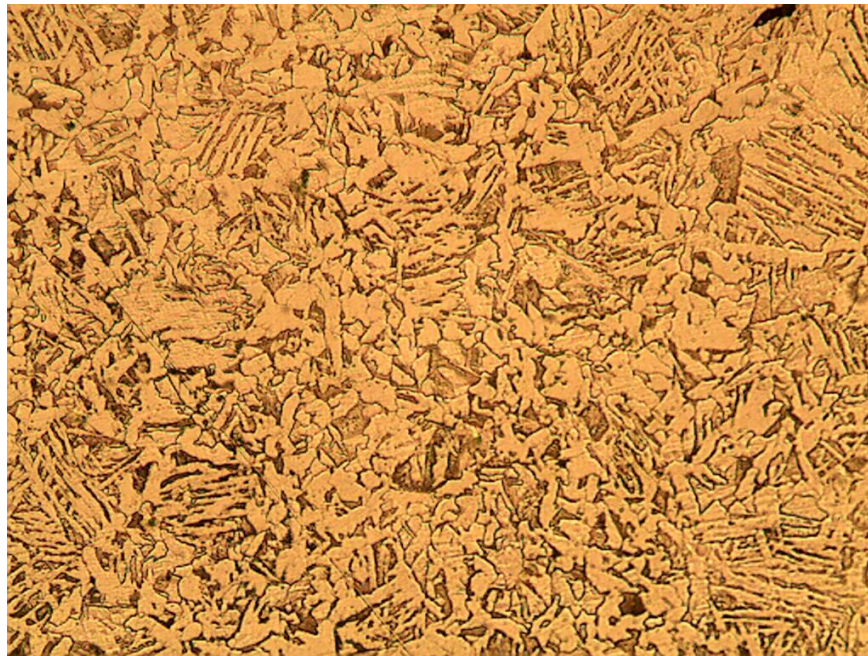


Figura 27.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 4hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstatten.



Figura 28.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 4hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.1.6 Cementación a 950°C x 6 horas

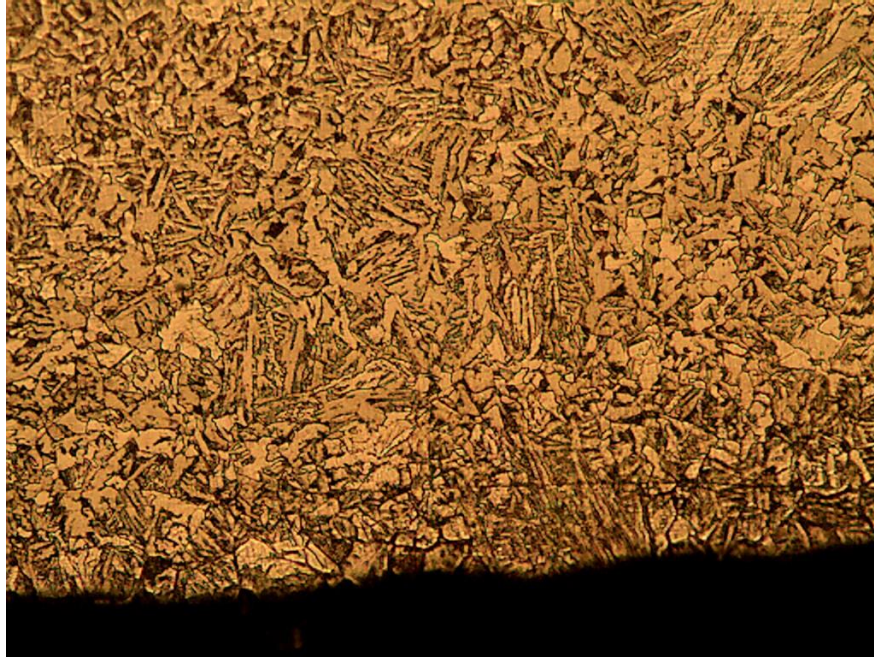


Figura 29.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 6hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 10X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstatten.



Figura 30.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 6hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 10X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstatten.



Figura 31.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 6hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 10x.

5.1.7 Cementación a 950°C por 8 horas

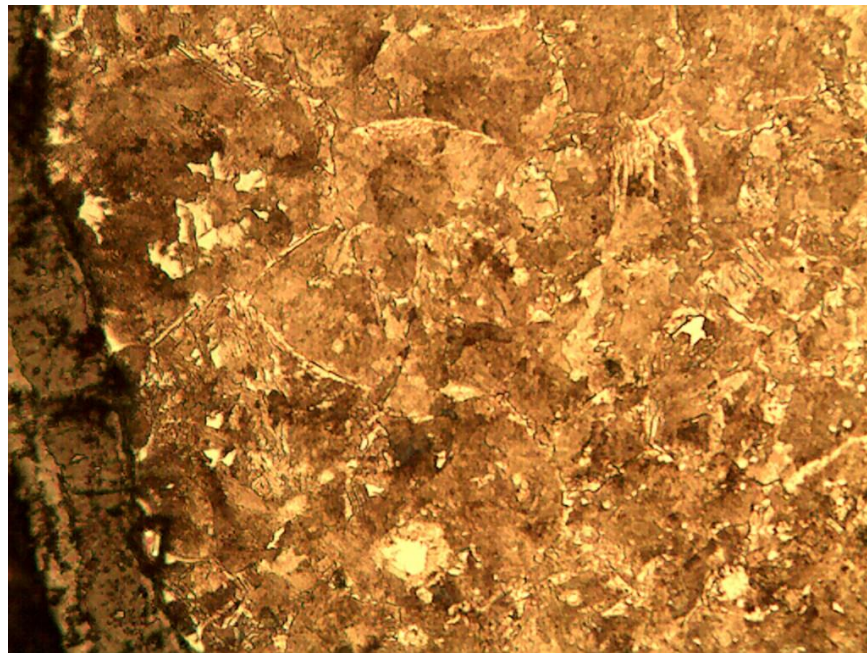


Figura 32.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 8hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe₃C precipitada en los límites de grano.

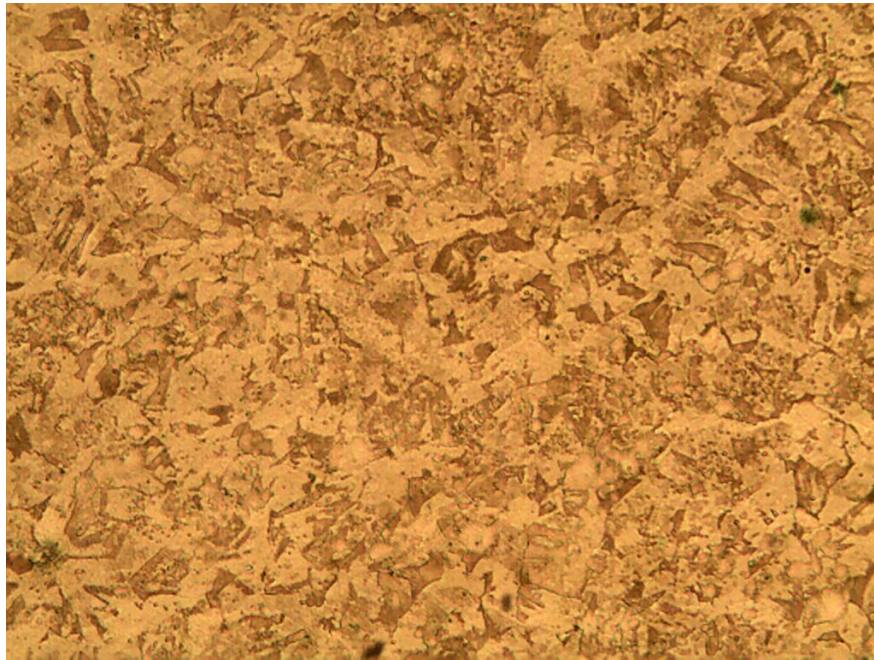


Figura 33.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 8hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita.

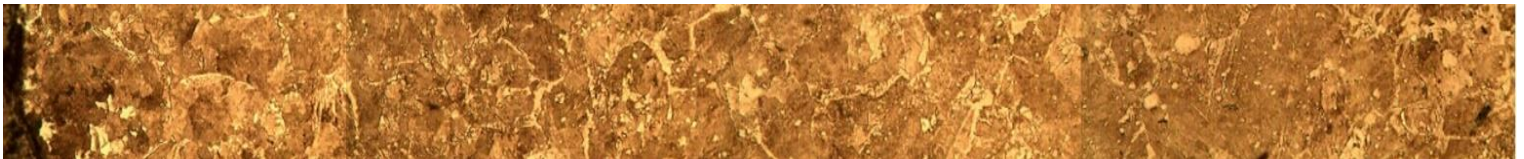


Figura 34.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 8hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.1.8 Cementación a 950°C por 10 horas

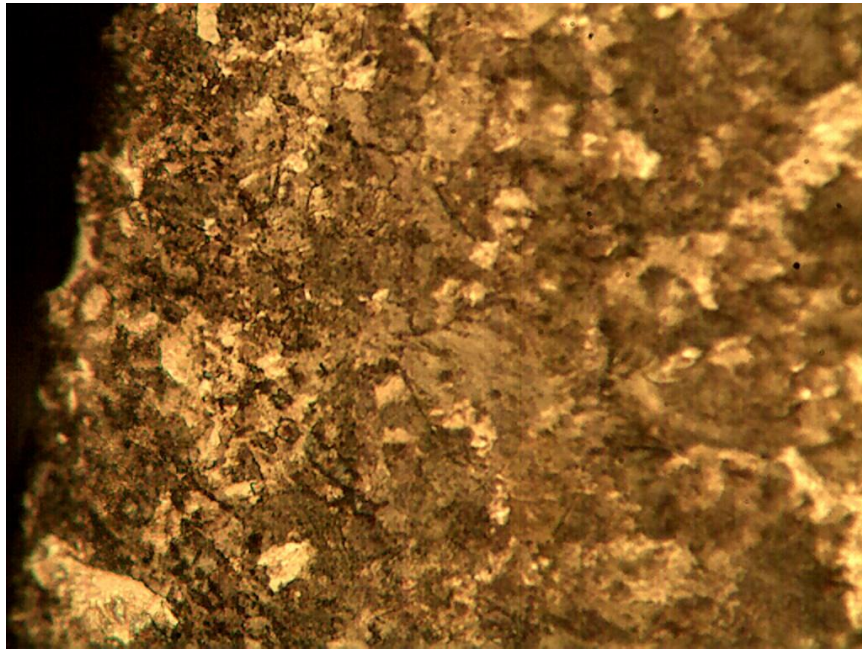


Figura 35.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 10hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos equiaxiales de perlita con Fe_3C precipitada en los límites de grano.

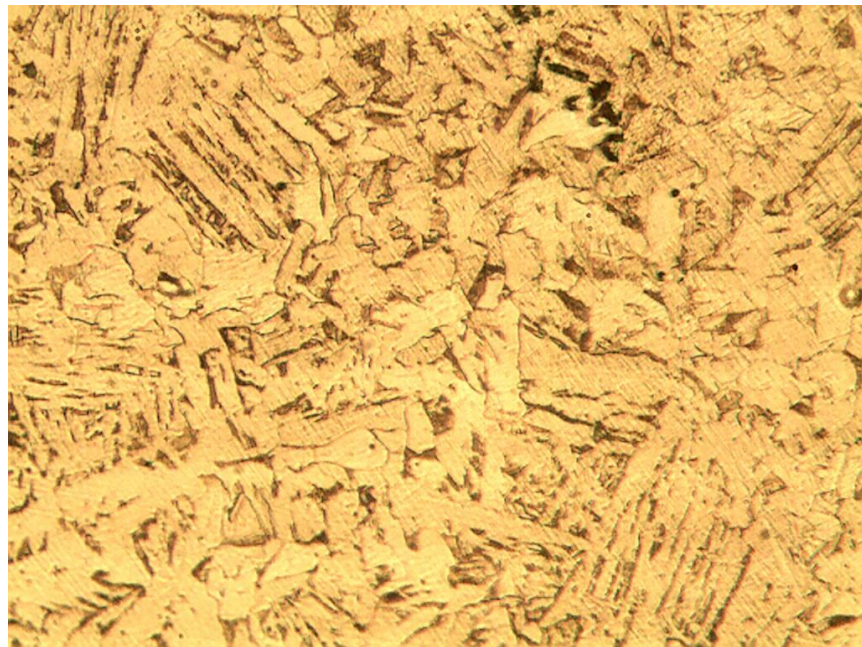


Figura 36.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 10hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2%, a 20X. Se observa la presencia de granos de perlita más ferrita tipo Widmanstatten.



Figura 37.- Micrografía de la capa-núcleo del acero Cold Rolled tratado térmicamente a 950°C x 10hrs, con enfriamiento al aire. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2 Micrografías de aceros cementados, templados y revenidos

Micrografías de acero cold Rolled después de ser cementados, templados a 850°C por 1 hora y revenidos a 250°C. Estas probetas fueron atacadas con nital al 2%.

5.2.1 Cementación a 850°C x 4 horas

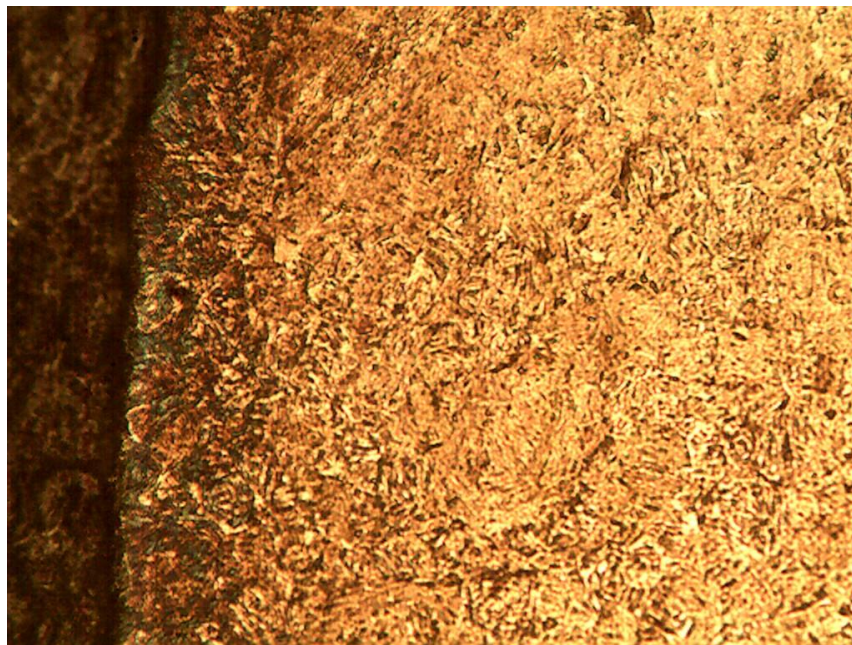


Figura 38.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 4hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.

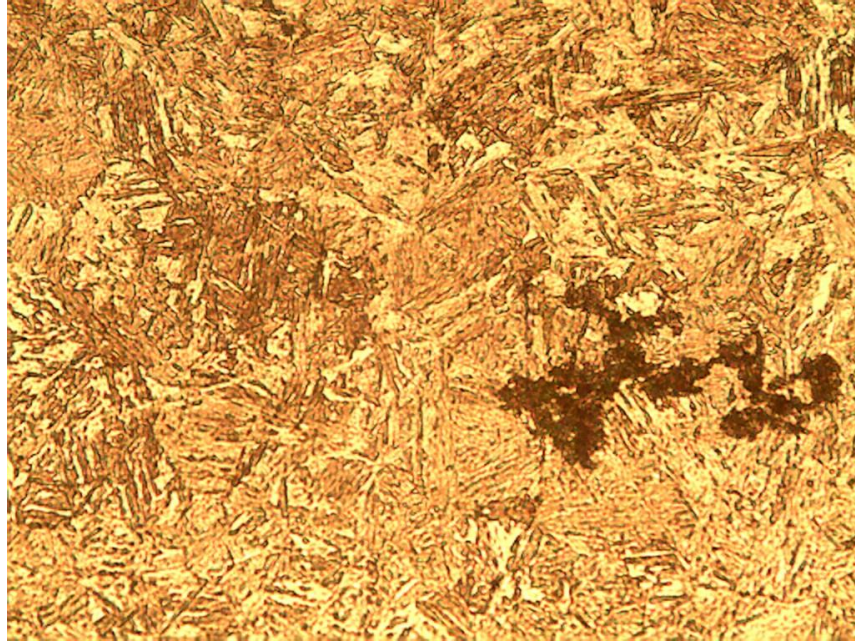


Figura 39.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 4hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita tipo widmanstatten mas perlita fina.



Figura 40.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 4hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.2 Cementación a 850°C x 6 horas

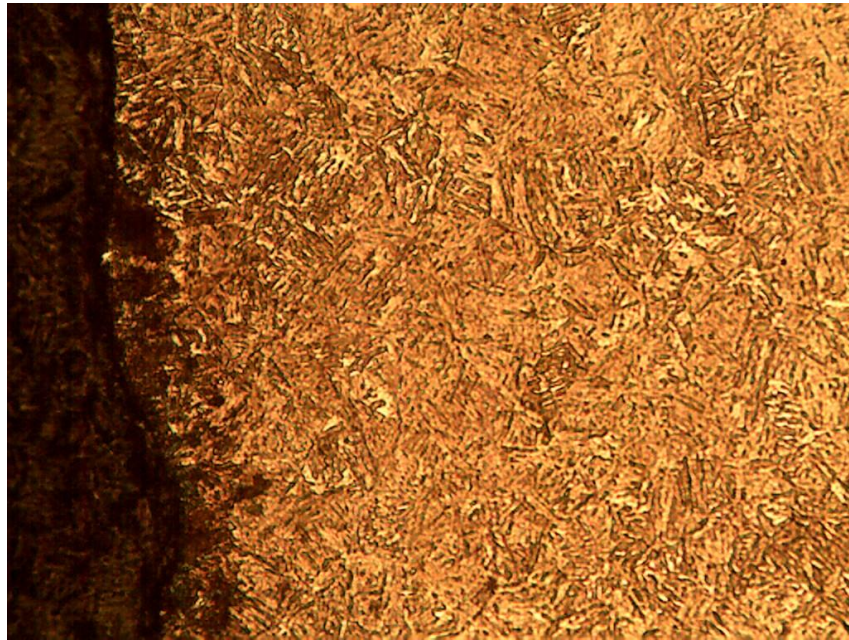


Figura 41.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 6hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.

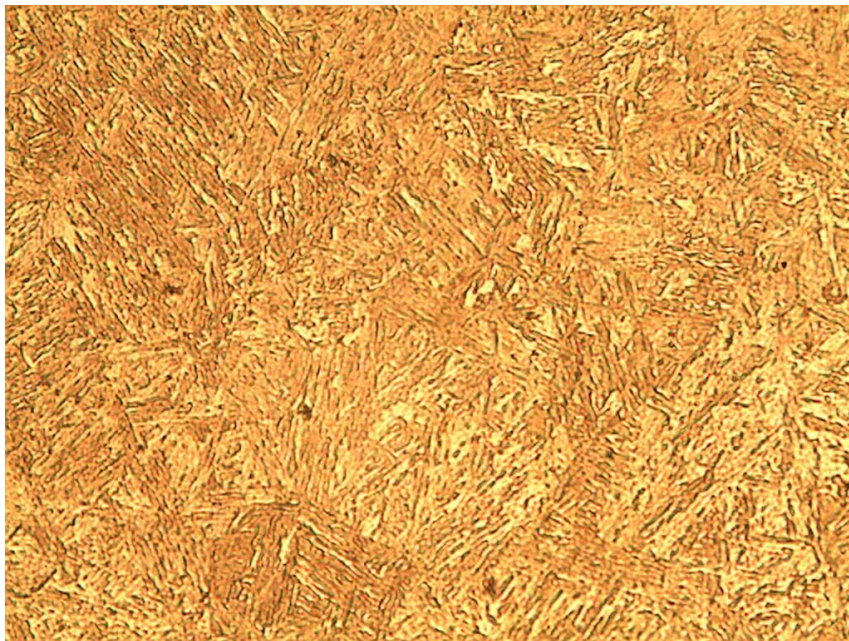


Figura 42.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 6hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita tipo widmanstatten mas perlita fina.



Figura 43.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 6hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.3 Cementación a 850°C x 8 horas

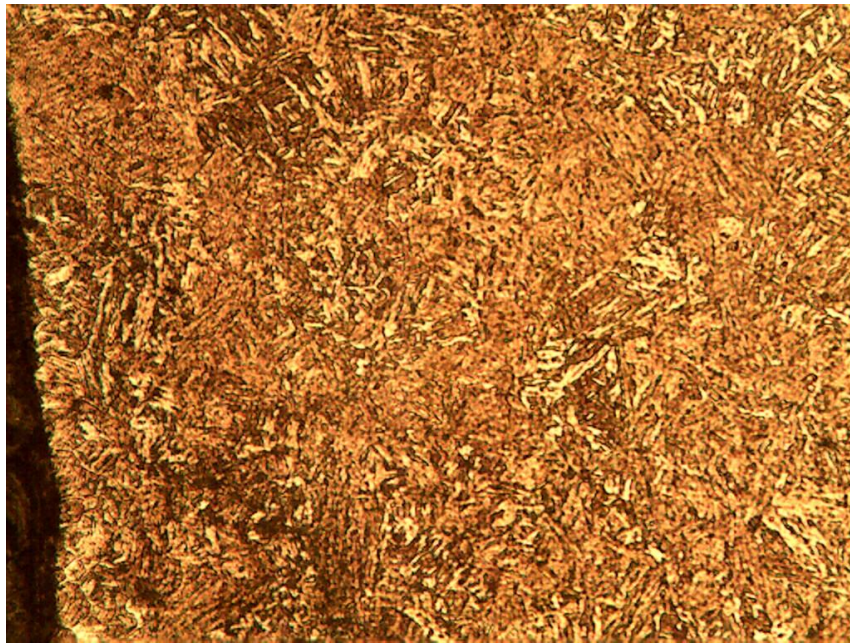


Figura 44.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 8hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.



Figura 45.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 8hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita tipo widmanstatten mas perlita fina.



Figura 46.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 8hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.4 Cementación a 850°C x 10 horas

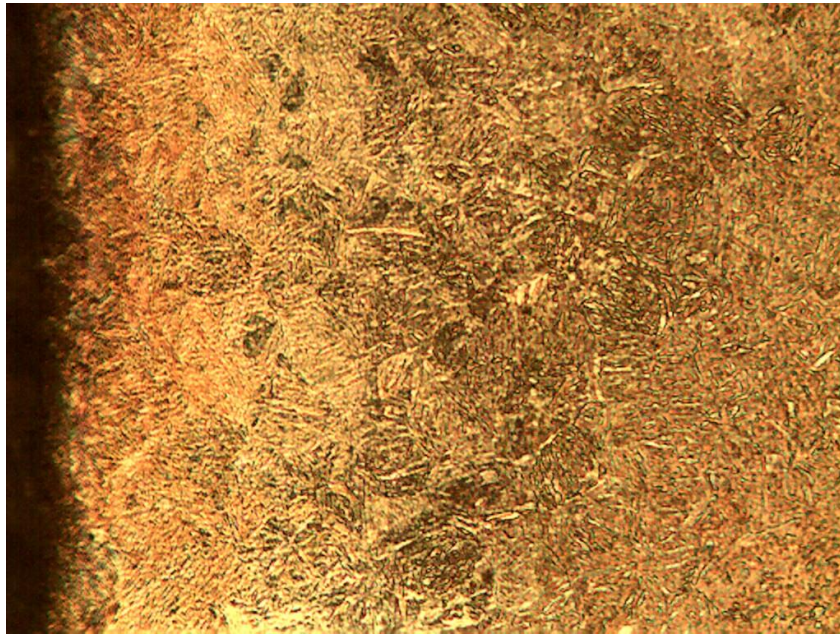


Figura 47.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 10hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.

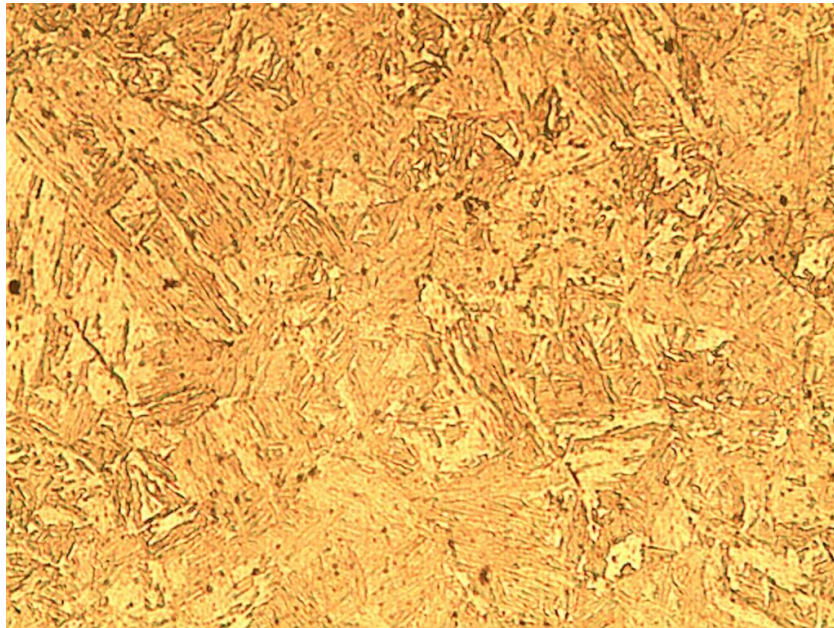


Figura 48.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 10hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita tipo widmanstatten mas perlita fina.



Figura 49.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 10hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.5 Cementación a 950°C x 4 horas

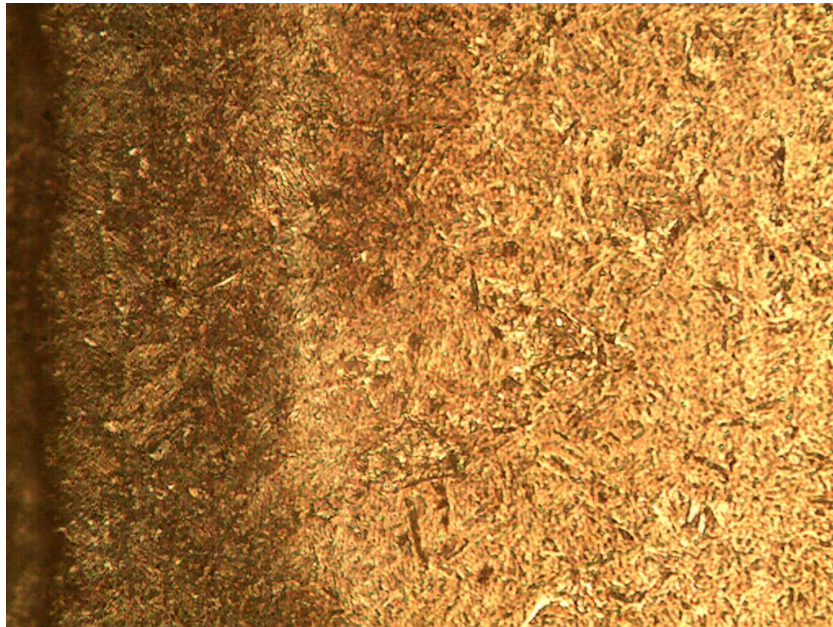


Figura 50.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 4hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.

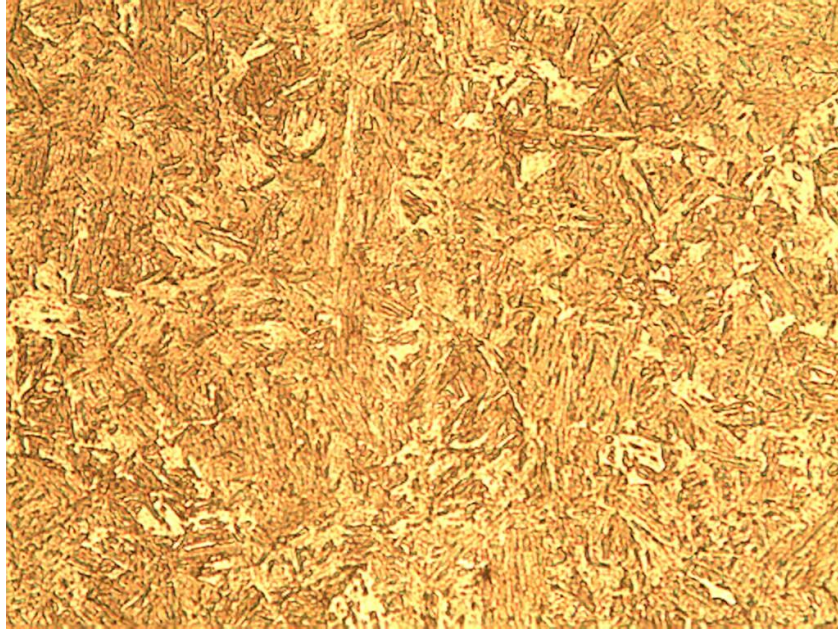


Figura 51.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 4hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita mas perlita fina.



Figura 52.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 4hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.6 Cementación a 950°C x 6 horas

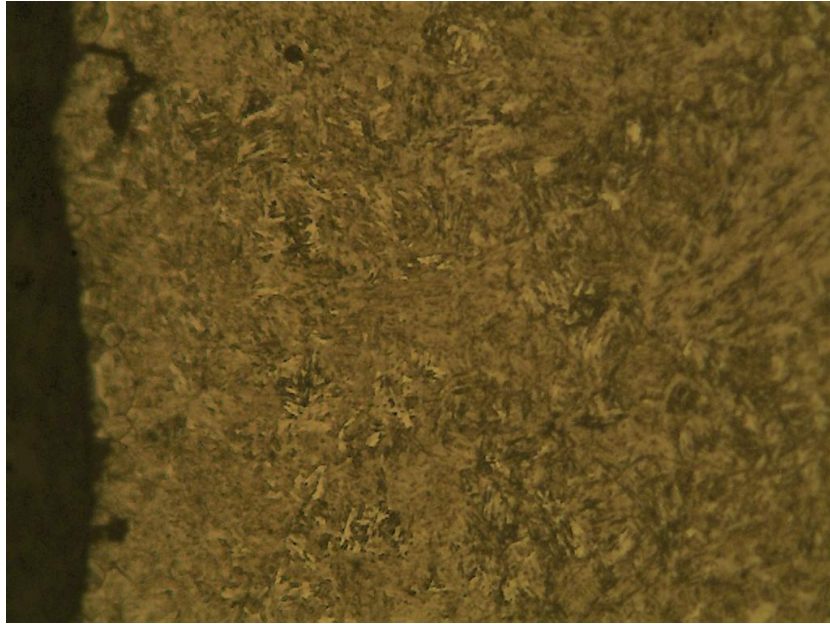


Figura 53.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 6hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita.

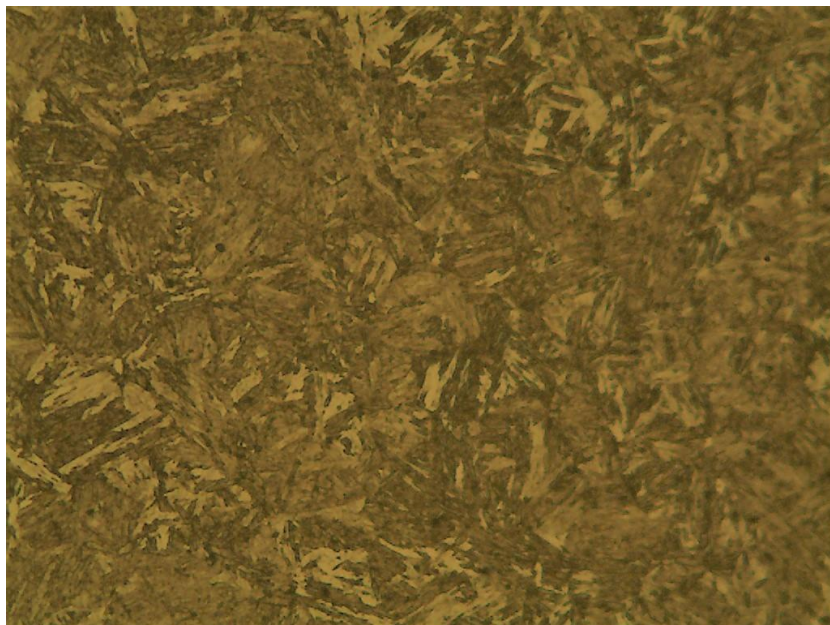


Figura 54.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 6hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita más perlita fina.

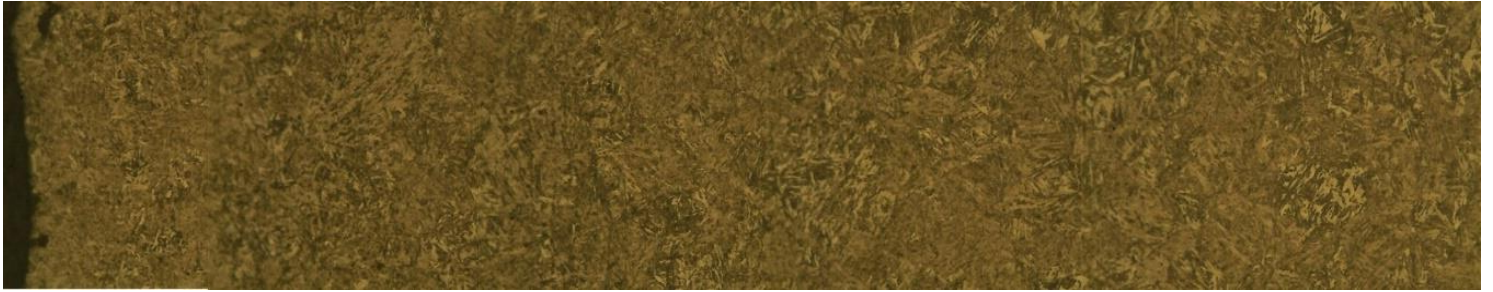


Figura 55.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 6hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.7 Cementación a 950°C x 8 horas

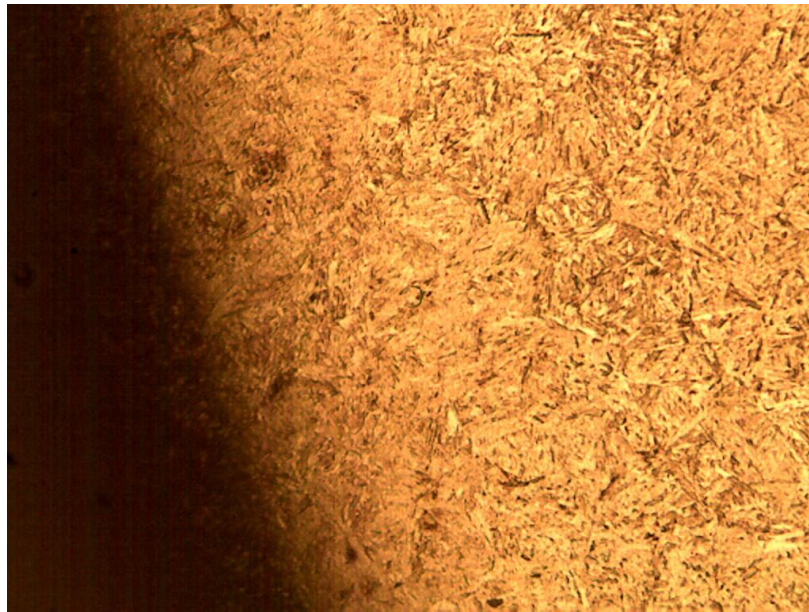


Figura 56.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 8hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.

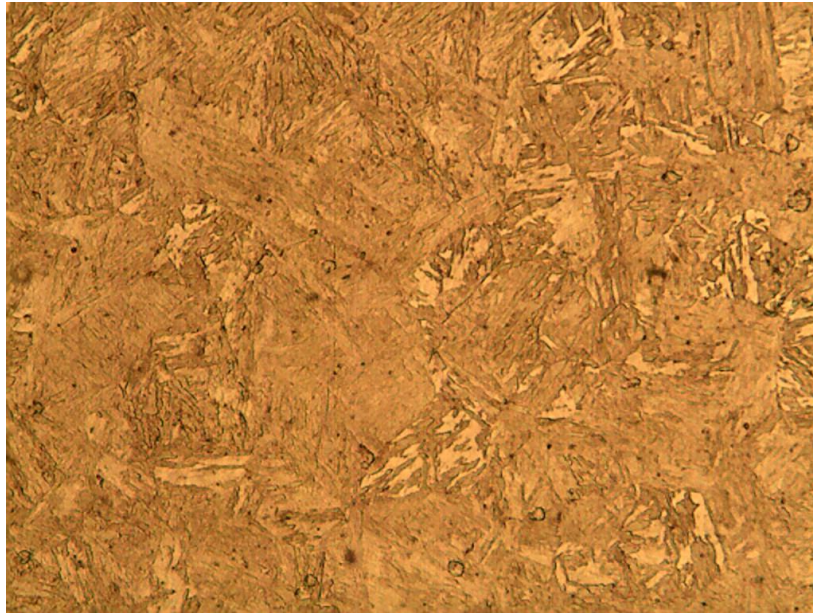


Figura 57.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 8hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita más perlita fina.



Figura 58.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 8hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.2.8 Cementación a 950°C x 10 horas

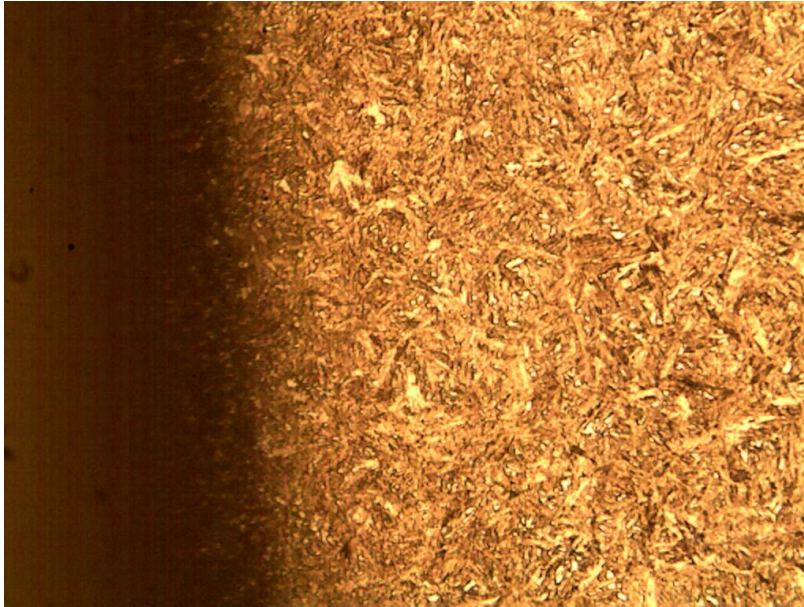


Figura 59.- Micrografía de capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 10hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de martensita acicular.

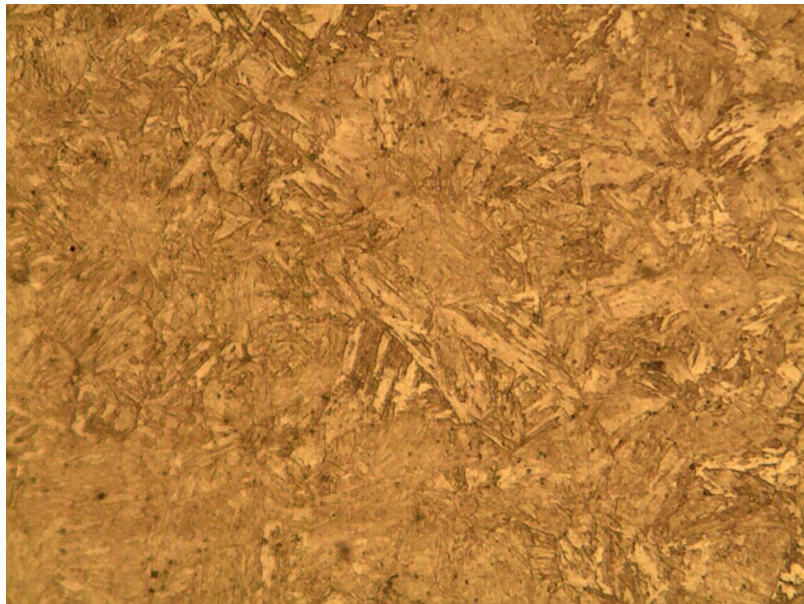


Figura 60.- Micrografía del núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 10hrs, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20X. Presencia de ferrita más perlita fina.

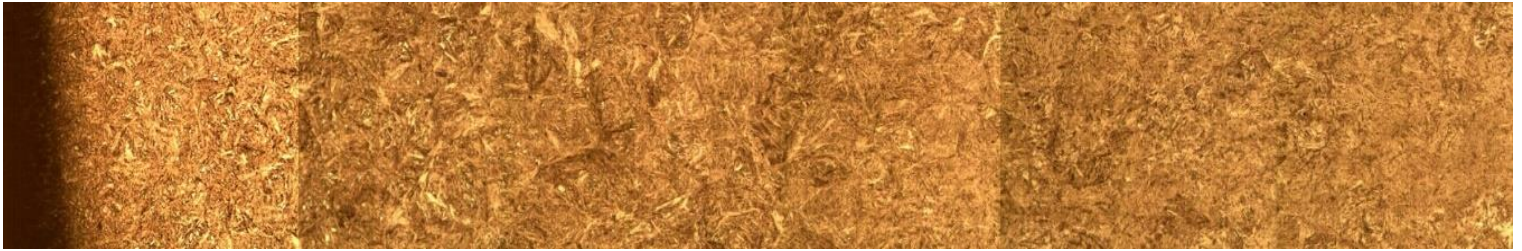


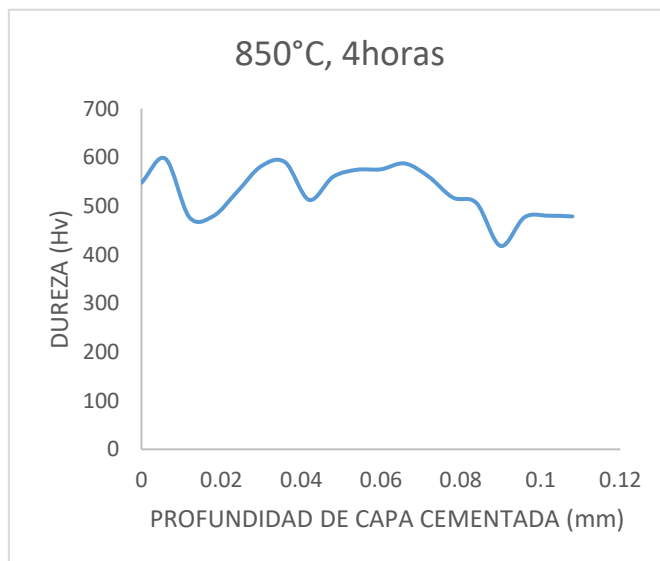
Figura 61.- Micrografía de capa-núcleo de acero Cold Rolled cementado a 950°C por 10 horas, templado y revenido. Atacado con nital al 2% a 20x.

5.3 Perfil de durezas de aceros templados y revenidos.

Los aceros cementados a 850°C y 950°C por 4, 6, 8, y 10 horas respectivamente, fueron templados a una temperatura de austenización de 850°C x 1 hr, enfriados en agua y posteriormente revenidos a 250°C x 1 hr.

5.3.1 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 4 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	52.2	547.8
0.006	55.1	597.2
0.012	47.4	476.8
0.018	47.6	479.2
0.024	51.6	529.3
0.03	54.3	581.7
0.036	54.7	589.9
0.042	50	512.6
0.048	53	559.8
0.054	53.9	574.4
0.06	53.9	575.3
0.066	54.6	587.3
0.072	53	560.2
0.078	50.3	517.5
0.084	49.5	505.8
0.09	42.5	417.9
0.096	47.4	476.8
0.102	47.7	480
0.108	47.6	478.5
CENTRO	47.4	473



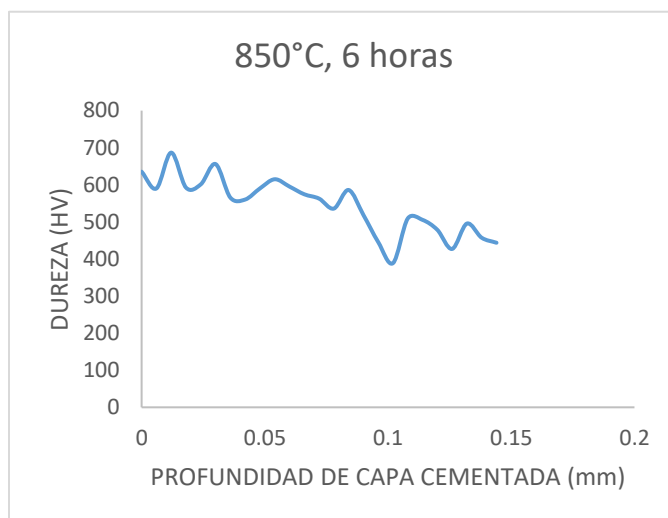
Grafica 1.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x4hrs.

Tabla 2.- Micro durezas en el acero Cold Rolled cementado a 850°C x 4 hrs.

5.3.2 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 6 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	57.1	635.4
0.006	54.7	590.1
0.012	59.6	686.7
0.018	54.9	592.5
0.024	55.7	601.1
0.03	58.1	655.9
0.036	53.3	565.5
0.042	52.8	560.2
0.048	54.7	590.1
0.054	56.1	614.9
0.06	54.3	595.2
0.066	52.4	574.4
0.072	53.2	562.8
0.078	51.5	535.8
0.084	54.5	585.9
0.09	50.4	518.7
0.096	45	445.6
0.102	39.7	388.7
0.108	49.7	509.1
0.114	49.5	505.4
0.12	47.6	478.5
0.126	43.4	427
0.132	48.8	495.5
0.138	45.9	457.2
0.144	44.8	443.7
CENTRO	45.6	453.4

Tabla 3.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado a 850°C x 6hrs.

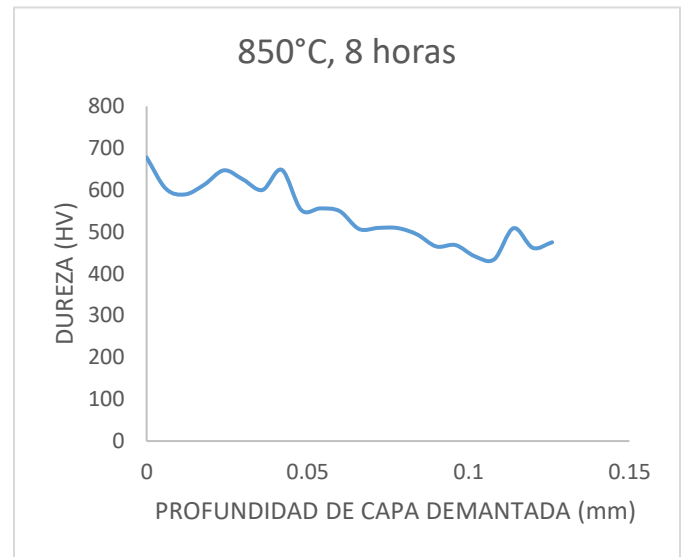


Grafica 2.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 6hrs.

5.3.3 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 8 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	59.2	677.9
0.006	55.4	603
0.012	54.7	589.6
0.018	56.9	613.3
0.024	57.7	647.1
0.03	56.6	625
0.036	55.3	600.1
0.042	57.8	648.2
0.048	52.5	552.5
0.054	52.8	556.1
0.06	52.3	549.5
0.066	49.6	506.9
0.072	49.8	509.5
0.078	49.7	509.1
0.084	48.7	494
0.09	46.6	465.1
0.096	46.8	468.4
0.102	44.6	441.6
0.108	44	434.4
0.114	49.7	508.8
0.12	46.3	461.8
0.126	47.3	475.1
CENTRO	49.3	501.7

Tabla 4.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado a 850°C x 8hrs.

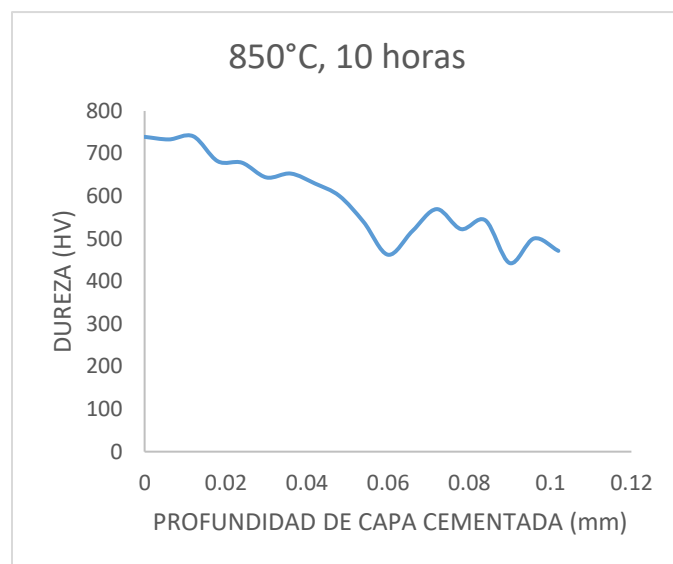


Gráfica 3.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 8hrs.

5.3.4 Perfil de durezas de acero cementado a 850°C por 10 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	61.8	739.2
0.006	61.3	733.2
0.012	61.8	740.5
0.018	59.4	682
0.024	59.2	678.5
0.03	57.5	643.9
0.036	58.1	653
0.042	56.8	629.6
0.048	55.3	600.6
0.054	51.7	539.1
0.06	46.3	462.4
0.066	50.3	517.9
0.072	53.6	569.5
0.078	50.6	522.6
0.084	52	543.2
0.09	44.7	442.8
0.096	49.2	500.6
0.102	47	471.4
0.108	61.8	739.2

Tabla 5.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado a 850°C x 10hrs.

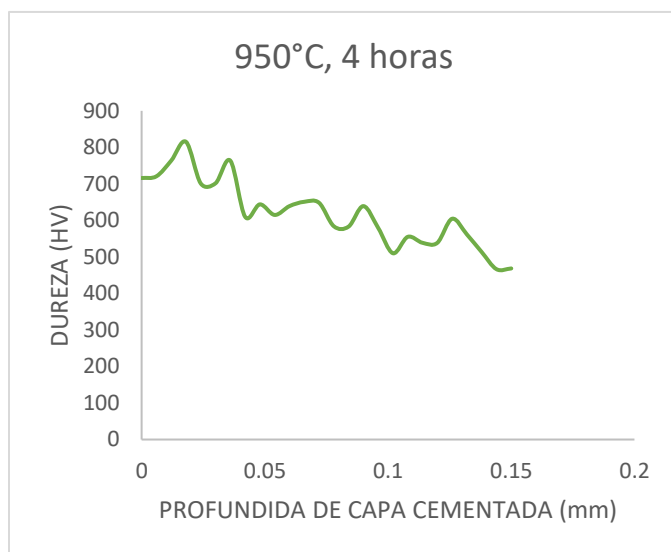


Gráfica 4.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 850°C x 10 hrs.

5.3.5 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 4 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	60.8	716
0.006	61.2	720.7
0.012	62.7	763.5
0.018	64.5	815.2
0.024	60.2	701.1
0.03	60.2	701.7
0.036	62.7	763.5
0.042	55.8	609.9
0.048	57.5	643.9
0.054	56.1	614.9
0.06	57.3	639.1
0.066	57.9	650.9
0.072	57.8	648.2
0.078	54.4	584
0.084	54.3	583.1
0.09	57.3	639.1
0.096	54.1	579.4
0.102	49.9	510
0.108	52.7	555
0.114	51.7	538.6
0.12	51.7	538.6
0.126	55.5	604.5
0.132	53.1	561.5
0.138	50	513.3
0.144	46.7	466.4
0.15	46.8	468.4
CENTRO	45.2	449

Tabla 6.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado por a 950°C x 4hrs.

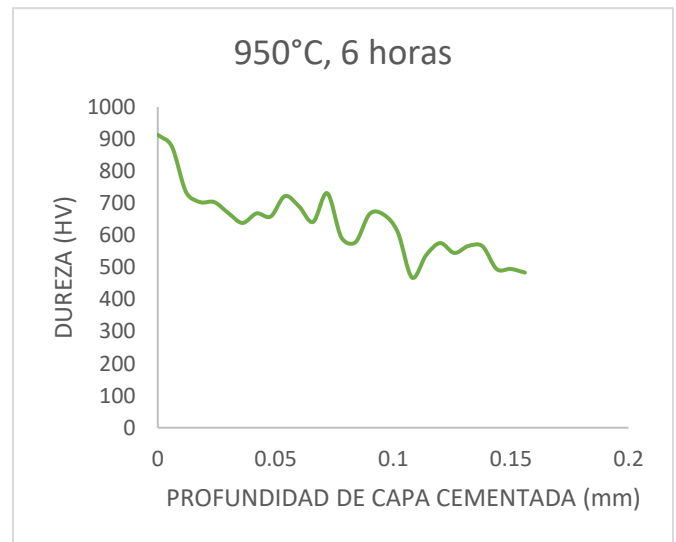


Gráfica 5.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 4hrs.

5.3.6 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 6 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	67.4	913.4
0.006	64.7	876.8
0.012	61.6	735
0.018	60.3	703.5
0.024	60.3	703.5
0.03	58.8	669.3
0.036	57.3	638.6
0.042	58.7	668.2
0.048	58.3	658.7
0.054	61.1	722.3
0.06	58.4	690.4
0.066	57.4	641.7
0.072	61.5	731.3
0.078	54.9	593.4
0.084	53.5	578.3
0.09	55.6	666.4
0.096	55.6	664.4
0.102	55.8	609.4
0.108	46.8	468.4
0.114	51.6	537.8
0.12	53.9	575.8
0.126	52.1	544.9
0.132	53.4	566.8
0.138	53.3	565.5
0.144	48.8	494.7
0.15	48.8	495.1
0.156	48	483.7
CENTRO	42.5	421.3

Tabla 7.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado a 950°C x 6hrs.

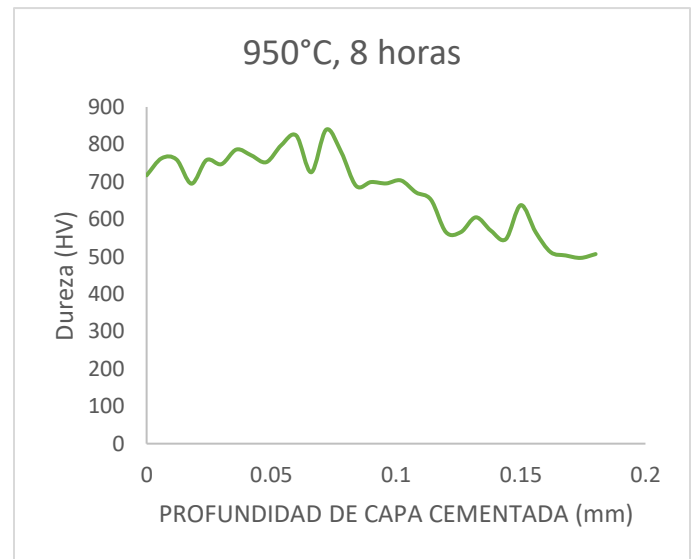


Gráfica 6.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 6hrs.

5.3.7 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 8 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	60.9	717.2
0.006	62.6	762.8
0.012	62.5	759.4
0.018	59.9	695
0.024	62.5	758
0.03	62	747.1
0.036	63.5	786.2
0.042	62.9	770.5
0.048	62.2	752.5
0.054	63.9	797.9
0.06	64.8	823.6
0.066	61.2	725.5
0.072	65.2	839.4
0.078	63.3	779.7
0.084	59.7	688.9
0.09	60.1	699.3
0.096	59.9	695.6
0.102	60.3	703.5
0.108	58.9	671.6
0.114	57.9	652
0.12	53.4	565.4
0.126	53.3	565.5
0.132	55.6	605
0.138	53.6	569.5
0.144	52.2	546.5
0.15	57.2	637.5
0.156	53.3	565
0.162	49.9	511.8
0.168	49.3	503.1
0.174	48.9	496.5
0.18	49.9	506.7
CENTRO	46.4	462.8

Tabla 8.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado a 950°C x 8hrs.

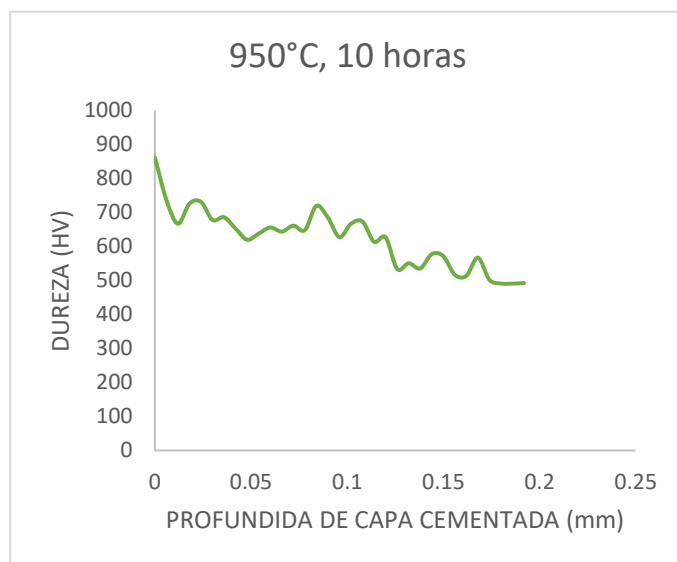


Gráfica 7.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 8hrs.

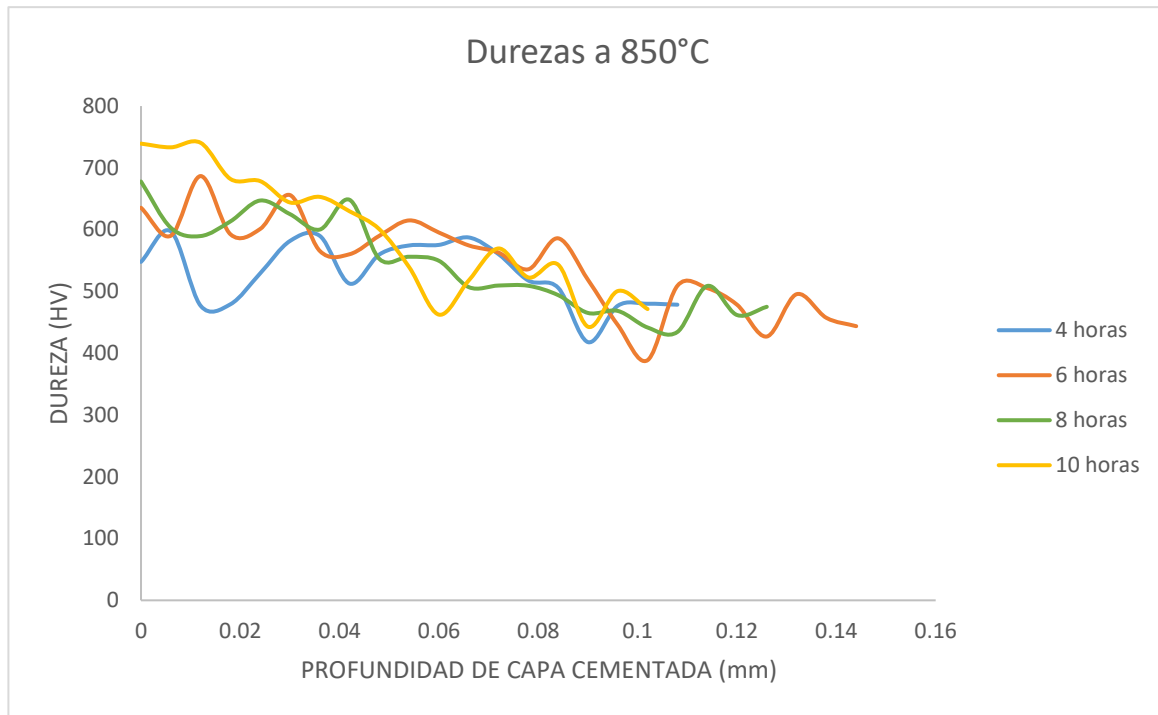
5.3.8 Perfil de durezas de acero cementado a 950°C por 10 horas, templado y revenido.

Espesor de capa cementada milímetros [mm]	Dureza HRC	Dureza HV
0	65.9	862.2
0.006	61.7	737.2
0.012	58.7	667
0.018	61.2	726.1
0.024	61.5	731.3
0.03	59.2	677.9
0.036	59.5	686.1
0.042	58	652.6
0.048	56.4	619.9
0.054	57.2	638
0.06	58.1	655.9
0.066	57.5	643.9
0.072	58.4	661.4
0.078	57.8	648.2
0.084	61	719.8
0.09	59.5	684.9
0.096	56.7	627.6
0.102	58.7	667
0.108	59	673.3
0.114	56	613.9
0.12	56.7	627.1
0.126	51.4	533.8
0.132	52.4	550.8
0.138	51.5	535.4
0.144	54	577.6
0.15	53.7	571.7
0.156	50.3	516.8
0.162	50	513.7
0.168	53.4	567.2
0.174	49.3	502
0.18	48.5	491.1
0.186	48.5	490.8
0.192	48.6	492.6
CENTRO	44.3	449

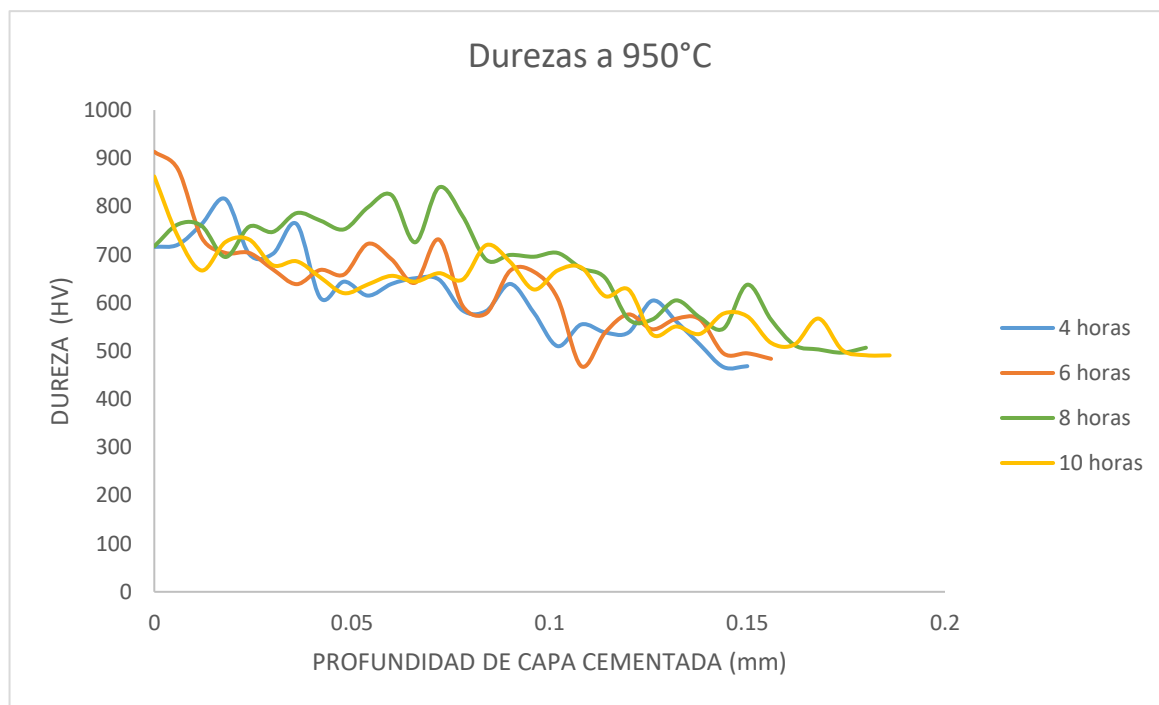
Tabla 9.- Micro durezas en acero Cold Rolled cementado a 950°C x 10hrs.



Grafica 8.- Relación dureza vs capa cementada de acero Cold Rolled cementado a 950°C x 10hrs.



Grafica 9.- durezas de aceros Cold Rolled cementado a 850°C a diferentes tiempos.



Grafica 10.- durezas de aceros Cold Rolled cementado a 950°C a diferentes tiempos.

6 Análisis de resultados

Las micrografías del acero cementado a 850°C sin tratamiento de temple (Figuras 14, 17, 20 y 23), presentan una microestructura en común en la capa cementada, se observa la presencia de cementita (Fe_3C) precipitada en los límites de grano de la perlita, mientras que en el centro del acero (Figuras 15, 18, 21 y 24) podemos observar una microestructura de ferrita acicular.

En las micrografías del acero cementado a 950°C sin tratamiento de temple, (Figura 26, 29, 32 y 35), se puede observar la presencia de cementita precipitada en las fronteras de grano de la perlita, cuyas microestructuras corresponden a una composición hipereutectoide.

En las figuras 27, 30, 33 y 36 podemos ver la presencia de ferrita acicular en el centro del acero.

La ferrita tipo Widmanstätten presente en los aceros tratados termoquímicamente a 950°C es mayor que la ferrita acicular presente en aceros tratados termoquímicamente a 850°C. Para obtener ferrita tipo Widmanstätten se requieren de dos condiciones las cuales son: un crecimiento de grano considerable para que se pueda formar esta fase y un enfriamiento relativamente rápido para la transformación de austenita a dicha ferrita ya que es un proceso que no se rige por la difusión. Esta ferrita tipo Widmanstätten es una fase no deseada en los aceros cementados ya que por su morfología funciona como concentrador de esfuerzos y fragiliza el acero.

En las figuras 16, 19, 22 y 25 se muestra un mapeo de los aceros tratados termoquímicamente a 850°C y las figuras 28, 31, 34 y 37 se muestra un mapeo de los aceros tratados termoquímicamente a 950°C, a ambas temperaturas y a las 4 tiempos de cementación (4, 6, 8 y 10 horas respectivamente) podemos observar el cambio microestructural de la superficie del acero hacia el centro lo que nos dice que hubo una difusión de carbono hacia el acero, con esto podemos asegurar que el proceso de cementación con endocarpio de coco calcinado como cementante se realizó de manera efectiva.

En la microestructura del acero cementado a las 2 temperaturas y a los 4 tiempos respectivamente podemos observar presencia de cementita en la capa cementada por lo que podemos asegurar que, bajo las condiciones de tratamiento termoquímico utilizadas, se tiene una capa saturada de carbono con un porcentaje de 0.8 o mayor.

En las micrografías 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59 de los aceros cementados, templados y revenidos a 850°C y 950°C a 4, 6, 8 y 10 horas respectivamente podemos observar la presencia de martensita acicular lo único que cambia es el espesor de la capa cementada lo cual se puede observar de mejor manera en las micrografías 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58 y 61.

En las micrografías 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60 de los aceros cementados, templados y revenidos a 850°C y 950°C a 4, 6, 8 y 10 horas respectivamente podemos observar la presencia de ferrita más perlita fina en el centro del acero.

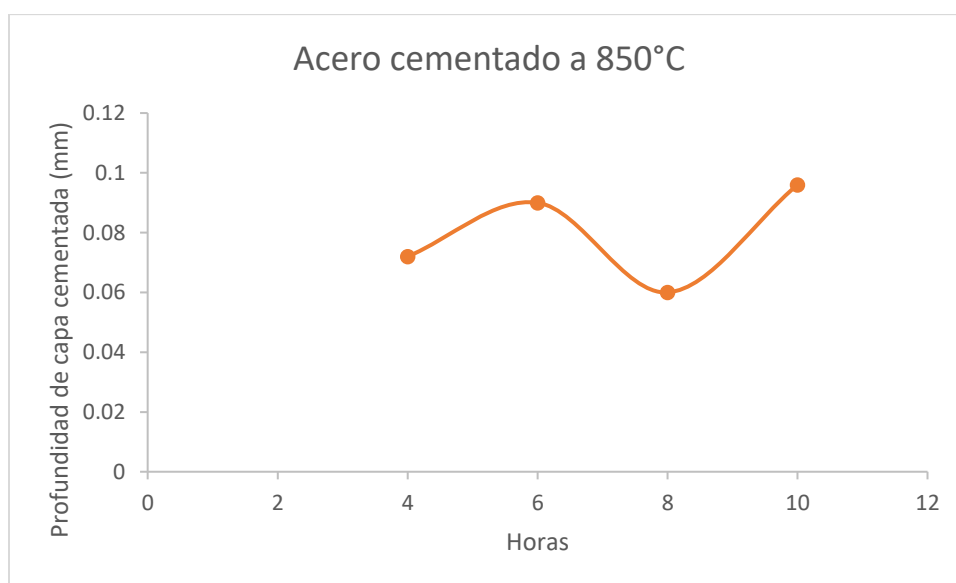
Realizando el perfil de durezas para cada acero (registrados en las tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9) podemos observar cómo es que la dureza va disminuyendo conforme avanzamos hacia el centro del acero llegando a tener hasta durezas de 50-65 RHC en la capa endurecida. Cabe destacar que las mediciones se hicieron cada 6 micras.

Al hacer la comparación de las durezas del acero cementado a 850°C y 950°C (grafica 9 y 10) podemos observar que la tendencia de las durezas es a disminuir y que la tendencia para cada temperatura es que, a mayor tiempo de cementación, mayor es el espesor de la capa cementada.

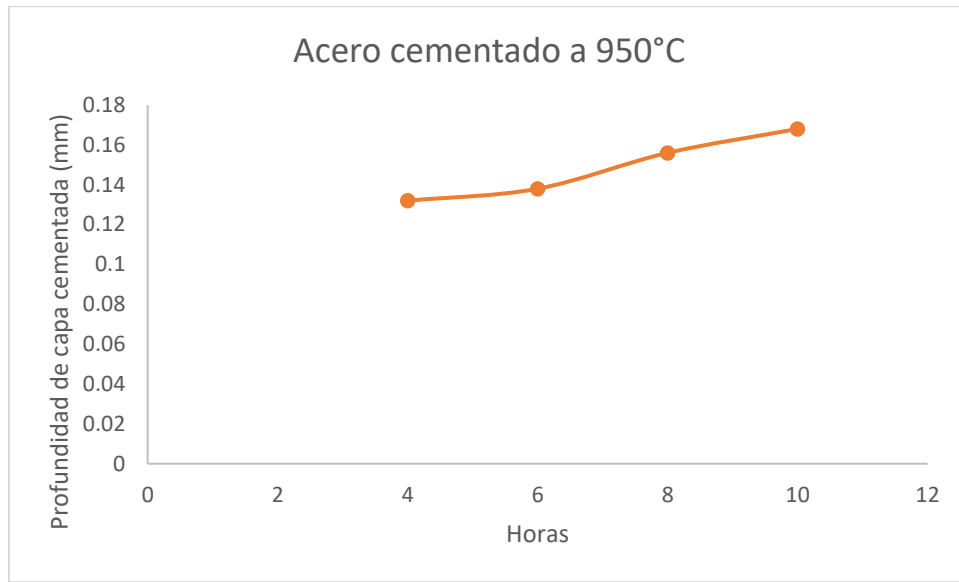
Mediante el perfil de durezas del acero para cada temperatura se logró obtener un aproximado de la profundidad de la capa cementada (capa efectiva), para cada tiempo, las cuales se registran en la tabla 10. Estos valores de profundidad de capa cementada se obtuvieron del perfil de durezas para cada acero registrado en las tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9, para obtener esta medición aproximada se consideró en la indentación donde la dureza bajaba drásticamente.

ACERO CEMENTADO	CAPA ENDURECIDA EFECTIVA (mm)
850°C, 4 horas	0.072
850°C, 6 horas	0.09
850°C, 8 horas	0.06
850°C, 10 horas	0.096
950°C, 4 horas	0.132
950°C, 6 horas	0.138
950°C, 8 horas	0.156
950°C, 10 horas	0.168

Tabla 10.- Registro de capa endurecida efectiva de aceros cementados, templados y revenidos.



Grafica 11.- espesor de capa para acero cementado a 850°C



Grafica 12.- espesor de capa para acero cementado a 950°C

La tabla 10 nos muestra la importancia de la temperatura durante el tratamiento de cementación sólida ya que claramente a mayor temperatura de cementación, mayor es la profundidad de la capa cementada. Esto lo observamos comparando los espesores de capa a diferentes temperaturas, pero a un mismo tiempo.

En la gráfica 11 podemos observar la profundidad de la capa cementada del acero cementado a 850°C por 8 horas no coincide con respecto a 4, 6 y 10 horas con la tendencia de aumentar el espesor de la capa a mayor tiempo de tratamiento termoquímico por lo que podemos deducir que ahí tenemos una mala medición de las durezas en la capa cementada o lo más probable es que se realizara un mal tratamiento termoquímico.

La grafica 12 muestra un comportamiento constante a 950°C, es decir, a mayor tiempo de cementación, mayor es la profundidad de la capa cementada.

7 Conclusiones

El endocarpio de coco calcinado resulta ser un cementante barato y eficaz ya que demostró tener grandes cantidades de carbono para llevar a cabo el proceso de difusión durante el tratamiento termoquímico de cementación sólida en dos etapas a un acero Cold Rolled.

La importancia de la cementación sólida en dos etapas es que, es un método el cual nos permite obtener un acero endurecido superficialmente con un núcleo dúctil y tenaz ya que al dejar enfriar el acero después de ser cementado para posteriormente austenizar y realizar el temple y revenido, no dejamos que la microestructura tenga las condiciones necesarias (crecimiento de grano) para la formación de ferrita tipo Widmanstatten la cual puede fragilizar el acero. En cambio, permitimos que se forme en el núcleo del acero ferrita más perlita fina y una capa endurecida de martensita acicular.

A diferencia de la cementación convencional o en una etapa que, por los tiempos largos de cementación sólida, permitimos un crecimiento de grano de la austenita la cual, al ser templada, transforma a ferrita tipo Widmanstatten que es una microestructura que fragiliza el acero ya que la morfología de esta fase funciona como concentrador de esfuerzos.

En cuanto a las 8 condiciones de cementación sólida planteadas en este proyecto (850°C y 950°C a 4, 6, 8 y 10 horas respectivamente), podemos decir que las 8 condiciones son viables ya que cumplen con el objetivo de tener un acero endurecido superficialmente con un núcleo dúctil y tenaz.

En cuanto a cuáles son las mejores condiciones para llevar a cabo este tratamiento termoquímico, no podemos elegir cual es la mejor ya que eso dependerá de las especificaciones que se requieran para la pieza tratada termoquímicamente. Lo que si podemos asegurar es que el endocarpio de coco es una alternativa más para realizar este tratamiento termoquímico bajo las condiciones propuestas al inicio de este proyecto.

8 Referencias bibliográficas

- [1]Herrera, O. C. (2016). Obtención de capas boruradas en aceros al carbono y aleados empleando bórax como medio de aporte., (pág. 6). Ciudad de México.
- [2]López, T. I. (Octubre de 2011). ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE UN ACERO 4140 SUJETO A TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS DE BORURADO, NITRURADO Y BORONITRURADO. 25-26. Atizapán de Zaragoza, Estado de México, México.
- [3]Luna, A. J. (2005). Cementación Solida de Aceros., (pág. 16). San Nicolás de los Garza, Nueva Leon, México.
- [4]MIRANDA, Q. G., & LAURA, C. R. (2016). CEMENTACION SOLIDA DE UN ACERO DE BAJO CARBONO EMPLEANDO CARBON VEGETAL Y CONCHAS MARINAS COMO ACTIVADOR ECOLOGICO., (págs. 2-3). AREQUIPA-PERU.
- [5]MONTAÑO, R. B. (2014). *EVALUACION DEL PROCESO DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DE UN ACERO SAE:1020 MEDIANTE CARBURIZACION SOLIDA Y POSTERIOR TEMPLE Y REVENIDO*. Arequipa, Peru.
- [6]Novakovic, R. (06 de Marzo de 2006). Nuevas Investigaciones. Santiago, Región Metropolitana, Chile.
- [7]Ortiz, D. M., Arturo, C. A., Morgado, G., Farfán, G. J., Hernández, P. J., & Cruz, B. J. (2020). Tratamientos termoquímicos. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 18.
- [8]Revista Digital Para Profesionales Enseñanza. (2011). Tratamientos Termoquímicos. *Temas Para La Educación*., 2.
- [9]Callister, Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). *CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES*. Barcelona: REVERTÉ.
- [10]García Romero, A. M., & Monasterio Guisasola, N. (2018). *INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I)*. Pais Vasco: Open Course Ware.
- [11]GONZÁLEZ VIVAS, J. A. (2016). *ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO AL UTILIZAR CARBONES VEGETALES REGIONALES EUCALIPTO Y SHIHUAHUACO COMO MATERIA PRIMA CEMENTANTE EN PIEZAS METÁLICAS FERROSAS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO*. HUANCAYO – PERÚ.
- [12]HUAMANI FLORES, E. W., & VIZCARDO HUAYNA, M. A. (2016). *COMPOSICION ÓPTIMA DE UN ACTIVADOR NATURAL PARA MEJORAR EL ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DE UN ACERO SAE: 1020*. Arequipa, Peru.

- [13]Luna Álvarez, J. S. (enero-marzo de 2014). Tratamiento termoquímico en un acero AISI 8620 mediante cementación solida utilizando rebaba de hierro gris. *Ciencia Acierta*.
- [14]MIRANDA QUICANA, U. G., & CRISTOBAL RAUL, L. C. (2016). *CEMENTACION SOLIDA DE UN ACERO DE BAJO CARBONO EMPLEANDO CARBON VEGETAL Y CONCHAS MARINAS COMO ACTIVADOR ECOLOGICO*. Arequipa, Peru.
- [15]Quille Ramos, R. A. (2016). *Estudio de efectos de hidrogenación cíclica en aleaciones metálicas con vistas a aplicaciones tecnológicas*. Buenos Aires.
- [16]Redacción Aceromafe. (09 de Junio de 2022). *Aceromafe*. Obtenido de <https://www.aceromafe.com/acero-cold-rolled/>

9 Authenticathe

Estudio microestructural de acero Cold Rolled Templado y Revenido después de ser cementado en sólido, utilizando endocarpio de coco calcinado como cementante.

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsa.edu.pe Internet	115 palabras — 1%
2	alicia.concytec.gob.pe Internet	98 palabras — 1%
3	tesis.ipn.mx Internet	96 palabras — < 1%
4	doku.pub Internet	72 palabras — < 1%
5	docplayer.es Internet	66 palabras — < 1%
6	cd.dgb.uanl.mx Internet	52 palabras — < 1%
7	repositorio.unibague.edu.co Internet	48 palabras — < 1%
8	repository.uaeh.edu.mx Internet	44 palabras — < 1%
9	rodolfo-novakovic.blogspot.com Internet	40 palabras — < 1%

10	www.itspozarica.edu.mx Internet	40 palabras — < 1 %
11	energia.azc.uam.mx Internet	36 palabras — < 1 %
12	depi.tlalnepantla.tecnm.mx Internet	34 palabras — < 1 %
13	www.sepi.esimez.ipn.mx Internet	34 palabras — < 1 %
14	zaloamati.azc.uam.mx Internet	33 palabras — < 1 %
15	cbi.azc.uam.mx Internet	32 palabras — < 1 %
16	tesis.ucsm.edu.pe Internet	25 palabras — < 1 %
17	es.scribd.com Internet	24 palabras — < 1 %
18	repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar Internet	19 palabras — < 1 %
19	moam.info Internet	18 palabras — < 1 %
20	holaplatoverde.blogspot.com Internet	17 palabras — < 1 %
21	docplayer.net Internet	16 palabras — < 1 %

22	docslide.us Internet	16 palabras — < 1%
23	repositorio.uncp.edu.pe Internet	16 palabras — < 1%
24	www.iit.upcomillas.es Internet	16 palabras — < 1%
25	repositorio.ucv.edu.pe Internet	15 palabras — < 1%
26	ocw.ehu.eus Internet	13 palabras — < 1%
27	www.cbi.azc.uam.mx Internet	13 palabras — < 1%
28	eprints.uanl.mx Internet	11 palabras — < 1%
29	estrucplan.com.ar Internet	11 palabras — < 1%
30	www.sba.org.br Internet	11 palabras — < 1%
31	cienciamateriales.files.wordpress.com Internet	10 palabras — < 1%
32	hagomez-electromecanica.blogspot.com Internet	10 palabras — < 1%
33	www-es.netapp.com Internet	9 palabras — < 1%
	www.cio.mx	

34	Internet	9 palabras — < 1 %
35	core.ac.uk Internet	8 palabras — < 1 %
36	dokumen.pub Internet	8 palabras — < 1 %
37	dspace.unitru.edu.pe Internet	8 palabras — < 1 %
38	pingpdf.com Internet	8 palabras — < 1 %
39	www.dspace.internacional.edu.ec:8080 Internet	8 palabras — < 1 %
40	www.scribd.com Internet	6 palabras — < 1 %
41	1library.co Internet	5 palabras — < 1 %
42	bdigital.unal.edu.co Internet	4 palabras — < 1 %

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

DESACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS

DESACTIVADO

Anexo 1

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

**Estudio microestructural de acero Cold Rolled Templado y
Revenido después de ser cementado en sólido, utilizando
endocarpio de coco calcinado como cementante.**

Licenciatura: Ingeniería Metalúrgica

Modalidad: Proyecto de Investigación.

Versión: Primera

Trimestre: 22-I

Alumno: Beristain Trejo Carlos Eduardo

Matricula: 2112045111

Correo Electrónico: al2112045111@azc.uam.mx

Firma

Asesor: Sandoval Pérez Francisco

Grado académico: Maestría

Firma

Co-asesor: Altamirano Torres Alejandro

Grado académico: Maestría

Firma

Declaratoria

En caso de que el Comité de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Metalúrgica apruebe la realización de la presente propuesta, otorgamos nuestra autorización para su publicación en la página de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.



Alumno:

Beristain Trejo Carlos Eduardo



Asesor:

Mtro. Sandoval Pérez Francisco



Co-Asesor

Mtro. Altamirano Torres Alejandro

Índice

Introducción	4
Antecedentes	5
Hipótesis	10
Justificación	10
Objetivos Generales	11
Objetivos Específicos.....	11
Desarrollo Experimental	12
Cronograma	14
Entregables	14
iThenticate	16
Bibliografía	16

Introducción

Actualmente se sabe que existen diferentes procesos para realizar endurecimientos superficiales en aceros, estos procesos son conocidos como tratamientos termoquímicos. Uno de los tratamientos termoquímicos más utilizados a nivel industrial es la cementación sólida que es utilizada para aceros bajo carbono.

La cementación sólida es un proceso en el que por medio de altas temperaturas (arriba de A_{c3}), el carbono difunde a través de la red cristalina del acero para formar una capa saturada de carbono la cual modificará las propiedades mecánicas del acero, se tendrá un acero con una alta dureza superficial.

Se conoce como “Cementación en dos etapas” al proceso de realizar un tratamiento termoquímico de cementado y dejar enfriar lentamente para después realizar tratamiento térmico de temple y revenido para obtener un núcleo tenaz y una superficie endurecida.

En los últimos años, la alta contaminación de medio ambiente ha obligado a buscar nuevas alternativas o procesos industriales más amigables con el planeta.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar experimentalmente si es posible que un acero Cold Rolled cementado en sólido pueda obtener una alta dureza superficial y un núcleo dúctil y tenaz por medio de un tratamiento térmico de temple y revenido. La variante o innovación de este proyecto es que el carbono utilizado como cementante es obtenido de la calcinación de endocarpio de coco.

Este proyecto no solo tendría un impacto innovador, sino que también económico y ambiental ya que al utilizar la basura del coco como cementante podemos disminuir la contaminación ocasionada por estas cáscaras, además de que podrían bajar los costos de producción del tratamiento termoquímico de cementación.

Antecedentes

Actualmente, ha crecido la demanda de avances tecnológicos e industriales en materiales metálicos para obtener características y propiedades específicas con el fin de cumplir con un servicio. Por ejemplo, el endurecimiento superficial de aceros mediante tratamientos termoquímicos.

Los aceros cold rolled son aceros con bajos contenidos de carbono, los cuales son conformados por estirado en frío o laminados en frío.

Tratamientos termoquímicos

“Los tratamientos termoquímicos son los procesos utilizados para modificar la estructura, forma y tamaño de los granos o transformar los constituyentes de los metales o aleaciones. Estos son tratamientos de recubrimiento superficial en los cuales interviene un elemento químico como Boro, Carbono y Nitrógeno que se producen por un proceso de difusión en la superficie de un material. Algunos de estos métodos son el cementado, nitrurado y borurado cianuración, carbonitruración y sulfinización.” (López, 2011)

- “Cementación (C). Aumenta la dureza superficial de una pieza de acero dulce, aumentando la concentración de carbono en la superficie. Se consigue teniendo en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. El tratamiento logra aumentar el contenido de carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temple y revenidos, una gran dureza superficial, resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.
- Nitruración (N). Al igual que la cementación, aumenta la dureza superficial, aunque lo hace en mayor medida, incorporando nitrógeno en la composición de la superficie de la pieza. Se logra calentando el acero a temperaturas comprendidas entre 400°C y 525 °C aproximadamente, dentro de una corriente de gas amoníaco, más nitrógeno.” (Revista Digital Para Profesionales Enseñanza., 2011)
- Borurado (B). “Es el recubrimiento de una capa superficial del acero con boro, adquiriendo una alta dureza, (unidades Vickers) en el rango de 1800 a 2000 HV, (lo que está ligado, en el caso de los aceros, a la formación de boruros FeB y/o Fe₂B), además, es resistente al desgaste y a la corrosión en distintos medios.” (Herrera, 2016)
- “Cianuración (C+N). Endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero. Se utilizan baños con cianuro, carbonato y cianato sódico. Se aplican entre 750°C y 950°C aproximadamente.
- Carbonitruración (C+N). Al igual que la cianuración, introduce carbono y nitrógeno en una capa superficial, pero con hidrocarburos como metano, etano o propano, amoníaco (NH₃) y monóxido de carbono (CO). En el proceso se requieren temperaturas de 650 a 850°C aproximadamente, y es necesario realizar un temple y un revenido posterior.
- Sulfinización (S+N+C). Aumenta la resistencia al desgaste por acción del azufre. El azufre se incorpora al metal por calentamiento, a la temperatura de 565°C aproximadamente, en un baño de sales.” (Revista Digital Para Profesionales Enseñanza., 2011)

Existen tres enfoques claramente diferentes para los diversos métodos de endurecimiento de superficies

- “Métodos de difusión termoquímica: Son aquellos que modifican la composición química de la superficie con especies endurecedoras como carbono, nitrógeno y boro. Los métodos de difusión permiten el endurecimiento efectivo de toda la superficie de una pieza y se utilizan generalmente cuando un gran número de piezas se van a endurecer superficialmente. Los tratamientos más comunes en la industria son carburización, nitruración, carbonitruración y borurización.
- Métodos energéticos o térmicos aplicados: Son los que no modifican la composición química de la superficie, sino que mejoran sus propiedades alterando la metalurgia superficial, es decir, producen una superficie templada dura sin especies de aleación adicionales.
- Recubrimientos de superficie o métodos de modificación de superficies: Son aquellos que impliquen la acumulación intencional de una nueva capa sobre el sustrato de acero o, en el caso de la implantación iónica, alteren la composición química del sub-superficial.” (Ortiz, y otros, 2020)

Cementación en aceros

“La cementación consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego, se templan las piezas y quedan con gran dureza superficial. Se puede emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos, oscilando la duración de la cementación de 6 a 10 horas cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 horas cuando se trata de sales o cementantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando cementación gaseosa. Se pueden emplear aceros aleados y sin aleación, de bajo contenido en carbono, generalmente de 0.08 a 0.25 %de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0.40 %de C. La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850 y 1000 °C, siendo las temperaturas próximas a 900 °C las más utilizadas.” (MONTAÑO, 2014)

Cementación solida

“Es el procedimiento más antiguo utilizado para enriquecer con carbono la superficie del acero. En este caso, las piezas, después de su elaboración preliminar, se limpian quitándoles la herrumbre, la suciedad y la grasa. Se utilizan diversos materiales para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación que se mezclan con carbonatos de bario, calcio y sodio. El carbón sólo, no se emplea porque con él no se suelen conseguir concentración de carbono en la periferia del acero, superiores a 0.65% de C, mezclándola a cambio con carbonatos alcalinos o alcalino-térreos, se alcanza hasta 1.20% de carbono. Durante mucho tiempo se creyó que la cementación de los aceros de muy bajo carbono se verificaba, al penetrar el carbono del cementante sólido a través de la superficie del acero y difundirse luego hacia el interior. Pero se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero, se verifica siempre por medio de los gases que se desprenden al calentarse las mezclas cementantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el monóxido de carbono el principal agente carburante.” (MONTAÑO, 2014)

Los aceros empleados para el tratamiento termoquímico de cementación son los aceros con bajos contenidos de carbono, por ejemplo, los aceros Cool Rolled.

Después del tratamiento termoquímico de cementado, los aceros suelen ser sometidos a un tratamiento térmico de temple revenido, esto dependiendo el uso o destino que tenga el acero. El temple y revenido al acero cementado se puede aplicar de diferentes maneras. Por ejemplo:

1.- Tratamiento térmico de cementación, temple directo desde la temperatura de cementación y posteriormente un revenido final, se conoce como “Cementación Convencional”. (figura 1).

2.- Tratamiento térmico de cementación con un enfriamiento lento dentro del horno, templar desde una temperatura entre A_{c1} y A_{c3} y posteriormente un revenido final.

3.- Tratamiento térmico de cementación con un enfriamiento lento dentro del horno, templar a una temperatura ligeramente superior a A_{c3} y posteriormente realizar un revenido final. Este último proceso se conoce como “Cementación En dos Etapas” (Figura2).

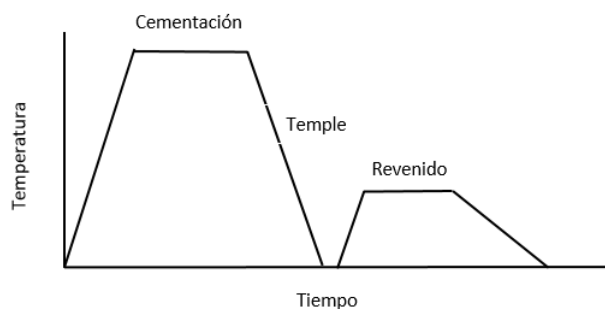


Figura 1 - Diagrama de cementación convencional.

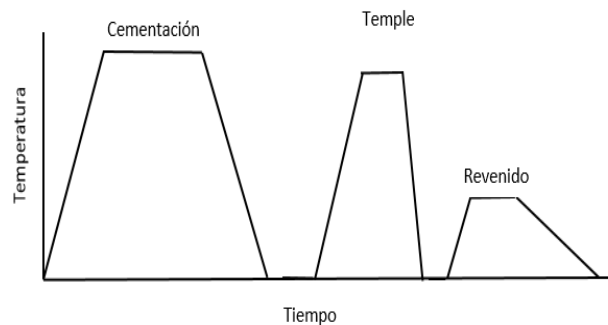


Figura 2.- Diagrama de cementación en dos etapas.

Fases formadas en la Austenita

Una vez formada la austenita, o más bien dicho, el grano de austenita, y dependiendo de la presencia de mecanismos difusionales o no difusionales, se presentarán diferentes fases de las cuales se quieren evitar 2:

- a) **“Ferrita Alotriomórfica”:** El término alotriomórfico significa que esta fase es cristalina y ordenada en su estructura interna pero no en sus bordes exteriores. Esto implica que las superficies limitantes del cristal no son regulares y no demuestran la simetría presente en su estructura interna. De este modo, la ferrita que tiende a nuclearse en los bordes de grano de la austenita, tiende a crecer a lo largo de las paredes de la austenita a niveles mayores de lo que lo hace en la dirección normal. Aunque la ferrita alotriomórfica no necesariamente debe formarse justo en los bordes de la austenita, en la práctica lo hace, presumiblemente debido a que no existe otro sitio heterogéneo de nucleación bi-dimensional como la austenita. La definición para la ferrita alotriomórfica se aplica a escala óptica, en que sus caras se ven aleatorias y amorfas, y no a su estructura cristalina interna que es ordenada.
- b) **Ferrita Widmanstatten:** esta fase se forma a un bajo enfriamiento inferior a la temperatura A_{e3} donde la fuerza motriz para la transformación es pequeña, de modo que

es una necesidad termodinámica la fragmentación del carbón durante dicha transformación. A una escala óptica, la ferrita Widmanstatten tiene la forma entre placas y listones. La formación de la ferrita Widmanstatten va también acompañada por un cambio en la forma de la región transformada. Este cambio consiste en dos planos de tensión de deformación invariantes adyacentes y opuestos. Estos planos *IPS* de deformación poseen componentes de corte grandes e implican la existencia de una correspondencia atómica entre las fases original y producto en la medida que se relacionen los átomos en solución del hierro y sustitucionales. Los átomos intersticiales como el carbón pueden difundir durante el crecimiento sin afectar la forma o el carácter displacivo de la transformación.” (Novakovic, 2006)

Existen dos tipos de ferrita Widmanstatten (f. W) como se muestra en la figura 3.

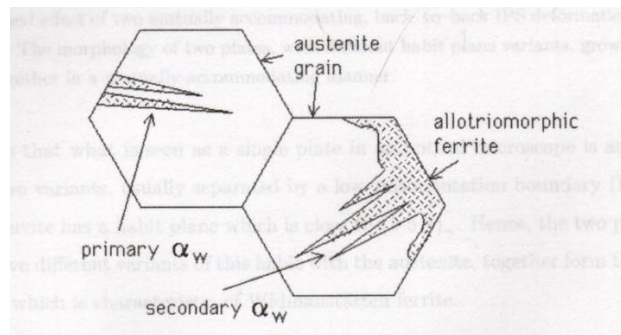


Figura 3: ferrita primaria y ferrita secundaria.

“1.- La ferrita primaria. Esta ferrita se forma directamente en los bordes del grano de Austenita y crece en forma perpendicular a dichos bordes, hacia el interior de la austenita. Como la f.W. es un proceso no difusional, al disminuir bruscamente la temperatura, las placas de ferrita Widmanstatten se formarán rápidamente impidiendo la formación de ferrita alotriomórfica.

2.- La ferrita secundaria: es la ferrita Widmanstatten que tiene lugar su nucleación a partir de los bordes de la ferrita alotriomórfica que ya se ha formado en el borde del grano de austenita. Este tipo de f.W. se produce generalmente en granos pequeños de austenita cuando el proceso de enfriamiento ha sido relativamente lento, debido a la presencia del mecanismo de transformación difusional ya descrito. En otras palabras, como la ferrita Widmanstatten compite con la alotriomórfica, si se forma la una, la otra tiende a desaparecer. Al ser el grano de austenita pequeño y si el enfriamiento no es tan rápido y da paso a la movilidad atómica, es la ferrita alotriomórfica la que se forma en gran medida, quedando menos espacio para formar ferrita Widmanstatten (f.W).” (Novakovic, 2006)

“La creciente preocupación mundial sobre la conservación del medio ambiente y la necesidad de desarrollo de procesos industriales ambientalmente amigables, ha sido uno de los campos más importante para los diferentes ámbitos de la investigación científica y tecnológica. (MIRANDA & LAURA, 2016)”. Por lo que se han buscado alternativas en material prima para desarrollar los mismos procesos industriales con materiales reciclables. Por ejemplo.

“Realizar un cementante con carbono vegetal con conchas marinas mediante la utilización de una mezcla adecuada de carbón vegetal y las conchas marinas como material cementante, se logra la difusión de átomos de carbono hacia el interior del acero de bajo carbono SAE: 1020 cuando se carburiza a 960°C por 6 horas. El correcto control de la temperatura y tiempo del proceso; permitirá un incremento de átomos de carbono en la superficie, la cual después de un temple en agua; mejora la dureza superficial y mantiene un núcleo tenaz.” (MIRANDA & LAURA, 2016)

Se utilizan diferentes materiales para cumplir la función de cementantes, Las materias primas que pueden sobresalir son los huesos calcinados y el cuero entre otros las cuales se deben de mezclar con carbonatos para que se lleve correctamente la difusión hacia el acero.

Temple y revenido

“El temple de un acero se define como el enfriamiento rápido de la pieza a partir de una temperatura de austenización adecuada. Este proceso involucra generalmente la inmersión de la pieza en agua, aceite o salmuera, sin embargo, en algunas ocasiones se emplea aire forzado, como en el caso de algunos aceros grado herramienta o inoxidable. Como resultado del proceso, las partes producidas pueden desarrollar una microestructura de temple en áreas críticas y propiedades mecánicas adecuadas para su uso final después del revenido, la efectividad del temple depende, por una parte de las características del medio de enfriamiento y por otra de la facilidad del acero para ser endurecido, de esta manera los resultados obtenidos pueden variar si cambia la composición química del acero o si varían las características del medio de temple, tales como: agitación, temperatura y fluido de temple.

El diseño mecánico y el sistema de temple adecuado contribuyen en la gran medida a una operación exitosa, deben evitarse en general diseños intrincados con concentradores potenciales de esfuerzos con el fin de prevenir distorsión de la parte a templar y/o eventuales fisuras. Es importante señalar que el temple y el revenido no son dos procesos separados, sino que son complementarios, es decir no existe revenido sin temple previo y tampoco es recomendable no aplicar el revenido a una pieza templada.” (Luna, 2005)

Hipótesis

Es posible obtener un acero Cold Rolled de alta dureza superficial y un núcleo tenaz con la combinación de un tratamiento termoquímico de cementación solida al emplear endocarpio de coco calcinado como cementante y un posterior tratamiento térmico de temple y revenido.

Justificación

Científica: En muchas ocasiones los aceros bajo carbono presentan propiedades mecánicas que limitan su uso en la industria, pero con un tratamiento termoquímico como el de Cementación Solida podemos mejorar las propiedades mecánicas del acero bajo carbono logrando propiedades similares a las de otros aceros o metales de mayor costo. Además, al usar como cementante materia prima reutilizable, como la fibra de coco, podemos reducir aún más los costos de producción para fabricar un acero cementado con alta dureza y núcleo tenaz.

Social: En la actualidad el uso de materiales metálicos se ha incrementado exponencialmente por su uso en procesos industriales, la automatización de los mismos o en la fabricación de productos para la vida diaria, exigiendo una mejor calidad en los materiales y de ser posible a un menor costo.

Ambiental: utilizar la fibra de coco calcinada como cementante en el tratamiento termoquímico de cementación tiene un impacto ambiental positivo ya que comúnmente la cáscara del coco es desechada a la basura sin saber realmente cuál es su destino, reutilizando esta fibra se obtiene materia prima (carbono) para el proceso de Cementación Solida, pero principalmente evitamos que esta cascara se vuelva un contaminante.

Objetivo General

- Realizar tratamiento térmico de Temple y Revenido a un acero Cold Rolled cementado en sólido en dos etapas, utilizando endocarpio de coco calcinado como cementante para obtener un acero con una superficie endurecida y un núcleo tenaz.

Objetivos Específicos

- Realizar tratamiento termoquímico de Cementación Solida a un acero Cold Rolled utilizando endocarpio calcinado (fibra del coco) como cementante, realizar a las temperaturas de 850°C y 950°C durante 4, 6, 8, y 10 horas respectivamente.
- Realizar un corte transversal a las probetas cementadas y someter a desbaste, pulido y ataque químico para obtener micrografía del acero Cold Rolled después del tratamiento termoquímico.
- Someter los aceros cementados a tratamiento térmico de Temple a una temperatura de entre 850°C durante 1 hora y un posterior Revenido a una temperatura de 250°C durante 1 hora.
- Realizar desbaste, pulido y ataque químico a probeta templada y revenida para obtener micrografías de la capa cementada, núcleo y la interface capa cementada-núcleo. Obtener micrografías por medio del microscopio óptico.
- Realizar el análisis microestructural de la capa cementada, el núcleo y de la interface capa cementada-núcleo del acero después de ser templado y revenido.
- Medir el espesor de la capa cementada del acero Cold Rolled mediante un software llamado "Image Pro Plus".
- Realizar un perfil de durezas para cada una de las probetas templadas y revenidas (8 probetas) con ayuda de un durómetro Vickers.

Desarrollo experimental.

Revisión Bibliográfica.

Durante las 12 semanas en que se plantea realizar este proyecto terminal, realizar consultas bibliográficas para tener una buena documentación sobre el tema que se está desarrollando.

Recolección de cascaras de coco.

Acudir a empresas, negocios y/o mercados donde trabajen con coco para pedir las cascaras que son desechadas después de utilizar el fruto.

Obtención de endocarpio.

Una vez que se tiene la cascara de coco, separar el endocarpio de toda la cascara de coco, ya que la preparación del cementante solo será con el endocarpio.

Calcinación y trituración de cascara de coco.

Introducir a un horno tipo mufla en endocarpio de coco a una temperatura de 1000°C durante una hora para su calcinación. transcurrido el tiempo, sacar del horno y dejar enfriar. Una vez calcinado el endocarpio, triturar con ayuda de un mortero y pistilo hasta obtener partículas finas del material calcinado.

Preparación del cementante.

Al polvo de endocarpio de coco obtenido, agregar carbonato de calcio (20% del peso total de polvo de endocarpio) el cual funcionara como sal activadora durante el proceso de cementación.

Obtención de probetas de acero Cold Rolled.

De una barra de acero Cold Rolled cortar 9 probetas de 1.5cm x 1.5cm, una probeta será la testigo y las 8 restantes serán sometidas a tratamiento termoquímico de cementación sólida.

Tratamiento termoquímico de Cementación Solida.

En un contenedor de hierro, agregar una cama del cementante preparado anteriormente y colocar 1 probeta asignada sobre cementante (separadas entre sí y de las paredes del contenedor de hierro), una vez que la probeta está sobre el cementante, agregar más cementante de tal forma que se cubra la probeta. Introducir el recipiente de hierro al horno tipo mufla a una temperatura de 850°C por 4 horas, después de transcurrir el tiempo dejar enfriar dentro del horno. Repetir el procedimiento para los tiempos de 6, 8 y 10 horas

Repetir el procediendo anterior a una temperatura de 950°C para 4, 6, 8 y 10 horas.

Análisis microestructural de aceros cementados y testigo.

Realizar desbaste, pulido y ataque químico a una las probetas cementadas y a la probeta testigo para obtener micrografías en microscopio óptico a diferentes aumentos de la capa cementada y de la interface núcleo-capa cementada para cada una de las 8 probetas tratadas termoquímicamente.

Tratamiento térmico de temple a aceros cementados.

Introducir a un horno tipo mufla las 8 probetas cementadas a una temperatura de 850°C por un tiempo de 1 hora y realizar tratamiento térmico de temple en agua de las 8 probetas.

Análisis microestructural de acero cementado después de ser templado.

Realizar desbaste, pulido y ataque químico de las probetas templadas y de la probeta templada para obtener micrografías en microscopio óptico a diferentes aumentos de la capa cementada y de la interface núcleo-capa cementada.

Tratamiento térmico de revenido a aceros templados.

Introducir a un horno tipo mufla una de las probetas cementadas-templadas para realizar revenido a una temperatura de 250°C por un tiempo de 1 hora. después de transcurrir el tiempo, dejar enfriar en el horno.

Análisis microestructural de acero revenidos.

Realizar desbaste, pulido y ataque químico de las probetas templadas revenidas para obtener micrografías en microscopio óptico a diferentes aumentos de la capa cementada y de la interface núcleo-capa cementada.

Medición de capa cementada.

Con ayuda del software “Image Pro Plus”. Se medirá la capa cementada de las 8 probetas templadas y revenidas.

Perfil de durezas.

Realizar un mapeo de los aceros templados-revenidos con durómetro Vickers para obtener el perfil de durezas. El número de indentaciones durante el mapeo dependerá de la huella que deje el indentador sobre la superficie del acero.

Análisis de resultados.

Durante el trascurso de las 12 semanas, realizar el análisis y la redacción de resultados obtenidos experimentalmente.

Cronograma

Trimestre 22I												
Actividades	Semanas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisión Bibliográfica.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Recolección de cascara de coco.	X											
Obtención de endocarpio.	X											
Calcinación y trituración de cascara de coco.	X	X										
Preparación de cementante.		X	X									
Obtención de probetas de acero Cold Rolled.				X								
Tratamiento termoquímico de Cementación Solida.				X	X							
Análisis micro estructural de aceros cementados y testigo.					X	X						
Tratamiento térmico de temple a aceros cementados.							X	X				
Análisis micro estructural de acero cementado después de ser templado.							X	X				
Tratamiento térmico de revenido a aceros templados.									X	X		
Análisis microestructural de aceros revenidos.								X	X	X		
Medición de capa cementada.								X	X	X	X	
Perfil de durezas.									X	X	X	
Análisis de resultados.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Presentación de proyecto.												X

Entregables

Finalizada la investigación, se hará entrega de un escrito con todos los detalles en formato PDF contenido dentro de un CD y formato PIE con la evaluación del proyecto de integración.

iThenticate

Estudio microestructural de acero Cold Rolled Templado y Revenido después de ser cementado en sólido, utilizando endocarpio de coco calcinado como cementante.

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Internet	50 palabras — 1%
2	doku.pub Internet	47 palabras — 1%
3	eprints.uanl.mx Internet	41 palabras — 1%
4	rodolfo-novakovic.blogspot.com Internet	40 palabras — 1%
5	depi.tlalnepantla.tecnm.mx Internet	13 palabras — < 1%
6	de.slideshare.net Internet	9 palabras — < 1%
7	documents.mx Internet	9 palabras — < 1%
8	holaplatoverde.blogspot.com Internet	9 palabras — < 1%
9	es.scribd.com Internet	8 palabras — < 1%
10	repositorio.uncp.edu.pe Internet	8 palabras — < 1%
11	www.iit.upcomillas.es Internet	8 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS

DESACTIVADO

Bibliografía

- Herrera, O. C. (2016). Obtención de capas boruradas en aceros al carbono y aleados empleando bórax como medio de aporte., (pág. 6). Ciudad de México.
- López, T. I. (Octubre de 2011). ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE UN ACERO 4140 SUJETO A TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS DE BORURADO, NITRURADO Y BORONITRURADO. 25-26. Atizapán de Zaragoza, Estado de México, México.
- Luna, A. J. (2005). Cementación Solida de Aceros., (pág. 16). San Nicolás de los Garza, Nueva Leon, México.
- MIRANDA, Q. G., & LAURA, C. R. (2016). CEMENTACION SOLIDA DE UN ACERO DE BAJO CARBONO EMPLEANDO CARBON VEGETAL Y CONCHAS MARINAS COMO ACTIVADOR ECOLOGICO., (págs. 2-3). AREQUIPA-PERU.
- MONTAÑO, R. B. (2014). *EVALUACION DEL PROCESO DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DE UN ACERO SAE:1020 MEDIANTE CARBURIZACION SOLIDA Y POSTERIOR TEMPLE Y REVENIDO*. Arequipa, Peru.
- Novakovic, R. (06 de Marzo de 2006). Nuevas Investigaciones. Santiago, Región Metropolitana, Chile.
- Ortiz, D. M., Arturo, C. A., Morgado, G., Farfán, G. J., Hernández, P. J., & Cruz, B. J. (2020). Tratamientos termoquímicos. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 18.
- Revista Digital Para Profesionales Enseñanza. (2011). Tratamientos Termoquímicos. *Temas Para La Educación*, 2.