Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas Facultad de Mecánica e Industrial Centro de Investigaciones de Soldadura



Caracterización del material de un engranaje de caja de cambios de auto Lada 2105

Tamara M. Ortiz Méndez Enrique Velázquez Pérez Amado Cruz Crespo Cisolina B. Passi Luemba

2021

© Tamara M. Ortiz Méndez, Cisolina B. Passi Luemba, Enrique Velázquez Pérez, Amado Cruz Crespo, 2021

© Sobre la presente edición, Editorial Feijóo, 2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas CC BY-NC-ND

Edición y corrección: Merly López Delgado

ISBN 978-959-312-463-8



Editorial Samuel Feijóo, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. CP 54830

Resumen

El presente trabajo aborda la caracterización del material de un engranaje de la caja de cambios de los autos tipo Lada 2105, para el cual se desarrolló como paso previo un estudio teórico sobre las características generales de los engranajes empleados en las cajas de velocidad, las principales fallas, los materiales y tratamientos térmicos empleados para su fabricación, así como las técnicas fundamentales a aplicar para caracterizar estos materiales. Como resultado se determinaron los criterios a tener en cuenta para la identificación del material del engranaje bajo estudio, con vistas al establecimiento de un procedimiento para su recuperación mediante soldadura. Más adelante se pasó al estudio de composición química del material por el método de emisión atómica, al análisis metalográfico mediante microscopía óptica y al estudio de la dureza Vicker del material, en diferentes zonas del engranaje, con lo cual se estableció que este elemento de máquina está compuesto por un acero de baja aleación para cementación, de templabilidad intermedia, clasificado como AISI/SAE 8620, en condición de cementado y endurecido.

Palabras Clave: Caracterización de materiales, engranajes, caja de cambio

Abstract

The present work gives reference to the characterization of the material in a gearbox's pinion of Lada 2105 type cars. As a previous step, the theoretical study is developed on the general characteristics of gears used in gearboxes, their main failures, the materials and heat treatments used for manufacture as well as the fundamental techniques applied to characterize these materials. As a result, the criteria to be taken into consideration for the identification of the gear material under studies are determined with a view to establishing a procedure for its recovery by welding. Later on, the chemical composition of the material is studied using the atomic emission method, metallographic analysis by optical microscopy and the study of the Vicker hardness of the material in different areas of the gear, which establishes that this machine element is made of a low alloy steel for cementation,

with intermediate hardenability, classified as AISI/SAE 8620, in a cemented and hardened condition.

Key Words: Materials characterization, gears, gearbox

Índice

Introduc	ciór	۵7
Capítulo) I. C	Características generales de los engranajes de cajas de velocidad 8
1.1.	Car	acterísticas de los engranajes8
1.1	.1.	Tipos de engranajes y aplicaciones10
1.1	.2.	Cajas de velocidad de automóviles13
1.2. tratam	Mat nien	teriales para la fabricación de engranajes de cajas de velocidad y tos térmicos empleados
1.2	.1.	Clasificación de aceros para la fabricación de engranajes 17
1.2	.2.	Tratamientos térmicos o termoquímicos en los aceros para engranajes 28
Conclus	ione	es del Capítulo I 45
Capítulo) . [.]	Técnicas de caracterización de materiales
2.1. su est	Téc tado	nicas de caracterización empleadas en la identificación de materiales y de tratamiento térmico46
2.1	.1.	Análisis metalográfico
2.1	.2.	Análisis de composición química mediante espectrometría 56
2.1	.3.	Caracterización mecánica58
2.1	.4.	Difracción de rayos x61
Conclus	ione	es del Capítulo II63
Capítulo 2105) III.	Caracterización de un engranaje de caja de cambios de auto Lada
3.1. engra	Org	anización de las etapas para la caracterización del material del
3.2	Pre	paración de las muestras para el estudio 65
3.2	1.	Selección v corte de las muestras de ensavo
3.2	2	Montaie de la muestra
3.2	3	Preparación de la superficie 67
3.2	.4.	Ataque químico
3.2	.5.	Estudio metalográfico
3.3.	Est	udio de dureza
3.4.	Est	udio de composición química71
3.5.	Aná	álisis de resultados de la composición química
3.6.	Aná	álisis de los resultados del estudio metalográfico
3.7.	Aná	álisis de los resultados del estudio de dureza78

Conclusiones del Capítulo III	. 81
Conclusiones Generales	. 82
Bibliografía	. 83
Anexos	. 86

Introducción

La elaboración de engranes de servicio ligero, como los mecanismos de relojería, data de centenares de años en la historia, sin embargo, la producción de engranajes para la transmisión de alta potencia y de forma económica apenas comenzó alrededor del año 1800 (Castillo, 2013). Esta fue la base del desarrollo de las impresoras de alta velocidad, de la máquina de coser y de muchos otros productos que se comenzaron a producir a gran escala a finales del siglo XIX, después de la Guerra Civil de los Estados Unidos. Al popularizarse el automóvil, ya en el siglo XX, cobró importancia la capacidad de producir engranajes silenciosos y precisos, específicamente, para su empleo en las cajas de velocidad, invento este generalizado por Walter G. Wilson en 1928.

Las cajas de velocidad, que permiten la transmisión desde el eje de una fuente de energía (motor de combustión interna o eléctrico), hasta otro eje situado a cierta distancia, que realiza un trabajo, es una de las aplicaciones más importantes de los sistemas de engranajes. Las propiedades de resistencia a la tracción, tenacidad y resistencia al desgaste deben conjugarse en los materiales para engranajes, las cuales se incrementan a partir de la aplicación de tratamientos térmicos y termoquímicos a estas piezas.

Al ser sometidas a condiciones de explotación inadecuadas, o debido al uso excesivo, por encima de su vida útil, los engranajes pierden sus características dimensionales y por tanto se requiere su reemplazo o recuperación.

Según Benítez (1985), las formas en que puede fallar un engranaje son muy diversas, pero pueden determinarse con un detenido análisis ya que cada tipo de falla deja una huella característica en los dientes. Se pueden, distinguir cinco tipos de fallas, entre las que se encuentran el desgaste, la fatiga superficial, flujo plástico, rotura de los dientes y fallas combinadas.

Estos tipos de fallas aparecen en las ruedas dentadas helicoidales que componen los trenes de engranaje las cajas de velocidad de los autos tipo Lada 2105, las cuales salen de servicio fundamentalmente por rotura de los dientes. Estas piezas generalmente son remplazadas en los talleres de reparación al no contar con una

7

tecnología de recuperación eficaz. También se conoce que en ocasiones se reconstruyen por soldadura las partes dañadas, mediante procedimientos poco factibles, pues el tiempo antes del fallo posterior es muy corto.

Para establecer una adecuada tecnología de recuperación mediante soldadura es necesario conocer el tipo de material que compone la pieza, así como su condición de tratamiento térmico, debido a que ambos factores intervienen en la soldabilidad del material y, por tanto, deben considerarse durante la elaboración del procedimiento de recuperación. No se reportan trabajos que aborde el tema antes planteado, ni se cuenta con información técnica en los talleres de reparación que brinde dicha información, por lo que se hace necesario acometer una investigación en este sentido, como base al establecimiento y ejecución de un procedimiento de recuperación de engranajes de cajas de velocidad de autos ligeros marca Lada 2105. Dado lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo la caracterización del material de un engranaje de caja de cambios de auto Lada 2105, que permita la identificación del material y de su estado de tratamiento térmico, con vistas a la futura recuperación de este elemento de máquina mediante el método de soldadura. Para esto se realiza una investigación teórica la cual obtiene la información sobre las características generales de los engranajes de las cajas de velocidad, los materiales con que se fabrican y los tratamientos térmicos a que se someten en su proceso de fabricación. Se estudian además las principales técnicas de caracterización empleadas en la identificación de materiales metálicos y de su estado de tratamiento térmico, las cuales fueron aplicadas al caso de estudio de este trabajo.

Capítulo I. Características generales de los engranajes de cajas de velocidad

1.1. Características de los engranajes

Los engranajes son mecanismos utilizados para transmitir y transformar el movimiento rotacional de un componente a otro (Dudley, 1980). Es utilizado para realizar un cambio en la velocidad o para variar el par de salida de un dispositivo que se encuentra rotando. Un ejemplo típico es la caja de cambios de un auto,

8

mecanismo este que permite variar la velocidad y el par de salida, en dependencia de los requerimientos de trabajo.

Un par de engranajes está conformado por dos ruedas dentadas, de las cuales la mayor se denomina corona y la menor, piñón (figura 1.1). Una de las aplicaciones más importantes de los engranajes es la transmisión del movimiento desde el eje de una fuente de potencia, como puede ser un motor de combustión interna o un motor eléctrico, hasta otro eje situado a cierta distancia, que realiza un trabajo. La rueda conectada a la fuente de potencia se conoce como engranaje motor y la otra, conectada al eje que debe recibir el movimiento, se denomina engranaje conducido.



Figura 1.1. Corona y piñón (Colectivo de autores, 2019).

Las partes que conforman un engranaje, y sus funciones (figura 1.2), son las siguientes (Castillo, 2013):

- Diente: realiza el esfuerzo de empuje y transmite la potencia, tiene un perfil propio en dependencia de su empleo. Las partes que componen los dientes son la cabeza o cresta, la cara, el flanco y el fondo o valle.
- Corona: es la parte donde se encuentran los dientes.
- Cubo: parte central del engranaje mediante el cual la corona queda fijada a su eje.



Figura 1.2. Ruedas dentadas

a) partes de las ruedas dentadas, b) zonas del diente.

Respecto a las transmisiones por correas y poleas, las transmisiones por engranajes son el tipo de transmisión de mayor difusión debido a sus numerosas ventajas, entre las que se encuentran su gran capacidad de transmisión de potencia, sus menores dimensiones, para igual capacidad de carga, su alta eficiencia, durabilidad y fiabilidad de funcionamiento, su relación de transmisión constante. Por otra parte, tiene posibilidad de utilización dentro de un amplio rango de velocidades, momentos y relaciones de transmisión. Las desventajas fundamentales de las transmisiones por engranajes consisten, fundamentalmente, en su elevado ruido durante la transmisión, sobre todo, en engranajes de dientes rectos y a altas velocidades; a esto se suma que son más costosos y difíciles de fabricar.

1.1.1. Tipos de engranajes y aplicaciones

Existen diferentes formas de clasificación de un engranaje (Colectivo de autores, 2019). En dependencia de la disposición de los árboles que soportan, los engranajes se clasifican en:

- Entre árboles paralelos: engranajes cilíndricos (figura 1.3 a y b).
- Entre árboles que se interceptan: engranajes cónicos (figura 1.4 a y b).
- Entre árboles que se cruzan: engranajes de tornillo sin fin (figura 1.5) y engranajes cilíndricos (figura 1.3 c).

También su clasificación viene dada por la forma de los dientes, como se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3. Engranajes cilíndricos a) de dientes rectos, b) de dientes helicoidales con árboles paralelos, c) de dientes helicoidales con árboles que se cruzan (Colectivo de autores, 2019).



Figura 1.4. Engranajes cónicos, de dientes rectos, b) de dientes curvilíneos c) hipoidales (Colectivo de autores, 2019).



Figura 1.5. Tornillo sin fin (Colectivo de autores, 2019).

Las aplicaciones de los diferentes tipos de engranajes se exponen a continuación:

- Los engranajes rectos son los más usados y se pueden ver en cualquier tipo de equipos, tales como máquinas herramientas, relojes y juguetes.
- Los engranajes helicoidales, cuyos dientes se encuentran siguiendo la trayectoria de hélices paralelos alrededor de un cilindro, proporcionan una marcha más lenta al estar en contacto varios pares de dientes al mismo tiempo, lo cual hace que se trate de un sistema más silencioso, con una relación de fuerza y movimiento más

uniforme y segura. Una aplicación típica de este tipo de engranaje es en las cajas de velocidad de los automóviles.

 Los engranajes cónicos, su aplicación más frecuente es en la industria automotriz se utilizan en ejes traseros especialmente para camiones grandes teniendo empleo también en el sector de la minería, aeroespacial, ferroviario.

Cuando se trata de un sistema formado por varios engranajes conectados entre sí se le denomina tren de engranajes, el cual es un mecanismo formado por varios pares de engranajes acoplados entre sí, de forma que el elemento conducido de un par es el elemento conductor del siguiente. Con esta configuración se consiguen características de mecanismos de transmisión que no podrían conseguirse con un solo engranaje. Se utilizan cuando la relación de transmisión que se quiere conseguir entre dos ejes no es posible establecerla con un único par de ruedas, también cuando se desea que la relación de transmisión entre dos ejes sea variable o en los casos en que los ejes de entrada y de salida de la transmisión están muy alejados.

Dentro de los trenes de engranajes se pueden encontrar dos tipos, simples o compuestos. Se le denomina simple cuando las ruedas dentadas están en un mismo plano, es decir, que en cada eje existe una sola rueda. El engranaje compuesto consta en alguno de los ejes con más de una rueda dentada (Figura 1.6).



Figura 1.6. Trenes de engranajes (Torres; 2014).

1.1.2. Cajas de velocidad de automóviles

En los vehículos, la caja de velocidad o caja de cambios es el elemento encargado de obtener en las ruedas el par motor suficiente para poner en movimiento el vehículo parado y, una vez en marcha, obtener un par suficiente en ellas para vencer las resistencias al avance, fundamentalmente las derivadas del perfil aerodinámico, del rozamiento con la rodadura y de la pendiente en ascenso (Rodes, 2019); (Getauto, 2020).

Las cajas de cambios son un ejemplo de aplicación de los trenes de engranajes (figura), que permite establecer elevadas relaciones de transmisión sin necesidad de mecanismos excesivamente voluminosos y permite variar la relación de trasmisión en dependencia de las exigencias de operación. Este mecanismo tiene la función de intermediar entre el cigüeñal y las ruedas, de manera que estas obtengan siempre el par motor necesario para desplazar el vehículo, subiendo y bajando las revoluciones del motor (figura 1 del anexo 1), según la fuerza necesaria en cada instante, además de invertir el sentido de giro en las ruedas, cuando las necesidades de la marcha así lo requieren.



Figura 1.7. Caja de cambios de auto ligero a) imagen interna de una caja de cambios (Palomino, 2017); b) imagen exterior de una caja de cambios de auto Lada 2105 (Getauto, 2020).

Un auto puede tener transmisión delantera, trasera o en las cuatro ruedas, dependiendo de eso la posición de la caja de cambios también será diferente, situándose de forma transversal o longitudinal, de manera que la primera tendrá solamente dos ejes y la segunda tres. En el primer caso se denomina cajas de cambios transversales y en el segundo, longitudinales. Independientemente del tipo,

la caja está compuesta por una serie de ejes unidos por piñones a los árboles (figura 1.7), que mediante unos cojinetes se acoplan a la carcasa de aluminio de la caja, que sirve para alojar los engranajes, los dispositivos de accionamiento y en algunas ocasiones el diferencial, así como el recipiente de aceite para lubricar el dispositivo.

Existen cajas de cambios manual y automática, las cuales van acopladas al volante de inercia del motor, del cual recibe movimiento a través del embrague, en transmisiones manuales o a través del convertidor de fuerza, en transmisiones automáticas. Articulado a ella va el resto del sistema de transmisión. En el caso de la manual, precisan de la acción del conductor, por medio de la palanca de cambios y el embrague, para poder realizar el cambio de velocidad o marcha. Estas cajas se valen de sincronizadores el cual es un disco intermedio que evita que en el cambio de marcha choquen los dientes de diferentes discos al engranar. Las cajas de cambio manuales convencionales suelen portar engranajes de dientes helicoidales, es decir, los dientes están en una disposición diagonal, no rectos ni paralelos al eje del engranaje (figura 2, anexo 1).





La caja de cambio automática (figura 3, anexo 1) evita que el conductor interactúe con el cambio, únicamente es necesario su acción al emprender la marcha, o al

accionar la marcha atrás. Toda la caja y el sistema de embragado funcionan de manera automática. No obstante, la mayoría cuentan con la opción de seleccionar la marcha de forma manual con levas en el volante a través de un selector o botones, pero siempre de manera secuencial y prescindiendo del uso del embrague.

Cada eje tiene su propia labor dentro del mecanismo de la caja de cambios (figura 1.8) y comúnmente se les nombran como:

- Árbol primario: Recibe el movimiento a la misma velocidad de giro del motor, tiene un solo piñón conductor cuando la caja es longitudinal y varios cuando es transversal. Este eje gira en el mismo sentido del motor.

- Arbol intermedio: Solamente se usa en las cajas longitudinales y tiene un engranaje llamado corona que se engrana al árbol primario, además de otros piñones llamados solidarios que se engranan al árbol secundario. Este eje gira en el sentido opuesto al motor.

- Arbol secundario: Tiene varios piñones fijos a lo largo del eje, montados sobre un cojinete de manera que puedan desplazarse a diferente velocidad del árbol. Gira en sentido opuesto al motor en las cajas transversales y en la misma dirección en las longitudinales.

 Árbol de marcha atrás: Lleva un piñón que se interpone entre los árboles intermedio y secundario en las cajas longitudinales o entre el primario y secundario en las transversales. Tiene la función de invertir el sentido de giro habitual del árbol secundario.

La palanca de cambios está conectada a una serie de barras de selector que se encuentran en la parte superior o lateral de la caja en paralelo con los ejes que permite controlar los piñones de los diferentes árboles para saber cuál se engrana en cada momento mientras la posición de las llantas se controla mediante unas horquillas. Las distintas velocidades de la caja están sincronizadas, lo que significa que tienen unos mecanismos que permiten igualar las velocidades de los diferentes ejes en el momento del cambio de velocidad, lo que evita que choquen los dientes de las diferentes ruedas al engranar. Sin embargo, debido a manipulación deficiente de los cambios o mantenimiento inadecuado se dañan las ruedas dentadas que

15

componen las cajas de cambio (figura 1.9), siendo la falla principal el desgaste adhesivo como mecanismo principal (anexo 2, figura 4) y la partidura de los dientes (anexo 2, figura 3). Este es el tipo de fallo que se reporta con mayor frecuencia en las ruedas dentadas de las cajas de velocidad de los autos tipo lada 2105.



Figura 1.9. Imagen de engranajes de cajas de velocidad afectados por desgaste y partidura de los dientes (Getauto, 2020).

También se presentan de manera secundaria otros mecanismos de desgaste, tales como el abrasivo (anexo 2, figura 1) y la fatiga superficial (anexo 2, figura 2).

1.2. Materiales para la fabricación de engranajes de cajas de velocidad y tratamientos térmicos empleados

Los engranajes pueden fabricarse de varios tipos de materiales, teniendo en cuenta el uso que van a tener (Castillo, 2013). Desde el punto de vista mecánico hay gran variedad de propiedades en los materiales que influyen en la decisión a la hora de elegir, entre las cuales se destacan la resistencia y la durabilidad (Guliaev, 1978). Para la producción de engranajes es importante que el material de fabricación presente una alta resistencia mecánica y a la fatiga, ya que deben soportar tanto cargas estáticas como dinámicas. Deben ser además materiales mecanizables. Las superficies de trabajo deben poseer un bajo coeficiente de fricción.

El tipo de material se selecciona en dependencia de las condiciones de trabajo de la transmisión (Colectivo de autores, 2019). Las ruedas de acero, tratadas térmicamente, son las de mayor aplicación. En menor medida se utiliza también el hierro fundido y los materiales plásticos, debido fundamentalmente a que son más

baratos y poseen menores propiedades de resistencia. Las ruedas de hierro fundido trabajan bien en condiciones de escasa lubricación, pero no soportan cargas de impacto, se utilizan en transmisiones abiertas, de grandes dimensiones, sometidas a cargas pequeñas y a condiciones de corrosión. Los engranajes plásticos tienen baja resistencia lo que provoca que no se utilicen prácticamente en transmisiones impulsoras. Presentan además elevada ligereza, característica esta importante para determinados tipos de aplicaciones, fundamentalmente de fines domésticos.

1.2.1. Clasificación de aceros para la fabricación de engranajes

Los aceros utilizados para la fabricación de engranajes son los llamados aceros de construcción, los cuales se emplean para fabricar elementos de máquinas (Guliaev, 1978). Como regla general son sometidos a tratamientos térmicos o termoquímicos. Estos materiales se subdividen en aceros para cementar y aceros mejorables o bonificados.

- a) Aceros para cementar: estos presentan bajo contenido de carbono, entre 0,1 a 0,25 %, y están aleados con Cr, Ni y Mn. El bajo contenido de carbono se utiliza con el objetivo de mantener un núcleo tenaz y una superficie de alta dureza después de la cementación. La dureza de la superficie, después de este tratamiento térmico, es cercana a 60 HRC y la del núcleo del orden de 15 a 30 HRC. El endurecimiento del núcleo, cuando se someten a tratamiento térmico, será tanto mayor, cuanto más carbono y elementos de aleación contenga el material, por esto dichos aceros se dividen en tres grupos:
- Aceros al carbono con núcleo que no se endurece
- Aceros de baja aleación con núcleo que se endurece poco
- Aceros de aleación relativamente alta con núcleo que se endurece mucho (denominado también acero para cementar de gran resistencia).

También deben considerarse como pertenecientes a este último grupo los aceros cuyo contenido de elementos de aleación es relativamente pequeño, pero el de carbono es elevado, alrededor de 0,25 a 0,30 %.

Aceros para cementar, al carbono, con núcleo que no se endurece

Este acero presenta muy poco endurecimiento con el tratamiento térmico debido a que, independientemente de las condiciones de enfriamiento, la austenita se transforma en una estructura ferrito-perlítica en el núcleo. A este primer grupo pertenecen los aceros con clasificación 10, 15, 20 (según la norma GOST 4543-71), los cuales son frecuentemente empleados para la fabricación de piezas cementadas. La composición química de algunos de estos aceros se muestra en la tabla 1.1. Este tipo de material simple y barato se emplea para elaborar las piezas que requieren una alta estabilidad al desgaste y no se les imponen condiciones elevadas con respecto a la resistencia. Este tipo de acero se templa en agua y luego se reviene entre 150 y 180 °C. Al templarlas en agua las piezas cementadas se deforman mucho. En la tabla 1.2 se dan sus propiedades mecánicas.

Tabla 1.1. Composición química de aceros al carbono para cementar, con núcleo que no se endurece, (según la norma GOST 4543-71) (Guliaev, 1978)

	Composición química (% de masa)					
Acero	С	Si	S	Mn		
10	0,17-0,13	0,17-0,37	<0,035	≤ 0,8		
20	0,17-0,24	0,17-0,3 5	<0,035	≤ 0,8		

En los aceros de bajo contenido de carbono no aleados (por ejemplo, el acero 10) el vértice de la curva de descomposición isotérmica de la austenita está tan desplazado hacia la izquierda que incluso si se somete a un intenso enfriamiento en agua, en las capas que se encuentran debajo de la cementada no se consigue subenfriar la austenita hasta temperaturas bajas.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas luego de la cementación de los aceros para cementar que el núcleo no se endurece (Guliaev, 1978)

Acero	$\sigma_{\rm B}$, kgf/mm ²	σ _T , kgf/ mm ²	δ, %	φ, %
10	40	25	35	70
15	43	27	32	65
20	47	30	30	60

18

Observaciones

 (σ_B) : Tensión limite; (δ): Elongación; (φ): Estricción o reducción del área La profundidad de cementación se elige de acuerdo con las condiciones en que deben funcionar las piezas, es decir cuanto mayor es la presión de trabajo a que es sometida su superficie tanto mayor debe ser el espesor de la capa cementada. En la figura 1.10 se muestra una imagen de la estructura formada por ferrita y perlita, como la que presenta el núcleo de un acero cementado con el núcleo que no se endurece.



Figura 1.10. Microestructura ferrito-perlítica del núcleo de un acero al carbono cementado (250x) (Guliaev, 1978).

Aceros para cementar de baja aleación con núcleo que se endurece poco

Estos aceros se caracterizan por tener muy desarrollada la región de transformación intermedia, bainítica. Cuando se templan en aceite, si la intensidad de enfriamiento es suficiente para obtener gran dureza en la superficie de la capa cementada, el núcleo sufre la transformación bainítica (figura 1.11) y se endurece sensiblemente. El elemento de aleación fundamental en estos aceros es el Cr, acompañado en algunos casos por el Ni. En este grupo pueden incluirse las clasificaciones 15X, 20X, 15XP y 20XH, de la norma GOST 4543-71.

Tabla 1.3. Composición química de los aceros de baja aleación para cementar, con núcleo que se endurece poco, % (según la norma GOST 4543-71) (Guliaev, 1978)

Acero	С	Cr	Ni	Mn

15X	0,12-0,18	0,8-1,0	_	≤ 0,8
20X	0,17-0,23	0,7-1,0	-	≤ 0,8
15XP	0,12-0,18	0,7-1,0	-	≤ 0,8
20XH	0,17-0,23	0,45-0,75	1,0-1,4	≤ 0,8

Todos estos aceros contienen 0,17 a 0,37 % de Si y <0,035 % de S y P. En los aceros que llevan la letra P en la marca, se garantiza un contenido del 0,002 a 0,003 % de B.

En el estado inicial, de recocido, las propiedades de estos aceros son prácticamente iguales: la tensión limite (σ_B) es alrededor de 50 a 60 kgf/ mm², la tensión de fluencia ($\sigma_{0,2}$) entre 35 a 40 kgf/mm², la elongación (δ) a 30 %, la estricción o reducción del área (φ) a 60 % y la dureza HB en el rango entre 140 a 180.

Después del temple y del revenido a baja temperatura, la resistencia de los aceros de baja aleación se eleva sensiblemente, disminuyendo muy poco su plasticidad (tabla 1.4). Estas propiedades son características del acero de bajo contenido de carbono, de tipo bainitico.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas luego de la cementación de los aceros para cementar que el núcleo se endurece poco (Guliaev, 1978)

Acero	$\sigma_{\rm B}$, kgf/mm ²	$\sigma_{\rm T}$, kgf/mm ²	δ, %	φ, %	a _{el} , kaf.m/cm ²
15X	75	65	15	55	10
20X	85	70	15	55	12
15XP	75	65	15	55	12
20XH	85	70	15	55	12

En la figura 1.7 se muestran imágenes de la microestructura bainítica, que se obtiene en el núcleo de los aceros de baja aleación luego de la cementación.



Figura 1.11. Estructura bainítica de un acero, a) bainita superior, b) bainita inferior (500x) (Guliaev, 1978).

Aceros para cementar de alta aleación con núcleo que se endurece mucho

El grado de endurecimiento de estos aceros viene determinado por el contenido de carbono y también, aunque en menor grado, por el contenido de los elementos de aleación y la intensidad de enfriamiento del temple.

El enfriamiento en aceite e incluso al aire es suficiente para obtener en el núcleo estructuras de bainita inferior o martensita (figura 1.12), lo que conduce a un endurecimiento bastante intenso.



Figura1.12. Estructura martensítica de un acero aleado (400x) (Guliaev, 1978). En este tercer grupo deben incluirse los aceros 20XΓP, 20XHP, 18XΓT, 12XH3, 12X2H4, 18X2H4B, 18XHMΦ, véanse su composición en la tabla 1.5. Tabla 1.5. Composición química de los aceros para cementar de alta aleación con núcleo que se endurece mucho, % (según las normas GOST 4543-71) (Guliaev, 1978)

Acero	С	Cr	Ni	Mn
20ХГР	0,18-0,24	0,7-1,1	-	0,7-0,1
20XHP	0,16-0,23	0,7-1,1	0,8-1,1	0,8-1,1
18XFT	0,17-0,23	1,0-1,3	_	0,8-1,1
18ΧΗΜΦΑ	0,16-0,21	0,6-0,9	-	≤ 0,8
12XH3	0,09-0,16	0,6-0,9	2,75-3,15	≤ 0,8
12X2H4	0,09-0,16	1,25 -1,65	3,25-3,65	≤ 0,8
20X2H4	0,16-0,22	1,25-1,65	3,25-3,65	≤ 0,8
18X2H4B ²	0,14-0,20	1,35-1,65	4,0-4,4	≤ 0,8

Observaciones: Todos estos aceros contienen 0,17 a 0,37 % de Si y <0,035 % de S y P, excepto en los llamados aceros de alta calidad (con letra A) que el contenido de S y P es <0,025 %. En los aceros en cuya marca figura la letra T, el contenido de titanio se reglamenta entre los límites de 0,06 a 0,12 %; si no figura la letra T, contienen por lo general un 0,01 a 0,03 % de titanio que se introduce para desoxidarlos. En los ceros que llevan la letra P en la marca, se garantiza un contenido del 0,002 a 0,003 % de B. El acero 18XHM Φ A contiene además un 0,08 a 0,14 % de V, 0,45 a 0,65 % de Mo o un 0,8 a 1,2 % de W.

Las piezas más seguras y estables a las cargas dinámicas deben hacerse de estos aceros para cementar de gran resistencia y someterse a cementación poco profunda. En estado de recocido (revenido entre 650 a 680 °C), las propiedades mecánicas de estos aceros son aproximadamente las mismas y del mismo orden que las de los aceros para cementar menos resistentes.

El tratamiento térmico de las piezas cementadas, destinadas a funciones de responsabilidad, consta del temple ordinario con calentamiento especial temple a (800 °C y revenido a 200 °C). El comportamiento del núcleo y de la superficie, que difieren mucho por el contenido de carbono, será distinto durante el tratamiento térmico.

Debe tenerse en cuenta que el aumento del contenido de carbono y la velocidad de enfriamiento de temple no solo conduce a la elevación de la resistencia, sino también a la disminución de la plasticidad y tenacidad. En tabla 1.6 se muestran las propiedades mecánicas de estos aceros luego de la cementación.

La elección de la marca del acero para las piezas cementada se basa en los razonamientos siguientes:

- Para las piezas de configuración simple que no sufren cargas importantes, deben emplearse aceros al carbono simples; para las piezas que experimentan grandes tensiones y choques, aceros al cromo-níquel de gran resistencia. Entre estos dos casos extremos puede existir una gran cantidad de casos intermediarios.

- Para las piezas de configuración compleja que no conviene que se deformen al templarlas, por ejemplo, los piñones, deben emplearse aceros aleados que se templen en aceite.

- Para las piezas cementadas de mayor responsabilidad se utilizan aceros al cromo-níquel y al cromo-níquel-wolframio 12X2H4A y 18X2H4BA. Después del temple y revenido a baja temperatura, estos aceros adquieren propiedades mecánicas muy elevadas; resistencia a la rotura alrededor de 130 a 140 kgf/mm², esto ha permitido su utilización principalmente la del acero 18X2H4BA, no solo cementados, sino también sin cementar (para piezas de las cuales se requiere alta resistencia sin ser muy estables al desgaste).

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas luego de la cementación de los aceros para cementar que el núcleo se endurece mucho (Guliaev, 1978)

Marca del	$\sigma_{\rm B}$, kgf/mm ²	σ _T , kgf/	δ, %	φ, %	a _{el} ,
acero		mm ²			kgf.m/cm ²
20ХГР	130	110	12	50	8
20XHP	130	110	14	60	9
18XFT	130	110	12	50	8
18XHMФ	120	100	15	55	16
12XH3	120	100	15	60	10
12X2H4	120	110	15	60	10
18X2H4B	130	110	14	55	10

23

El Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI), y la Sociedad Americana de Automóviles (SAE) clasifica a los aceros para cementar en tres grupos de aceros de bajo carbono (Ingmecanica, 2020).

1ro. De baja templabilidad (series SAE 4000, 5000, 5100, 6100 y 8100)

2do. De templabilidad intermedia (series SAE 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 8600 y 8700)

3ro. De alta templabilidad (series SAE 4800 y 9300).

Estos últimos se seleccionan para piezas de grandes espesores y que soportan cargas mayores. Los otros para piezas pequeñas, de modo que en todos los casos el temple se pueda efectuar en aceite. Véase la clasificación de estos aceros para cementación en la tabla 1.7, según AISI/SAE.

Tabla 1.7. Clasificaciones de aceros para cementación según AISI/SAE (Ingmecanica, 2020)

Necesidad de núcleo	Acero SAE
Baja templabilidad	4012, 4023, 4024, 4027, 4028, 4418, 4419, 4422, 4616, 4617, 4626, 5015, 5115, 5120, 6118 y 8615
Media	4032, 4427, 4620, 4621, 4720, 4815, 8617, 8620, 8622 y
templabilidad	8720
Alta	4320, 4718, 4817, 4820, 8625, 8627, 8822, 9310, 94B15 y
templabilidad	94B17

La dureza del núcleo depende del % de carbono y de los elementos aleantes. Esta debe ser mayor cuando se producen elevadas cargas de compresión, de modo que soporte las deformaciones de la capa. Cuando lo esencial es la tenacidad, lo más adecuado es mantener baja la dureza del núcleo. En la tabla siguiente (tabla 1.7)

En el anexo 3, tabla 1 se muestran numerosas clasificaciones de aceros para cementación establecidas por la norma GOST y su composición química. En la tabla 2 del anexo 3, se exponen los homólogos a estos aceros clasificados por diferentes normas internacionales.

b) Aceros mejorables

Los aceros mejorables, clasificados como aceros de construcción de medio contenido de carbono, contienen un 0,3 a 0,4 % de carbono y diversas cantidades de elementos de aleación como cromo, níquel, molibdeno, wolframio, manganeso, silicio, que sumadas están en el rango entre 3 y 5 %, y frecuentemente cerca de un 0,1 % de afinadores del grano, entre ellos vanadio, titanio, niobio, circonio (Guliaev, 1978).

Los criterios para elegir la marca de estos aceros pueden enunciarse de la siguiente manera:

- El grado de aleación se determina por las dimensiones de la pieza bruta que se ha de tratar térmicamente;
- El nivel de resistencia lo determina la temperatura de revenido;
- La existencia de concentradores de tensiones y de cargas dinámicas determina la necesidad de la aleación con elementos que bajen la temperatura de transición al estado de fragilidad.

Los aceros mejorables se dividen convencionalmente en cinco grupos (tabla 1.8). A medida que aumenta el número del grupo, crece el grado de la aleación y, por lo tanto, el tamaño de la sección en la cual se alcanza la templabilidad total.

Las piezas de configuración compleja, sobre todo si han de estar sometidos a acciones de choque, conviene fabricarlas de aceros que contengan níquel.

Los aceros de construcción aleados, de contenido medio de carbono, tratados térmicamente, poseen una estructura consistente en productos de descomposición de martensita. El efecto de mejorado, es decir la elevación de las propiedades mecánicas del acero después del mejoramiento, se observa solamente si el revenido se hace hasta temperaturas con las cuales se conserva la orientación de la martensita. Las estructuras típicas del acero de construcción mejorable se muestran en la figura 1.13, a y b.

Tabla 1.8. Composición química de los aceros de construcción mejorables (según las normas GOST 4543-71) (Guliaev, 1978)

Grupo	Acero	С	Mn	Si	Cr	Ni	Otros
I	40	0,37-	-	-	-	-	-
	45	0,44					
		0,42-					
		0,49					
	40X	0,36-	-	-	0,8-1,1	-	-
	40XP	0,44	-	-	0,8-1,1	-	0,002-0,005
		0,37-					В
		0,45					
	30XM	0,26-	-	-	0,8-1,1	-	0,15-0,25
	40XF	0,34	0,9-1,2	-	0,9-1,2	-	Мо
	40FP	0,36-	0,7-1,0	-	0,9-1,1	-	-
	30XLL	0,45	0,8-1,1	-	1,0-1,3	-	0,002-0,005
	30XFC	0,37-	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	-	В
		0,45					0,06-0,12 Ti
		0,24-					-
		0,32					
		0,28-					
		0,35					
IV	40XH	0,36-	-	0,17-	0,45-	1,0-1,4	_
	40XHP	0,44	0,6-0,9	0,37	0,75	0,4-0,8	0,002-0,005
	40XFHP	0,35-	0,8-	0,17-	0,6-0,9	0,5-0,8	В
	40XHM	0,42	0,11	0,37	0,8-1,1	1,2-1,6	0,002-0,005
	42XMΦ	0,35-	_	0,17-	0,6-0,9	-	В
		0,45	0,5-0,8	0,37	0,8-1,1		0,05-0,25
		0,37-		0,17-			Мо
		0,44		0,37			0,20-0,30
		0,40-		0,17-			Mo
	0.03/1.10	0,45		0,37		. ==	0,8-0,14 V
V	30XH3	0,27-	-	—	0,6-1,9	2,75-	-
	30XH2B	0,34	-	—	0,6-0,9	3,15	0,5-0,8 W
	Φ	0,27-			4045	2,0-2,4	0,15-0,30 V
	00)/11011	0,34	-	—	1,2-1,5	0001	0,35-0,45
	3UXH3M	0.00				3,0-3,4	MO
	Φ	0,30-					0,1-0,2 V
		0,42					

Observaciones (Guliaev, 1978):

1. Cuando el contenido de manganeso y de silicio es el ordinario (0,4- 0,8 % de Mn y 0,15-0,40 % de Si) su existencia no se indica.

2. El contenido permitido de impurezas casuales (y entre ellas de las que en otros aceros se utilizan como elementos de aleación) no se indica aquí.

3. La mayoría de los aceros se fabrican con contenido de azufre y fósforo ordinario (0,0335 %) o bajo ($\leq 0,030$ o 0,025%); en este último caso figura la letra A al final de la marca.

4. El diámetro crítico se indica para la templabilidad total, 95% de martensita, cuando el contenido de carbono y de elementos de aleaciones es el inferior y el enfriamiento se hace en aceite (para los aceros del primer grupo, en agua).

5. Debido a que la cantidad de datos reales es insuficiente, algunos de los valores que se dan para el diámetro crítico y el umbral de fragilidad son aproximados.

6.



Figura 1.13. Estructura del acero 30XFCA, x 500: a) Recocido; b) Mejorado (Guliaev, 1978).

En la tabla 3 del anexo 3 se muestran los homólogos de los aceros para mejoramiento, clasificados por la norma GOST. La AISI/SAE clasifica los aceros mejorables que se destinan a la fabricación de engranajes dentro de un Grupo 3 de los aceros para temple directo. Estos tienen un contenido de carbono nominal entre 0,45 y 0,50%. Su empleo fundamental es en engranajes y otras piezas que requieran alta dureza, resistencia y tenacidad (Ingmecanica, 2020).

En la tabla 1.9 se muestran las clasificaciones AISI/SAE de los aceros comprendidos en este grupo.

Tabla 1.9. Aceros mejorables para la fabricación de engranajes (Ingmecanica, 2020)

Característica del acero	Clasificación SAE
Baja templabilidad	SAE 5046, 50B44, 50B46 y 5145.
Media templabilidad	SAE 4145, 5147, 5150, 81B45, 8645 y
	8650

Alta templabilidad	SAE 4150 y 86B45.

1.2.2. Tratamientos térmicos o termoquímicos en los aceros para engranajes

El proceso de fabricación de engranajes incluye el tratamiento térmico con vistas a garantizar diversas exigencias de resistencia, tanto a nivel superficial como de núcleo que requieren estos elementos de máquina (Colectivo de autores, 2919). Los tratamientos más empleados para los engranajes son el mejoramiento y los tratamientos termoquímicos.

Mejoramiento o bonificado

Este proceso, también llamado tratamiento térmico doble (temple + revenido), consiste en la elevación de la calidad del acero, variando ampliamente las propiedades de resistencia, desde las máximas, correspondientes al estado de temple, hasta las mínimas, que corresponden al de recocido y, con ello, las propiedades de plasticidad y tenacidad (Guliaev, 1978).

El régimen de tratamiento térmico para obtener el mejor conjunto de propiedades mecánicas para los aceros aleados de bajo contenido de carbono es el temple a 900 °C en aceite, con revenido a 150 °C. Después de este tratamiento térmico la estructura está constituida por martensita revenida.

En el caso de los aceros de contenido medio de carbono para construcción, el tratamiento térmico de mejoramiento consiste en el temple a 850 °C en aceite con revenido a alta temperatura, generalmente entre 550 y 650 °C, a la cual se produce la descomposición total de la martensita formándose una mezcla granular altamente dispersa de ferrita y carburos: sorbita (figura 1.14).



Figura 1.14. Microestructura sorbítica del acero revenido a 550 °C (500 x) (Guliaev, 1978).

En la tabla 1 del anexo 4 se expone el tratamiento térmico empleado para diferentes tipos de aceros para engranajes y las propiedades finales que se obtienen.

> Tratamiento termoquímico de cementación

En la cementación se lleva a cabo una saturación superficial del acero con carbono, a consecuencia de la cual se obtiene una capa superficial de alto contenido de carbono. Como para cementar se utiliza acero pobre en carbono, el núcleo permanece blando y tenaz, aunque después de cementado se temple el acero.

Este método es muy utilizable para mejorar las propiedades de la superficie de ejes, engranajes, cojinetes y otras partes de la máquina con elevado tensionamiento (Lampman, 1995). Las barras de acero con bajo contenido de carbono se fabrican forjando y mecanizando y luego se convierten mediante la cementación en un material compuesto. Cuando este material se templa y se enfría obteniendo martensita, la alta dureza y la resistencia combinada con una favorable tensión residual de compresión, desarrollada por las interacciones entre la capa y el núcleo durante el enfriamiento, producen una resistencia muy alta al desgaste, fatiga por flexión y fatiga por contacto rodante.

En la siguiente figura 1.15 se muestran algunos componentes típicos a los que se les aplica la cementación en su proceso de fabricación.



Figura 1.15. Componentes típicos a los que se les aplica la cementación (Smith, et al; 2006).

En la figura 1.16 se muestra una imagen visual de los dientes de un engranaje cementado, luego de pulidos y atacados.



Figura 1.16. Imagen visual de un piñón de un engranaje SAE 8620 cementado con nitrógeno-metanol (Smith, et al; 2006).

En el proceso de cementación, ya sea sólido o gaseoso, se emplean sustancias carburantes o cementantes, las cuales se descomponen obteniéndose así el carbono libre. El acero se calienta a temperaturas por encima de Ac1 (generalmente entre 900 y 930 °C o mayores), en la cual se estabiliza la fase austenita, lo cual permite la difusión del carbono en la red cristalina (Guliaev, 1978). Con el enfriamiento, desde la temperatura de cementación hasta la normal, se produce la transformación de acuerdo al contenido de carbono en las diferentes profundidades de la capa.

Prácticamente la cementación se hace a temperaturas entre (900 a 930 °C), pero existe la tendencia a elevar esta temperatura en el rango entre (950 a 970 °C) y aún más. La elevación de temperatura, aumenta la profundidad de la capa y el contenido de carbono en la superficie.

Se recomienda cementar de tal modo, que el contenido de carbono en la capa exterior no exceda del 1,1 a 1,2%. Si el contenido de carbono es mayor se forman cantidades considerables de cementita secundaria que da a la capa una fragilidad elevada. Para obtener una dureza superficial elevada y gran resistencia al desgaste, siendo tenaz el núcleo de la pieza, no basta dicho tratamiento. Las propiedades de la pieza cementada se ponen de manifiesto definitivamente después del temple, con el cual se obtiene en la superficie martensitica rica en carbono, y en el núcleo se conserva la baja dureza y la alta tenacidad. En todos los casos las piezas cementadas, después del temple, se someten a revenido a baja temperatura en el rango entre (150 a 200 °C) para eliminar las tensiones internas. Como resultado de este tratamiento la superficie deberá tener la dureza entre HRC 58 a 62, y el núcleo una mucho menor, del orden de HRC 25 a 35 en los aceros aleados y aún más baja en los aceros al carbono. Los regímenes típicos de tratamiento térmico de las piezas cementadas se muestran en la figura 1.13.

Por lo general, el temple se hace directamente con el calor de cementación, a veces después de cierto enfriamiento y de tratamiento a temperatura bajo cero (figura 1.17, a). Aunque este régimen es el más económico en cuanto a duración del proceso y al gasto de combustible, con él se conserva la granulación gruesa de la capa superficial y del núcleo; el grano de la austenita crece durante el proceso de calentamiento de larga duración para cementación. Por esto cuando de las piezas cementadas se requieren altas propiedades mecánicas después de la cementación, el enfriamiento se hace lentamente y luego se templan volviéndolas a calentar (figura 1.17, b) o incluso se templan dos veces; la primera, por encima de A_{c3} , para el núcleo, y la segunda por encima de A_{c1} para la capa superficial, (figura 1.17, c). Los calentamientos múltiples hacen que varíen las dimensiones de las piezas, por eso, si se utilizan los regímenes de tratamiento térmico indicados en la figura 1.17, b o c), las piezas cementadas deben rectificarse, lo que generalmente no se hace

en el caso de temple directo desde la temperatura de cementación. En todos los casos la operación final es un revenido a baja temperatura.



Figura 1.17. Regímenes típicos de tratamiento térmico de las piezas cementadas (Guliaev, 1978).

En el anexo 3, tabla 4 se muestra una tabla con varios tipos de aceros para cementación clasificados por el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI), y la Sociedad Americana de Automóviles (SAE), así como los tratamientos térmicos empleados en cada caso.

Características de la capa cementada

- La estructura de la capa cementada después de un enfriamiento lento desde la temperatura de cementación, se muestra en la figura 1.18. La zona superficial, en la que hay más del 0,8 a 0,9% de carbono, tiene la estructura de perlita y cementita, esta es la llamada zona hipereutectoide; después va la zona cuyo contenido de carbono es cerca del 0,8%, esta es la zona eutectoide y, finalmente, la zona hipoeutectoide, que contiene menos del 0,7% de carbono y que pasa suavemente a la estructura del núcleo.

- Se recomienda cementar de tal modo, que el contenido de carbono en la capa exterior no exceda del 1,1 a 1,2%. Si el contenido de carbono es mayor se forman cantidades considerables de cementita secundaria que da a la capa una fragilidad elevada.



Figura 1.18. Microestructura de la capa cementada después de un enfriamiento lento desde la temperatura de cementación (Guliaev, 1978).

En la figura 1.19 se muestra un gradiente de carbono en una barra de prueba y en la figura 1.20 se muestra perfil de microdureza, ambos de acero 8620 después de la cementación de gas a 925 ° C.



Figura 1.19. Gradiente de carbono en una barra de prueba de 25 mm, de acero 8620 después de la carburación de gas a 925 ° C (Lampman, 1995).



Distancia desde la superficie, mm.



Medición de la profundidad de la capa

Hay varias formas de medir la profundidad de la capa producida por un régimen de cementación dado (Lampman, 1995). Las profundidades totales de la capa se

pueden estimar a partir de las diferencias de textura entre la capa superficial y el núcleo. Una de las técnicas más comúnmente aceptadas es seccionar una parte o barra de prueba y medir el perfil de dureza. La distancia perpendicular desde la superficie hasta el punto donde la dureza cae a una dureza dada, a menudo especificada como 50 HRC (510 HV), se define como la profundidad de la capa.

La forma o geometría de la pieza también afecta la profundidad de la capa. El acceso a la atmósfera de cementación o la razón del enfriamiento puede verse afectado por formas complejas de las piezas. Por ejemplo, la profundidad de la capa de los dientes de engranaje cementados varía entre la línea exterior de la cabeza del diente y las áreas de la raíz. En la Figura 1.21 se muestran las ubicaciones recomendadas para los análisis de dureza los cuales son: líneas discontinuas normales a la superficie del diente en el perfil medio, la línea de inclinación y el radio de la raíz; además se muestra las diferencias en la línea de paso y los recorridos de la raíz para un engranaje 8620H cementado (figura 1.18). La profundidad efectiva de la capa es menor en la raíz que en la línea de exterior de la cabeza del diente.



Figura 1.21 Lugares recomendados para las mediciones de dureza del núcleo de un diente de engranaje (Lampman, 1995).

La Figura 1.23 se muestra la microestructura típica de martensita-austenita formada cerca de la superficie de los aceros cementados enfriados directamente después de la cementación. La martensita alta en carbono (oscura) está formada por una transformación de la austenita sin difusión y tiene una morfología caracterizada por cristales en forma de placa no paralelos. Los tamaños de las placas de martensita están determinados por el tamaño del grano de austenita y la formación continua de placas adicionales con temperatura decreciente. Las primeras placas se forman a la temperatura de inicio de la transformación de estas placas es, por lo tanto, equivalente al tamaño de grano austenítico. Con la disminución de la temperatura, se forman más placas de martensita entre placas grandes, y se vuelven más finas a medida que la austenita se divide cada vez más por más transformación. De acuerdo con esta secuencia de formación de martensita, cuanto más fino es el tamaño de grano de austenita, más fina es la matriz de placas de martensita.



Distancia debajo de la superficie, mm

Figura 1.22 Perfiles de dureza y profundidades de la capa efectiva a 50 HRC para ubicaciones de la línea de raíz y paso de un engranaje de acero 8620H cementado y endurecido (Lampman, 1995).


Figura 1.23. Microestructura de martensita-austenita en capa superficial del acero AISI-SAE 4121 cementado directo y templado (anteriormente acero EX24) (0.89Mn-0.55Cr-0.24Mo), micrografía óptica (Lampman, 1995).

Las áreas blancas de la figura 1.23 son regiones de austenita que no se han transformado. Esta austenita se conoce como austenita retenida y está presente debido a la alta estabilidad de la austenita con alto contenido de carbono. El aumento del contenido de carbono reduce significativamente la temperatura Ms y disminuye todo el rango de temperatura para la transformación martensítica por debajo de la temperatura ambiente. En consecuencia, siempre hay cantidades significativas de austenita retenida en los casos de aceros cementados enfriados a temperatura ambiente. La austenita retenida desempeña un papel importante en la fatiga de los aceros cementados y las cantidades del orden del 30 al 35% son comunes en la zona de la capa cercana a la superficie, sobre todo en muestras enfriadas directamente después de la cementación.

La dureza y la resistencia de la martensita aumentan al incrementarse el contenido de carbono, por lo tanto, la mayor dureza de un acero cementado endurecido está cerca de la superficie. La dureza puede alcanzar un pico a una distancia de la superficie donde disminuye la cantidad de austenita retenida, la cual es mucho más blanda que la martensita.

Con el aumento de la distancia desde la superficie cementada disminuyen la concentración de carbono en la martensita, la dureza y también el contenido de austenita retenida. A medida que disminuye la concentración de carbono en la

austenita, la temperatura de inicio de la transformación martensítica aumenta y se forma más martensita durante el enfriamiento.



Figura 1.24. Microestructura de martensita de listones en el núcleo de acero tipo 8719 cementado con gas que contiene 1,06% de Mn, 0,52% de Cr, 0,50% de Ni y 0,17% de micrografía de luz (Lampman, 1995).

La figura 1.24 se muestra la microestructura del núcleo martensítico de un acero cementado que contiene 1,06% Mn; 0,52% Cr; 0,50% Ni y 0,17% Mo. La martensita baja en carbono se conoce como martensita de listones, y la morfología consiste en placas finas, dispuestas paralelas entre sí en regiones denominadas paquetes. Los paquetes son visibles en el microscopio óptico, pero la mayoría de los listones o cristales individuales de martensita son demasiado finos para ser resueltos por microscopía óptica.

Tratamiento de nitruración

La nitruración es un proceso que consiste en endurecer la superficie de una aleación ferrosa maciza introduciendo nitrógeno en su superficie, con el mantenimiento del metal a una temperatura adecuada (por debajo de Ac1, para aceros ferríticos) en contacto con un gas nitrogenado, generalmente amoníaco y así conseguir un acabado de superficie muy duro (Guliaev, 1978). Como la capa nitrurada adquiere una gran dureza y las dimensiones de las piezas varían muy poco después de este proceso, la nitruración a diferencia de los procesos de cementación, se efectúa con las piezas acabadas, es decir, después de someterlas al tratamiento térmico y de rectificarlas hasta el tamaño exacto. No obstante, la temperatura de revenido debe

ser mayor que la que luego se utilizará en la nitruración para que el núcleo de la pieza no resulte afectado por el tratamiento superficial. La temperatura de nitruración para todos los aceros está entre (500 y 600 °C).

El proceso puede ser gaseoso (amoníaco), sólido (sales) o líquido (baño de compuestos nitrogenados).

La nitruración gaseosa se lleva a cabo en un horno de tratamiento, en virtud de la disociación de una atmósfera rica en amoníaco, según la reacción: $NH_3 \longrightarrow N + 3H$. El nitrógeno atómico resultante es absorbido por la superficie del acero y difunde hacia el interior de la pieza.

El endurecimiento superficial no se debe a la formación de una solución sólida del nitrógeno en la ferrita, sino a la formación de nitruros submicroscópicos formados en virtud de la alta afinidad del nitrógeno con determinados elementos químicos, como el aluminio, cromo, vanadio y molibdeno que, lógicamente, deben estar necesariamente presentes en la composición química del acero para poder plantearse la realización de este tratamiento superficial. Estos nitruros son fases muy duras y su precipitación tiene lugar con un aumento de volumen, que genera la aparición de tensiones residuales locales de compresión. Los aceros de construcción ordinarios y los aceros al carbono no alcanzan elevadas durezas durante el proceso de nitruración.

Los engranajes se encuentran entre los elementos de máquinas donde se emplea con frecuencia la nitruración, la cual mejora sus características de resistencia al desgaste y a la fatiga.

Las principales razones para realizar el proceso de nitruración son las siguientes:

- Obtener una alta dureza de la superficie
- Aumentar la resistencia al desgaste
- Mejorar la vida a la fatiga
- Mejorar la resistencia a la corrosión (excepto los aceros inoxidables)

• Obtener una superficie que sea resistente al efecto de ablandamiento por calor, hasta las temperaturas de la nitruración

Debido a la ausencia de un requisito de temple, que genera cambios de volumen, así como a las temperaturas relativamente bajas empleadas en este proceso, la nitruración de aceros produce menos distorsión y deformación que la cementación o el endurecimiento convencional, y los cambios volumétricos son relativamente pequeños comparados con la cementación.

De acuerdo con el sistema Fe-N en la capa nitrurada pueden formarse las siguientes fases nitrogenadas, las cuales se muestran en la figura 1.25:

- Fase ∝, ferrita nitrogenada, que contiene en disolución un 0,1% de N a 591 °C y menos de un 0,01% a la temperatura ambiente;
- Fase Υ, austenita nitrogenada, que existe como fase en equilibrio únicamente a temperaturas superiores la eutectoide (591 °C); fase Υ΄, nitruro de hierro, Fe₄N, es una fase de inserción, de cristales cubica centrados en las caras;
- Fase ε, nitruro de hierro, Fe₂N, es también una fase de inserción con campo de homogeneidad bastante amplio; tiene red hexagonal;



Figura 1.25. Microestructura de la capa nitrurada del hierro. Nitruración a 630 °C con enfriamiento lento. X 500 (Guliaev, 1978).

La medición directa de la dureza durante el proceso de nitruración ha demostrado que la dureza, extraordinariamente alta, de la capa nitrurada se debe precisamente al último proceso, es decir, a la segregación de nitruros dispersos durante el enfriamiento, la cual se conserva en el calentamiento secundario, mientras que en el proceso mismo de la saturación la dureza crece débilmente. Se puede emplear un proceso de una o dos etapas, cuando se nitrura con amoníaco anhidro (Lampman, 1995). En el proceso de una sola etapa, se usa una temperatura en el rango de (495 a 525 ° C), y la tasa de disociación varía entre 15 a 30%. Este proceso produce una capa quebradiza y rica en nitrógeno conocida como capa de nitruro blanco en la superficie de la caja nitratada.

El proceso de doble etapa, conocido también como el proceso "Floe", tiene la ventaja de reducir el grosor de la capa nitrurada blanca. La primera etapa del proceso de doble etapa es, a excepción del tiempo, una duplicación del proceso de una sola etapa. La segunda etapa puede proceder a la temperatura de nitruración empleada para la primera etapa, o puede incrementarse en el rango de (550 a 565 ° C); sin embargo, a cualquier temperatura, la tasa de disociación en la segunda etapa se incrementa entre 65 a 80 % (preferiblemente, 75 a 80%). Generalmente, es necesario un disociador de amoníaco externo para obtener la disociación más alta requerida de la segunda etapa.

El objetivo principal de la nitruración de doble etapa es reducir la profundidad de la capa blanca producida en la superficie de la capa. El uso de este proceso no es tan imprescindible, excepto en el caso que se necesite una reducción en la cantidad de amoníaco consumido por hora y en el caso que la cantidad de la capa blanca producida en la nitruración en una sola etapa no se pueda tolerar en la parte terminada o que el acabado requerido después de la nitruración se reduce sustancialmente.

Las características de la capa nitrurada son ampliamente dependiente del medio, la temperatura y el tiempo de nitruración.

En la figura 1.26 se muestra el efecto del tiempo de nitruración en la profundidad de la capa desarrollada en acero 4140 durante la nitruración de doble etapa a 525 ° C para ambas etapas. Los números indican horas de nitruración con una disociación del 15 al 25% y el resto del ciclo con una disociación del 83 al 85%. El uso de una temperatura más alta durante la segunda etapa habría producido una capa más profunda de dureza ligeramente inferior.

41



Figura 1.26. Profundidad de la capa desarrollada en el acero 4140 durante la nitruración de doble etapa (Lampman, 1995).

En la figura 1.27 se muestra la microestructura del acero 4140 templado y revenido después de nitruración gaseosa durante 24 h a 525 °C con disociación del 20 al 30 % (a) y nitruración gaseosa durante 5 h a 525 °C con 20 a 30 % de disociación seguido de una segunda etapa de 20 h a 565 °C con 75 a 80 % de disociación (b) (Lampman, 1995).



Figura 1.27. Microestructura de acero 4140 templado y revenido después de (a) nitruración gaseosa durante 24 h a 525 °C (975 °F) con disociación del 20 al 30% y (b) nitruración gaseosa durante 5 ha 525 °C con 20 a 30% de disociación seguido de una segunda etapa de 20 h a 565 °C con 75 a 80% de disociación, Ataque 2% nital. 400 × (Lampman, 1995).

Ambas muestras se enfriaron con aceite a 845 °C, templadas durante 2h a 620 °C, y se activaron en la superficie con fosfato de manganeso antes de la nitruración. La estructura después de la nitruración en una sola etapa es una capa de superficie blanca (Fe₂N) de 0,005 a 0,0075 mm, compuesta por nitruro de hierro y martensita templada. La alta disociación de la segunda etapa de la nitruración provoca la ausencia de una capa blanca, y la estructura final es una capa de nitruro difuso en una matriz de martensitica templada.

La profundidad y la dureza superficial de la capa nitrurada dependen también de la temperatura de nitruración, el tiempo que esta última dura y la composición del acero (Guliaev, 1978). La dependencia de la profundidad con respecto al tiempo que dura la nitruración se muestra en la figura 1.28 como puede verse, para obtener una capa de aproximadamente 0,6 mm de espesor la nitruración debe durar 40h a 550 °C. La velocidad de incremento de la capa crece rápidamente con la elevación de la temperatura, pero la posibilidad de esta elevación está limitada por la necesidad de obtener una gran dureza.



Figura 1.28. Influencia del tiempo que dura la nitruración en la profundidad de la capa (a) y en la dureza de la superficie (b) del acero 30XMIOA (Guliaev, 1978).

De los aceros de construcción empleados para la fabricación de engranajes los siguientes aceros deben ser nitrurados para aplicaciones específicas:

 Aceros de baja aleación con contenido medio de carbono y cromo de las series 4100, 4300, 5100, 6100, 8600, 8700 y 9800

- Aceros para troqueles de trabajo en caliente que contienen 5% de cromo, como H11, H12 y H13
- Aceros de baja aleación con bajo contenido de carbono y cromo de las series 3300, 8600 y 9300

En el anexo 4, tabla 2, se muestra algunos aceros de baja aleación, empleados para nitruración, que contienen aluminio

Conclusiones del Capítulo I

- Los engranajes son elementos de máquinas de gran empleo como parte de los mecanismos de trasmisión de velocidad y potencia, los cuales presentan una gran variedad de diseño, en dependencia de sus requerimientos de aplicación.
- Las fallas fundamentales de los engranajes de las cajas de velocidad se deben a desgaste por fatiga superficial, adhesivo y abrasivo, además de la rotura de los dientes por sobre cargas de trabajo.
- 3. Para la fabricación de engranajes de alta responsabilidad, como los que componen las cajas de velocidad de autos, se emplean diferentes tipos de aceros, generalmente aleados. Resulta común el empleo de tratamientos térmicos o termoquímicos superficiales, con lo cual se obtiene una gran dureza en la zona de contacto de los dientes y tenacidad en el núcleo de la pieza, lo que disminuye la posibilidad de rotura por sobreesfuerzo. También se emplean tratamientos térmicos volumétricos, los cuales aumentan la resistencia en todo el material y con ello la durabilidad de la pieza.

Capítulo II. Técnicas de caracterización de materiales

2.1. Técnicas de caracterización empleadas en la identificación de materiales y su estado de tratamiento térmico

La caracterización de materiales se refiere a la identificación de un material a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas y estructurales (Nava, 2014); (Fernando, 2019). Existen para ello una amplia variedad de técnicas de caracterización, con diferente nivel de complejidad, las cuales se aplican en dependencia de las características de interés del material bajo estudio y, como es lógico, de su disponibilidad.

Las principales técnicas que se utilizan en función de identificar un material y su condición de tratamiento térmico son:

- Análisis metalográfico
- Caracterización mecánica
- Análisis de composición química mediante espectrometría
- Difracción de rayos X

2.1.1. Análisis metalográfico

La metalografía es la disciplina científica que examina y determina la constitución y estructura de los constituyentes en los metales, aleaciones y otros materiales (en ocasiones es llamada materialografía. El examen de la microestructura puede realizarse en un amplio rango de escalas o niveles de aumento, que va desde el método visual o de bajo aumento (aprox. 20 X) hasta aumentos por encima del 1 000 000 X con microscopía electrónica. La metalografía también incluye el análisis de la estructura cristalina mediante técnicas tales como la difracción de rayos X. Sin embargo, la herramienta más familiar en la metalografía es el microscopio óptico, con aumentos que varían desde 50 a 1000 X, y la capacidad de resolución de 0,2 µm en adelante.

La metalografía cualitativa constituye uno de los ensayos más comunes que se realizan cuando se estudia una pieza, para comprobar sus requisitos, el estado de la capa de recubrimiento luego de determinadas condiciones de explotación o si la pieza ha cambiado su composición por algún sobrecalentamiento al que haya estado expuesta (Olmo, 2017).

Entre las características estructurales del material están el tamaño de grano, la forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades, que determinan las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal (Ornelas, 2013); (Nava, 2014); (Ortiz, et al; 2016). Estas fases que constituyen el agregado metálico son, generalmente, de tamaño microscópico, por lo tanto, el microscopio metalográfico es el principal instrumento, para la realización de un examen metalográfico.

Para que el estudio metalográfico brinde resultados confiables es imprescindible garantizar la adecuada preparación de las muestras, de acuerdo con lo enunciado en la norma ASTM E3, con vistas a obtener una superficie totalmente plana y especular.

Las principales técnicas que se siguen para realizar la preparación de las muestras son:

- extracción de muestra
- montaje
- desbaste
- pulido
- limpieza
- ataque
- observación Micrográfica.

Extracción de probetas o muestras de ensayo

Las muestras se extraen mediante el corte de una porción del material a ser analizado, teniendo en cuenta las convenciones en tamaño y la representatividad de dicha porción del total a analizar (Metalografía, 2011); (Helilton, 2013). Esto corte se realiza mediante corte con una herramienta manual o con equipo especializado como la tronzadora (figura 2.1 a). En cualquier caso, debe evitarse el calentamiento de la muestra, debido a que este puede modificar el estado del material a ensayar. Para esto se utiliza refrigerante líquido durante el corte. Las muestras deben extraerse de forma que sea representativa para el fin a que se dirige el estudio; por ejemplo, si se ha roto durante el servicio una pieza y el objeto del estudio metalográfico es determinar las causas de la rotura, la muestra debe extraerse de aquella región particular de la fractura que pueda dar el máximo de información y compararla con otra obtenida en una sección normal y sana de la pieza en cuestión. Es importante establecer el plano de corte de la superficie de análisis, como se muestra en la (figura 2.1 b).



Figura 2.1. Obtención de la muestra a) Tronzadora, b) Identificación del plano de extracción de la muestra (Nava, 2014); (Metalografía, 2011).

<u>Montaje</u>

El montaje o empastillado, consiste en embutir la probeta en alguna resina endurecible (bakelita, acrílico, etc.) (figura 2.2), de forma que el conjunto sea manejable manualmente o adecuado para insertarlos en los alojamientos de los dispositivos de preparación (Ornelas, 2013); (Nava, 2014); (Fernando, 2019).

Se realiza el montaje cuando se trata de muestras pequeñas que son difíciles de manejar o sujetar o, también, cuando se pretende observar la superficie o borde de la probeta (recubrimientos, cementación). Para evitar cortes y agarres de la probeta en los papeles y paños de pulidos, se biselan las aristas mediante desbaste en la

lijadora de cinta. Es importante tener en cuenta que, antes de realizar el montaje se debe limpiar la muestra.



Figura 2.2. Montaje de la muestra (Nava, 2014).

<u>Identificación</u>

Debe ser colocada inmediatamente después del montaje, en la parte posterior. Para ello, se pueden identificar mediante la fijación de una etiqueta o realizando la identificación mediante un grabador. La forma más conveniente, cuando se emplea resina transparente, es introducir la etiqueta en la resina de montaje, durante su preparación. De esta forma será visible después e inalterada con la preparación y el ataque posterior.

Todas las operaciones de la preparación metalográfica que se describen a continuación tienen por objeto relevar, en una superficie metálica plana, sus constituyentes estructurales para ser observadas al microscopio.

<u>Desbaste</u>

La finalidad del desbaste es la de preparar la superficie para el pulido, eliminando las capas distorsionadas, y obtener una superficie plana, ya que el microscopio tiene solo una pequeña profundidad focal, lo cual no permite enfocar la imagen simultáneamente en planos situados a distintos niveles. Mediante el posterior pulido se logra que en la superficie solo aparezcan detalles propios de su estructura, y no circunstancias ajenas a ella.

El desbaste se realiza mediante el frotado de la superficie de la muestra sobre una serie de papeles abrasivos, en una secuencia cada vez más finos. Una vez obtenido un rayado uniforme sobre un determinado papel, se debe girar la probeta 90° para

facilitar el control visual del nuevo desbaste. Cada fase será completada cuando desaparezcan todas las rayas producidas por el papel abrasivo anterior.

Los papeles abrasivos pueden ser de carburos de silicio o de corindón (Benítez, 2019). Los papeles de SiC se clasifican mediante numeración: 60, 120, 180, 220, 320, 500, 600, 800, 1000, 2400 y 4000. Este número se relaciona con el tamaño de la partícula del abrasivo. A mayor número menor tamaño de la partícula.

El desbaste puede hacerse manualmente, o mediante aparatos que se denominan desbastadoras o lijadoras. Se realiza en medio húmedo, para evitar los calentamientos que pueden modificar la estructura superficial del material de la muestra. El método más utilizado para el desbaste es mediante el empleo de un disco giratorio cubierto con el papel lija, sobre el cual se presiona manualmente la muestra (figura 2.3).



Figura 2.3. Máquina para el desbaste (Olmo, 2017).

El desbaste consta principalmente de tres etapas:

- Desbaste grosero o burdo: Se realiza de manera manual o mecánica, con el empleo de papel número 180 o más grueso. Su objetivo es eliminar las irregularidades dañadas por el corte, remover cascarillas y otras condiciones superficiales antes del montaje o eliminar material de la muestra sin necesidad de cortarla, hasta alcanzar el plano deseado para el pulido
- Desbaste intermedio y final: Este proceso se realiza en mesas de pulido y su objetivo es eliminar las rayas ocasionadas por el desbaste grosero. La muestra es desbastada sucesivamente en papel abrasivo cada vez más fino, que proporcione una buena planicidad a la muestra y elimine las rayas de operaciones anteriores. Una secuencia lógica de las lijas a utilizar es la siguiente:

240, 320, 400, 600, dependiendo del pulido de la superficie de la muestra pueden omitirse algunos números de lija.

En todos los casos se debe utilizar agua para evitar que los desechos de la lija rayen la muestra. El agua a su vez actúa como un lubricante para evitar el calentamiento de la muestra. Cuando se pasa de una lija a otra la muestra debe de limpiarse.

Cada etapa de preparación de muestras debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.

<u>Pulido</u>

El pulido consiste en eliminar las rayas ocasionadas por el desbaste final y obtener una superficie especular (Ortiz, et al; 2016). Se lleva a cabo por medio de paños en los cuales se deposita polvo abrasivo. El movimiento de la muestra se realiza mediante dispositivos giratorios.

Se pueden emplear diversos tipos de abrasivos: polvo de diamante (10, 1, 0,5 y 0,25 μ m), alúmina (5, 1, 0,5, 0,1 y 0,05 μ m), óxido de magnesio, entre otros. En cuanto a los paños de pulido, los hay de tela de billar, nylon, seda y algodón. La alúmina es el abrasivo más satisfactorio y universal desde el punto de vista metalográfico. Se emplea fundamentalmente para aceros al carbono y se puede obtener en polvo o en suspensión. Para su aplicación, primero se moja el paño con la suspensión de alúmina y luego se va añadiendo durante el pulido cuando se va necesitando, de tal modo que el paño de pulido nunca se quede seco.

<u>Limpieza</u>

Las probetas deben ser limpiadas después de cada paso El método más empleado es mantener la probeta bajo un chorro de agua y frotarla con un algodón. La limpieza ultrasónica es más efectiva (10 a 30 s), aunque en ocasiones puede dañar la muestra. Después de la limpieza se enjuaga con un chorro de alcohol y se seca rápidamente bajo un chorro de aire caliente.

<u>Ataque</u>

Una superficie pulida revela ya una serie de hechos interesantes, como pueden ser grietas, inclusiones, fases (si su forma y color las hacen diferenciables), poros, etc.

51

(Metalografía, 2011); (Ornelas, 2013). Pero, normalmente, la probeta hay que atacarla para "revelar" la microestructura (fases, límites de grano, impurezas, zonas deformadas).

El ataque puede realizarse mediante diferentes formas:

• Ataque químico

Este el método más empleado para la gran mayoría de los materiales metálicos. Puede realizarse por frotamiento (empleando un algodón impregnado en el reactivo que se pasa sucesivamente por la superficie pulida) o mediante inmersión de la muestra en el reactivo (figura 2.4) (Helilton, 2013). Inmediatamente después del ataque la probeta debe ser lavada con agua y secada con un chorro de alcohol y aire caliente.



Figura 2.4. Ataque químico por inmersión (Helilton, 2013).

Los reactivos de mayor empleo para realizar el ataque químico por inmersión en aceros son los siguientes:

NITAL: 100 ml de alcohol etílico 96 %, 1-10 ml de ácido nítrico. Utilizable para aceros al carbono, aceros, aleados y fundición gris. Resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos de los aceros. Pone de manifiesto las uniones de los granos de ferrita, la perlita se ennegrece y la cementita se mantiene blanca.

PICRAL: 100 ml alcohol etílico al 96%, de 2-4 g de ácido pícrico. Reactivo para todo tipo de aceros, con o sin tratamiento térmico. Utilizable con todos los aceros aleados, aceros especiales y fundición gris, así como para estructuras particularmente finas. Oscurece la martensita, el ataque se prolonga desde 10

segundos hasta unos cuantos minutos, si se desea un ataque más lento, se sustituye el alcohol etílico por el amílico.

VILELLA: 45 ml de glicerol, 15 ml ácido nítrico y 30 ml ácido clorhídrico. Aceros inoxidables con alto contenido en Cr. Aceros moldeados al Cr-Ni.

 Ataque electrolítico: está basado en los procesos redox. En la figura 2.5 se expone una imagen del equipo empelado y un esquema de su principio de funcionamiento.



Figura 2.5. Ataque electrolítico a) Equipo de pulido y ataque electrolítico b) esquema de funcionamiento del ataque electrolítico (Ornelas, 2013).

Observación metalográfica

El objetivo de la observación metalográfica es estudiar las características morfológicas de la microestructura. Esta se realiza mediante el empleo del microscopio metalográfico que difiere de otros tipos de microscopios por la manera en que la muestra es iluminada. Como una muestra metalográfica es opaca, se ilumina por luz reflejada.

La microscopía óptica está basada en la reflexión de un haz de luz horizontal que proviene de la fuente, dicha reflexión se produce, por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo, a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Parte de esta luz incidente, reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, llegará al objetivo y

continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; después, de nuevo se amplificará en el sistema superior de lentes (ocular).



Figura 2.6. Microscopio óptico metalográfico (Ornelas, 2013).

La máxima ampliación que se consigue con los microscopios metalográficos es, aproximadamente de 1000 x (Fernando, 2019). Con el empleo de lentes bañadas en aceite puede mejorarse este límite, hasta unos 2000 x. No obstante, esta es la mayor magnificación que se puede conseguir con la microscopia óptica debido al tamaño de la longitud de onda de la luz visible que es aproximadamente 4000 Å.

El uso general de la metalografía óptica es el siguiente (Whan, 1988):

- Obtención de imágenes de los aspectos microestructurales o topográficos de las superficies pulidas y atacadas.
- Caracterización de la estructura y dimensiones de los granos y las fases.
- Caracteriza la estructura mediante el revelado de los bordes de grano y de fase, la distribución de inclusiones y la evidencia de deformación mecánica.

Ejemplo de aplicaciones

- Determinación de la historia de fabricación y tratamiento térmico de un material.
- Determinación de la integridad de una unión soldada.
- Análisis de falla.
- Caracterización de los efectos de un proceso en la estructura y propiedades del material.

Características de las muestras:

- Material: Metales, cerámicas, compuestos o geológicos.
- Tamaño: Rangos desde 10⁻⁵ to 10⁻¹ m
- Preparación: Las muestras generalmente son cortadas y montadas, pulidas y atacadas para producir una superficie lisa y plana que posteriormente será atacada.

Limitaciones:

- Límite de resolución: Aproximadamente 1 µm
- Profundidad de campo limitada (no puede enfocar en superficies rugosas)
- No aporta información química o cristalográfica directa acerca de los aspectos microestructurales.

Tiempo de análisis estimado: Desde 30 minutos hasta varias joras por muestras, incluyendo la preparación.

Otras técnicas relacionadas son las siguientes:

- Microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés): Provee una mejor resolución, mayor profundidad de campo y microanálisis cuantitativo elemental. La superficie de la muestra es bombardeada con un haz de electrones que provee información produciendo una imagen. SEM, al igual que la microscopía óptica, se emplea para caracterizar la microestructura mediante el revelado de los bordes de grano y de fase, distribución de inclusiones y evidencia de deformación mecánica. También se emplea para caracterizar superficies fracturadas, circuitos integrados, productos de corrosión, y otras superficies rugosas, especialmente cuando se requiere de microanálisis elemental.
 - Microscopía electrónica de trasmisión (TEM por sus siglas en inglés): Provee de mucha mayor resolución en muestras especialmente preparadas, microanálisis elemental semicuantitativo, e información cristalográfica de constituyentes micro estructurales. TEM consiste en un haz pasante de electrones a través de una muestra fina. La información estructural se obtiene del análisis del haz trasmitido. TEM es utilizado para el estudio de dislocaciones o estructuras y otros pequeños

defectos en metales y aleaciones. Las partículas de fases secundarias, que no son observables mediante metalografía óptica pueden ser frecuentemente analizadas mediante TEM.

2.1.2. Análisis de composición química mediante espectrometría

La espectrometría es la técnica espectroscópica utilizada para determinar la existencia y concentración de elementos químicos en el material de ensayo (Nava, 2014). En estos casos, el instrumento que realiza tales medidas es un espectrómetro o espectrógrafo. Para ello se utilizan patrones o espectros de emisión o absorción conocidos de otras muestras. Se puede clasificar este método de las siguientes formas:

> Según la naturaleza de la excitación medida:

El tipo de espectrometría depende de la cantidad física medida. Normalmente, la cantidad que se mide es una intensidad de energía absorbida o emitida. Se pueden distinguir fundamentalmente estos tipos de espectrometría según la naturaleza de la excitación:

- Electromagnética: Interacciones de la materia con radiación electromagnética como la luz.
- De electrones: Interacciones con haces de electrones. En este caso la medida implica la energía cinética del electrón como variable.
- De masa: Interacción de especies cargadas con campos magnéticos y/o eléctricos, dando lugar a un espectro de masas. En este caso la medida es esencialmente de la energía cinética de la partícula.
- Según el proceso de medida

Se pueden distinguir los siguientes tipos de espectrometría según la naturaleza de su interacción:

- De absorción: Usa el rango de los espectros electromagnéticos en los cuales una sustancia absorbe. Incluye la espectrometría de absorción atómica y varias técnicas moleculares, como la espectrometría infrarroja y la resonancia magnética nuclear (RMN).

- De emisión: Usa el rango de espectros electromagnéticos en los cuales una sustancia irradia (emite). La sustancia primero debe absorber la energía. Esta energía puede ser de una variedad de fuentes, que determina el nombre de la emisión subsiguiente, como la luminescencia.
- De dispersión: Mide la cantidad de luz que una sustancia dispersa en ciertas longitudes de onda, ángulos de incidencia y ángulos de polarización. El proceso de dispersión es mucho más rápido que el proceso de absorción/emisión.

El análisis espectral se emplea para el análisis químico debido a que el espectro de un elemento determinado es absolutamente característico de ese elemento (figura 2.7), por lo cual es posible, estudiar o identificar la composición química de los materiales.



Figura 2.7. Espectros de emisión (superior) y absorción (inferior) de diferentes elementos químicos, a) Al, b) Fe, c) Cu, d) Ni (Nava, 2014).

La espectrometría de emisión es una de las técnicas de análisis espectral de más frecuente empleo en el estudio de materiales metálicos. En esta se usa el rango de espectros electromagnéticos los cuales una sustancia emite, luego de absorber determinado tipo de energía. Para observar el espectro de emisión de un elemento, se introduce al mismo en estado gaseoso en un tubo de descarga de baja presión

y alto voltaje entre el ánodo y el cátodo. La luz emitida se hace pasar por una rendija, después por un prisma y se obtiene el espectro. Cada línea corresponde a una longitud de onda y su grosor depende de la cantidad relativa del elemento en la muestra. La separación entre las líneas es evidencia de la existencia de los niveles de energía de los átomos.

2.1.3. Caracterización mecánica

La capacidad de un metal para cumplir los requerimientos de diseño está determinada por sus propiedades mecánicas y físicas (Kuhn & Medlin; 2000). Las propiedades físicas son aquellas que se miden mediante métodos que no requieren de la aplicación de una fuerza externa (o carga), tales como la densidad, las propiedades magnéticas, etc. Las propiedades mecánicas se describen como la relación entre fuerzas (o tensiones) que actúan sobre el material y su resistencia a la deformación y fractura. Diferentes tipos de ensayos son empleados para medir estas propiedades, tales como el modulo elástico, Resistencia ala fluencia, elongación, dureza, resistencia a la fatiga y tenacidad a la fractura. Las propiedades mecánicas son altamente dependientes de la microestructura (ejemplo: tamaño de grano, distribución de fase, contenido de fase secundaria), del tipo de estructura cristalina, y composición elemental (contenido de elementos de aleación, nivel de impurezas), por tanto, constituyen criterios necesarios para la identificación del material y de su estado de tratamiento térmico.

Cuando se trata de la caracterización de un material con vistas a su identificación, a partir de una muestra constituida por un fragmento de un elemento de máquina bajo estudio, el método de caracterización mecánica que se emplea es el ensayo de dureza.

Ensayo de dureza

El término dureza puede ser definido como la capacidad de un material de resistir la penetración o deformación permanente, en contacto con un penetrador bajo carga. Generalmente, el ensayo de dureza consiste en presionar un penetrador, de geometría y propiedades mecánicas conocidas, dentro de un material. La dureza de este es cuantificada usando una variedad de escalas que directa o indirectamente indican la presión de contacto involucrada en la deformación del material de la muestra. Debido a que el penetrador es presionado hacia el material durante el ensayo, la dureza es, además, vista como la capacidad del material de resistir cargas mecánicas de compresión. El penetrador puede ser esférico (ensayo de Brinell), piramidal (ensayos de Vickers y Knoop), o cónico (ensayo de Rockwell). En los ensayos de Brinell, Vickers y Knoop (figura 2.8), el valor de dureza es la carga soportada por unidad de área de la penetración, expresada en kilogramos por milímetros cuadrados (kgf/mm²). En el ensayo de Rockwell la profundidad de penetración a una carga dada es determinada y convertida a un número de dureza (sin unidades de medición) la cual está inversamente proporcional a la penetración.

Para obtener una data precisa con baja dispersión, la muestra debe estar adecuadamente preparada y es necesario el empleo adecuado del procedimiento de ensayo, con equipos calibrados. La norma ASTM E 384 brinda una guía de las variables de operación para los ensayos de dureza, basada en la experiencia teórica y práctica en largos períodos de tiempo empleando estos métodos.

De esta manera, existen ensayos de macrodureza, microdureza y, los relativamente novedosos, de nanodureza. Para los ensayos de macrodureza, las cargas de penetración son de 1 kgf o mayores. Los ensayos Vickers pueden usar cargas desde 1 a 120 kgf, los ensayos Rockwell varían la carga entre 15 a 150 kgf, en dependencia del tipo de penetrador y la escala de medición Rockwell. El ensayo Brinell incluye cargas desde 500 hasta 3000 kgf, aunque ocasionalmente pueden utilizarse cargas tan bajas como 6,25 kgf.

59



Figura 2.8. Forma de los penetradores en los ensayos de dureza a) Brinell, b) Rockwell, c) Knoop, d) Vickers (Kuhn & Medlin; 2000).

Los ensayos de dureza Vicker son ampliamente empleados para la realización de perfiles de dureza en secciones transversales de materiales con tratamiento térmico superficial (figura 2.9)



Figura 2.9. Perfiles de dureza Vickers a) Engranaje de acero SAE 8660 endurecido superficialmente mediante llama, b) Engranaje de acero SAE 1053 endurecido superficialmente por inducción (Kuhn & Medlin; 2000).

Ensayo de microdureza

Este ensayo se diferencia de los referidos anteriormente, en la magnitud de la superficie afectada por el ensayo. En efecto los ensayos de dureza afectan usualmente a la superficie ocupada por varios granos o compuestos. En el caso del ensayo de microdureza puede afectar solo a un grano monofásico, o compuesto homogéneo y es empleado caracterizar las distintas fases o compuestos que aparecen en la microestructura (figura 2.10). Las cargas se aplican con una velocidad mínima, manteniéndose durante unos 30 segundos. El campo de aplicación es idéntico al asignado a los ensayos de dureza Brinell, Rockwell o Vickers: materiales metálicos de durezas diversas.



Figura. 2.10. Ensayo Knoop donde se observan micro identaciones oscuras en la ferrite y claras en la austenite (500×) (Kuhn & Medlin; 2000).

Los ensayos de microdureza (Vickers y Knoop) usa pequeñas cargas, que van desde 1 gf a 1 kgf, siendo más común el empleo de cargas entre 100 y 500 gf, que además es adecuado para el ensayo de capas superficiales de 3 mm o mayor. El ensayo de nanoindentación depende de la medición simultánea de la carga y la profundidad de penetración. Para ello se emplean cargas tan pequeñas 0,1 mN, con profundidades de penetración de 20 nm.

2.1.4. Difracción de rayos x

El difractómetro de rayos X (figura 2.11) es el instrumento que permite la identificación de las estructuras cristalinas, fundamentado en la difracción según Bragg (Nava, 2014). En esencia consta de una fuente de radiación K α monocromática, frecuentemente Cu k α cuya longitud de onda es λ = 1.541 Å, un portaprobetas móvil con ángulo variable, 2 \Box , y un contador de radiación X, Geiger,

asociado al portamuestras que contabiliza la intensidad del haz difractado, en cuentas por segundo, cuando forma un ángulo 2 con la muestra y cumple con las condiciones de reflexión.

La técnica de difracción de rayos X es útil para determinar las estructuras cristalinas características usando diversas radiaciones monocromáticas λ_i , o para la identificación de sólidos cristalinos, pues existe una relación biunívoca entre espectros característicos y fases. Para esto se dispone de una colección de los espectros característicos de cada fase monocristalina. Los diagramas característicos están recogidos por la Joint Comittee on Powder Difraction Standards (JCPDS).



Figura 2.11. Difractómetro (Nava, 2014).

Conclusiones del Capítulo II

- 4. Existen distintas técnicas de caracterización de los materiales que permiten su identificación, así como la de su condición de tratamiento térmico
- En el caso del estudio del material del piñón de una rueda dentada perteneciente a una caja de cambios, se requiere de la aplicación del análisis de composición química, el análisis metalográfico y el estudio de dureza.

Capítulo III. Caracterización de un engranaje de caja de cambios de auto Lada 2105

3.1. Organización de las etapas para la caracterización del material del engranaje

El estudio de caracterización del material del engranaje de la caja de cambios de un auto ligero marca Lada 2105 se emplearon diferentes técnicas para determinar su clasificación y estado de tratamiento térmico o termoquímico, como paso previo al establecimiento de un procedimiento de recuperación por soldadura.

Como primer criterio para la identificación del material se tuvo en consideración el tipo de pieza que se estudia, la cual, según se constató en el estudio del estado del arte expuesto en el capítulo I, se fabrica de varios tipos de aceros clasificados en dos grupos generales, aceros (aleados) para tratamiento termo químico superficial o aceros para mejoramiento.

Para definir entonces el tipo de acero es necesario en este caso el estudio de la sección transversal de la muestra, con vistas a conocer la composición química, la estructura metalográfica y las propiedades mecánicas del material a diferentes distancias a partir de la superficie, lo que permite establecer la existencia o no de un tratamiento termoquímico superficial al material (y el tipo de tratamiento), así como sus características generales.

El orden de las etapas para el estudio de caracterización del material del engranaje fue el siguiente:

- Análisis de composición química de la superficie y el núcleo del engranaje, con el objetivo de identificar el material y verificar la existencia de un tratamiento termoquímico superficial.
- Caracterización metalográfica de una muestra de la sección transversal de un diente del engranaje, con el objetivo de identificar el estado de tratamiento térmico de la pieza, tanto en la superficie como en el núcleo.
- Realización de un perfil de dureza de una muestra de la sección transversal de un diente del engranaje, como complemento de la caracterización metalográfica.

3.2. Preparación de las muestras para el estudio

Fueron preparadas dos muestras para la caracterización del material del engranaje. La primera se extrajo para el estudio metalográfico y la realización del perfil de dureza, cuya preparación se describe más adelante. La segunda muestra se extrajo para el análisis de composición química de la superficie y el núcleo del engranaje. En este caso, posterior al corte, solo fue necesario realizar la limpieza adecuada de la muestra con disolventes base acetona, ya que en ella quedaban restos en la superficie del aceite utilizado en el tratamiento térmico.

3.2.1. Selección y corte de las muestras de ensayo

Para estudiar la estructura metalográfica y la dureza, tanto de las zonas cercanas a la superficie como la del volumen del material del engranaje, se obtuvo una muestra a partir del corte de la sección de un diente, en el plano de la sección transversal del engranaje, paralelo su eje de rotación (figura 3.1a), representada como dirección "F" en la figura 2.1 (del capítulo II). De igual manera se extrajo la muestra para el estudio de composición química (figura 2.1b).



Figura 2.1. Zonas del engranaje donde fueron extraídas las muestras de ensayo a) para análisis metalográfico y de dureza, b) para análisis de composición química.

Para la realización del corte se empleó una tronzadora (figura 3.2), ubicada en el Laboratorio de Tribología, de la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial (FIMI) de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV). Este medio de corte emplea como refrigerante un aceite hidrosoluble, lo que evita el calentamiento en la zona de corte y con ello cambios en la estructura metalográfica del material a estudiar.



Figura 3.2. Imagen de la tronzadora utilizada para la obtención de las muestras.

3.2.2. Montaje de la muestra

La zona de estudio metalográfico y de dureza incluye las capas de material cercanas a la superficie, por lo que es necesario el montaje de la muestra para su preparación, con vistas a garantizar la adecuada planicidad, desbaste y pulido de dicha zona. Para el montaje de la probeta se empleó un fragmento de 12 mm de largo de un tubo plástico de 25,5 mm de diámetro interior, en el que se introdujo la plastilina epóxica autoendurecible, de fabricación mexicana, comercializada como "Plastiloka" en la cadena de comercio. Este tipo de resinas epóxicas son ventajosas para esta aplicación dada la rapidez y sencillez de su empleo (no se requiere una prensa de montaje), la alta dureza y la excelente retención del borde de la muestra, así como su resistencia a los ácidos (como los empleados en el ataque) (Olmo, 2017).

El montaje se realizó de la siguiente manera:

- Limpieza de la muestra y el aro plástico con alcohol al 90 %.
- Corte a partes iguales de las barras blanca y verde de resina.
- Mezclado manual, con los dedos húmedos con agua, de ambas resinas hasta obtener un material de color homogéneo verde claro.
- Introducción de la mezcla dentro del aro plástico, llenando completamente la sección circular.
- Embutición de la muestra en la resina, dejando en la superficie la zona de estudio (figura 3.3).

De esta manera la muestra estuvo lista para comenzar la preparación de su superficie.



Figura 3.3. Muestra montada para el estudio metalográfico y de dureza.

3.2.3. Preparación de la superficie

Para la obtención de una superficie lisa, exenta de irregularidades que permitiera la observación metalográfica, se procedió primeramente al proceso de desbaste. Para esto se utilizó una máquina desbastadora (figura 3.4). La técnica consistió en la utilización de una serie de papeles de esmeril, ordenados de mayor a menor tamaño de grano, con los que se actuó secuencialmente, en direcciones perpendiculares, sobre la superficie de la muestra.



Figura 3.4. Máquina desbastadora empleada en la preparación de la muestra de ensayo.

Se tuvo en consideración que el desbaste no provocara un exceso de calentamiento en la superficie, debido a la fricción entre la lija y el metal, que afecte la estructura metalográfica del material de la muestra.

La secuencia de papeles empleados en el desbaste fue: 100, 160, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200. Se cambió de papel de esmeril a uno más fino siempre que era

eliminado el rayado del papel anterior, siempre lavando la muestra, para no introducir partículas de tamaño mayor al del papel que se va a usar.

Posteriormente se pasó al pulido de la muestra lo cual se realizó sustituyendo el papel de esmeril por paño, en la máquina desbastadora. El paño posee una superficie relativamente blanda y no abrasiva, sobre la que se impregna una suspensión de polvos abrasivos. En este caso se utilizó como abrasivo el polvo de alúmina, de granulometría de 0,1 a 0,3 µm, en una proporción de 100 a 150 g de alúmina por cada litro de agua destilada. Para su preparación se dejó sedimentar por 10 minutos para que se separen las partículas gruesas de las finas y por último se realizó el sifonado del líquido que sobrenada saliendo en él las partículas finas, la cuales fueron empleadas para el pulido.

De esta forma se obtuvo en la superficie de la muestra un brillo especular, con las condiciones necesarias para la observación mediante microscopía óptica. Finalmente, la muestra fue lavada y secada. Este proceso se realizó basado en lo establecido en el procedimiento CIS-MET-030 (2002).

3.2.4. Ataque químico

El ataque químico se realizó con el empleo de Nital (1 % de ácido nítrico + 99 % de alcohol etílico), con el fin de crear un relieve entre los límites de grano y las diferentes fases que conforman el acero, para de esta forma resaltar los aspectos microestructurales. Esta técnica consistió en sumergir la superficie de la probeta en reactivo de ataque por un tiempo aproximadamente de 15 y 20 s. Inmediatamente después de terminado el ataque la probeta fue lavada con agua destilada para evitar la oxidación y luego secada con un chorro de aire. En este caso se consideró lo establecido en el procedimiento ASTM E407 (2015).

3.2.5. Estudio metalográfico

Antes de pasar al estudio metalográfico mediante microscopía se realizó la inspección visual, en busca de una capa superficial de diferente coloración del núcleo, para verificar si la pieza fue sometida a un tratamiento termoquímico superficial.

68

Posteriormente se realizó la observación de la microestructura con el empleo de un microscopio óptico NOVEL 120 F de fabricación China, ubicado en el Laboratorio de Metalografía (figura 3.5) y aplicando el procedimiento establecido con ese fin, CIS-MET-027 (2002). Antes de montar la muestra en la platina del microscopio se garantizó la planicidad de la superficie a observar mediante una muestra manual de montaje de muestra metalográfica. Luego de ubicada la muestra se procedió a enfocar la imagen por medio del sistema de desplazamiento vertical de la platina. Una vez que la imagen se observó con nitidez, se realizó el desplazamiento horizontal para el análisis de la microestructura presente en diferentes zonas de la sección trasversal del diente y del núcleo de la sección trasversal de la muestra en diferentes zonas de la microestructura en diferentes zonas de la muestra estudiada se adquirieron digitalmente mediante una computadora acoplada al microscopio, con el empleo del programa "EDn-2.exe".



Figura 3.5. Equipamiento utilizado para la observación metalográfica.

Para el estudio metalográfico se utilizaron fundamentalmente dos aumentos, 200x y 400x. El aumento de 200x se empleó para verificar la existencia de una diferencia de coloración entre la superficie y el núcleo de la pieza, con vistas a identificar un tratamiento termoquímico. Con el aumento de 400x se realizó la observación de las microestructuras existentes en las diferentes zonas de la muestra, con vistas a la identificación morfológica de las fases.

Se observaron las microestructuras a diferentes distancias desde la superficie en la zona esquematizada en la figura 3.6, y en diferentes zonas de la muestra de ensayo. Para conocer la ubicación aproximada de la zona donde se adquirieron las

imágenes, se midió con una regla milimetrada la distancia de la superficie al punto luminoso coincidente con el foco.



Figura 3.6. Esquema de la sección transversal de la muestra (la zona sombreada indica el lugar donde se observó la microestructura a diferentes distancias desde el borde).

3.3. Estudio de dureza

Los ensayos de dureza fueron realizados con el empleo de un microdurómetro Vicker, marca Shimatzu, japonés, el cual está ubicado en el Laboratorio de Tribología.

El ensayo se inició localizando con el objetivo del microscopio la zona donde se desea medir la dureza; una vez seleccionada, se sustituye el objetivo por una pieza que sostiene el penetrador sobre el cual se ha ubicado previamente la carga de ensayo. Se hace actuar el penetrador sobre la superficie un tiempo de ensayo dado. A continuación, se sustituye de nuevo el penetrador por el objetivo micrométrico para poder medir las diagonales de la huella piramidal marcada sobre el metal. Con estas medidas se consulta la tabla de conversión de donde se obtiene finalmente el valor de la dureza en HV.

Para los ensayos se utilizó una carga de 300 g durante un tiempo de 15 segundos. Las identaciones se realizaron en la zona que se muestra en el esquema de la figura 3.6. A partir de la superficie se midió a 11 distancias diferentes, empleando un paso de 0,5 mm establecido mediante el sistema de desplazamiento de la platina, con lo cual se obtuvo un perfil de dureza.

Los resultados de dureza Vickers (HV) se convirtieron a dureza Rockwell para su comparación con otros estudios reportados, mediante una tabla de conversión brindada en la literatura (Kuhn, 2000).

70

3.4. Estudio de composición química

La caracterización química del engranaje se realizó mediante espectroscopía de emisión atómica, empleando un equipo marca "Belec Spektrometrie Opto-Elektronik", de la empresa Planta Mecánica, en Santa Clara. Este análisis se realizó en la zona del corte transversal, para determinar la clasificación del material del engranaje, según su composición química y sobre la superficie de la muestra, para verificar la existencia de un tratamiento termoquímico superficial.

3.5. Análisis de resultados de la composición química

Los resultados de composición química del material en la superficie y el núcleo del engranaje se exponen en la tabla 3.1.

Elemento	Contenido (el % de masa)	
	En el	En la superficie
	núcleo	
С	0,215	0,829
Cr	0,513	0,455
Ni	0,472	0,463
Мо	0,164	0,164
Si	0,228	0,225
Mn	0,874	0,790
Cu	0,142	0,151

Tabla 3.1. Composición química del material que compone el engranaje

A partir de estos resultados de composición química se hace evidente que el acero presenta un tratamiento termoquímico superficial. La variación de la composición química, entre el núcleo y la superficie de todos los elementos, a excepción del carbono, se encuentra en todos los casos en el orden de la centésima de %, lo que cae en el margen de error de la medición, por lo cual puede considerarse que se mantiene constante.

La mayor concentración de carbono en la superficie, comparado con la del núcleo, es muestra de un tratamiento termoquímico de cementación. El contenido de este elemento (≈ 0,83 %) se encuentra en el rango reportado para la capa superficial en aceros cementados luego de este tratamiento (Guliaev, 1978); (Lampman, 1995). En la figura 1.15 (del capítulo I epígrafe 1.3.2) se observa que para un acero AISI/SAE 8620, luego de la cementación gaseosa, se obtiene un contenido de carbono aproximadamente igual al obtenido en el ensayo de la superficie de la muestra, lo cual avala este resultado y resulta coherente con el tipo de pieza que se estudia, pues como se expuso en el epígrafe 1.3.2, la cementación es un tratamiento empleado frecuentemente en la fabricación de engranajes.

Referido a la composición del núcleo, este material es un acero aleado de bajo carbono, como los empleados para la construcción de piezas cementadas, sin embargo, su composición química no se incluye dentro de los rangos establecidos para los diferentes grupos de aceros para cementación clasificados por GOST 4543-71 (Guliaev, 1978); (Dokumen, 2015). El de mayor semejanza es el 20XH ya que el carbono y el cromo coinciden con los resultados del material estudiado, no siendo así para los restantes elementos de aleación.

Cuando se compara con los aceros para cementación clasificados por AISI/SAE (tabla 4 del anexo 3) se comprueba que los rangos de composición reportados para el acero 8620 (tabla 3.2) incluyen los resultados de composiciones química del material del engranaje bajo estudio.

Tabla 3.2. Composición química del acero AISI/SAE 8620 (Aplicaciones-aceros, 2020)

Elemento	Composición
	química (% de
	masa)
С	0,18 – 0,23
Mn	0,70 - 0,90
Si	0,20 – 0,35
Cr	0,40 - 0,60
Ni	0,40 - 0,70
Мо	0,15 – 0,25

El acero 8620 es clasificado por AISI/SAE como de media templabilidad (tabla 1.7 del epígrafe 1.3.1), dirigido a la fabricación de piezas de mediano tamaño, solicitadas a la fatiga, tales como piñones y coronas de diferencial, engranajes de alta revolución, entre otras. Las propiedades mecánicas del núcleo luego de la cementación son una resistencia a la tracción (σ_r) de 850 MPa y una dureza de 255
HB. El tratamiento de cementación típico para este acero es una cementación entre 900 y 930 °C, temple desde 845 °C (en aceite) y revenido a 150 °C.

En la tabla 3.3 se muestra un listado de varios homólogos del acero AISI 8620, clasificado por normas de varias organizaciones internacionales de diferentes países.

Fed. R. of Germany (DIN)	Japan (JIS)	United Kingdom (BS)	France (AFNOR NF)	ltaly (UNI)	Sweden (SS ₁₄)
1.6522,	G4052	2772	18NCD4	5331	2506-03
20NiCrMo2	SNCM21H	806M20	20NCD2	20NiCrMo2	2506-08
1.6523,	G4052	970	A35-551	6403	
21NiCrMo2	SNCM220H	805A20	19NCDB2	20NiCrMo2	
1.6526,	G4103	970	A35-552	7846	
21NiCrMoS2	SNCM21	805H20	19NCDB2	20NiCrMo2	
1.6543,	G4103	970	A35-551		
21NiCrMo2	SNCM220	805M20	20NCD2		
2		(En362)	A35-553		
			20NCD2		
			A35-565		
			20NCD2		
			A35-566		
			20NCD2		

Tabla 3.3. Aceros homólogos del AISI/SAE 8620 (Lampman, 1995)

3.6. Análisis de los resultados del estudio metalográfico

De manera preliminar, macroscópicamente se pudo observar luego del ataque la diferencia de coloración del contorno exterior de la muestra en la zona de la evolvente de los dientes (figura 3.7a). Esta diferencia en el macroataque es un indicador de la existencia de estructuras metalográficas diversas en la superficie y el núcleo, lo cual, según se reporta en la literatura (Lampman, 1995) es típico de los aceros tratados superficialmente (figura 3.7b) y corrobora el resultado del epígrafe anterior.



Figura 3.7. Imagen macrográfica de muestras cementadas a) muestra del engranaje bajo estudio b) perfil dientes de engranaje sometido a cementación gaseosa a 980 °C (Lampman, 1995).

En la figura 3.8a se muestra una imagen con un mayor aumento, donde se aprecia con mayor claridad la diferencia de coloración entre la capa superficial de la muestra y el núcleo.



Figura 3.8. Imagen de la capa cementada de la muestra de estudio a) aumento de 200x, b) aumento de 400x.

La morfología de la microestructura de esta capa cementada (figura 3.8b) es fina, con forma de agujas, típica de la martensita de alto carbono y elevado grado de subenfriamiento (Guliaev, 1978), (Lampman, 1995). En la figura 3.9 a y b, y en el anexo 5, se muestran imágenes de microestructuras martensíticas en aceros de alto carbono, con morfología similar, que apoyan la afirmación anterior. Considerando la composición química de la capa superficial de la muestra del engranaje, con elevado contenido de carbono (≈ 0.83 %) y elementos de aleación que aumentan la templabilidad del acero (Cr, Ni, Mo, Mn), así como el efecto del tratamiento térmico

que acompaña a la cementación (temple + revenido bajo), la formación de este tipo de microestructura en la capa cementada es un resultado esperado.

En la figura 3.8b se observan zonas claras entre las agujas de martensita que pudieran revelar la presencia de austenita residual, lo cual es de esperar dado el elevado contenido de carbono y la condición de tratamiento térmico de la capa superficial del engranaje. Lo anterior se debe a que el alto contenido de carbono de la capa (> 0,8 %) disminuye significativamente la temperatura de transición Ms y reduce el rango de temperatura para la transformación completa de la martensita por debajo de la temperatura ambiente. Esta fase residual juega un rol significativo en la resistencia a la fatiga de los aceros cementados y cantidades en el orden entre 30 a 35 % son comunes en las capas superficiales de los aceros templados directamente luego de la cementación.

La austenita residual se hace visible mediante microscopía óptica generalmente cuando el contenido de esta fase supera el 20 %. Al comparar con las imágenes de microestructuras de capas cementadas, mostradas en la figura 3.9 a y b, donde se refiere la presencia de una microestructura mixta de martensita + austenita residual, se observa semejanza.



Figura 3.9. Estructura típica de la martensita en capas de cementadas a) Microestructura mixta de martensita + austenita residual de la capa cementada de acero un acero SAE 4121 (0,17- 0,22 de C; 0,89 % de Mn; 1,55 % de Cr; 0,24% de Mo; b) capa cementada de acero AISI 3310 steel (0,08-0,13 de C; 0,45-0,60 Mn;

0,20- 0,35 Si; 0,40-1,75 Cr; 3,25-3,75 Ni), conteniente de martensita revenida y un 30 % de austenita retenida; ambos atacados con Nital (Lampman, 1995).

La zona del núcleo mostró una microestructura con una morfología totalmente diferente a la de la superficie (figura 3.10). En este tipo de acero, que dada su composición química posee una templabilidad intermedia, el núcleo cambia su estructura y propiedades con el tratamiento térmico que acompaña a la cementación. Al ser un acero hipoeutectoide, con aproximadamente 0,2 % de carbono, su estructura en estado recocido se compone de ferrita + perlita, similar a la que se observa en la figura 1.10 del capítulo I. La microestructura obtenida en el núcleo de la muestra del engranaje no presenta esa apariencia, en cambio se observan fases con formas alargadas, en ocasiones más finas y con forma de aguja, con morfología de estructuras de no equilibrio, lo que demuestra el efecto del tratamiento térmico en el núcleo del material del engranaje. A medida que aumenta la distancia desde la superficie se pueden definir granos de mayor tamaño y diferente coloración.



Figura 3.10. Microestructuras típicas de diferentes zonas del núcleo de la muestra, a) separado aproximadamente 5 mm de la superficie, b) separado aproximadamente 8 mm de la superficie, c) separado aproximadamente 15 mm (400 X).

Al comparar con microestructuras resultados de tratamientos de temple y revenido, como la mostrada en la figuras 3.11, se aprecia cierta semejanza, fundamentalmente en la forma acicular y las diferencias de coloración entre constituyentes o granos.



Figura 3.11. Microestructuras resultantes de temple y revenido, con una mezcla de bainita (constituyente oscuro) y martensita (constituyente gris claro) en un acero de baja aleación AISI/SAE 4340 templado y revenido, atacado con 4% picral + 2% nital (aumento original de 500x) (Vander, 2004).

En la figura 1.24 del capítulo I se muestra una microestructura martensítica en el núcleo de un acero de clasificación AISI/SAE 8719 (1,06% de Mn; 0,52% de Cr; 0,50% de Ni; 0,17% de Mo) sometido a cementación gaseosa (Lampman, 1995), donde también se observan semejanzas con la obtenida en la metalografía del núcleo de la muestra bajo estudio, lo que ratifica la hipótesis de la existencia de estructuras de temple en el núcleo del engranaje estudiado.

Los diferentes tamaños de los constituyentes o granos que se observan a medida que cambia la distancia a la superficie se explica debido al cambio de las condiciones de enfriamiento a diferentes profundidades y la disminución de la velocidad de enfriamiento a medida que aumenta la distancia desde la superficie, como se esquematiza en la figura 3.12 (Guliaev, 1978). Cuanto más lentamente se efectúa la transformación, menor pendiente presentan las curvas de enfriamiento en el diagrama de descomposición isotérmica de la austenita y por tanto diferentes serán las estructuras resultantes, tanto en el tipo de constituyentes obtenidos como en el tamaño de estos, haciéndose más finos a distancias más cercanas a la superficie, donde mayor es el grado de subenfriamiento.

77



Figura 3.12. Esquema demostrativo del efecto de la profundidad en la velocidad de enfriamiento y el efecto en la templabilidad (Guliaev, 1978).

El resultado de este estudio metalográfico demuestra que el tratamiento térmico que acompaña al proceso de cementación tuvo efecto en la estructura metalográfica del núcleo de la pieza, como es de esperar que ocurra al tratarse de un acero de templabilidad intermedia como es el caso del acero AISI/SAE 8620.

3.7. Análisis de los resultados del estudio de dureza

En la tabla 3.4 se muestran los resultados de los ensayos de dureza realizados a diferentes distancias desde la superficie, en la dirección expuesta en la figura 2.6.

Ensayo	Distancia desde la superficie (mm)	Valor promedio de Dureza Vickers (HV)	Conversión a Dureza Rockwell (HRC)
1	0,5	811	63
2	1	639	58
3	1,5	486	48
4	2	393	40
5	2,5	363	37
6	3	347	35
7	3,5	312	31
8	4	298	30
9	4,5	287	28
10	5	274	26
11	5,5	295	29

Tabla 3.4. Resultados de los	s ensayos de dureza	en el perfil de	la muestra
------------------------------	---------------------	-----------------	------------

Con los datos de la tabla 3.4 se obtuvo la curva de perfil de dureza, la que se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13. Perfil de dureza de la sección transversal de la muestra del engranaje.

Se puede apreciar que los valores de dureza tienen un comportamiento descendente a medida que el punto de ensayo se aleja de la superficie, haciéndose estable estas mediciones a distancias de 3,5 mm, lo cual se asocia a la profundidad de capa afectada por la cementación. A distancias mayores que estas se mantiene una dureza en el rango entre 280 y 300 HV, las cuales son cercanas a las reportadas para el núcleo de aceros aleados cementados y endurecidos (Guliaev, 1978), así como la que se expone en el anexo 3, tabla 5 para el núcleo del acero AISI/SAE 8620 cementado (Aplicaciones-aceros, 2020).

Al comparar este resultado con los perfiles de dureza mostrados en las figuras 1.19 y 1.20 del capítulo I, reportados en la literatura (Lampman, 1995) para una barra de 16 mm de diámetro de acero AISI/SAE 8620 y un engranaje de acero AISI/SAE 8620H, ambos cementados y endurecidos, se observa una notable coincidencia, tanto en los valores de dureza como en las distancias a las que se obtienen. La dureza máxima de la capa está en el orden de los 800 HV (64 HRC), lo cual se asocia, para el acero AISI/SAE 8620 con un contenido de carbono ligeramente

superior a 0,8 % (según la figura 1.19), coincidiendo esto con los resultados brindados por el análisis de composición química de la superficie de muestra del material bajo estudio.

El ancho de la capa cementada (*case depth* en la literatura en inglés) se estima a través de la medición de dureza y se establece como la distancia entre la superficie y el punto en que la dureza cae por debajo de los 50 HRC, en una línea perpendicular a la superficie. En el caso de la muestra estudiada esta dureza se reporta a una distancia de la superficie del orden de los 1,5 mm, la cual es mayor a las representadas en las figuras 1.19 y 1.20 del capítulo I, de los perfiles de durezas de aceros cementados. Este espesor de capa está regulado por los diferentes factores que controlan la concentración de carbono en la superficie, tales como los parámetros del proceso, el tiempo y la temperatura, el tipo de atmósfera, las sustancias empleadas, etc., según se describió en el epígrafe 1.2.2. Esto explica la diferencia entre el espesor de capa en la muestra de estudio y los reportados en la literatura.

De esta manera se ratifican los criterios antes expuestos a favor de la identificación del material del engranaje como un acero de templabilidad intermedia, con clasificación AISI/SAE 8620, cementado y endurecido.

Los resultados obtenidos en cuanto a composición química, estructura metalográfica y dureza afectan negativamente la soldabilidad del material del engranaje, con vistas a una posible recuperación de estas piezas mediante el método de soldadura.

80

Conclusiones del Capítulo III

- El engranaje del auto tipo Lada 2105 está constituido de un acero aleado, clasificado por AISI/SAE como 8620, el cual posee un tratamiento termoquímico superficial de cementación.
- 2- La estructura metalográfica de la sección transversal de la muestra del engranaje es heterogénea, lo cual es de esperar en un acero cementado y posteriormente endurecido mediante temple y revenido bajo. La capa superficial está compuesta fundamentalmente por una microestructura con morfología de martensita y en el núcleo se observan microestructuras con presencia de constituyentes aciculares, típicas del acero mejorado.
- 3- Los resultados del perfil de dureza apoyan los obtenidos en la caracterización química y metalográfica para un acero de bajo carbono cementado.

Conclusiones Generales

- 1- Los engranajes que componen las cajas de velocidad de autos se fabrican generalmente de aceros aleados y tratamientos termoquímicos superficiales, lo cual le aporta dureza en la superficie y tenacidad en el núcleo de la pieza para soportar las cargas de trabajo a los que se someten estos elementos de máquina durante su explotación.
- 2- El material de los engranajes de la caja de cambios del auto marca Lada 2105 está constituido por un acero de bajo carbono aleado, de templabilidad intermedia, clasificado por AISI/SAE como 8620, el cual fue sometido a un proceso de cementación y un endurecimiento posterior mediante temple y revenido.
- 3- Las características del material del engranaje bajo estudio, la complejidad geométrica de la pieza y de las zonas de deterioro, afectan negativamente la soldabilidad del material y elevan la complejidad del procedimiento de soldadura a emplear en su recuperación.

Bibliografía

1. Benítez Hernández, Luis E. Las fallas en los engranajes. Ingeniería e investigación. Issue 12, p. 40-52, 1985.

 Castillo Rodríguez, F. D. Engranes: Historia, Fabricación y Fallas. Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. (2013).
 111p

3. Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS-UCLV). Procedimiento de preparación de muestras. CIS-MET-030. Santa Clara, 2002

4. Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS-UCLV). Procedimiento de observación de muestras por microscopia óptica. CIS-MET-027, 2002

5. Colectivo de autores. Engranajes cilíndricos, Material docente de la asignatura elementos de máquina П. Ubicada en el portal docente. sitio: \\10.12.1.68\fimi\Carreras\CRD\Ing Mecánica\4to año\Segundo Semestre\Elementos. de. Máquina II \ materiales-docentes\Engranajes. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Fecha de consulta: Octubre, 2019

 Dudley, Darle W. Manual de engranajes. Cia. Edit. Continental S.A., México, 1980. 472p

7. Dokumen. Guía para la selección y conversión de aceros soviéticos a otras normas internacionales. (2015) Obtenido del sitio: https://dokumen.tips/. Fecha de consulta: 2020

8. Fernando Rodríguez, Oscar. Técnica Metalografia, preparación de muestras.
Obtenido del sítio: https://metaensayos.webcindario.com/tecnicametalografica/.
Fecha de consulta: Noviembre, 2019

9. Guliaev, A, Metalografía. Tomo I. Editorial Mir MOSCÚ. Traducción al español, Ed. 1978 334p

Guliaev, A, Metalografía .Tomo II. Editorial Mir MOSCÚ. Traducción al español,
 Ed. 1978 295p

11. Getauto, Caja de cambios. Fuente: https://getauto.es/Caja de cambios/. Fecha de consulta: enero 2020

12. Helilton Morais, R. L. Análise de ataques químicos para revelação de microestrura de soldas dissimilares de aços inoxidáveis austeníticos y ferríticos.(2013) Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de

Materiais. Tutor: Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva. Universidade Federal do Ceará. Obtenido del sitio: http://www.repositoriobib.ufc.br/000020/0000208e.pdf. Fecha de consulta: Diciembre, 2019

13. Kuhn, Howard; Medlin, Dana. (Eds) Mechanical Testing and Evaluation. ASM HandBook Volume 08. ASM International, USA (2000) 2235 p

14. Lampman, Steven R. (Tech. Ed.) Heat Treating. ASM Handbook Volume 04 ASM International, USA (1995) 2173 p

15. Machado Rodriguez, Á. S.; Moya Rodriguez, J. L., Principales fallas en las transmisiones por engranajes. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Centro Azúcar Vol 32(4) (2005) p62-67

16. Nava Castillo. Caracterización de materiales. (2014) Obtenido del sitio:

https://pt.slideshare/raecabrera/capitulo-6-caracterización-de-materiales: Fecha de consulta: octubre, 2019

17. Olmo Rendón, Inmaculada. Estudio metalográfico de aceros empleados para impartir docencia en Ingeniería de Materiales. Proyecto Fin de Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales. (2017) Tutor: Prof. Dr. D. Laureano Soria Conde. Dep. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. Obtenido del sitio: bibing.us.es/ proyectos/abreproy/91361/. Fecha de consulta: febrero, 2020

18. Ornelas Guzman, C. F. Análisis de aceros por microscopia óptica. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Mecánico. (2013) Tutor M en I Jesus García Lira. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de ingeniería mecánca y eléctrica, México. Obtenido del sítio: https://tesis.ipn.mx/bitstrem/handle/. Fecha de consulta: Enero, 2020

19. Ortiz Cardona, Luís Felipe; Pulido Jaramillo, Andrés Felipe; Mesa Grajales, Dairo Hernán. Caracterización mecánica, metalográfica y tribológica de un buje metálico del cable aéreo de manizales Scientia et Technica Año XVIII, No xx, mayo de 2016. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

20. Pallí Pérez, Osmany; Machado Rodríguez, A. S.; Moya Rodríguez, L. S. Fallas superficiales transmisiones por engranajes metálicos. (2018). Obtenido del sítio:

84

https://www.monografias.com/trabajosf-pdf5/fallas-superficiales-transmisionesengranajes/. Fecha de consulta: marzo, 2020

21. Rodes, 2019. Caja de cambios, obtenido del sitio: https://www.ro-des.com/Caja de cambios/. Fecha de consulta: 2019

22. Smith, W. F.; Hashemi, J.; Cázares, G. N.; González Cave, P. A., Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. McGraw-Hill México (2006) 765p

23. Suárez Michelena, J. A. Deterioro y modo de fallo en engranajes. Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica. (2017) Tutor: Dr. Ángel Machado. Facultad de ingeniería mecánica. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Obtenido de: Dspace.uclv.edu.cu. Fecha de consulta: febrero, 2020

24. Vander Voort, George F. (Ed) Metallography and Microstructures. ASM Handbook Volume 9. 10ma Edición. ASM International, USA (2004). 2733p

25. Whan, Ruth E. (Ed) Materials Characterization. ASM Handbook Volume 10. 5ta Edición. ASM International, USA (1998) 1310p

26. ASTM. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM E407 (2015). Ed. ASTM International. EUA

27. Torres Búa, Manuel. Mecanismos. DOG Núm. 89 (2014). Ed. Consellería de Cultura, Educación e Ordenación Universitaria de Galicia. Publicado en el sitio: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/146494767 3/contido/index.html. Fecha de consulta: 26 de junio de 2020

28. Fersainz, Rodrigo. Mecánica básica: ¿cómo funciona la caja de cambios? Publicado en el sitio https://www.autobild.es/practicos/mecanica-basica-como-funciona-caja-cambios-287971. (2016)

85

Anexos

Anexo 1. Cajas de velocidad







Figura 2. Caja de cambios manual de un auto ligero (Getauto, 2020).

Continuación Anexo 1



Figura 3. Caja de cambios automática de un auto ligero (Getauto, 2020).

Anexo 2. Fallas frecuentes en los engranajes de cajas de velocidad



Figura 1. Falla por desgaste abrasivo (Pallí, et al; 2018).



Figura 2. Falla por fatiga superficial (Benítez, 1985).

Continuación del Anexo 2



Figura 3. Falla por rotura de diente (Suárez, 2017).



Figura 4. Falla por desgaste adhesivo (Suárez, 2017).

Continuación del Anexo 2



Figura 1. Clasificación general de las fallas en los engranajes (Machado & Moya; 2005)

Anexo 3. Aceros para la fabricación de engranajes

Norma					Compo	sición quí	mica en %)			
GOST	C	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	Ni	V	Cu	Otros
12XH3A	0,09-0,16	0,17-	0,30-	0,025	0,025	0,60-	-	2,75-	-	<0,30	-
		0,37	0,60			0,90		3,15			
12X2H4A	0,09-0,15	0,17-	0,30-	0,025	0,025	1,25-	-	3,25-	-	<0,30	-
		0,37	0,60			1,65		3,65			
12XM	<0,16	0,17-	0,40-	0,025	0,025	0,80-	0,40-	<0,30	-	<0,30	-
		0,37	0,70			1,10	0,55				
15X	0,12-0,18	0,17-	0,40-	0,040	0,040	0,70-	-	<0,30	-	<0,30	-
		0,37	0,70			1,00					
15XM	0,11-0,16	0,17-	0,40-	0,035	0,035	0,80-	0,40-	<0,25	-	<0,20	-
		0,37	0,70			1,10	0,55				
15G	0,12-0,19	0,17-	0,70-	0,035	0,025	<0,30	-	<0,25	-	<0,30	-
		0,37	1,00								
18XG	0,15-0,21	0,17-	0,90-	0,035	0,035	0,90-	-	<0,30	-	<0,30	-
		0,37	1,20			1,20					
18X2H4M4	0,14-0,20	0,17-	0,25-	0,025	0,025	1,35-	0,30-	4,00-	-	<0,30	-
		0,37	0,55			1,65	0,40	4,40			
18G	0,14-0,20	0,15-	0,80-	0,040	0,045	<0,30	-	<0,30	-	<0,30	-
		0,30	1,10								
20	0,17-0,24	0,17-	0,35-	0,035	0,040	<0,25	-	<0,25	-	<0,25	-
		0,37	0,65								
30X	0,24-0,32	0,17-	0,50-	0,035	0,035	0,80-	-	<0,30	-	<0,30	-
		0,37	0,80			1,10					

Tabla 1. Aceros para cementar. Relación de marcas de aceros según las normas GOST (Dokumen, 2015)

30XM	0,26-0,34	0,17-	0,40-	0,035	0,035	0,80-	0,15-	<0,30	-	<0,30	-
		0,37	0,70			1,10	0,25				
30X3MF	0,27-0,34	0,17-	0,30-	0,035	0,035	2,30-	0,20-	<0,30	0,06-0,12	0,30	-
		0,37	0,60			2,70	0,30				
30G	0,27-0,35	0,17-	0,70-	0,035	0,035	<0,30	-	<0,30	-	0,30	-
		0,37	1,00								

Continuación del anexo 3

Tabla 2. Conversión de la marca GOST a otras normas internacionales de los aceros para cementar (Dokumen, 2015)

Norma GOST	Códig o norm a alem a-na	DIN	AFNOR	B.S.	UNI	JIS	SS	UNE	AISI	GB	EN
12XM	1.733 5	13CrMo4- 4	15CD3. 5 15CD4. 5	1501- 620 ó Gr27 620-440	14CrMo3 16CrMo3	SFVAF*	2216*	F2631	F11; F12 ASTMA1 82	12CrMo	13CrMo4- 5
15X	1.701 5 1.701 6	15Cr3	12C3 18C3	523M15	16CrNi4*	SCr415(H)	2511*	F150B*	5015 5115	15CR	15Cr2
15XM	1.733 5	13CrMo4- 4	15CD3. 5 ó 15CD4. 5	1501- 620 ó Gr27 620-440	14CrMo3	SFVAF1 2*	2511* 2216*	F2631	F11; F12 ASTMA1 82	12CrMo	13CrMo4- 5
15G	1.046 7	16MnCr5*	XC18*	527M17*	16CrNi4*	SLA33*	2174*	F15OB*	1119*	15Mn	S355JO*
18XG	1.713 1	16MnCr5	16MC4	527M17 590M17	16MnCr5	SCM420 H*	2511 2173	F1516 F1517	5115	15CrMn	16MnCr5
18X2H 4MA	1.276 4	17CrNiMo 6*	14NC11 *	835M15	16NiCrMo1 2*	SNCM61 6*	2512** ó F15OE* *	F156	E3316*	G20Cr2 Ni4**	18CrNiMo 14*

18G	1.046 9	20MnCr5*	16MC5*	527M17*	C16*	SM41B*	2174*	F120L*	1120*	20Mn	S355JO
20	1.115 1	Ck22 Ó C22E	2C22 XC25 ó XC18	050ª20 055M15	C20 C25	S20C ó S20Ck	1312* 1450	F1120- C25k	1020 1023	20	C20D*
30X	1.703 0	25CrMoB3 3* 28Cr4	25CD4*	530ª30	30CrMo4*	SCr430*	2233*	F125*	A3130* 5130	30Cr	34Cr4*
30XM	1.721 8	25CrMo4	25CD4 25CrMo 4	1717 ó CDS110 708ª25	25CrMo4(K B)	SCM420 ó SCM430	2225	F8372- AM ó F8330- AM	4130	30CrMo	34CrMo4*
30X3M F	1.770 7	25MoCrS4 *	30CD12 *	720M32*	-	SNCM63 0*	2534**	F124A*	-	-	39CrMoV 13*
30G	1.114 6	-	XC32*	605 ^a 32*	C30*	SMN433 H*	2225**	F120.1*	8632*	30MN	-

*Puede ser usado como sustituto.

**Puede ser usado como sustituto limitadamente.

Continuación del anexo 3

Tabla 3. Conversión a otras marcas internacionales de los aceros para el mejoramiento térmico con marca según norma GOST (Dokumen, 2015)

Norma GOST	Norma Aleman a	DIN	AFNOR	B.S.	UNI	JIS	SS	UNE	AISI (SAE)	GB	EN
30XM	1.7218	25CrMo 4	25CD4	708A25 1717CDS 110	25CrMo4 (KB)	SCM420 ó SCM430	2225	F.8372- AM26CrMo4 ó F.8330- AM25CrMo4	4130	ML30CrM oA	25CD4
30X	1.7030	28Cr4	30CAD6.1 2*	530A30	30CrMo4*	SCr430*	2130 *	F.1200*	5130	30Cr	34Cr4*
30GC	1.1165	30Mn5	35M5	120M36 (150M28)	30CrMo4* *	SCMn2 ó SMn433H	2233 *	F.8211-30Mn5 ó F.8311- AM30Mn5	1036 1330	30Mn	-
35	1.1181	Ck35 C35E	XC32 ó 2C35 ó XC38H1	080A35	C35	S35C	1550 1572 *	F.1130-C35K	1035 1038	35	C35E
35X	1.7033	34Cr4	32C4 34Cr4	530A32 530H32	34Cr4(KB)	SCr430(H)	2545 *	F.8221-35Cr4	5132	35Cr	34Cr4
35XM	1.7220	34CrMo 4	35CD4 34CrMo4	708A37	35CrMo4 35CrMo4 F	SCM432 ó SCCrM3 SCM435H	2234	F.8331- AM34CrMo4 Ó F.8231- 34CrMo4 F:1250- 35CrMo4	4137 y 4135	35CrMo	34CrMo 4
35G2	1.1167	36Mn5	35M5 40M5	150M36	35CrMn5* *	SMn438(H) ó SCMn3	2120	F.1203-36Mn6 Ó F.8212- 36Mn5	1335	-	-

38X2H2M	1.6582	34CrNiM	35NCD6	817M40	35NiCrMo	SNCM447	2541	F.1272-	4337	-	34CrNi
		06	34CrNiMo8	816M40	6			40NiCrMo7	4340		Mo6
					(KB)						
38X2MIU	1.8509	41CrAIM	40CAD6.1	311-Type	41CrAlMo	SACM645	2940	F.1740-	A355CLA	38CrMoAl	41CrA1
		07	2	7	7			41CrA1Mo7	E71400		Mo7
			40NCD2								
38XGHM	1.6546	40NiCrM	38CMND8*	311-Type	40NiCrMo	SNCM240	2541	F.1204-	8740	-	40NiCr
		o2-2		7	2		*	40NiCrMo2			Mo2KD
					(KB)						
40	1.1186	Ck40	2C40	060A40	C40	S40C	1957	C42	1040	4D	C40E
	C40E						*				
40X	1.7035	41Cr4	42C4	530M40	41Cr4	SCr440(H	2245	F.1202-42Cr4	5140	40Cr	41Cr4K
		45C4	41Cr4	530H40	41Cr4KB)	*	F.1211-			D
								41Cr4DF			
40XF	1.7223	41CrMo	42CD4TS	708M40	41CrMo4	SCM440	2244	F.8232-	44140 ó	-	41CrMo
		4						AM42CrMo4	4142		4*
								Ó F.1252-			
								40CrMo4			
40XH	1.5711	40NiCr6	40NCD3*	640M40	38NiCrM	SNC236**	2541	40NiCrMo4*	(*)3140	40CrNi	40NiCr
					O4*		**				Mo4KD
40X2H2M	1.6565	40NiCrM	40NCD3*	311-Type	40NiCrM	SNCM439	2541	F.1272-	4340	40CrNiMo	-
A		06		6	07*		**	40NiCrMo7	9850	A	
				817A37							

Continuación del anexo 3

Tabla 4. Aceros para cementación (Aplicaciones-aceros, 2020)

SAE	Composición Química	Características	Aplicaciones
		ción	
SAE 1010	C: 0,08 / 0,13 Mn: 0,30 / 0,6	Acero al C. Baja resistencia a la rotura con muy alta tenacidad	Piezas confeccionadas por estampado en frío (Bulones, Remaches, etc.) Otras piezas de mediana y baja Responsabilidad
SAE 1020	C: 0,18 / 0,23 Mn: 0,30 / 0,60 Si: 0,15 / 0,30	Acero al C de baja resistencia, con alta tenacidad	Piezas confeccionadas por estampado o mecanización de mediana responsabilidad.
SAE 3115	C: 0,13 / 0,18 Mn: 0,40 / 0,60 Ni: 1,10 / 1,40	Acero con alta resistencia y alta tenacidad. Acero de baja templabilidad	Piezas de mediana y alta responsabilidad en la construcción de máquinas en general
SAE 3310	C: 0,08 / 0,13 Mn: 0,45 / 0,60 Si: 0,20 / 0,40 Cr: 1,40 / 1,75 Ni: 3,25 / 3,75	Acero al Cr-Ni, de muy alta tenacidad. Acero de muy alta templabilidad y muy elevada resistencia a la fatiga	Piezas de alta responsabilidad y de grandes dimensiones. Engranajes, ejes traseros, piezas de dirección, pernos de seguridad. Matrices para plásticos y metales no ferrosos

SAE 4317	C: 0,15 / 0,20 Mn: 0,45 / 0,65 Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,40 / 0,60 Ni: 1,65 / 2,00 Mo: 0,20 / 0,30	Acero al Cr-Ni-Mo, de mediana templabilidad y excelente tenacidad	Piezas de responsabilidad, de grandes y medianas dimensiones. Pernos para cadenas, engranajes y piñones de mando
SAE 5120	C: 0,17 / 0,22 Mn: 0,70 / 0,90 Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,70 / 0,90	Acero al Cr con buena resistencia y tenacidad y baja templabilidad	Piezas de pequeñas y medianas dimensiones, confeccionadas por extrusión o por mecanizado. Pernos de pistón, etc.
IRAM 5121	C: 0,17 / 0,22 Mn: 1,10 / 1,40 Si: 0,20 / 0,35 Cr 1,00 / 1,30	Acero al Mn y Cr. Equivalente al acero DIN 20MnCr5. Buenas propiedades en estado cementado, templado y revenido	Engranajes. Coronas y piñones del diferencial. Ejes, árboles. Otras piezas de tamaño mediano
SAE 4815	C:0,17 / 0,22 Mn: 0,40 / 0,60 Si: 0,20 / 0,35 Ni: 3,25 / 3,75	Acero al Ni-Mo, con muy alta tenacidad, mediana templabilidad y muy alta resistencia.	Piezas de grandes dimensiones y de muy alta responsabilidad, especialmente a la fatiga

	Mo: 0,20 / 0,30		
SAE 8620	C: 0,18 / 0,23 Mn: 0,70 / 0,90 Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,40 / 0,60 Ni: 0,40 / 0,70 Mo: 0,15 / 0,25	Acero al Cr-Ni-Mo de alta resistencia, con templabilidad mediana y alta tenacidad.	Piezas de mediano tamaño, solicitadas a la fatiga. Piñones y coronas del diferencial. Engranajes de alta revolución. Pernos de seguridad
		Acero para Temple y Re	venido
SAE	C: 0,35 / 0,42	Acero al C. Con	Piezas fabricadas por
1038	Mn: 0,60 /	estructura globulizada	estampado en frío (Bulones,
	0,90	es apto para estampar	tuercas, tornillos, etc.)
		templabilidad	caliente poco exigidas
SAE	C: 0.43 / 0.50	Acero al C. de baia	Piezas de alta dureza v buena
1045	Mn: 0,60 /	templabilidad. En	tenacidad (manivelas,
	0,90	estado templado tiene	chavetas, ejes, cigüeñales,
		alta dureza y buena	bielas, engranajes, espárragos,
		tenacidad. Es apto	etc.)
		para temple	
SAE	$C \cdot 0.36 / 0.44$	Acero al C. con	Piezas de dimensiones
1541	Mn: 1 35 /	templabilidad	medianas y chicas Engranaies
	1,65	Mejorada	árboles, pernos, palieres, etc.

SAE 3135	C: 0,33 / 0,38 Mn: 0,60 / 0,80 Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,55 / 0,75 Ni: 1,10 / 1,40	Acero al Cr-Ni de mediana templabilidad con muy buena tenacidad	Piezas de dimensiones medianas y grandes, expuestas a solicitaciones elevadas. Por ej. Puntas de ejes, bielas, ejes delanteros, eslabones de cadenas, etc.
SAE 3335	C: 0,30 / 0,40 Mn: 0,30 / 0,60 Si: 0,15 / 0,30 Cr: 1,25 / 1,75 Ni: 3,25 / 3,75	Acero al Cr-Ni de muy alta templabilidad y de extrema tenacidad	Piezas grandes expuestas a solicitaciones muy elevadas, especialmente a la fatiga. Por ej.: cigüeñales, pernos de acople, ejes de piñones, etc.
SAE 4140	C: 0,38 / 0,43 Mn: 0,75 / 1,00 Cr: 0,80 / 1,10 Mo: 0,15 / 0,25	Acero al Cr-Mo de mediana templabilidad y buena tenacidad. No presenta fragilidad de revenido. Apto para temple superficial. Con estructura globulizada puede estampar en frío	Piezas de alta exigencia para la construcción de vehículos en general. Cigüeñales, árboles, palieres, engranajes de transmisión, etc. Piezas confeccionadas por estampado en frío (bulones de alta calidad)
SAE 4340	C: 0,38 / 0,43 Mn: 0,65 / 0,85	Acero al Cr-Ni-Mo de alta templabilidad, de alta resistencia y excelente tenacidad.	Piezas de aviones y automóviles sometidas a las más grandes exigencias y los más altos esfuerzos estáticos y

	Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,70 / 0,90 Ni: 1,65 / 2,00 Mo: 0,20 / 0,30	No presenta fragilidad de revenido. Alta resistencia a la fatiga.	dinámicos. Piezas para temperaturas debajo de 0 ºC.
SAE 5140	C: 0,38 / 0,43 Mn: 0,70 / 0,90 Si: 0,20 / 0,35 Cr: 0,70 / 0,90	Acero al Cr de baja templabilidad, alta resistencia al desgaste. Apto para endurecimiento superficial por cianurado directo.	Piezas de dimensiones medianas. Engranajes, ejes, árboles, puntas de ejes, etc.
SAE 8640	C: 0,38 / 0,43 Mn: 0,75 / 1,00 Cr: 0,40 / 0,60 Ni: 0,40 / 0,70 Mo: 0,15 / 0,25	Acero al Cr-Ni-Mo de mediana templabilidad. Tiene alta resistencia y muy buena tenacidad. Con estructura globulizada es apto para estampar en frío. No presenta fragilidad del revenido	Bulones especiales de alta resistencia a esfuerzos estáticos y dinámicos. Piezas de alta responsabilidad, especialmente a la fatiga, hasta aprox. 100 mm de espesor.

Anexo 4. Tratamientos térmicos y propiedades de aceros para mejoramiento

Tabla 1. Aceros utilizados en la fabricación de engranajes, tratamiento térmico y propiedades (Colectivo de autores, 2019)

Tipo de acero		10 14	10 1++	- , · ,	Du	Límite de	
ANSI	NC	[D _m]^ (mm)	[Sm]** (mm)	l ratamiento	Du	resistencia $\sigma_u(MPa)$	
(similar)		()	()		Superficie Núcleo		
1035	35			Ν	163÷192 HB		550
1040	40	120	60	М	192÷228 HB		700
				Ν	179÷2	600	
1045	45	125	80	М	235÷2	780	
		80	50	М	269÷	890	
	40Cr	200	125	М	235÷2	790	
5140		125	80	М	269÷	900	
		125	80	M+TCAF	45÷50 HRC	260÷300 HB	900
2425	40CrNi	315	200	М	235÷262 HB		800
3135		200	125	М	269÷302 HB		920
		200	125	M+TCAF	48÷53 HRC 270÷300 HB		920
	35CrMo	315	200	М	235÷262 HB		800
		200	125	М	269÷302 HB		920
		200	125	M+TCAF	48÷53 HRC 270÷300 HB		920

5120	20Cr	200	125			143÷170 HB			
8720	20CrNiMo	200	125	M+C	56÷63 HRC	300±400 HB	1000		
	18CrMnTi	200	125			300.400 118			
	35 (fundido)			Ν	163÷	550			
	45 (fundido)	315	200	М	207÷	680			
*Diámetro máximo del piñón construido solidario con el árbol. **Espesor máximo de las ruedas construidas no solidarias con el árbol									

***Los tipos de tratamiento térmico son: N: normalizado, M: mejoramiento, C: cementación y temple, TCAF: temple por corriente de alta frecuencia

Continuación del Anexo 4

Tabla 2. Composición nominal y ciclos preliminares de tratamiento térmico para aceros de baja aleación que contienen aluminio empleados en la nitruración gaseosa (Lampman, 1995)

Acero		Composición, %								Temperatur a austenizaci ón	Temperatur a de temple	
SAE	AMS	Nitrallo v	С	Mn	Si	Cr	Ni	Мо	AI	Se	°C	°C
		Ğ	0,35	0,55	0,30	1,2		0,20	10		955	565-705
7140	6470	135M	0,42	0,55	0,30	1,6		0,38	10		955	565-705
	6475	N	0,24	0,55	0,30	1,15	3,5	0,25	10		900	650-675
		EZ	0,35	0,80	0,30	1,25		0,20	10	0,20	955	565-705

Anexo 5. Imágenes metalográficas de capas superficiales de aceros cementados



Figura 1. Diferentes niveles de austenite retenida en acero AISI 4620 cementado con gas y tratado térmicamente. (a) 0 % de austenite retenida (por rayos X) en una matriz revenida con bajo contenido de bainita y carburos. Cementado 8 h a 940 °C, templado en aceite, revenido 1 h a 180 °C, y re-revenido 2 h a 260 °C. (b) El mismo proceso que en (a) pero re-revenido 2 h at 230 °C. La estructura es martensita revenida, bainita inferior, carburos dispersos y 10 % de austenita revenida (por rayos X). (c) Cementado 4 h a 940 °C, templado en aceite y revenido 1 h a 180 °C. La microestructura (con 0,90 % C) es martensita revenida y 35 % de austenita retenida retained austenite (por rayos X). (d) Martensita no revenida con 25 % de austenite retenida (por rayos X). Cementado con gas 4 h a 955 °C, austenizado 30 min a 820 °C, y templado en aceite (ataque con nital, 1000x).