

TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



**EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DEL
ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION PARA
TORNILLOS FORJADOS EN FRIO DE ACERO SAE 1038**

TESIS

PARA TENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

PRESENTA

RAMÓN LÓPEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. BENJAMIN VARGAS ARISTA

CO-DIRECTORA DE TESIS

DRA. ELIZABETH GARFIAS GARCIA

TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MEXICO, A 10 DE JUNIO DEL 2019

INDICE

	Pag.
Listado de figuras	iv
Listado de tablas	vii
Resumen	viii
Abstract	ix

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado del arte	1
1.1.1. Simulación numérica e investigación experimental sobre el endurecimiento por inducción de tornillo de bola	1
1.1.2. Efectos de condiciones de mecanizado sobre el endurecimiento por deformación y esfuerzos residuales en raíces del roscado de tornillos	2
1.1.3. Caracterización metalúrgica y simulación computacional de roscado de tornillo para mejorar su rendimiento en los ferrocarriles	4
1.1.4 Análisis de falla en tornillo estructural A325	5
1.1.5. Análisis de falla de pernos galvanizados de alta resistencia utilizados en torres metálicas	6
1.2. Planteamiento del problema	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo general	8
1.3.2. Objetivos específicos	8
1.4. Justificación	8
1.5. Alcances	9
1.6. Limitaciones	9

CAPITULO 2. MARCO TEORICO

2.1. Acero SAE 1038	10
2.2. Proceso de forjado en frío	14
2.2.1. Trabajo en frío	22
2.2.2. Endurecimiento por deformación plástica	24
2.3. Tornillos automotrices	30
2.4. Microscopia	34
2.4.1. Microscopia óptica	39
2.4.2. Microscopia electrónica de barrido	46
2.4.3 Análisis microestructural	50

CAPITULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Materiales	55
3.2. Análisis microestructural	56

3.2.1. Metalografía	56
3.2.2 Microscopia óptica	58
3.2.3. Microscopia electrónica de barrido	59
3.2.4. Numero de tamaño de grano G ASTM	59
3.2.5. Alargamiento de grano promedio	61
3.3. Deformación plástica	62
3.4. Exponente del endurecimiento por deformación	63

CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evolución microestructural	64
4.1.1. Microscopia óptica	64
4.1.2. Microscopia electrónica de barrido	65
4.1.3. Numero de tamaño de grano G ASTM	66
4.1.4. Alargamiento de grano promedio	70
4.2. Análisis mecánico	70
4.2.1. Deformación plástica	70
4.2.2. Exponente del endurecimiento por deformación plástica	71

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	73
5.2. Recomendaciones	74

Bibliografía	75
---------------------	----

Listado de figuras

	Pag
	.
1.1a) Granos grandes de austenita y b) Grietas producidas a lo largo de los límites de grano en tornillo de bola durante su servicio	2
1.2a) Maquinado de roscado genera esfuerzos, b) esfuerzos residuales en raíz de roscas y c) endurecimiento por deformación	3
1.3a) Calentamiento por maquinado afecta el roscado, b) efecto del desgaste de herramienta sobre esfuerzos residuales en raíz de roscas y c) endurecimiento por deformación	3
1.4 Falla de espigas en servicio: a) micrografía de sección transversal de punta del tornillo, b) microestructura del acero constituido por ferrita y perlita a 100x y c) microestructura de granos ferríticos irregulares a 400x, típicos de enfriamiento rápido	5
1.5a) Corte adyacente a la fractura muestra agrietamiento interno concéntrico a la geometría del tornillo y b) microestructura equiaxial, mientras que en anillo exterior la microestructura presenta martensita fina de revenido	6
1.6a) Pernos en estado de recepción y b) microestructura observada del perno	7
2.1. Granos de tamaño grande en aleación Ti-V después de tiempo prolongado	14
2.2. Procesos de conformado volumétrico convierten material fundido en productos terminados a través de secuencia de operación	17
2.3. Barras se pueden reducir en altura por medio de secuencia de carrera en proceso de forjado	18
2.4. Forjado en martinete de dos bielas: a) material en barra; b) golpeado, c) laminado, d) conformación aproximada, e) terminado), f) recortado, g) corte de rebaba, y h) matriz de forjado	18
2.5a) Porta-rollo soporte para el funcionamiento de máquina de pernos y b) guía para enderezar alambre en máquina	19
2.6. Máquina de recalado de pernos fabricados por varias funciones de golpeo en serie	20
2.7a) Maquina de troquel para fabricar pernos y tornillos con cabeza redonda y b) troquel desmontable para mantenimiento	21

2.8a) Planos de átomos se deslizan unos sobre otros en diferente dirección, b) tensión deforma en extremos no constreñidos y c) diagrama de deslizamiento en cristal	26
2.9a) Diagrama de plano y dirección de maclaje, y b) región de maclaje en red cristalina	27
2.10. Dislocación se origina por la deformación plástica y aumenta la resistencia del acero	29
2.11. Curva de esfuerzo real-deformación unitaria real para metales	30
2.12a) Tornillos con cuerda fina, estándar, cuadrada y b) tornillo de potencia	33
2.13. Microscopio con sistema óptico compuesto desde campo objetivo hasta imagen final virtual	44
2.14. Esquema de microscopio electrónico de barrido, mostrando la columna electrónica, sistema de deflexión y detectores	50
2.15. Microestructuras de hierro forjado: a) cristal de austenita con átomos de hierro y carbono intersticial, b) austenita, c) ferrita, d) perlita de laminillas de cementita y ferrita, e) cementita (zonas oscuras) y perlita (zonas claras) en fundición blanca, y f) enfriamiento rápido de austenita	53
3.1. Diagrama de bloques del desarrollo experimental	54
3.2. Esquema de tornillo forjado en frío de acero SAE 1038	55
3.3. Alambre y pasos de forjado de tornillos: a) corte y enderezado del alambre, b) cuadro de cabeza y cabeza, c) roscado, d) tornillo con temple y revenido y e) tornillo tropicalizado	56
3.4 Pasos de metalografía: a) Cortadora de disco, b) montadora manual, c) muestra montada en baquelita, d) pulidora giratoria y e) ataque químico mostrando microestructura	58
3.5 Microscopios Carl Zeiss: a) óptico y b) electrónico de barrido	59
4.1. Micrografías obtenidas por MO de los tornillos forjados en frío del acero 1038: a) alambre enderezado con bandas alternadas, b) cuadro de cabeza con bandas que cambiaron de dirección, c) cabeza de tornillo con la mayor deformación plástica de granos y d) roscado con bandas de granos de ferrita alternados.	65
4.2. Micrografías obtenidas por MEB de muestras de tornillos forjados de acero SAE 1038: a) partículas de tamaños y formas diferentes en alambre enderezado, b) granos	66

alargados con cambios de dirección en cuadro de cabeza, c) granos con la mayor deformación plástica en cabeza de tornillo, y d) granos con deformación moderada en roscado.

4.3. Numero de tamaño de grano G_{pi} ASTM para los diferentes pasos de forjado en frío en tornillos de acero SAE 1038.	69
4.4. Alargamiento de grano promedio para los diferentes pasos de forjado de tornillos de acero SAE 1038	70
4.5. Deformación plástica para diferentes pasos de forjado en frío de tornillos de acero SAE 1038	71
4.6. Exponente del endurecimiento por deformación plástica para diferentes pasos de forjado en tornillos de acero SAE 1038.	772

Listado de tablas

	Pag.
2.1 Propiedades mecánicas del acero SAE 1038 recocido	11
2.2. Acero SAE J429 estándar para fabricar pernos y tornillos	34
3.1 Dimensiones de tornillo forjado en frío de acero SAE 1038	55
3.2 Composición química (% peso) del acero al carbono SAE 1038	56
3.3. Valores del número de tamaño de grano G ASTM y diámetro de grano promedio	62
4.1. Número de tamaño de grano G y alargamiento de grano del alambre enderezado de acero SAE 1038	67
4.2. Número G y alargamiento de grano en cuadro de cabeza de tornillos forjados de acero 1038	67
4.3. Número G y alargamiento de grano de cabeza de tornillos forjados de acero 1038	68
4.4. Número G y alargamiento de grano de roscado de tornillos forjados de acero 1038	68
4.5. Número G promedio y alargamiento de grano promedio para diferentes pasos de forjado de tornillos de acero 1038	69

Resumen

Se estudió la evolución microestructural, comportamiento del tamaño de grano y endurecimiento por deformación plástica generada por los diferentes pasos de forjado en frío de los tornillos de acero SAE 1038 recocido. Se utilizaron los microscopios óptico y electrónico de barrido para el análisis microestructural considerando mediciones del número de tamaño de grano G ASTM, alargamiento de grano promedio y se calcularon el exponente de endurecimiento por deformación plástica y valores de deformación plástica para el análisis mecánico. Los resultados microestructurales indicaron que los granos ferríticos se deformaron plásticamente (es decir, los granos se alargaron) en forma ascendente conforme se forjaron la cabeza del tornillo, cuadro de cabeza y roscado, con respecto al alambre enderezado. La deformación plástica inducida por el forjado en frío de tornillos generó una notable disminución del número de tamaño de grano G conforme se aplicaban los pasos de forjado, la cabeza del tornillo mostró el menor número G con respecto al alambre enderezado inicial debido a la máxima deformación plástica. Se determinó el alargamiento de grano promedio para cada paso de forjado, encontrando un considerable incremento mayor en la cabeza del tornillo, seguido del cuadro de cabeza y roscado en comparación con el alambre inicial, como consecuencia de la máxima deformación plástica. El exponente del endurecimiento y valores de deformación plástica aumentaron con los pasos de forjado, resultando el mayor exponente en la cabeza del tornillo, seguida del cuadro de cabeza y roscado con respecto al alambre enderezado, lo cual se asoció con la mayor deformación permanente.

Abstract

The microstructural evolution, grain size behavior and plastic deformation hardening generated by the different cold forging steps of SAE 1038 annealed steel screws were studied. Optical and scanning electron microscopes were used for the microstructural analysis, considering measurements of grain size number G ASTM, average grain elongation, and the exponent of plastic deformation hardening and plastic deformation values were calculated for mechanical analysis. The microstructural results indicated that the ferritic grains were plastically deformed (ie, the grains lengthened) in an ascending manner as the screw head, head and threading frame were forged, with respect to the straightened wire. The plastic deformation induced by the cold forging of screws generated a considerable decrease in the number of grain size G as the forging steps were applied, the screw head showed the lowest G number with respect to the initial straightened wire due to the maximum deformation plastic. The average grain elongation was determined for each step of slab, finding a considerable increase in the head of the screw, followed by the head and threading compared to the initial wire, as a consequence of the maximum plastic deformation. The exponent of the hardening and values of plastic deformation increased with the steps of forging, resulting in the highest exponent in the head of the screw, followed by the head and threaded box with respect to the straightened wire, which was associated with the greatest permanent deformation.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Estado del arte

1.1.1. Simulación numérica e investigación experimental sobre el endurecimiento por inducción de tornillo de bola

Para mejorar la distribución de capa endurecida y evitar posibles defectos de endurecimiento por inducción construyeron un modelo de elemento finito para el endurecimiento por inducción de bobina. Obtuvieron curvas de temperatura en la región de la superficie de tornillo de bola por simulación numérica. La capacidad de endurecimiento y transformación de fase del acero 55CrMo se investigaron mediante un experimento.

La simulación y resultados experimentales mostraron que las temperaturas Ac_1 (estructura cristalina cambia de ferrita en austenita) y Ac_3 (estructura cristalina transforma de perlita en austenita) aumentaron la velocidad de calentamiento. La falta de uniformidad de temperatura en la región de raíz de rosca podría llevar a una austenización no uniforme con dureza. La alta temperatura podría producir grietas, tamaño de grano grueso y defectos de recalentamiento en la rosca. La austenita durante el enfriamiento transformo en martensita templada debido al calor residual y la austenita retenida transformo en martensita a baja velocidad de enfriamiento.

Un tornillo de bola tipo 5010 no alcanzo una capa endurecida con espesor de 2.5 mm por simple inducción de bobina. Sin embargo, con más bobinas de inducción múltiples con cierto espacio serían útiles para mejorar la uniformidad de temperatura y dureza.

La perlita presente en la raíz de rosca podría transformarse totalmente en austenita aumentando el voltaje o corriente de la fuente de alimentación de inducción. Un grano grueso de austenita en punta de rosca ocurrió a temperatura excesivamente alta, como se muestra en figura 1.1a). Las grietas podrían producirse a lo largo de los límites de grano en el proceso del servicio del tornillo de bola, ver figura 1.1b). En el endurecimiento por inducción de un tornillo de bola tipo 5010, una parte de la martensita producida durante el enfriamiento por agua puede convertirse en martensita templada debido a la reducción de temperatura, y la austenita restante transforma en martensita a una baja tasa de enfriamiento [1].

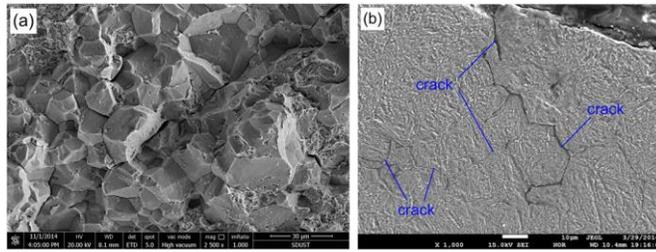


Figura 1.1a) Granos grandes de austenita y b) Grietas producidas a lo largo de los límites de grano en tornillo de bola durante su servicio [1].

1.1.2. Efectos de condiciones de mecanizado sobre el endurecimiento por deformación y esfuerzos residuales en raíces del roscado de tornillos

Estudiaron el endurecimiento por deformación y generación de esfuerzos residuales en los valles del roscado (figura 1.2a) producidos mediante el maquinado (figura 1.2b) de acuerdo con el Instituto Americano del Petróleo. El roscado del tornillo se cortó con barra tubular de acero aleado Cr-Ni para medir esfuerzos residuales mediante la técnica de eliminación de capas con electroquímica. El trabajo experimental mostró severo endurecimiento por deformación y concentración de esfuerzos residuales en los valles del roscado del tornillo dependieron de las condiciones de maquinado, ver figura 1.2c).

En la mayoría de los casos, las condiciones de trabajo son muy agresivas, resultando desgaste abrasivo y combinaciones de esfuerzos de tracción y torsionales que fluctúan con el tiempo debido al cambio en presión interna. El maquinado produce cambios microestructurales en capas superficiales de los materiales que se endurecen teniendo esfuerzos residuales que afectan la vida útil en las uniones roscadas. El maquinado de roscado fino requiere de corte para un desgaste mínimo de herramienta. Las condiciones de corte que proporcionaron mínimo desgaste (vida máxima) de herramienta pueden no suministrar geometría en la pieza roscada de precisión.

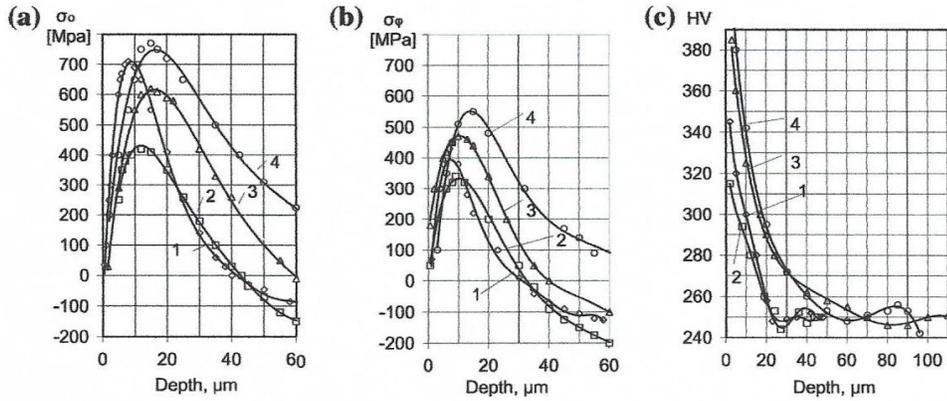


Figura 1.2a) Maquinado de roscado genera esfuerzos, b) esfuerzos residuales en raíz de roscas y c) endurecimiento por deformación [2].

Los resultados experimentales mostraron un endurecimiento superficial similar debido a varias velocidades de corte y herramientas variando los esfuerzos residuales. De la distribución de esfuerzos residuales de tensión en raíces de hilos de roscado tanto en direcciones axial y tangenciales, todos fueron generados bajo condiciones controladas por el calentamiento (figura 1.3a). A medida que aumentaron el desgaste en herramienta (figura 1.3b) y calor generado por el roscado de tornillos, resulto una concentración de esfuerzos residuales medidos en el roscado de tornillos, maquinado con herramientas desgastadas y sin usar refrigerante alcanzo el límite elástico de deformación, ver figura 1.3c) [2].

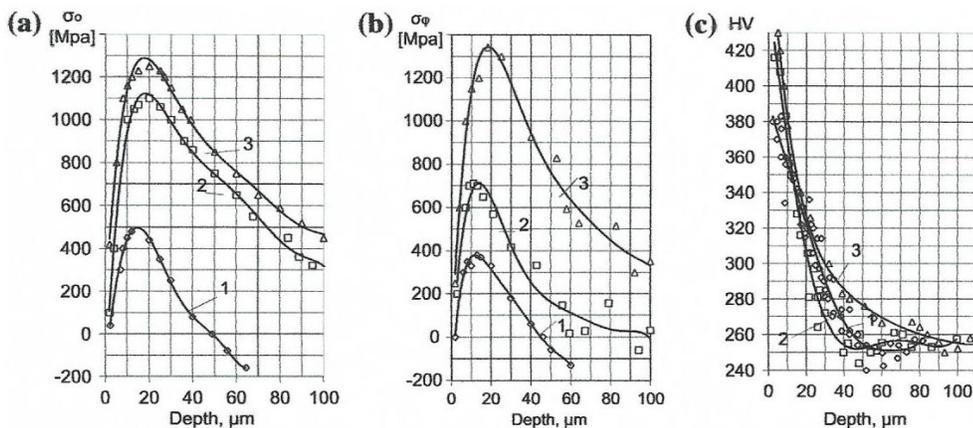


Figura 1.3a) Calentamiento por maquinado afecta el roscado, b) efecto del desgaste de herramienta sobre esfuerzos residuales en raíz de roscas y c) endurecimiento por deformación [2].

1.1.3. Caracterización metalúrgica y simulación computacional de roscado de tornillo para mejorar su rendimiento en los ferrocarriles

El crecimiento en ferrocarriles está relacionado con inversiones en materiales de ingeniería para aumentar la capacitación del personal. Un problema grave es la fractura en la rosca de tornillo en ferrocarriles brasileños debido al aumento de carga transportada en los últimos años. Las fallas se producen en dos situaciones: exceso de carga en vagones en servicio sometido a carga cíclica, y la segunda situación es más grave, la vida útil del riel disminuye. La figura 1.4a) muestra un tornillo perfecto y trece de estos fallaron en el servicio. Se observó en general que el tornillo se fracturó en la segunda región de roscado. Actualmente, el roscado del tornillo se produce mediante forja y laminación en caliente de barras de acero al carbono SAE 1015, de acuerdo con estándar NBR 8497:08 [3].

Establecieron condiciones para la fabricación, suministro de materias primas, así como las propiedades mecánicas requeridas para la aceptación de roscado del tornillo, siguiendo criterios del estándar mencionado. Sin embargo, las concesionarias brasileñas han informado del aumento de las fallas en este elemento de fijación. El tornillo utilizado en ferrocarriles brasileños es fabricado en acero SAE 1015 producido por deformación en caliente.

El análisis microestructural (figura 1.4b) mostró que el acero está constituido por ferrita y perlita, con pequeña cantidad de inclusiones (Al_2O_3) normal para este tipo de material. Es posible observar que el tornillo está manufacturado de acero al carbono común que cumple con las especificaciones de acero 1015. Figura 1.4c) muestra los granos ferríticos irregulares, típicos de un enfriamiento relativamente rápido (dinámico por aire).

La aplicación del modelo de simulación computacional proporcionó la causa de fractura en roscado en el tornillo. Las fallas incluyeron, la geometría actual asociada con la carga de servicio en altos valores de esfuerzo en la base del roscado, especialmente en la segunda región del roscado, donde en un caso extremo, excede el límite elástico del acero SAE 1015, lo que lleva a una deformación plástica localizada que puede fracturar el tornillo debido a sobrecarga o fatiga [3].

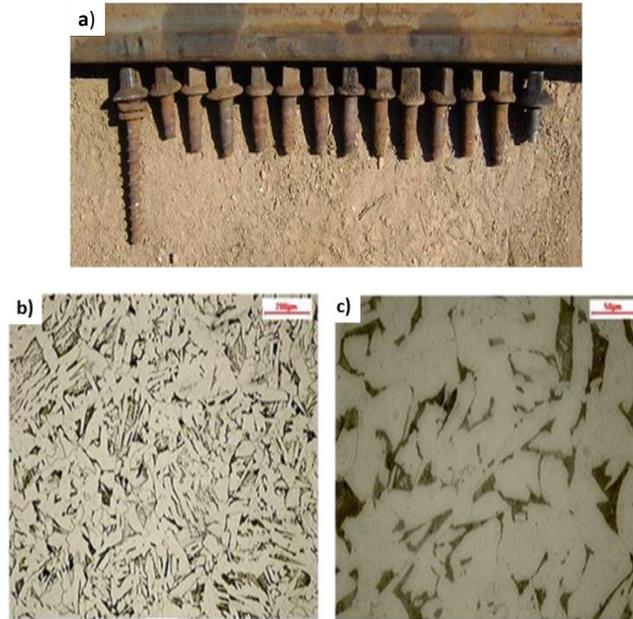


Figura 1.4 Falla de espigas en servicio: a) micrografía de sección transversal de punta del tornillo, b) microestructura del acero constituido por ferrita y perlita a 100x y c) microestructura de granos ferríticos irregulares a 400x, típicos de enfriamiento rápido [3].

1.1.4 Análisis de falla en tornillo estructural A325

Presentan el análisis de falla realizado a un tornillo de cabeza hexagonal, cuyo estampado de forja en la cabeza indico el tipo A325, correspondiente a tornillo estructural de alta resistencia y composición nominal de medio carbono, ver figura 1.5a). Las dimensiones fueron de 76.3x31.7 mm. Dicho tornillo presenta fractura total de manera transversal al eje longitudinal del tornillo, en una configuración de copa y cono en la zona de cuerdas próximas a la cabeza característica de una falla por tracción, sin embargo no encontraron deformación plástica en ninguna de las partes que indicara cargas de tracción.

Realizaron limpieza electrolítica, corte y preparación metalográfica tanto en secciones transversales como en longitudinales para su caracterización microestructural mediante microscopía óptica y microscopio electrónico de barrido, mientras que por otra parte, realizaron ensayos, tanto químicos como mecánicos, para identificar la naturaleza del acero en corte transversal en zona de fractura interna (figura 1.5b).

Encontraron fractura interna circular, concéntrica a la geometría del tornillo, en cuyo interior observaron residuos proveniente del proceso metalográfico. Sin embargo, las superficies

adyacentes presentaron una diferencia microestructural crítica distribuida en bandas (sección central del tornillo) [4].

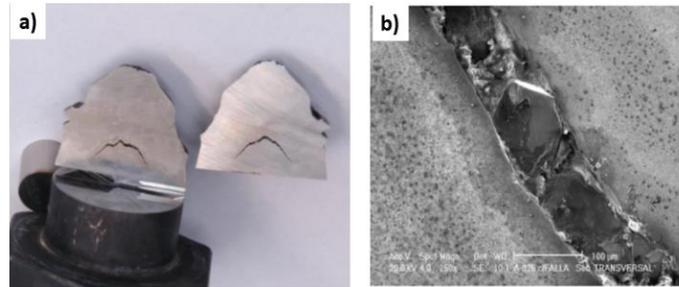


Figura 1.5a) Corte adyacente a la fractura muestra agrietamiento interno concéntrico a la geometría del tornillo y b) microestructura equiaxial, mientras que en anillo exterior la microestructura presenta martensita fina de revenido [4].

1.1.5 Análisis de fallas de pernos galvanizados de alta resistencia utilizados en torres metálicas

Este artículo analiza la falla de pernos de anclaje empleados en la conexión de diferentes tramos de torres eólicas de acero en el norte de Europa. Los pernos galvanizados para obtener una mejor durabilidad, fueron colocados en las torres de servicio, presentando falla en dos meses de operación, ver figura 1.6a). Tres pernos fueron recibidos en dependencias de la universidad de Cantabria para determinar las causas de fallo.

En los análisis llevados a cabo en este trabajo tomaron en cuenta normas para aplicaciones estructurales de pernos. Todos tenían la misma geometría, presentando una rosca métrica M56, estaban fabricados en acero 42Cr4Mo de acuerdo con UNE-EN-10027-1 [5]. Durante el proceso de fabricación, los pernos fueron forjados, después sometidos a recocido, seguido de temple y revenido. En todos los casos, se encontró martensita revenida como microestructura dominante, junto con bainita en el centro de la sección (figura 1.6 b) [6].

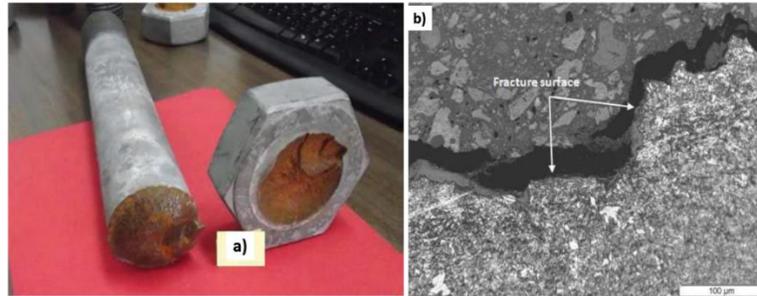


Figura 1.6a) Pernos en estado de recepción y b) microestructura observada del perno [6].

1.2. Planteamiento del problema

El proceso de forjado en frío de tornillos para ensamblar el chasis de automóvil, causa deformación plástica permanente cambiando su microestructura compuesta por granos. También, el endurecimiento del acero causado por la deformación plástica de forjado influye en la resistencia de formabilidad, de acuerdo a la composición química. Además, existe mínima información del comportamiento metalúrgico y mecánico de forjado en frío en tornillos de acero SAE 1038.

Este acero de medio carbono es el más utilizado para piezas forjadas en frío con 0.35 a 0.45 % C proporcionando un manejo fácil de trabajo en frío. No obstante, a medida que se incrementa la cantidad de carbono la ductilidad disminuye. Además, en materiales complejos difíciles de deformar, es recomendable un recocido que organiza su microestructura más dúctil para deformación más sencilla.

La cantidad de trabajo en frío que el metal resiste depende de su ductilidad, entre más ductilidad tenga el material, mejor se trabaja en frío. Por lo tanto, el forjado en frío de tonillos del acero 1038 en la industria metalmecánica representa un proceso económico y comercial, por lo que es importante realizar un estudio microestructural y mecánico.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar la evolución microestructural, deformación plástica y comportamiento mecánico en los tornillos de acero al carbono SAE 1038 durante las etapas del proceso de forjado en frío mediante el microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido para complementar el conocimiento de la metalurgia de los tornillos forjados.

1.3.2. Objetivos específicos

- Ejecutar la metalografía de las muestras de tornillos con diferentes pasos de forjado en frío para el análisis microestructural
- Observar las microestructuras deformadas de las muestras de tornillos forjados en frío del acero SAE 1038 para el análisis microestructural
- Determinar el número de tamaño de grano G ASTM de las muestras de tornillos forjados mediante el estándar ASTM E 112 para caracterizar la microestructura
- Obtener el alargamiento de grano promedio de las muestras de tornillos forjados mediante el estándar ASTM E 112 para caracterizar la microestructura
- Medir la deformación plástica de los tornillos forjados en frío para definir la deformación máxima
- Calcular el exponente del endurecimiento por deformación plástica para encontrar el endurecimiento máximo
- Establecer las correlaciones importantes entre las características microestructurales, deformación plástica y exponente del endurecimiento.

1.4. Justificación

El actual proyecto donde se estudia la evolución microestructural durante el forjado de tornillos en acero SAE1038 deformado plásticamente es importante para complementar la metalurgia del proceso de forjado en frío de tornillos automotrices. Además, es relevante estudiar indirectamente la deformación plástica mediante parámetros microestructurales

(número de tamaño de grano G y alargamiento de grano promedio) y mecánicos (deformación plástica y exponente del endurecimiento por deformación).

El proceso forjado en frío es muy importante para piezas que necesitan ahorrar material, obtener adecuado acabado en dimensiones de precisión y mejorar la resistencia mecánica. Es importante mencionar que los tornillos deben fabricarse de material de alta resistencia mecánica como el acero al carbono SAE 1038 con aplicaciones en la industria automotriz.

1.5. Alcances

En la presente investigación se estudió el análisis microestructural en las diferentes zonas deformadas de tornillos forjados en frío: alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado manufacturados de acero al carbono SAE 1038. Se analizaron el número de tamaño de grano G , alargamiento de grano promedio mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, así como el exponente de endurecimiento y deformación plástica.

1.6. Limitaciones

Los datos necesarios para los cálculos del exponente por endurecimiento y deformación plástica fueron extraídos de dos tesis de maestría previas, por lo que las pruebas respectivas no se realizaron. Además, las observaciones microestructurales solo se realizaron mediante microscopía electrónica (microscopio no disponible dentro del tecnológico) y óptica.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1. Acero SAE 1038

El tratamiento posterior de los lingotes para obtener productos utilizables en la manufactura fue objeto de mecanización a partir del siglo XVI. Surgen maquinas hidráulicas de laminado, consistentes en dos cilindros juntos que se movían en sentido inverso en 1561, máquina para cortar el hierro en barras, formada por dos cilindros provistos de cuchillas, máquinas para fabricar clavos, cañones de fusil, máquinas para producir hilo de hierro donde el hilo pasaba sucesivamente por una serie de agujeros, cada vez más pequeños y se enrollaba en bobina accionada por rueda de molino, todas igualmente existentes a mediados del siglo XVI.

La capacidad de producción de hierro aumento de forma notable en Europa con el nuevo procedimiento, por ejemplo, la fabricación de cañones domino hasta que la segunda mitad del siglo XVI, Inglaterra comienza a producir cañones de hierros más baratos e igualmente eficaces [7].

Las propiedades mecánicas son la réplica del material a las fuerzas aplicadas. El comportamiento de los metales depende del incremento en las condiciones en las que trabajan, y así se manifiesta en los ensayos de tracción estático o dinámico debajo del agua que son diferentes de los obtenidos en el aire, ya que parece que se afectan de modo distinto las propiedades superficiales del material [8].

El instituto americano del hierro y acero (AISI) y sociedad de ingenieros automotrices (SAE) han designado a los aceros y aleaciones con cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos indican los porcentajes de elementos de aleación y los dos últimos dígitos indican el contenido de carbono en peso. El acero al medio carbono tiene entre 0.30 y 0.60 % C se utiliza en aplicaciones que requieren mayor resistencia que la disponible en los aceros que se utilizan en maquinaria, automóviles, piezas para maquinaria agrícola (engranes, ejes, bielas y cigüeñales) y equipos ferroviarios [9].

El acero 1038 tiene contenido de medio de C y permite mantener la ductilidad a pesar que el C origina dureza mientras que con el contenido de Mn y Si permanece la maleabilidad con tratamiento térmico. La composición química del acero SAE 1038 incluye 0.35 a 0.42 % C, 0.60

a 0.90 % Mn y 0.040 % máx P. Los aceros equivalentes son G1038 UNS, ASTM 510, A544, A545, A546, A576, SAEJ403, J413, J414 y AFNOR XC38TC [10]. En la tabla 2.1 se muestran las propiedades mecánicas del acero SAE 1038 tales como el límite elástico que representa el límite de la acción elástica del material y se define como el esfuerzo máximo que el material es capaz de desarrollar sin producir deformación permanente al desaparecer la carga. El límite de proporcionalidad representa un aspecto en comportamiento de alargamiento que es el módulo de Young. El módulo de tenacidad es la energía necesaria por unidad de volumen para producir la fractura del material. La dureza en metales se basa en medir la resistencia a la penetración [8].

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas del acero SAE 1038 recocido [11].

Propiedades	Valores
Dureza Brinell	163 Kg/mm ²
Módulo de Young elástico	190-210 GPa
Alargamiento a la fractura (50 mm)	12%
Reducción del área	35%
Razon de Poisson	0.27 a 0.30
Resistencia máxima a la tensión (UTS)	660 MPa (96 x 10 ³ psi)
Conductividad térmica	360 BTU
Densidad	7.8 g/cm ³

Recocido de esferodizacion o globulización

Es un proceso térmico mediante el cual la estructura distorsionada de la red trabajada en frío retorna a un estado que se haya libre de tensiones por medio de la aplicación de calor. Este proceso se efectúa en el estado sólido y le sigue un enfriamiento lento en el horno desde la temperatura de recocido. Este tratamiento de recocido puede dividirse en tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento de grano [12].

Recuperación

Es un proceso a baja temperatura y los cambios producidos en las propiedades no dan lugar a un cambio apreciable en la microestructura. El principal efecto de recuperación es el alivio en esfuerzos internos debidos al trabajo en frío. A una temperatura dada, la rapidez del endurecimiento por la deformación residual es más intenso al principio y decae para periodos más largos. También la cantidad de reducción de esfuerzos residuales ocurre en un mayor

tiempo y con el incremento de temperatura. La conductividad eléctrica también se incrementa en forma apreciable durante la etapa de recuperación

Cuando se suprime la carga que ha producido la deformación plástica en un material policristalino, no desaparece toda la deformación elástica. Esto se debe a la diferente orientación de los cristales, que no permite que algunos de estos retrocedan cuando se suprime la carga. Conforme la temperatura aumenta, hay un rápido retroceso de estos átomos desplazados elásticamente, lo cual alivia la mayor parte de la tensión interna. En algunos casos, puede haber una ligera cantidad de flujo plástico, que podría causar un ligero incremento en dureza y resistencia.

Como las propiedades mecánicas del metal no experimentan cambio alguno, la principal aplicación del calentamiento de la etapa de recuperación es aliviar tensiones internas de aleaciones trabajadas en frío para impedir el agrietamiento por corrosión bajo tensión o hacer mínima la distorsión producida por esfuerzo residual. Este tratamiento a baja temperatura en la etapa de recuperación se conoce como recocido para aliviar tensiones [12].

Recristalización

Conforme se alcanza la temperatura superior del intervalo de recuperación, aparecen nuevos cristales microestructurales, los cuales tienen misma composición y estructura reticular que los granos originales no deformados y no están alargados sino uniformes en sus dimensiones (ejes iguales). Los nuevos cristales suelen aparecer en porciones de grano más drásticamente deformados, por lo general en los límites de grano. La recristalización tiene lugar mediante la combinación de nucleación de grano libre de deformación y crecimiento de núcleos para abarcar todo el material trabajado en frío [13].

Parte del calor de cristalización lo absorben los átomos vecinos, de modo que adquieren suficiente energía para vencer la rigidez de la red distorsionada y ser atraídos en la estructura reticular de granos libres de tensión. El número y contenido de energía de estos puntos de alta energía dependen de estos aumentos y de la intensidad de la deformación previa, cuyo número podría ser mayor mientras más aumente la deformación [12].

La temperatura de recristalización se refiere a la aproximada para que un material altamente trabajado en frío se cristalice por completo en una hora. En los metales puros parecen tener baja temperaturas de recristalización en comparación con los metales impuros. Esto significa que los metales no pueden trabajarse en frío a temperatura ambiente, ya que se recristalizan espontáneamente, reconstruyendo una estructura reticular libre de tensiones.

A mayor cantidad de deformación previa, menor temperatura necesaria para iniciar el proceso de recristalización ya que habría mayor distorsión y más energía disponible. Al aumentar el tiempo de recocido disminuye la temperatura de recristalización. El proceso de recristalización es sensible a cambios en temperatura, más que a variaciones de tiempo a temperatura constante.

Para igual intensidad de trabajo en frío, se introduce más endurecimiento por deformación en los metales que tienen granos finos que los metales que tienen granos gruesos. Cuanto más fino sea el tamaño de grano inicial menor será la temperatura de recristalización. Mediante el mismo razonamiento cuanto menores sean las temperaturas de trabajo en frío, mayor será la cantidad de deformación introducida, disminuyendo efectivamente la temperatura de recristalización para cierto tiempo de recocido [12].

Crecimiento de grano

Como el recocido comprende la nucleación y crecimiento de grano, los factores que favorecen la nucleación rápida y lento crecimiento dan como resultado un material de grano fino, y aquellos que favorecen la nucleación lenta y crecimiento rápido darán como resultado material de grano grueso. El grado de la deformación previa es el factor más importante. Si aumenta la cantidad de deformación previa se favorece la nucleación y disminuirá el tamaño fino del grano. Si el tiempo aumenta a la temperatura de recocido, el tiempo de cualquier temperatura superior de recristalización favorece el crecimiento de grano e incrementa el tamaño final de grano.

Cuanto menor sea la temperatura de recocido por encima de la recristalización, más fino será el tamaño final de grano. Cuanto menor sea el tiempo de calentamiento y la duración a la temperatura de recocido, más fino será el tamaño de grano. Cuanto mayor sea la cantidad y más

fin a la distribución de impurezas insolubles, más fino será el tamaño final de grano. No solo aumentan la nucleación, sino también actúan como barreras al crecimiento de los granos [12].

Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños. Esta fuerza impulsa el crecimiento del grano. Oponiéndose a esta fuerza se encuentra la rigidez de la red que disminuye conforme la temperatura aumenta. A cualquier temperatura, hay un tamaño de grano máximo. Los granos de gran tamaño mostrados en la figura 2.1) se obtuvieron mediante este método. La muestra se mantuvo a temperatura por debajo del punto de fusión de esta aleación [12].

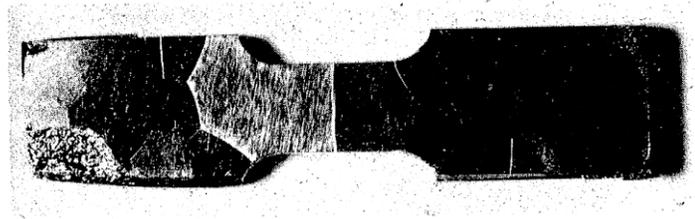


Figura 2.1 Granos de tamaño grande en aleación Ti-V después de tiempo prolongado [12].

2.2. Proceso de forjado en frío

En la industria, el forjado en frío es un gran avance tecnológico alcanzado en la actualidad en la deformación del acero recocido. Teniendo la capacidad de formar piezas de acero de gran calidad en la industria automotriz. Hoy en día se utiliza esta tecnología de ensamble mecánico para sus chasis metálicos del transporte. El análisis microestructural del tornillo (alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado) forjados en frío es un proceso para tener una mayor resistencia mecánica.

El forjado ha sido un proceso muy útil para moldear a forma deseada y llevar a cabo estructuras para diferentes necesidades, pero este trabajo, generalmente, se trabaja por medio de calor, fue así hasta mediados del siglo XIX uso del laminado en frío, esta realidad fue cuando se empezó a usar en años de 1930 este tipo de laminado estaba cediendo de avances y evolución, pero como era algo desconocido en el mercado, no se podía estandarizar algo y hacer ciertas especificaciones de uso como en laminado en caliente.

Fue así como investigadores en estructuras de acero en pesaron la búsqueda para realizar experimentos en la industria. Las diversas propiedades de este tipo de forjado se investigaron patrocinadas por el comité de investigación y tecnología del AISI y realizado por el Dr. George

Winter en la universidad de Cornell. En 1939, algunas de las empresas privadas que hacían uso de forjado en frío y varias universidades se dieron la tarea de investigar acerca de este proceso de forjado en diferentes tareas que se requieren en la industria, dichas investigaciones dieron a conocer sus resultados en diferentes conferencias en EUA [14].

Después de estos acontecimientos en 1946 se empezaron a publicar documentos acerca del forjado en frío que hicieron en aplicar más estandarizado su uso y aplicación, pero debido a sus propiedades, este tipo de acero forjado no es candidato a ser estandarizado totalmente, porque dicho acero tiende a ser más flexible, lo que lo hace un más innovador, estandarizar sería evitar la innovación de este material [14].

Los metales y aleaciones se pueden forjar, si bien la facilidad de la operación varía de unos a otros y con el espesor del metal. En general, la relativa formabilidad del material la determina los elementos existentes de aleación; es decir, cuantos más elementos de aleación hay presentes, más difícil es la forja y más rápidamente se desgastan las matrices [8].

El término se refiere trabajo a temperatura ambiental, aunque el trabajo de la deformación puede elevar la temperatura desde los 100 hasta 200 °C. El trabajo en frío comúnmente sigue el trabajo en caliente, normalmente la cascarilla y otras películas superficiales se mueven por medio de una reacción química (decapado) o por otro chorro de perdigones [15].

Cada uno de los metales que se forjan, tienen propiedades características de resistencia a tracción, fatiga, durabilidad, etc., que hacen apropiadas para aplicaciones específicas. Se clasifican en grupos siguientes; aceros ordinarios, aceros aleados, aceros resistentes a la corrosión y a elevadas temperaturas e inoxidable, hierros y fundiciones, cobre, latones y bronces, níquel y aleaciones Ni-Cu, aleaciones ligeras y otras aleaciones modernas. En otras ventajas de forja se indican resistencia atracción igual o mayor para un menor peso, en comparación con piezas moldeadas por soldaduras, etc. [8].

El trabajo en frío tiene varias ventajas. En ausencia de enfriamiento, oxidación se pueden obtener tolerancias más cerradas, un mejor acabado superficial y también paredes más delgadas. Las propiedades finales de piezas de trabajo pueden controlarse con exactitud, si se desea, retener resistencia elevada obtenida durante el trabajo en frío asimismo se necesita una ductilidad elevada es posible controlar el tamaño de grano para aprovechar [15].

El forjado en frío tiene una amplia aplicación en la fabricación de tornillos en acero al carbono. Este proceso también se conoce como estampado, encabezado o recalcado en una operación de formado para configurar el metal por fluencia plástica. Una fuerza aplicada en el extremo de un cilindro metálico contenido entre punzón, matriz rebasa el límite elástico del material y reduce su deformación [16].

El forjado en dado abierto con matriz abierta es la operación de forjado más simple aunque la mayoría de piezas forjadas en dado abierto suele pasar entre 15 y 500 Kg, se andado forjas de hasta 300 ton los tamaños de las piezas pueden variar desde muy pequeñas (como alfileres, clavos y pernos) hasta muy grandes ejes para hélices de barcos de hasta 23 m [9].

En aplicaciones de forjado en frío en tornillos de acero su proceso de etapas que son enderezado y corte en alambre, recalcado de cuadro de cabeza, cabeza y roscado. Las propiedades mecánicas cambian debido al endurecimiento por deformación. El comportamiento de deformación de aceros utilizados en la fabricación en tornillos influye en la habilidad para moldear formas, también es importante para mejorar la resistencia a los tensiones en el tornillo [5,10].

El forjado en frío es un proceso de deformación plástica hasta 70 % frecuentemente utilizado para el conformado de metales y aleaciones, tal como la manufactura de tornillos en acero al carbono para la industria metal-mecánica. Para facilitar el forjado se requiere que el metal presente una condición de recocido obtenido por tratamiento térmico a una temperatura de 855 °C por 20 min con enfriamiento dentro del horno a 650 °C, con el objetivo de generar una microestructura dúctil susceptible a la deformación sin agrietamiento. Este proceso se relaciona con el fenómeno del endurecimiento por deformación o por trabajo relacionado con la interacción de dislocaciones con obstáculos [13].

Forjado en matriz abierta

Los procesos de forjado más importantes a distinguir tres amplios grupos: forjado en matriz abierta permite deformación libre de superficie de pieza de trabajo, deformación se restringe más en el forjado por matriz de impresión y completamente en el forjado en matriz cerrada.

En el recalcado de endentecían, el forjado en matriz abierta como se muestran en la figura 2.2) emplea otros procesos que se analizan por analogía donde se pueden producir una gran variedad de formas con matrices relativamente sencillas, aunque a menudo por medio de secuencias compleja de pasos de deformación, la sencillez de las herramientas se logra acosta de complejos controles del proceso [15].

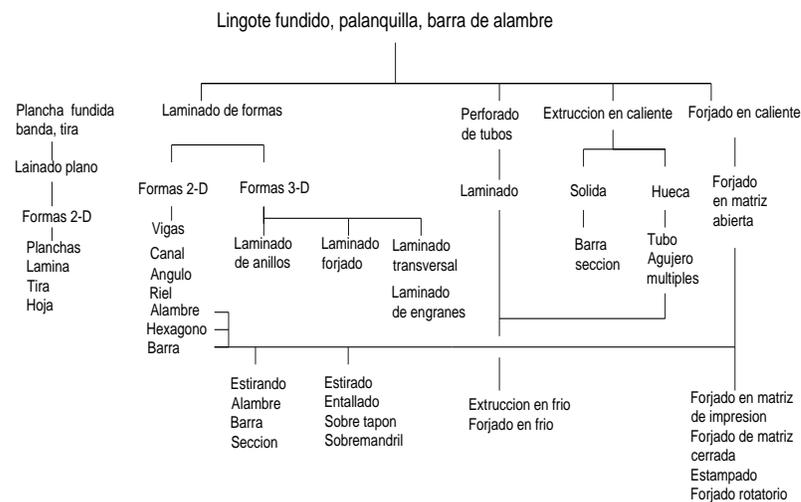


Figura 2.2. Procesos de conformado volumétrico convierten material fundido en productos terminados a través de secuencia de operación [15].

En matriz abierta tenemos en superficies piezas de trabajo que se deforma libremente, los procesos de forjado en matriz abierta ver figura 2.3) producen piezas de trabajo de menor exactitud de forjado por matriz de impresión o matriz cerrada; sin embargo, las herramientas y el equipo usualmente son sencillos, relativamente baratos y permiten la producción de una gran variedad de formas [15].

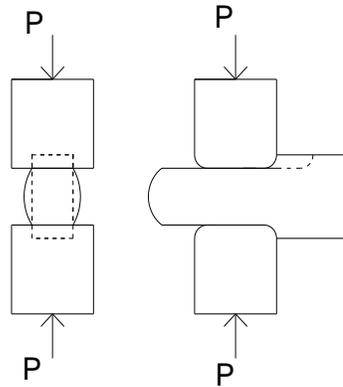


Figura 2.3. Barras se pueden reducir en altura por medio de secuencia de carrera en proceso de forjado [15].

Forjado por matriz de impresión y matriz cerrada

La forma se obtiene llenando la cavidad definida por las mitades superiores e inferiores de la matriz. Se permite que el exceso de material escape en forma de rebaba; como la matriz no está por completo cerrada, nombre adecuado matriz de impresión. No obstante, a veces se aplica el termino matriz cerrada, así que la forja por martinete se ha empleado para denotar el forjado conducido en un martinete; sin embargo, esta distinción no tienen merito técnico en particular [15].

Con el fin de reducir el número de operaciones de acabado adicionales (y por lo tanto el costo), continua la tendencia hacia el logro de una mayor precisión en los productos forjados en figura 2.4) (formados de forma neta). Los productos formado por precisión típicos son los engranes, bielas y alabes para turbina. El forjado de precisión requiere dados especiales y más complejos, un control preciso de volumen y de la forma de la pieza en bruto [9].

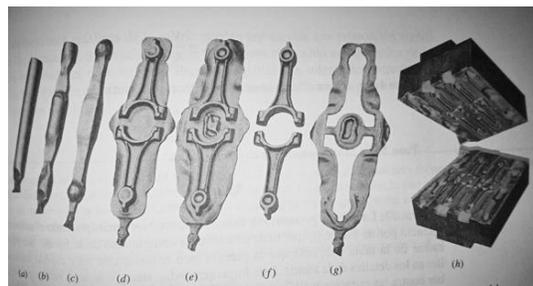


Figura 2.4. Forjado en martinete de dos bielas: a) material en barra; b) golpeado, c) laminado, d) conformación aproximada, e) terminado), f) recortado, g) corte de rebaba, y h) matriz de forjado [15].

Enderezado y corte del alambre (etapa 1)

Etapa inicial que consiste en un sistema de alimentación del alambre, rodillos giratorios y conos transportadores que utiliza la fuerza de fricción que existente entre los rodillos y el alambre para desplazarlo ver figura 2.5a). Uno de los rodillos es el cilindro motriz y el otro puede variar su altura para distintos diámetros del alambre. Primero se endereza el alambre, luego se corta en trozos ligeramente más largos para el futuro tornillo, el sobrante se convertirá en la cabeza por esto el corte es ligeramente más grande como se observa en la materia prima para la maquina el porta rollo y las guías del material.

Una vez establecido tamaño y herramientas del alambre se pueden seleccionar la pieza para el manejo de material: rodillos de enderezado, alimentación de guías, tubos de alimentación ver figura 2.5b), cortadores y boquillas dimensionadas de acuerdo con el diámetro de alambre o varilla [10].

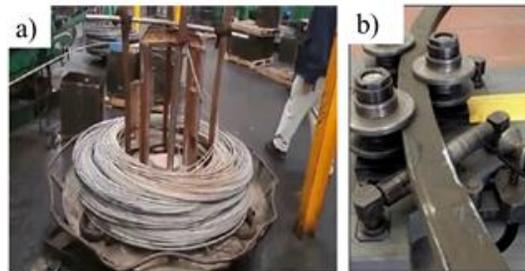


Figura 2.5a) Porta-rollo soporte para el funcionamiento de máquina de pernos y b) guía para enderezar alambre en máquina [17].

Recalcado de cuadro de cabeza (etapa II)

En el encabezado mediante dos golpes, el primero recalca el material a diámetro mayor, reduciendo la longitud del material libre para el segundo golpe. El primer golpe produce una forma tronco-cónica alargado y operación de hacer el cono se llama recalca del bulbo o martillado. El segundo golpe se denomina recalca, encabezado o martillado final.

Debe insistirse en la importancia de la operación de hacer el cono, la razón es disminuir la longitud del material no sujeto a menos de 2.5 veces el diámetro medio del cono en la mitad de la suma de los diámetro mayor y menor. Esta longitud se recalcará satisfactoriamente en el segundo golpe de acabado. El momento de contacto entre el punzón y matriz determina la forma de recalque.

Las piezas se recalcan en el punzón y otras en la matriz. En el momento de contacto entre el punzón y alambre, la porción del alambre queda fuera de la matriz sin ser soportada ni por la matriz ni por el punzón. Si esta longitud es demasiado larga, se dobla en lugar de recolectarse uniformemente. La longitud máxima es recalada sin doblarse y se expresa en múltiplos de diámetro.

Por ejemplo, si el alambre tiene 12.7 mm de diámetro y sobresale 25.4 mm de la matriz, hay dos diámetros de longitud no soportada. Como regla general puede recalarse hasta 2.25 a 2.5 diámetro de un solo golpe. Si este volumen de material no es suficiente para formar el recalque requerido, puede efectuarse dos o más golpes. El primer golpe recalca el material a un diámetro mayor y longitud reducida, disminuyendo con esto el diámetro sin necesitar el segundo golpe.

Otra regla general es que pueden recalarse hasta 4.5 de diámetro en dos golpes. No obstante cuando se utiliza un punzón deslizante para soportar partes del alambre en bruto durante el recalado, puede recalarse hasta aproximarse 6.5 de diámetro en dos golpes ver figura.2.6) [10].



Figura 2.6. Máquina de recalado de pernos fabricados por varias funciones de golpeo en serie [17].

Recalcado de cabeza (etapa III)

La reducción del diámetro se expresa en reducciones posibles de sección de 30% o mayores. Se ha llegado hasta reducción de sección de 90% al extruir con ciertos materiales dependiendo de las propiedades del acero. La razón de considerar la extrusión sobre recalcado es que las piezas obtenidas por la combinación de ambos procedimientos pueden tener de seis o más diámetros de espigas en el recalque de cabeza figura 2.7a).

Siendo que la extrusión y el encabezado son dos operaciones distintas, cada una de estas con sus propias limitaciones y máximas deformaciones deben calcularse por separado. Existen en cabeza de tres o cuatro matrices que combinan el encabezado, desbaratado, punteado y roscado en una sola máquina figura 2.7b). Se utiliza para fabricar tornillos de cabeza hexagonal y embutido con acabados, su versatilidad permite producir una gran variedad de piezas especiales roscadas. Sus características alcanzan hasta materiales de 12 mm de diámetro y las producciones varían hasta 90 piezas por min [10].

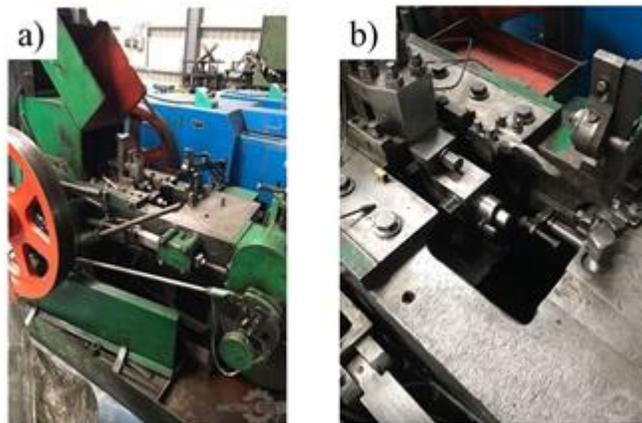


Figura 2.7a) Máquina de troquel para fabricar pernos y tornillos con cabeza redonda y b) troquel desmontable para mantenimiento [17].

Roscado del tornillo (etapa IV)

Mediante el forjado en frío se efectúan filetes en vástago de tornillos para que se pueden enroscar la tuerca, por medio de moldes en rodillos con alta presión que imprimen la forma del roscado. La forma del filete puede ser variada dependiendo del tipo de aplicación que tenga el tornillo, podría ser triangular, redonda, cuadrada, trapecial, diente de sierra, entre otras.

El roscado puede medirse en forma directa o indirecta. Para la medición directa se utilizan micrómetros con puntos adaptados que son introducidas en el flanco de roscado. También puede introducirse un juego de varillas para medir los diámetros medios. Para medición indirecta del roscado utilizando métodos, con galgas es un juego de plantillas que presentan los pasos del roscado en diferentes sistemas. En laboratorios de metrología también se usan instrumentos que permiten verificar el roscado su precisión. El roscado presenta defectos asociados con su cálculo, diseño, dimensiones y materiales. Esto produce el deterioro prematuro o incluso súbito del apriete. La rosca también pueden deteriorarse por corrosión u oxidación, lo que produce la pérdida de precisión y originar avería de ajuste [10].

2.2.1. Trabajo en frío

Cuando un metal es rolado, extruido o estirado a una temperatura debajo de la recristalización, el metal es trabajo en frío. La mayoría de los metales se trabajan en frío a temperatura ambiente aunque la acción de formado en ellos causa una elevación de temperatura. El trabajo en caliente realizado sobre metal en estado plástico, refina la estructura del grano, mientras que el trabajo en frío distorsiona el grano y reduce un mínimo de su tamaño. El trabajo en frío mejora la resistencia, maquinabilidad, exactitud dimensional y terminada de superficie del metal [16].

El trabajo en frío es necesario siempre que se requiera dimensiones precisas, aumento la resistencia mecánica y buen acabado, donde multitud de objetos se fabrican directamente a partir de la deformación del metal con superficies lisas. El acero solo se puede trabajar en frío en proporción limitada, sin comunicarle propiedades mínimas convenientes. Una vez realizado el trabajo en frío, se puede modificar propiedades, haciendo uso de recristalización.

También por envejecimiento inducido de aleaciones, que son soluciones sólidas que se han podido mejorar en propiedades tales como elasticidad, alargamiento y límite de resistencia a cargas repetidas. La deformación en frío requiere mayor esfuerzo que la deformación en caliente, pero no produce descarbonización y se evita riesgo de oscilación superficial. El control dimensional es más preciso que en el hechurado en caliente; por estos motivos se recurre al hechurado en frío para acabado de piezas metálicas [8].

Varios metales son cristalinos por naturaleza y están contruidos de granos de forma irregular de varios tamaños. Cuando el material sea trabajado en frío, los cambios resultantes se observan en la microestructura del grano, tales como deformación de grano, movimientos de átomos y desorción de estructura cristalina. El efecto aplicado sobre todo en su ductilidad es considerado trabajo en frío si sus granos están en condición distorsionada después de la deformación plástica [10].

La pieza de acero fabricada por forja puede tener buena superficie y dimensiones exactas. Ahora bien, las matrices son caras y el gasto inicial superior al de los moldes. Por otra parte, si la pieza tiene contornos complejos, no se puede forjar y se ha de moldear. Actualmente se están desarrollando técnicas de forja de preformas sinterizadas, consiste en forjar piezas obtenidas mediante la pulvimetalurgia. Las características mecánicas de las piezas sinterizadas se mejoran considerablemente, debido a la eliminación de la porosidad y aumento considerable de densidad. Se incrementa la resistencia, límite elástico, resiliencia, elongación, etc.

Por este procedimiento se están fabricando bielas y cigüeñales que compiten ventajas con lo obtenido por métodos convencionales de forja o moldeo. Así se reducen las etapas y presiones de forja, ya que la preforma sinterizada (porosa) ofrece menos resistencia a la presión que el acero macizo, lo que se traduce en una mayor duración del utillaje. Por otra parte, partiendo de preformas sinterizadas, se logra una microestructura muy homogénea [8].

El forjado en frío tiene amplia aplicación en la fabricación de tornillos de acero al carbono. Esta proceso también se conoce como encabezado o recalado, es una operación de formado para configurar el metal por influencia plástica. Una fuerza aplicada en el extremo de un cilindro metálico contenido entre punzón y matriz rebasa el límite elástico del material y produce su deformación plástica.

El diámetro del cilindro aumenta mientras disminuye su longitud. Varias piezas geométricas distintas pueden producirse por recalado. Cuando se combina con otras operaciones de formado como punzonado, rasurado y roscado, las posibilidades de este procedimiento son limitadas. Las aplicaciones de recalado más frecuentes es el formado de cabeza de tornillo es encabezado en frío resultando un procedimiento exitoso debido a la economía obtenida, aumentado la cantidad de piezas que se recalcan.

Las piezas frecuentemente conformadas en frío son simétricas pero también se producen comercialmente recalques asimétricos pero también se producen comercialmente recalques asimétricos. Es también frecuente el paso de sección redonda o cuadrada, hexagonal o de otra forma. Para comprender la acción del trabajo en frío, se debe poseer el conocimiento de la estructura de los metales [10].

2.2.2. Endurecimiento por deformación plástica

Cuando un material se tensa por debajo de su límite elástico, la deformación resulta es temporal. La supresión del esfuerzo da como resultado un retorno gradual del objeto a sus dimensiones originales. Cuando un material se tensa más allá del límite elástico, tienen lugar una deformación plástica o permanente, y no regresa a su forma original por la sola aplicación de una fuerza. El comportamiento de un metal cuando se deforma plásticamente y el mecanismo mediante el cual son de interés esencial para perfeccionar la operación de trabajado [18].

Deformación por deslizamiento

Cuando un nanocrystal se somete a un fuerza externa, primero experimenta una deformación elástica; es decir, regresa a su forma original cuando la fuerza se retira. Una analogía simple de este tipo de comportamiento es un resorte helicoidal que se extiende al aplicar una carga y vuelve a su forma original cuando la carga se retira. Si la carga aumenta lo suficiente, el cristal experimenta una deformación plástica o deformación permanente [9].

Si el monocristal de un metal es cargado tensilmente más allá de su límite elástico, se alarga de forma ligera, aparece un escalón sobre la superficie indicando un desplazamiento relativo de una parte del cristal con respecto al resto y a la elongación se detiene. Al aumentar la carga se producirá movimiento en otro plano paralelo y dará como resultado otro escalón [18].

Es como delgadas secciones vecinas del cristal se hubieran deslizado una sobre otra como cartas de barajas. Cada alargamiento sucesivo necesita un esfuerzo aplicado mayor y resulta en la aparición de otro escalón, que es realmente la interacción de plano deslizamiento con la

superficie del cristal. El aumento progresivo de la carga eventualmente produce fractura del material [12].

La deformación plástica es el resultado del movimiento de dislocación al cual se le llama deslizamiento. Sin embargo, como ya se ha mencionado, la deformación plástica requiere de un gran número de dislocaciones moviéndose sobre un gran número de planos y direcciones que se cruzan entre sí. Además, las dislocaciones individuales interactúan debido a sus propiedades de línea, lo que hace que el deslizamiento sea un fenómeno complejo.

El resultado global del movimiento de dislocaciones determina las propiedades plásticas del material. Este resultado es observado como una configuración o arreglo de los grupos de dislocación en un cristal. Al arreglo final de las dislocaciones en un cristal, después de la deformación plástica, básicamente es resultado de la manera en que se mueven las dislocaciones dentro del cristal. Existen dos formas principales de dislocación o un grupo de dislocaciones pueden moverse en un cristal, llamadas modos de deslizamiento [18].

Un factor más importante para determinar el movimiento deslizante es la dirección y sentido del esfuerzo cortante sobre el plano de deslizante. El deslizamiento ocurre en direcciones en que los átomos están más empacados, ya que esto que quiere la mínima cantidad de energía. También esperar, ya que los átomos no están unidos por enlace directo sino que se mantienen juntos simplemente por los electrones libres, que están filas de átomos compactamente empacados podrían deslizarse entre sí en forma muy fácil sin separarse ver la figura 2.8a).

Se ve que los átomos de las fila en a) están más juntos y las filas se encuentran más partidas verticalmente que las de b) de manera que se necesita menor fuerza para un desplazamiento horizontal dado como lo sugiere la pendiente de la barras negras entre los átomo. Además, se necesita menor desplazamiento para mover los átomos a posiciones inestables, donde tienden posiciones estables cuando están cercanas entre sí.

Las porciones del cristal en cualquier lado de un plano específico de deslizamiento se mueven en dirección opuesta y al alcanzar el reposo los átomos en posición próximas al equilibrio, de tal forma que hay un cambio menor en la orientación de la red. De este modo la forma externa del cristal cambia sin destrucción. Los métodos sensibles de rayos X muestran que lo ocurrido algún doblamiento o torcimiento de los planos de la red y que los átomos no

están en su posición exactamente normales después de la deformación (figura 2.8b) y c), muestra esquemáticamente el deslizamiento en una red f.c.c (cubica centrada en la cara).

El plano (111) de la figura 2.8b), que es el de población atómica más densa, corta el plano (001) en la línea ac. Si se supone que el plano (001) es el papel y se toman juntas varias celdas unitarias (figura 2.8c) el deslizamiento se aprecia como un movimiento a lo largo de los planos (111) en dirección de empaquetamiento (110), recorriendo una distancia de una dimensión o unidad reticular o múltiplo de esa dimensión [12].

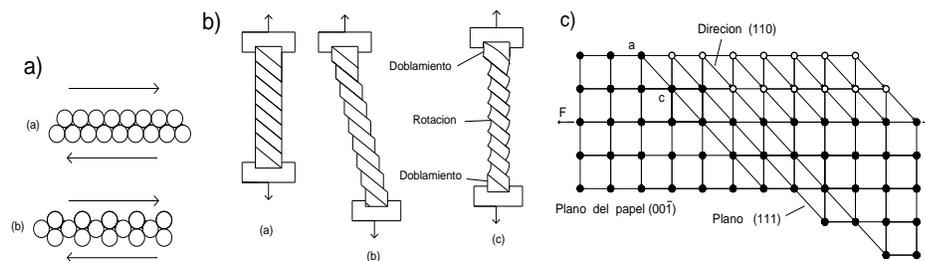


Figura 2.8a) Planos de átomos se deslizan unos sobre otros en diferente dirección, b) tensión deforma en extremos no constreñidos y c) diagrama de deslizamiento en crista [12].

Deformación por maclaje

En ciertos materiales, particularmente metales c.p.h., el maclaje es uno de los principales medios de deformación. Esto puede causar un extensivo cambio en la forma o colocar planos potenciales de deslizamiento en una posición más favorable para el deslizamiento. El maclaje es un movimiento de planos de átomos en la red, paralelo a un plano específico (de maclaje) de la manera que la red se divide en dos partes simétricas diferentemente orientadas.

La cantidad de movimiento de cada plano de átomos en la región maclada es proporcional a su distancia del plano de maclaje, de manera que se forma una imagen espectacular a través del plano de maclaje. Las figura 2.9a) y 2.9b) ilustran esquemáticamente el maclaje en una red f.c.c. (cubica centrada en la cara). En la figura 2.9a) el plano de maclaje (111) corta el plano (110) a lo largo de la línea AB`, que es la dirección de maclaje.

La figura 2.9b) muestra el mecanismo de maclaje. El plano del papel es el (110) y se toman varias celdas unitarias. Cada plano (111) en la región de maclaje se mueve tangencialmente a la

dirección (112), el primer, CD, se mueve un tercio de una distancia interatómica; el segundo, EF, se mueve dos tercios de una distancia interatómica, el tercero GH y se mueve un espacio entero.

Si desde el átomo A` se traza una línea perpendicular al plano de maclaje (AB^{\prime}), se tendrá otro átomo, C` exactamente a la misma distancia del plano maclado pero del otro lado. Lo mismo es cierto para todos los átomos en la región maclada, de modo que realmente se tiene una imagen especular en la región maclada que refleja la porción no maclada del cristal. Como los átomos terminan en espacios interatómicos, se ha cambiado la orientación de los átomos o la distancia entre estos [12].

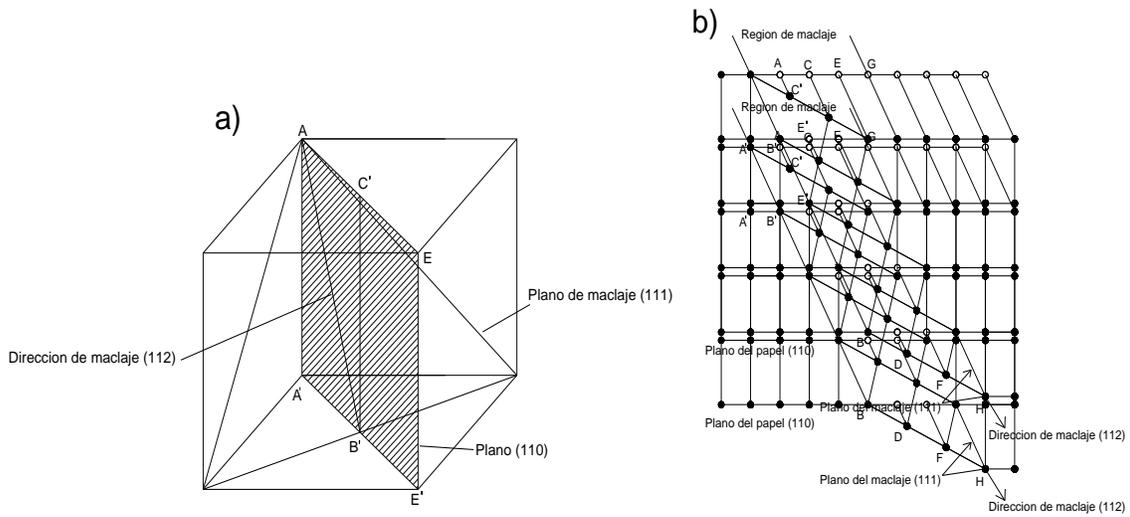


Figura 2.9a) Diagrama de plano y dirección de maclaje, y b) región de maclaje en red cristalina [12].

Deslizamiento contra maclaje

El deslizamiento y el maclaje difieren en la cantidad de movimiento: en el deslizamiento, los átomos se mueven en números enteros de espaciamiento interatómico, en tanto que en el maclaje los átomos se mueven cantidades fraccionarias, dependiendo de su distancia desde el plano de maclaje. Otra diferencia es el aspecto microscópico: el deslizamiento aparece como unas líneas delgadas en tanto que el maclaje aparece como líneas o bandas anchas. Otra diferencia es la orientación reticular: en el deslizamiento hay muy limitados cambios en la orientación reticular y los escalones son visibles para solo en la superficie del cristal. Si los

escalones se eliminan por pulido, no habrá evidencia de que ha habido deslizamiento. Sin embargo, en el maclaje como hay diferente orientación reticular en la región maclada, la eliminación de los escalones por pulido superficial no destruirá la evidencia del maclado. Adecuadas soluciones de ataque, sensibles a la diferencia en orientación, revelan la región maclada [12].

Todas las propiedades de un material que depende de la estructura reticular se ven afectadas por la deformación plástica o por trabajo en frío. El trabajo en frío es un mecanismo útil del endurecimiento; también es una herramienta muy eficaz para conformar materiales mediante trefilado. Aunque, el trabajo en frío causa algunos efectos indeseables por ejemplo, la pérdida de ductilidad o desarrollo de esfuerzos residuales que podrían no ser adecuados en ciertas aplicaciones.

Como el trabajo en frío o endurecimiento por deformación se relaciona con una mayor densidad de dislocaciones ver figura 2.10 se dispone que cualquier tratamiento para reordenar o aniquilar las dislocaciones podrían comenzar a reducir los efectos de trabajo. El resultado del resultado en frío es deformar los granos dentro del metal adicionando imperfección con los cristales que servirán de anclaje, evitando el movimiento interplanar con el consiguiente aumento de las propiedades de dureza, resistencia a la tensión, resistencia eléctrica y por el contrario disminuye la ductilidad.

Aunque la resistencia y la dureza aumentan. La ductilidad sigue una trayectoria opuesta a la dureza, un gran decremento en el primer 10% de reducción y después una disminución con una rapidez menor. El incremento de energía interna en las fronteras de grano hace que el material sea más susceptible a la corrosión intergranular, con lo cual se reduce la resistencia de corrosión conocida como el esfuerzo de corrosión, esta es la aceleración de la corrosión que ciertos medios debido a los esfuerzos residuales resultante del trabajo en frío.

Una forma de evitar el agrietamiento por el esfuerzo de corrosión es aliviar los esfuerzos internos de mediante un tratamiento térmico adecuado después del trabajo en frío y antes de poner el material en servicio. Los metales puros pueden resistir mayor deformación que los metales aleados, dado que los elementos de aleados incrementan la tendencia y la rapidez de endurecimiento por deformación. Los metales de grano grande son más dúctiles que los de grano

pequeño. Cuando el material es deformado por el trabajo en frío, severos esfuerzos residuales son generados.

Para reducir estos esfuerzos, el material debe de recalentarse en el rango de temperatura de recocido sin cambio apreciable en las propiedades físicas o estructurales del grano. El recalentamiento en el rango cristalino elimina el efecto del trabajo en frío y el material regresa a su condición original. La vida en fatiga en piezas pequeñas pueden mejorarse en granallado el cual causa que la superficie del metal este comprimida mediante el esfuerzo compresivos y el material reduzca su tensión [10].

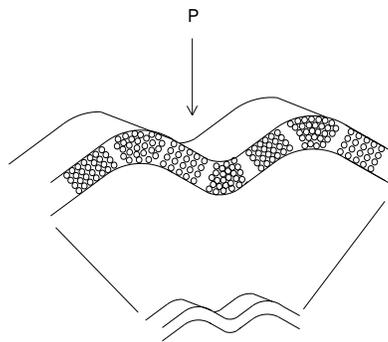


Figura 2.10. Dislocación se origina por la deformación plástica y aumenta la resistencia del acero

El endurecimiento por deformación es el incremento del esfuerzo necesario para continuar la deformación de un material. Se debe principalmente al incremento progresivo de la interacción de dislocación, que hace que cada vez haya más obstáculos para el deslizamiento. Se reconocen tres tipos de interacción 1) Interacción entre dislocaciones individuales, 2) Interacción de grupos de dislocaciones y 3) Interacción con obstáculos [14].

El endurecimiento por deformación es un fenómeno asociado con lo que se conoce como deformación en frío, mientras que la deformación en caliente no observa endurecimiento por deformación, o bien este desaparece en menor tiempo después de aplicar la deformación plástica [18].

En aplicación como el forjado de los tornillos, los metales y aleaciones se deforman. Las propiedades mecánicas cambian durante el proceso debido al endurecimiento por deformación.

El comportamiento del endurecimiento por de formación de los acero utilizados en la fabricación de tornillos influye en la habilidad para moldear las formas [16].

La respuesta en un material metálico ver figura 2.11 el trabajo en frío se determina por el exponente de endurecimiento por deformación (n) ver ecuación 2.1 que es la pendiente de la porción plástica de la curva esfuerzo real-deformación unitario real cuando se utilizan escalas logarítmicas [10].

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad 2.1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo de deformación

K= Coeficiente de resistencia

ε = Deformación unitaria

n = Exponente de endurecimiento por deformación

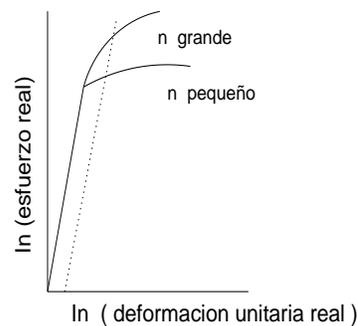


Figura 2.11. Curva de esfuerzo real-deformación unitaria real para metales [10].

2.3 Tornillos automotrices

En 1864, Estados Unidos adoptó una propuesta por William Sellers de Philadelphia, pero las tuercas Sellers no se enroscarían en tornillos Whitworth o viceversa. En 1935 se adoptó en Estados Unidos la rosca estándar estadounidense, con la misma forma en V de 60° grados de la antigua rosca Sellers. Aun que no existía una estandarización entre países. En tiempos de paz

esto resultaba una molestia, en la primera guerra mundial fue un problema serio y en la segunda guerra mundial el obstáculo crecía a tal grado que los aliados decidieron hacer algo al respecto.

Las pláticas comenzaron entre estados unidos y británicos, canadienses en 1948 se logró un acuerdo para la unificación de las roscas de tornillo americana y británicos. Las nuevas roscas se llamaron rosca de tornillo unificada, representaba un punto medio entre el estándar estadounidense, los sistemas Whitworth y lo que permitía una intercambiabilidad completa entre las tuercas de los tres países. En 1946 se formó un comité de la organización internacional para la Estandarización (ISO) tallecer un solo sistema internacional de roscas de tornillos métricas. Consecuentemente y gracias a los esfuerzos cooperativos del Instituto de Sujetadores Industriales (IFI), varios comités del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) [19].

Los tornillos son elementos que tienen filetes enrollados en forma de hélice sobre una superficie cilíndrica y son de los elementos más utilizados en las maquinas en general, los tornillos presentan diámetro exterior de la caña en mm para sistema métrico y plg para sistema ingles [16].

Los tornillos se suministran como pieza normales listas para su empleo. Se diferencian, en su aplicación, por su tamaño, el diámetro, longitud y forma de la cabeza ver figura 2.12a). La calidad superficial y el material del tornillo se forma la tuerca se fabrican de acuerdo con la norma Deutsches Institut für Normung (DNI): Cabezas y tuercas de tornillo normalizados hexagonal DNI 931, tornillo cuadrado con collar DNI 478, tornillo de martillo DNI 261, tornillo avellanado con nervio prisionero DNI 604.

Tornillo con hexágono interior DNI 912, tornillo cilíndrico DNI 84, tornillo redondo DNI 86, tornillo avellanado DNI 87, tornillo cilíndrico alomado DNI 85, tornillo gota de sebo DNI 88, tornillo con agujero cruzado DNI 404, tornillo de mariposa DNI 316, tuerca hexagonal, tuerca de corona o almenada, tuerca con ranura DNI 546 [20].

Tornillo de potencia

Existen diferentes tornillos para las más variadas aplicaciones de chasis. La relevancia de seguridad de los tornillos de chasis considera la calidad de los elementos de fijación. Las

aplicaciones van desde tornillos para fijaciones habituales de chasis hasta aplicaciones especiales como el ajuste de alineación o fijaciones de dirección o frenos figura 2.12b) [16].

Tornillos de potencia y los de cabeza redonda están diseñados para convertir el movimiento giratorio en movimiento lineal y ejercer la fuerza necesaria para mover una pieza de una maquina a lo largo de una trayectoria deseada. Los tornillos de potencia operan con base en el principio clásico de cuerda de tornillo y tuerca enlaza. Si el tornillo se apoya en cojinetes y gira en tanto se evita que la tuerca gire, la tuerca se enroscara a lo largo del tornillo.

Cuando se utiliza un tornillo de potencia para ejercer una carga pesada ver figura 2.12b) como levantar una carga como un mesa de trabajo de gran peso, es necesario saber que tanto el torque hay que aplicarle a la tuerca del tornillo para mover la carga. La eficiencia para la transmisión de una fuerza mediante un tornillo de potencia se puede expresar como la relación del torque que se expresa para mover el tornillo sin fricción con la que se necesita para mover donde si existe fricción [21].

Dentro de las diferentes calidades de atornillado, la especificación de par torsional más ángulo tienen un uso actualmente en la industria automotriz en ensambles de atornillado en lo que se emplean tornillos de grado y componentes que soportan altos esfuerzos; o sea ensambles estructurales. En este método se llega al campo plástico del tornillo, o sea a la deformación permanente aprovechando generalmente la máxima capacidad de apriete del tornillo.

La magnitud para ensambles de atornillado es la fuerza pero por la dificultad de medirla, a través del par torsional más un ángulo determinado se llega al punto de cedencia. El par torsional es una magnitud derivada de las magnitudes fuerza y longitud. Para obtenerlo se aplica una fuerza a una distancia perpendicular de un eje de un cuerpo, tal que se genere en este cuerpo una rotación alrededor de este eje.

También se le conoce como torque o momento de giro de apriete, en este trabajo se usarán estos términos par torsional y torque indistintamente, esto es por razones de uso de términos propios de atornillado. Las unidades utilizadas son Nm. En los ensambles de atornillado que se ensamblan únicamente con especificación de par torsional, el tornillo una vez ensamblado trabaja en la zona elástica.

Existen diferentes tornillos para las más variadas aplicaciones de chasis. La relevancia de seguridad de los tornillos de chasis considera la calidad de los elementos de fijación. Las aplicaciones van desde tornillos para fijación habituales de chasis hasta especiales de ajustes de la alineación o fijaciones de la dirección o frenos. En diseño mecánico, casi todos los afianzadores se fabrican de acero debido a su alta resistencia, buena ductilidad, susceptibilidad aceptables para maquinaria y darles forma.

El atornillador electrónico, tiene internamente un transductor de torque y encoder, este último es el que mide y controla el ángulo. El atornillado con el equipo electrónico, especificación de torque más ángulo se parametriza junto con otros valores como rpm's, tiempos, etapas, etc. El operador simplemente tiene que posicionar el dado al atornillador a ensamblar, sujetarlo, oprimir el gatillo, el atornillador efectúa toda la programación o rutina, ensamblando dicho tornillo y al final del ciclo indica el estatus del atornillado mediante leds de colores.

En la fase final del ciclo, el atornillador va a tender a girar por la reacción, por lo que el operador debe sujetarlo firmemente o en caso de torques finales de 50 Nm o más, se recomienda usar una barra de reacción. El atornillador electrónico es calibrado con transductor de torque rotatorio y con el mismo también es posible ensamblar tornillos con especificación de sólo torque [22].

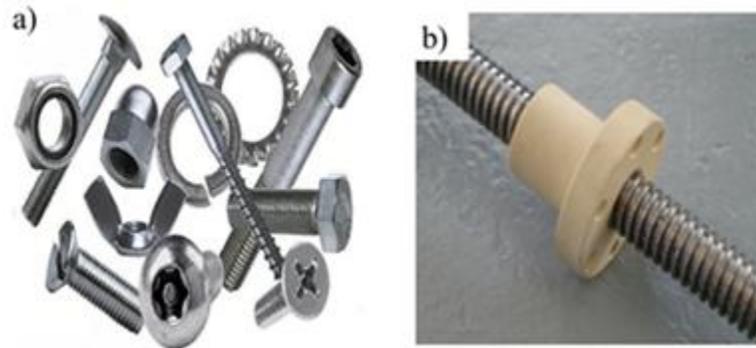


Figura 2.12a) Tornillos con cuerda fina, estándar, cuadrada y b) tornillo de potencia [21,22].

No obstante, se emplean diferentes composiciones y condiciones del acero. La resistencia de los aceros que se emplean para fabricar pernos y tornillos se utiliza para determinar su grado

de confortabilidad con uno de los estándares en la tabla 2.2, se observan varias de sus características de grado de tornillo de potencia estándar de acero SAE J429. Casi se dispone de tres especificaciones de resistencia, la resistencia al esfuerzo de tracción y la resistencia a la deformación además de la resistencia que resulta de prueba [22].

Tabla 2.2. Acero SAE J429 estándar para fabricar pernos y tornillos [20].

Numero de grado	Tamaño de perno mm	Resistencia a la tensión (Mpa)	Resistencia a la cedencia (Mpa)
1	6.35-38.1	413.7	248.2
2	6.35-19	510.2	393
	6.35-38.1	413.7	248.2
4	6.35-38.1	792.9	689.5
5	6.35-25.4	827.4	643.3
	25.4-38.1	723.9	558.5
7	6.35-38.1	917	792.9
8	6.35-38.1	1034	896.3

2.4 Microscopia

Metalografía

La metalografía o microscopia estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es una herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revela el tratamiento mecánico, térmico del metal, bajo un conjunto de condiciones dadas y podrá predecir su comportamiento esperado [12].

Extracción y corte de muestra

Durante la extracción de la muestra es fundamental considerar el lugar de donde se extrae la probeta y la forma en que se hace dicha extracción. Se debe tener en cuenta que no es indiferente el lugar de donde se extraerá la muestra, de acuerdo sea el objetivo del examen. Por ejemplo cuando se trata de una pieza rota en servicio, y el objeto del examen es determinar las

causas de dicha falla, la probeta debe extraerse, en la medida de lo posible, de la zona puntual donde la pieza ha fallado.

Esto depende de obtener la mayor información posible de las características del material en dicha zona y así obtener mejores conclusiones sobre las posibles causas de la falla. Por ejemplo, si se pretende determinar si un trozo de alambre posee trabajo en frío, causado por algún proceso de trefilado, se deberá observar una cara paralela al eje longitudinal de dicho trozo; por lo tanto la extracción de la muestra estará determinada por esta condición. En síntesis se debe lograr una muestra que representa el material a examinar.

En cuanto a la forma de extracción de la probeta se debe tener en cuenta que esta operación debe realizarse en condiciones tales que no afecten la estructura superficial de la misma. Por lo tanto se debe cuidar que la temperatura del material no se eleve demasiado durante el proceso de extracción. La extracción del corte manual se puede hacer con arco con segueta, o en el caso de pieza muy dura o diámetro grande el corte se realiza con sierra cinta o cortadora de disco [10].

Preparación de muestra

La muestra pequeña o de forma incomoda deben montarse de alguna manera para facilitar el pulido intermedio y final. Alambres, varillas pequeñas, muestras de hojas metálicas secciones delgadas etc., deben montarse en un material adecuado o sujetarse rígidamente en una monta mecánica. Los materiales plásticos sintéticos que se acoplan a la muestra en una prensa para montar especial proporcionan las bases de un tamaño uniforme conveniente (2.5, 3, o 4 cm de diámetro) para manipular las muestras en ulteriores operaciones de pulido.

Estas bases, cuando se han hecho en forma adecuada, son muy resistentes a la acción de los reactivos de ataque que se emplean comúnmente. La resina termo fijadora que más se emplea para montar la muestra es la baquelita. Los polvos para moldear baquelita se fabrican de colores de este material, lo cual simplifica la identificación de las muestras montadas. La muestra, la cantidad correcta de polvo de baquelita, se colocan en el cilindro de la prensa de montar.

La temperatura aumenta hasta 150 °C y se aplica una presión de moldeo de 4000 psi. Una vez que la baquelita está adherida y curada cuando se alcanza esta temperatura, la base con la

muestra puede extraerse del dado de moldeo mientras esta caliente. La lucita es la resina termoplástica más común; es transparente cuando se moldea en forma adecuada.

Al contrario de los plásticos térmicos, las resinas termoplásticas no sufren cura en la temperatura de moldeo, sino que adquieren estabilidad al enfriarse. La muestra, la cantidad de polvo de lucita adecuada se coloca en la prensa para montar, se someten a la misma temperatura y presión (150 °C y 4000 psi). Una vez alcanzada esta temperatura, se quita la bobina de calentamiento y las aletas de enfriamiento se colocan alrededor del cilindro para enfriar la base hasta 75 °C en 7 min el tiempo que mantiene la presión de moldeo [12].

Si se saca la base todavía caliente o si se deja enfriar lentamente en el cilindro de moldeo a la temperatura ambiente sin sacarla, se opacará. Las muestras pequeñas que pueden montarse en forma conveniente para prepararlas de metano gráficamente en un dispositivo de sujeción hecho en el área de trabajo. Las muestras laminares delgadas, cuando se montan de tal dispositivo de sujeción, suelen alterarse con hojas metálicas molde de metal que tiene la misma dureza que la muestra. Si se usan hojas de molde, se conservará la superficie libre de las irregularidades de la muestra y se evitará, de alguna manera, que los bordes de la muestra se redondeen durante el pulido [7,12].

Desbaste grueso

El proceso de desbaste metalográfico más típico consiste en hacer pasar la superficie de la probeta por sucesivos papeles de abrasivos de finura creciente. La finura creciente se refiere al uso de grados más finos de abrasivo para producir ranuras o rasguños más finos en la superficie. El nivel más simple, la superficie de la sección, después del mecanizado preliminar la banda de grano grueso que elimina la resina sobrante y que origina las primeras líneas en una sola dirección cuya misión es hacer que el plano donde se encuentra la superficie y la cara opuesta sean coplanarios, es frotar a mano contra la superficie de trabajo de un papel abrasivo soportado sobre una superficie plana de respaldo. La superficie de trabajo del papel se inunda con un líquido [23].

Desbaste final

Los papeles abrasivos impermeables, usualmente los revestidos con abrasivo de carburo de silicio, son convenientes porque sus superficies de trabajo pueden ser enjuagadas continuamente con agua para eliminar los desechos de abrasión a medida que se forman. La superficie de la sección se trata de esta manera, utilizando grados sucesivamente más finos de papel abrasivo, usualmente a los mejores disponibles. A continuación, la superficie se desbasta girándola a mano 90° contra un paño que se ha cargado con un abrasivo fino y un líquido apropiado, y después se ha estirado a través de una superficie plana de respaldo. Usualmente son necesarias varias etapas de desbaste que emplean abrasivos cada vez más finos.

Un nivel más automatizado es que el papel abrasivo gira, siendo el procedimiento el mismo que el anterior. La probeta se mueve lentamente, siguiendo una de las direcciones radiales del disco, de tal forma que las rayas del desbaste inicial formen un ángulo de 90° con dicha dirección y apretándola ligeramente contra el papel con el fin de aprovechar toda la superficie del papel abrasivo disponible. Cuando se aprecien sólo las marcas del papel que se esté usando, se cambia a un papel con tamaño de grano menor, girando la probeta 90° antes de seguir desbastando.

Es importante insistir en un material sobre un determinado papel, aunque ya hayan desaparecido las marcas del papel anterior, con el fin de eliminar cualquier deformación plástica que haya bajo la superficie debida a alguna operación anterior (de mecanizado, de desbaste con presión excesiva, etc.). Además, hay que asegurarse de que toda la superficie de la probeta toque con el papel, si no, podría formarse algún plano, que habría que quitar volviendo a un papel abrasivo anterior. Como resultado de esta operación, se obtiene un sistema de rayas finas y uniformes sobre la superficie de la muestra [23].

Pulido

Si la muestra ha sido preparada adecuadamente hasta este punto, la verdadera microestructura de la muestra debe estar intacta. Esto incluye retención de las inclusiones, fases estructuras frágiles, bordes afilados sin redondeo, bordes de porosidad distintos (sin redondeo), sin metal manchado ni partículas abrasivas incrustadas. Los únicos propósitos para el pulido

final deben ser limpiar la superficie (quitar las finas rayas del último papel de abrasivo del desbaste) y preparar la superficie para el ataque (si es necesario).

Si la microestructura verdadera no ha sido resuelta por este punto en el proceso de preparación, es muy probable que la superficie resultante después del pulido final contenga todavía artefactos microestructurales. El pulido consiste en la superficie de la probeta, ya desbastada, hasta el grado más fino y limpia, por los paños impregnados de partículas abrasivas seleccionadas cuidadosamente en función de su tamaño. El tipo de paño y abrasivo dependen del material de la probeta.

En cuanto a los abrasivos más usados para los materiales ferrosos, destacan las suspensiones de alúmina o de magnesia de distintos grados. En cambio, para aceros inoxidable se emplean unas pastas con polvo de diamante, clasificadas en función del tamaño medio de partículas de este, expresado en micras. Estas pastas se extienden en los paños que son lubricados con líquidos especiales. Otra forma de realizar esta operación, de una manera más automática, consiste en colocar las muestras en un soporte que rota en sentido contrario al giro en el paño de pulido [23].

Si bien es muy cierto que cuanto más pulida este la superficie más clara será la imagen que obtengamos en el ocular, algunas veces no es necesario llegar hasta un pulido perfecto, sino que bastará con que la densidad de rayas en la superficie sea lo suficientemente baja y preferentemente en una sola dirección. Si con un aumento de 500x se pueden distinguir porciones lisas más grandes entre las rayas, entonces el pulido puede darse por terminado [24].

Método de ataque

ASTM E407 [25] especifica qué productos químicos de grabado (generalmente ácidos) y procedimientos son necesarios para revelar la microestructura de diferentes tipos de metales. El acero al carbono tiene varias estructuras tales como ferrita, perlita y martensita dependiendo de cómo se distribuye el carbono en el material. La forjar a menudo muestra elongación de granos individuales que indican la orientación y el flujo del material. Las diferencias en la microestructura son importantes porque ayudar a determinar si un metal ha sido sometido a productos químicos corrosivos, es más suave o más duro en la superficie, se ha deformado, soldar correctamente o se ha sobrecalentado [25].

El propósito del ataque es revelar la microestructura de la muestra bajo el microscopio. Para ello, la muestra debe estar perfectamente pulida, sin ninguna raya presente en la superficie a estudiar. Aunque se puede obtener cierta información de los especímenes de pulidos, la microestructura suele ser visible sólo después del grabado. Solamente las características que exhiben una diferencia del 10% o más en la reflectividad se pueden ver sin el ataque como, por ejemplo, las características microestructurales con fuertes diferencias de color o con grandes diferencias en la dureza.

Se pueden observar grietas, poros, fosas e inclusiones no metálicas en la condición pulida. Sin embargo, una muestra pulida normalmente no exhibe su microestructura, que es lo que se pretende estudiar en este trabajo, debido a que la luz se refleja uniformemente y el ojo es incapaz de percibir esas diferencias de reflectividad tan bajas. Por ello, es necesario el ataque químico [23].

El reactivo para atacar al acero es el nital que es la solución oxidante compuesta de ácido nítrico (HNO_3) acuoso y etanol. Se utiliza en aplicaciones como la metalografía. El nital se compone de un ácido potente oxidante y orgánico. Para poder trabajar con el nital se tienen que reducir con alcohol [25].

2.4.1. Microscopia óptica

Es un método de grabar una muestra de metal para revelar su microestructura. A escala microscópica, el metal se compone de una gran cantidad de granos que pueden variar en forma y tamaño. Los elementos de aleación en el metal a veces se separan en partículas microscópicas con formas distintas. Esta microestructura se puede inspeccionar montando, seccionando y puliendo de acuerdo con ASTM E3 [24] seguido de ataque químico en base al estándar ASTM E407 [25].

Esta práctica abarca soluciones y procedimientos químicos. Para ser utilizados en el grabado de metales y aleaciones para examen. Precauciones de seguridad e información diversa también se incluyen. La presente norma no pretende abarcar todas las preocupaciones de seguridad, si las hay, asociadas con su uso. Es responsabilidad del usuario de este estándar para establecer las prácticas de seguridad, salud y determinar la aplicabilidad.

El principal objetivo de exámenes microestructurales es dar a conocer sus componentes, estructurales de los metales y aleaciones por medio del microscopio. El objetivo del examen puede requerir al desarrollo de menos detalles que en otros casos, pero en virtud de casi todas las condiciones, la selección adecuada y la preparación de la muestra es de gran importancia. La metalografía estudia la estructura interna de los metales de aleaciones y relaciona esa estructural con las propiedades mecánicas. Para poder establecer las relaciones entre la composición química de los metales y aleaciones con las respectivas propiedades físicas [24].

Los resultados de estos estudios se relaciona finalmente entre si y permiten deducir las condiciones necesarias, ya sea en el campo de la investigación, en el control de los procesos metalúrgicos o en la verificación de calidad de los productos terminados. Es importante proceder metódicamente al elegir el sector de una pieza o conjunto de piezas de la que se desea conocer la estructura microscópica, porque la estructura suele no ser homogénea. Las muestras destinadas a la observación microscópica debe tener una superficie plana y pulida hasta presentar aspecto de espejo [23].

Todos los metales y aleaciones pueden ser preparados usando secuencia de pulido. Las aleaciones duras pueden requerir mayor presión que las aleaciones blandas. Las principales diferencias serán en el pulido final. Algunos metales, aleaciones requieren combinaciones específicas de material abrasivo y pero número puede ser manejado por el mismo procedimiento. Suministros e instrucciones para el rectificado, pulido son fácilmente obtenibles de casas de suministro de laboratorio. Las microestructuras tienen una fuerte influencia sobre las propiedades y aplicación con existo de metales y aleaciones [23].

La determinación y control de la microestructura requieren el análisis microestructural. Varias especificaciones contienen un requisito con respecto a la microestructura; por lo tanto, un uso importante para el examen metalográfico es la inspección para asegurar que se cumple el requisito. Otros usos importantes para el examen metalográfico están en el análisis de fallos, investigación y el desarrollo adecuada elección de la ubicación [24].

La microscopía el conjunto de técnicas y métodos destinados a hacer visible los objetos de estudio que por su pequeñez están fuera del rango de resolución del ojo normal. Para observar la estructura de los metales se emplean microscopios especiales, a fin de que los rayos luminosos

sean reflejados por la muestra, ya que no es posible hacer observaciones de metales por transparencia [26].

Microscopio óptico está constituido de las siguientes partes principales ópticas, luminosas y accesorias. Una de las ramas de la metalografía estudia la estructura microscópica de los cuerpos metálicos. Emplea, para estos, microscopios adecuados, que permiten observar, por luz reflejada, superficies planas de las muestras, previamente preparadas. Para preparar las muestras que se desean observar microscópicamente. Es importante proceder metódicamente al elegir el sector de una pieza o conjunto de piezas de las que se desean conocer la estructura microscópica, porque la estructura suele no ser homogéneas [27].

La microscopia es la ciencia que estudia la relación entre la composición química, estructura y la propiedad de los metales, sus aleaciones para su caracterización y clasificación. Es una técnica que se utiliza para revelar las características microestructurales tales como límite de grano, donde se requiere un aumento aproximado menor 1000x. El proceso es preparar una muestra de metal y observar su microestructura se llama metalografía. Se corta desbaste y pule una muestra hasta que tenga un acabado espejo.

A continuación la superficie se expone al ataque químico y los límites de grano. En la microscopia del acero lo primero que se debe de reconocer es el diagrama de hierro-carbono graficando la temperatura en función del ciento de carbono, donde se localiza diversas fases, cada una de las cuales es homogénea respecto a sus propiedades mecánicas.

Es una técnica que se utiliza para revelar las características microestructurales como límite de grano, donde se requiere un aumento aproximado menor que 1000x. El proceso de preparar una muestra de metal y observar su microestructura se le llama metalografía se corta, desbasta y pule una muestra hasta que tenga una acabado de espejo. A continuación, la superficie se expone al ataque químico, y los límites de grano se atacan en forma más intensa que el resto del grano.

En el laboratorio se emplea un microscopio facilitando la información acerca de la microestructura de los metales. La luz del microscopio óptico es reflejada o dispersa en la superficie de la muestra, dependiendo de la forma en que esta llega a la superficie. Cuando bastante luz se dispersa en partes donde el ataque es más profundo, como los límites de grano,

las zonas aparecen negras. La forma de especificar el tamaño del grano es mediante el número de tamaño de grano ASTM. La cantidad del grano /plg² se determina con una micrografía tomada a 100x. Esta cantidad se sustituye en la ecuación 2.2 y se calcula el número n de tamaño de grano ASTM [10].

$$N = 2^{n-1} \quad 2.2)$$

Donde:

N = Cantidad de granos por plg²

n-1 = Numero de tamaño de grano

El microscopio óptico presenta diferencia cuando la luz es proyectada sobre una muestra metalográfica que es opaca a la luz, este caso debe iluminarse por la luz reflejada. Un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz es reflejada por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objeto del microscopio sobre la superficie de la muestra. Una parte de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplificara al pasar del sistema inferior del lente, objetivo y continua hacia arriba a través del reflector del vidrio plano después una vez más lo amplifica al sistema superior de lentes oculares.

El poder de amplificación inicial del objeto y ocular esta generalmente grabado en la base del lente. Cuando es utilizada una combinación particular del objeto, ocular y longitud adecuada del tubo, la amplificación total es igual al producto de las amplificaciones del objeto y ocular. La amplificación máxima obtenida con el microscopio óptico es de 1000x. Las diferencias de fases causadas por variaciones extremadamente pequeñas al nivel de microestructuras se transforman en diferencias de intensidad en la imagen observada, revelando de esta forma aspectos invisibles bajo iluminación ordinaria.

En todos los microscopios ópticos la calidad de la imagen depende de la calidad de óptica. Las lentes trabajan con la refracción y diferentes longitudes de onda de luz. Este fenómeno lleva a la aberración cromática y distorsión de imagen, ya que los diferentes colores de luz inciden en el foco a diferentes distancias de la lente. Una imagen con aberración cromática muestra bandas de arcos iris en la imagen del objeto, lo que va en deterioro de la resolución de los detalles.

Después se encontró que un doblete de dos lentes de materiales ópticos diferentes podía concentrar dos colores en el mismo nivel. Este tipo de objetivo se conoce hoy en día como objetivo acromático y se emplea en la mayor de los microscopios ópticos. El desarrollo de los objetivos acromáticos condujo al elemento de prisma apocromático, el cual fue diseñado para focalizar tres longitudes de onda al mismo tiempo.

Generalmente, estas longitudes de onda son rojas, verdes, azules y permiten obtener una mejor presentación de colores que con los objetivos acromáticos más sencillos. El avance más moderno de la microscopia óptica son los lentes planas cromáticas actuales, también llamadas lentes superacromáticas. Esta combina las correcciones cromáticas en cuatro longitudes de onda con las correcciones de la aberración esférica.

La cuarta longitud de onda se encuentra por norma general en el rango infrarrojo para evitar un reajuste del foco en la deformación multispectral de la imagen, ver figura 2.13. El examen microscópico representa una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante la microscopia óptica para observar las características microestructurales. Este tipo de análisis permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal evidenciando la estructura o cambios estructurales que sufren de dicho proceso.

Como consecuencia de esto también es posible deducir las variaciones que experimenta sus propiedades mecánicas dependiendo de los constituyentes microestructurales presentes en la microestructura. Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que no solo son útiles a los investigadores sino a los ingenieros. El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface la especificación en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general.

La microestructura es un instrumento para analizar las fallas mecánicas y controlar procesos industriales. Para un estudio microscópico se necesita una preparación más cuidadosa de la superficie. No obstante el procedimiento de la preparación de la superficie es básicamente por metalografía. Esta experiencia de línea muestra una forma de preparar muestras pequeñas de acero dúctil con el fin de realizar un examen microscópico.

Los pasos a seguir en el procedimiento de preparación son las mismas para todos los materiales difiriendo solo las herramientas de corte y grado de los papeles de esmeril de acuerdo

la dureza del material. El reactivo de ataque a utilizar depende del tipo de aleación. Los ensayos micrográficos se realizan sobre muestras o probetas de los materiales que han de ser sometidos a estudios, se prepara una superficie que luego de ser pulida se ataca con reactivos químicos apropiados a un fin [10].

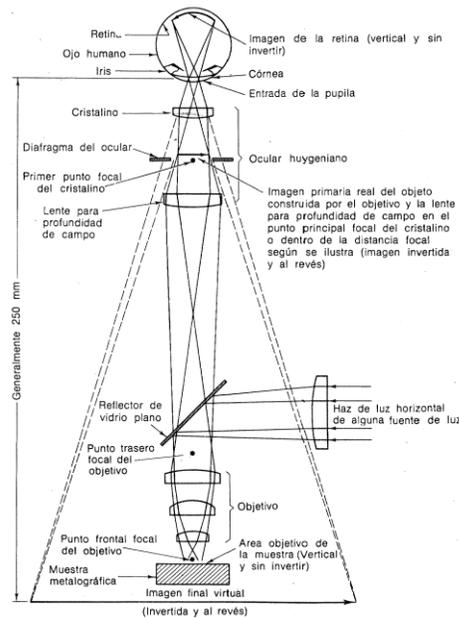


Figura 2.13 Microscopio con sistema óptico compuesto desde campo objetivo hasta imagen final virtual [12].

Para observar la estructura de los metales se emplean microscopio óptico está constituido de las partes principales. Un estativo, destinado a sostener mecánicamente, dar posición a la parte óptica, la iluminación y los accesorios. Se llama estativo al conjunto de elemento o piezas metálicas del microscopio. Las partes más importantes del estativo son; pie, tubo, platina, mecanismo de enfoque.

El pie sostiene y da estabilidad al microscopio. Está formado por dos brazos horizontales que forman un ángulo y que se apoya sobre una mesa u otro mueble. Del vértice este ángulo parte una columna recta o curva, el tipo de microscopio y que casi siempre es articulada para poder inclinar todo el microscopio excepto el pie que queda horizontal [27].

Tubo es un cilindro hueco, de paredes delgadas y metálicas, con su interior teñido de negro para impedir reflejos luminosos. Está dividido en las dos partes para poder variar su longitud, con un sistema telescópico. Su funcionamiento esencial es de sostener, dar posición al ocular y al objetivo. En el extremo inferior del tubo, donde se ubica el objetivo, puede encontrarse un dispositivo mecánico, en forma de semiesfera hueca, giratoria y con varios orificios. La platina es un plato cuadrado, rectangular o redondo ubicado debajo del tubo y destinado a recibir y sostener las muestras que se desean observar microscópicamente.

La platina necesita tener un orificio frente al tubo porque en los microscopios más comunes, la luz debe de pasar a través de la muestra desde abajo, donde se encuentra el espejo de iluminación. El mecanismo de enfoque además de los grandes movimientos del tubo, que se ejecutan por medio de tornillos de mayor tamaño, se dispone de un mecanismo que permite efectuar pequeños movimientos del tubo, con el objeto de enfocar correctamente la muestra en observación. Este segundo tornillo de enfoque se llama micrométrico, porque también permite hacer mediciones de altura y entre dos puntos observados.

En efecto, el tornillo está graduado en tal forma que al girar frente a un punto de referencia, se miden hasta centésimas de milímetros del movimiento longitudinal del tubo. Parte óptica del microscopio está formado por los objetivos y los oculares que constituyen los elementos más importantes. Los objetivos son sistemas de lentes montados en una caja cilíndrica o de forma similar que se sitúan generalmente en el extremo inferior del tubo. La distancia entre el objetivo y las muestras se llaman espacio libre o espacio de trabajo. Los oculares es un sistema de lentes que amplifican, corrigen la imagen de la muestra y enfocada por el objetivo del microscopio su amplificación es variable.

La iluminación se efectúa por lámparas eléctricas especiales desde el exterior. Sus rayos se dirigen hacia el espejo del microscopio, el cual los desvía hacia el condensador de aquí pasan a la muestra y donde forman un punto al cruzarse para seguir hacia el objetivo. Un dispositivo especial de iluminación en el interior del tubo se consigue el empleo de un microscopio para la observación de muestras metálicas, con las cuales solo es posible la observación y por luz reflejada. Accesorios del microscopio existen una gran cantidad y variedad de accesorios [27].

2.4.2 Microscopia electrónica de barrido

Uno de los equipos más versátiles para el análisis de características microestructurales de objetos sólidos es el microscopio electrónico de barrido (MEB), está equipado con distintos detectores entre los cuales se encuentra un detector de electrones secundarios para formar imágenes. La primera razón de la utilidad de estos microscopios es la alta resolución que se puede obtener cuando se examinan muestras gruesas. En los instrumentos comerciales se pueden alcanzar sin dificultad valores de resolución del orden de 2 a 5 nm (20 a 50 Å), mientras que en instrumentos que están en desarrollo se pueden obtener resoluciones en torno a 0.5 nm (5 Å).

Otra característica importante del MEB es la apariencia tridimensional de la muestra, el efecto es un resultado directo de la gran profundidad de campo, así como el efecto de relieve producido en la imagen de electrones secundarios y retrodispersos. De acuerdo, a esta capacidad para ver en tres dimensiones es citada en la bibliografía como la característica más valiosa para los usuarios de estos instrumentos. El MEB también es capaz de examinar objetos a muy bajos aumentos. Esta aplicación es especialmente útil en estudios forenses, así como en otros campos donde la imagen electrónica se complementa con la imagen óptica, como la arqueología o la metalurgia [28].

Cañón y lentes electrónicas

La columna electrónica consiste en un cañón de electrones y dos o más lentes, operando en vacío. El cañón es la fuente de electrones, los acelera con una energía en el rango de 1 a 40 keV (aunque algunos instrumentos de última generación permiten trabajar hasta con un potencial de aceleración de sólo 200 V). El diámetro del haz producido por la emisión de un cañón de electrones convencional es movimiento rectangular, que se genera de forma sincronizada tanto en la muestra como en la pantalla donde se ve la imagen.

Se utilizan dos pares de bobinas de deflexión electromagnéticas (llamadas bobinas de barrido) para controlar el movimiento del haz. La amplificación de una imagen de la muestra es la relación entre el tamaño lineal de la pantalla de visión (conocido como tubo de rayos catódicos, CRT) y el tamaño lineal del barrido del haz sobre la muestra. Por tanto, un aumento

en la ampliación puede obtenerse excitando las bobinas de barrido con menor energía de forma que el haz sea reflectado una distancia menor sobre la muestra.

Como la pantalla de imagen tiene un tamaño fijo, se registra una ampliación mayor (mayores aumentos) cuando la amplitud del barrido sobre la muestra es menor. Un barrido con amplitud de 100 μm se convierte en una imagen a 1.000 aumentos cuando se ve en una pantalla de 10 cm de ancho [28].

Detector de electrones

La interacción del haz de electrones con la muestra causa la generación de varias señales que pueden emplearse para modular la intensidad de la GRT y producir una imagen. Las dos señales que con mayor frecuencia se emplean para producir imágenes son los electrones secundarios y los electrones retrodispersos. Tanto los electrones secundarios como retrodispersos pueden recogerse empleando detectores Everhart— Thornley (E—T).

El detector E—T consiste en un centellador, una guía de luz (fibra óptica) y un tubo fotomultiplicador. El detector se sitúa junto a la muestra, depende del modelo, la muestra se inclina hacia él. Este detector se encuentra eléctricamente aislado del resto del microscopio y está protegido por una malla de alambre que se encuentra a un potencial de +300 V. Esta pantalla cargada positivamente atrae a los electrones secundarios de baja energía hacia el detector desde cualquier punto de la cámara porta muestras.

Es necesario tener en cuenta que para formar una imagen de electrones secundarios de alta calidad es necesario que la mayor fuente de electrones se localiza en el punto en que el haz colisiona con la superficie de la muestra. También entran en el detector E—T una pequeña fracción de los electrones retrodispersos de la muestra, que salen en la dirección del detector (menos del 2 %).

Los electrones entrantes en el detector son acelerados hacia el recubrimiento de aluminio del centellador por un potencial de +12 KV. Estos electrones golpean el material sensible produciendo luz demasiado grande para producir buenas imágenes a altos aumentos. Las lentes de electrones se emplean para reducir el diámetro de la fuente de electrones y situar

un haz de electrones más pequeño y enfocado sobre la muestra, tal como se muestra en Figura 2.14 [28].

En la mayoría de los MEB se puede generar un haz de electrones que en la superficie de la muestra tiene un tamaño menor de 10 nm y con una corriente suficiente para formar una buena imagen. En la mayoría de los MEB el haz de electrones emerge desde la parte inferior de la lente objetivo para entrar en la cámara porta muestras donde interacciona con una región próxima a la superficie de la muestra, hasta una profundidad de 1 pm, generando diferentes señales que se emplean para formar imágenes. La formación de imágenes requiere un sistema de barrido para construir la imagen punto a punto [28].

Sistema de deflexión y control de amplificación

Para producir contraste en una imagen la intensidad de la señal producida por la interacción haz—muestra debe ser medida en un punto tras otro a lo largo de la superficie de la muestra. La función del sistema de deflexión es mover el haz de electrones sobre la muestra siguiendo una línea y a continuación desplazar la posición de la línea para realizar un nuevo barrido, todo esto siguiendo un patrón de que viaja a través de una guía hasta el tubo fotomultiplicador que convierte la luz en una señal eléctrica amplificada. Las variaciones que se presentan en la señal al moverse el haz sobre la muestra producen cambios en la intensidad que se ven en la pantalla como una imagen.

Los electrones retrodispersos son recolectados de forma más eficiente si el detector se encuentra perpendicular al haz de electrones y paralelo a la superficie de la muestra, “viendo la muestra desde arriba”, en su configuración más usual. Estas imágenes se obtienen, generalmente, usando uno de los dos tipos de detectores siguientes, de tipo semiconductor o de tipo escintilador—fotomultiplicador El detector E—T descrito antes también puede emplearse para la adquisición de estos electrones, para ella se carga la pantalla del detector con un potencial de -100 y con objeto de repeler a los electrones secundarios.

Aunque sólo se ha discutido acerca de los electrones secundarios y retrodispersos es necesario aclarar que cualquier señal que se pueda recoger en el interior del MEB es susceptible de ser amplificada, empleada y en principio para formar una imagen [28].

Cañones de electrones

El propósito de un cañón de electrones es dar una corriente grande y estable en un haz electrónico pequeño. Actualmente se emplean diferentes tipos de cañones de electrones en los MEB. Éstos varían en la cantidad de corriente que pueden producir, el tamaño de la fuente, la estabilidad de la corriente emitida, y el tiempo de vida de la fuente. La mayoría de los MEB emplean fuentes de tipo termoiónico de tungsteno (W).

Otros tipos, con las que se obtienen mejores prestaciones de imagen, son el hexaboruro de lantano y las fuentes de emisión de campo (FEMEB) que a su vez pueden ser de cátodo frío, de cátodo caliente, o de efecto Schottky. En este estudio se empleó un MEB con un cátodo termoiónico y un FEMEB con cátodo tipo Schottky [28].

Emisión termoiónica de electrones

La emisión termoiónica ocurre cuando se proporciona al emisor una cantidad de calor tal que los electrones pueden superar la barrera de energía de la función de trabajo, E_{\sim} , y escapar del material. Los electrones en el metal tienen dentro del enlace metálico un rango de energías, cuyo estado energético superior se llama nivel de Fermi, E_F . Cuando un material emisor se calienta a alta temperatura, una pequeña fracción de electrones que se encuentran en el nivel de Fermi adquieren suficiente energía para superar E_{\sim} y escapar al vacío [28].

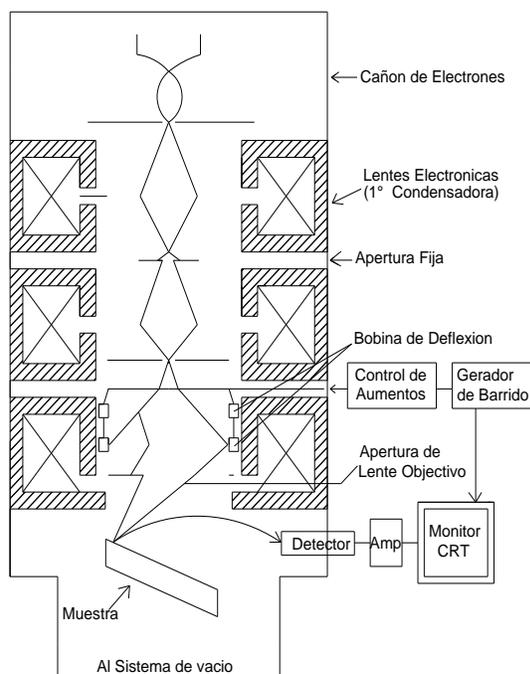


Figura 2.14. Esquema de microscopio electrónico de barrido, mostrando la columna electrónica, sistema de deflexión y detectores [28].

2.4.3. Análisis microestructural

El análisis de propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de las cantidades de carbono y de su distribución. Antes del tratamiento térmico, la mayoría de los aceros son de una mezcla de tres fases, ferrita, perlita, cementita. La ferrita blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución. La cementita es un compuesto de hierro con 6.67 % C, es de gran dureza y muy quebradizo [25].

Austenita

Se define como una solución sólida de carbono en hierro gamma. Solo estable a temperatura superior a 723° C, desdoblándose por reacción eutectoide, a temperaturas inferiores, en ferrita cementita. Solo puede aparecer austenita a temperatura ambiente de los acero austeníticos, en

este caso la austenita si es estable a temperatura ambiental. Es deformable como el hierro gama, material bajo en dureza, presenta gran desgaste, es magnética, es el constituyente más denso de los aceros y no se ataca con reactivos.

La resistencia de la austenita retenida a la temperatura ambiental oscila entre 800 y 1000 N/mm² y el alargamiento entre 20 y 25 %. Puede disolver hasta 1.7-1.8 % de carbono. Presenta red cristalográfica cubica centrada en las caras (c. c. c), con los siguientes parámetros de red figura 2.15a), $a = 3.67 \text{ \AA}$ y $d = 2.52 \text{ \AA}$ [25]. La austenita presenta las siguientes características: Baja temperatura de fusión, buena tenacidad, excelente soldabilidad, no es magnética en la figura 2.15b) se observa la estructura de la austenita.

Ferrita

Esta constituyente está formado por una solución solida de inserción de carbono de hierro alfa. Es el constituyente más blando de los aceros pero es el más tenaz, es el más maleable, su resistencia a la tracción es de 2800 N/mm² y su alargamiento de 35 %. Su solubilidad máxima es de 0.008 %. Puede también mantener en solución de sustitución a otros elementos tales como Si, P, Ni, Cr, Cu que figuran en los aceros, bien como impureza, bien como elemento de aleación [25].

La ferrita se presenta en los aceros hipoeutectoides como elementos de aleación como constituyente y mezclada con la cementita entra a formar parte de la perlita. Si el acero es muy pobre en carbono, su estructura está formada casi en su totalidad por granos de ferrita cuyos límites pueden revelarse fácilmente con el microscopio, después de un ataque con (HNO₂) diluido. Los granos son equiaxiales. Tienen una distancia interatómica de 2.48 Å [25].

Es un constituyente más blando y tenaz de los aceros, se presenta en los aceros hipoeutectoides. Es una solución solida intersticial de carbón en una red cubica centrada en el cuerpo de hierro b.c.c permitiendo hasta 0.021 %C en solución en la temperatura eutectoide. Es el constituyente más blando que el acero. Su resistencia es de 275 Mpa es una fase ferromagnética siendo su temperatura de curie de 768 °C a partir de una temperatura y hasta de esta temperatura y hasta 910 °C su comportamiento es paramagnético [10].

La morfología y estructura granular es la ferrita es muy variada, se encuentran cerca de 24 formas descriptivas, ver figura 2.15c). La morfología equiaxial correspondiente a granos poligonales de ejes iguales, que resultan a veces atacados diferente en función de su orientación cristalográfica respecto a la superficie de observación [10].

Cementita

Es un constituyente que aparece en fundiciones y acero. Es el carburo de hierro, de formula Fe_3C , que cristaliza en el sistema ortorrómbico. Es muy frágil y duro, teniendo sobre 840 Vickers, y es muy resistente al rozamiento en las funciones atruchadas. A bajas temperaturas es ferromagnético y pierde esta propiedad a 212 °C (punto de Curie). Se piensa que funde por encima de 1950 °C, y es termodinámicamente inestable a temperatura inferiores a 1200 °C. Se puede presentar en forma reticular, laminar y globular. La cementita posee las siguientes propiedades: Alta dureza, muy frágil, alta resistencia al desgaste ver figura 2.15d) [10].

Perlita

Está formada por una mezcla eutectoide de dos fases, ferrita y cementita, se produce a 723 °C cuando la composición es de 0.80 %. Su estructura está constituida por las láminas alternadas de ferrita y cementita, siendo el espesor de las láminas de ferrita superiora las de cementita. Estas últimas quedan en relieve después del ataque con (HNO₃) lo cual hace que en la observación microscópica se revele por las sombras se proyectan sobre las láminas de ferrita. La perlita es más dura y resistente que la ferrita, pero más blanda y maleable que la cementita. Se presenta en forma laminar, reticular y globular, ver figura 2.15 e) [10]. Hay dos tipos de perlita: perlita fina dura y resistente, y perlita gruesa menos dura y más dúctil.

La perlita gruesa es más dúctil que la perlita fina a consecuencia de la mayor restricción de la perlita fina a la deformación plástica. Mecánicamente la perlita tiene las propiedades intermedias entre la blanda y dúctil ferrita y la dura y quebradiza cementita [10]. La perlita es una mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica de estructura característica; sus propiedades físicas con intermedias entre las de sus dos componentes. La resistencia y dureza de un acero, que no ha sido tratado térmicamente, depende de las porciones de estos tres

elementos. Cuanto mayor es el contenido del carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la perlita: cuando el acero tienen un 0.8% de carbono, está por compuesto de perlita. El acero con cantidades de carbono mayores, es una mezcla de perlita y cementita [25].

Martensita

Es una solución sólida, intersticial, sobresaturada de carbono en hierro alfa. Es el constituyente estructural (figura 2.15f) de temple de los aceros y su microestructura se presenta en forma de agujas cruzadas. Los átomos de hierro están como en la ferrita, en los vértices. Los átomos de carbono están en las caras, aristas y presenta por tanto una red distorsionada. Esta distorsión en la red es la responsable de la dureza de la martensita. Presenta una red tetragonal. Sus características mecánicas son resistencia a la tracción entre 170-250 Kg/mm², dureza HRC entre 50-60, alargamiento de 0.5 % y es magnética [25].

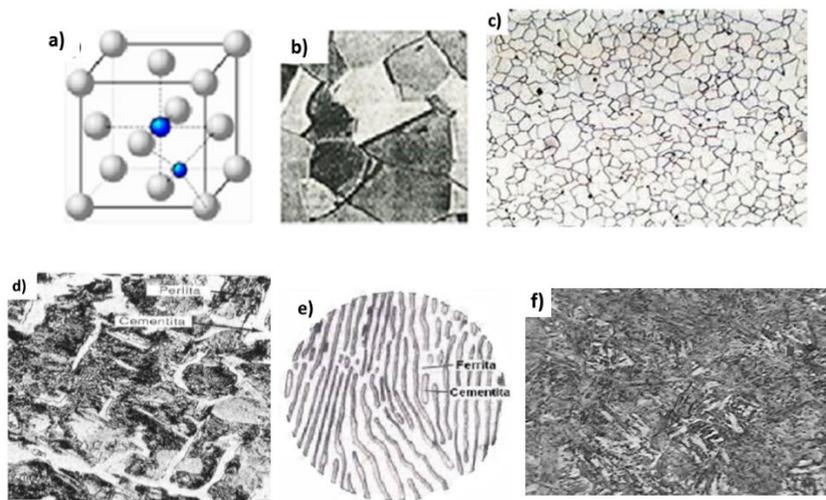


Figura 2.15. Microestructuras de hierro forjado: a) cristal de austenita con átomos de hierro y carbono intersticial, b) austenita, c) ferrita, d) perlita de laminillas de cementita y ferrita, e) cementita (zonas oscuras) y perlita (zonas claras) en fundición blanca, y f) enfriamiento rápido de austenita [28].

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

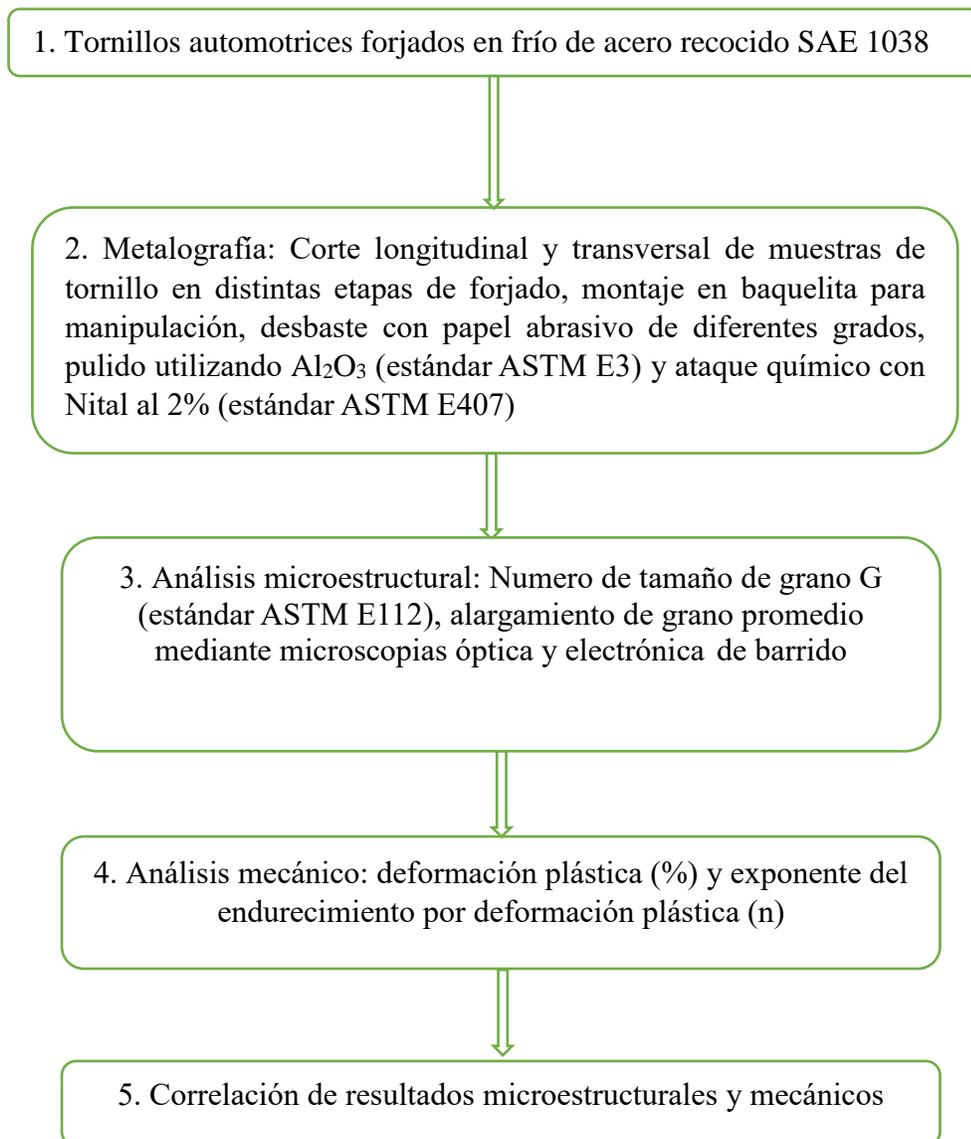


Figura 3.1 Diagrama de bloque del desarrollo experimental

3.1 Materiales

El tornillo es un dispositivo provisto de cuerda a manera que pase a través de un orificio en las piezas que se enlazan y asegura el apriete a tuerca desde el extremo opuesto a la cabeza del perno. El tornillo que se utilizó en el experimento (ver figura 3.2) tiene la resistencia adecuada para soportar la tensión en el perno, sus dimensiones son la longitud, diámetro de cabeza, diámetro entre caras, altura de cabeza, altura de cuadro y diámetro de perno.

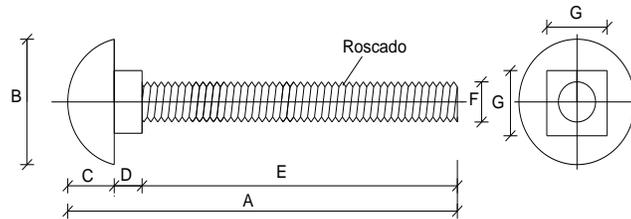


Figura 3.2 Esquema de tornillo forjado en frío de acero SAE 1038.

En la tabla 3.1 se presentan las medidas técnicas del tornillo para conocer sus dimensiones, saber su aplicación y seguridad que debe aportar en el trabajo a ejecutar.

Tabla 3.1. Dimensiones de tornillo forjado en frío de acero SAE 1038

Símbolo	Característica	Especificación (mm)
A	Longitud entre caras	75
B	Diámetro de cabeza	20
C	Altura de cabeza	4.5
D	Altura de cuadro	5
E	Longitud de cuerda	64
F	Diámetro	9.5
G	Cuadro de cabeza	9.7

Se realizó una adecuada preparación de muestras a partir del tornillo forjado con alambre recocido fosfatado de acero SAE 1038 con diámetro de 8.3 mm y largo de 95.2 mm. El perno

ya deformado tenía diámetro de 9.5 mm y largo de 75 mm en los cuatro pasos de forjado en frío, ver la figura 3.3. El tratamiento térmico de recocido para realizar el forjado en frío fue realizado por el proveedor de acero a 855 °C por 20 min de enfriamiento, con el objetivo de formar una microestructura dúctil y uniforme para los pasos de forjado.



Figura 3.3. Alambre y pasos de forjado de tornillos: a) corte y enderezado del alambre, b) cuadro de cabeza y cabeza, c) roscado, d) tornillo con temple y revenido y e) tornillo tropicalizado

La composición química del alambre en la condición inicial indica que es un acero SAE 1038 al medio carbono, cumpliendo con estándar de acero SAE 1038 [29], por lo que es apto para estampar en frío, ver tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición química (% peso) del acero al carbono 1038 [10]

Material	(% Peso)				
	C	Mn	Si	P	S
Acero SAE 1038	0.386	0.750	0.221	0.040	0.050

3.2. Análisis microestructural

3.2.1. Metalografía

El procedimiento para el análisis microestructural inicia con la preparación metalográfica de muestras de tornillos con diferentes pasos de forjado para saber el comportamiento de la microestructura. Las muestras se cortaron en dirección longitudinal y transversal mediante una cortadora automática especial con disco de corte marca Buehler con alimentación de voltaje de 127 VCA, ver figura 3.4a). Las probetas cortadas se montaron en baquelita utilizando una

montadora hidráulica manual marca Buehler, para poder manipularlas. La muestra debe estar libre de grasas o contaminantes que interfieran en la adherencia. La muestra se coloca en un molde cilíndrico donde se agrega la baquelita y se introduce el perno. La operación de montaje requiere de calentamiento mediante una resistencia eléctrica y aplicando presión mediante una prensa bajo una presión de 3000 psi controlada por un manómetro, durante 15 min y posterior enfriamiento al aire por 5min, ver figura 3.4b).

La muestra montada se desbaste progresivamente para obtener una superficie plana, lisa y libre de rayaduras. Este proceso se realizó con una serie de papeles abrasivos ordenadas de mayor a menor cantidad de partículas de SiC que se relacionó con el número del papel abrasivo, de tal manera que la secuencia fue desde grueso hasta fino: 60, 80, 100, 120, 150, 180, 220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 y 2000. Durante el desbaste es importante agregar agua para que la muestra no este rayada y el papel abrasivo este limpio durante el desbaste (ver figura 3.4c).

Posteriormente, se desarrolló el pulido tipo espejo mediante un paño húmedo con partículas de Al_2O_3 con diámetro de $0.3 \mu m$ suspendidas en agua sobre disco giratorio, con el objeto de eliminar las rayas finas producidas por el desbaste. Esta etapa se consiguió utilizando una maquina pulidora, ver figura 3.5d). Finalmente, se realizó un ataque químico sobre las superficies pulidas con acabado espejo, utilizando el reactivo Nital al 2 % (HNO_3) en metanol [25] para revelar las características microestructurales presentes en los diferentes pasos de forjado, de acuerdo al estándar ASTM E3 [12]. La microestructura fue revelada por consecuencia del ataque químico.

El análisis microestructural se realizó mediante un microscopio óptico Carl Zeiss modelo Axiovert 40 Mat. Para visualizar las micrográficas se tienen una cámara digital conectados a una computadora de escritorio, observando las diferentes características microestructurales para cada paso de forjado, resultando una serie de micrográficas digitales representativas y MEB marca Carl Zeiss modelo Gemini Supra 55VP, sus parámetros fueron señal de electrones secundarios, magnificaciones de 2000 y 2500x, voltaje de 20 kV y distancias de trabajo de 13.4, 16.7 y 18.4 mm [16].

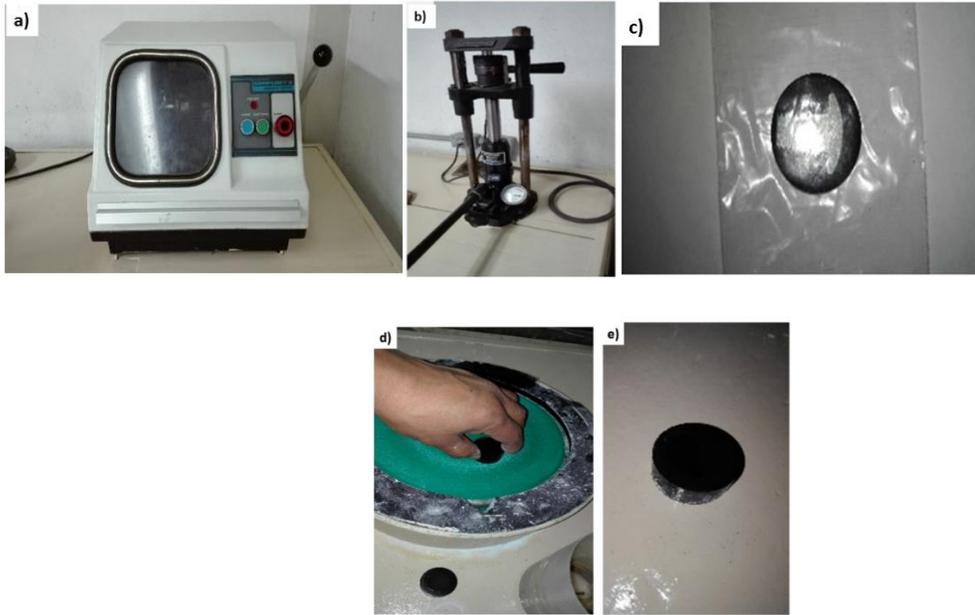


Figura 3.4. Pasos de metalografía: a) Cortadora de disco, b) montadora manual, c) muestra montada en baquelita, d) pulidora giratoria y e) ataque químico mostrando microestructura.

3.2.2. Microscopia óptica

Es un aparato excelente en aumento de imagen en la investigación de materiales de acero. La luz que alimenta a través de las muestras utilizado el espejo semitransparente y donde la luz se refleja a la superficie examinada.

Las partes básicas del microscopio óptico: Ocular lente fijo que tiene una capacidad de aumento de 10x diferente a los aculares que son intercambiables donde el analista observa la muestra. Brazo pieza que sujeta al tubo del cuerpo a la base, está unido a un robusto pedestal que permite que su ángulo de visión sea ajustado.

Los objetivos son las partes más importantes de un microscopio, están sujetos a una pieza que puede girar el estudiante llamado revolver donde se colocan de tres, cuatro o hasta cinco (5x, 10x, 20x, 40x y 50x). El Diafragma ajusta la cantidad de luz que llega a la muestra. El Condensador concentra la luz del iluminador sobre la muestra que se está visualizando. En figura 3.5a) se observa el microscopio Carl Zeiss Axiovert 40 MAT con un dispositivo de conexión donde se coloca una cámara para observar la microestructura de la muestra en la computadora.

3.2.3. Microscopia electrónica de barrido

La figura 3.5b) se observa un equipo extraordinario en la investigación de materiales que genera innumerables datos de la muestra analizada. El funcionamiento del MEB se basa en su haz electrónico sobre la superficie o área del tamaño que se quiera aumentar y en un monitor que visualiza la información que se seleccionó en función con sus demás dispositivos que trabajan en conjunto para dar un excelente funcionamiento en el análisis de muestras.

Cuando el haz toca la superficie en la muestra se generan las siguientes partículas electrones retro dispersores, electrones secundarios. El microscopio tiene detectores que recogen la energía, la transforman en imágenes y datos en el monitor de la PC. Los electrones secundarios donde se obtienen mejor imágenes de alta resolución. Detectores de electrones retro dispersores con menor resolución en la imagen pero mayor contraste para obtener la superficie.

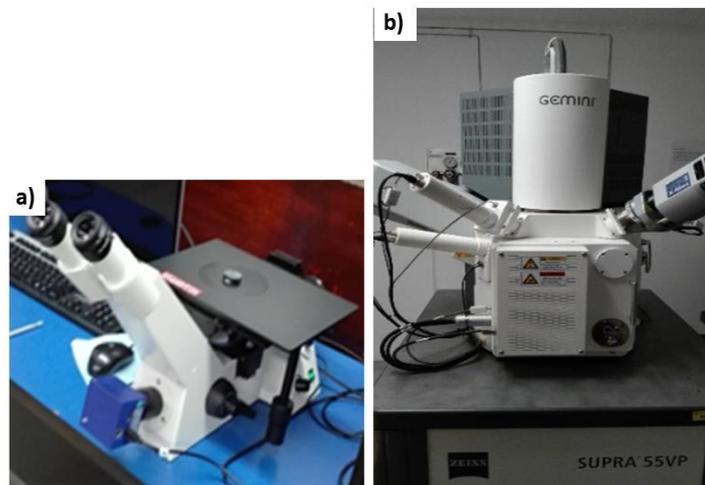


Figura 3.5. Microscopios Carl Zeiss: a) óptico y b) electrónico de barrido

3.2.4. Numero de tamaño de grano G ASTM

Este método basado en estándar ASTM E112 [30] se utilizó para determinar la medición del tamaño de grano que es el procedimiento para encontrar el promedio del tamaño de grano G. Utilizando una muestra en su área o superficie de acero en una distribución de grano. Este método de prueba describe la técnica realizada manualmente utilizando una micrografía y plantilla del estándar.

Este es el procedimiento de los tres círculos de Abrams, el inicio a este método especifica el número G. El parámetro de prueba consta de tres círculos igualmente espaciados que tienen una circunferencia total de 500 mm es el patrón. Ampliamente espaciado el primer círculo tiene un perímetro 83.3 mm, el segundo círculo tiene un perímetro 166.7 mm, el tercer círculo tiene un perímetro 250 mm y sumados tenemos un total de 500 mm de perímetro.

El objetivo de este estudio es encontrar el número de tamaño de grano en las cuarenta micrografías en sus diferentes pasos que consiste en diez en alambre enderezado, diez en base cuadrada de cabeza, diez en cabeza y diez en roscado del tornillo forjado en frío del acero SAE 1038.

El cálculo teórico del tamaño de grano método de acuerdo al estándar ASTM E-112 [30]. Procedimientos generales para el tamaño de grano. En las ecuaciones 3.1 y 3.2 son el número de interceptos o intersecciones [25].

$$N_L = N_i / L \quad 3.1)$$

$$P_L = P_i / L / M \quad 3.2)$$

Donde:

N_L = Número de intercepto

P_L = Número de intersecciones

N_i = Número de intercepto

P_i = Número de intersecciones contados en el campo

L = Longitud total de la línea de prueba (500 mm)

M = Magnificación

Número de tamaño del grano G estándar ASTM E112 [30] se puede calcularse a partir con las ecuaciones 3.3 y 3.4 de N_L y N_P (número de granos).

$$G = (6.643856 \log_{10} N_L) - 3.288 \quad 3.3)$$

$$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288 \quad 3.4)$$

Donde:

G = Tamaño de grano

\log_{10} = Logaritmo base diez

N_L = Número de intercepto

N_p = Número de intersecciones

3.2.5. Alargamiento de grano promedio

El tamaño de grano tiene considerable influencia en las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones, por eso es de gran interés conocerlo. Así pues, podemos entender que la realización de los diferentes tratamientos térmicos tenga como principal objetivo obtener el tamaño de grano deseado. Resulta evidente que dicho tamaño de grano es inversamente proporcional al número de granos presentes en la muestra

Las técnicas más antiguas y nuevas para evaluar el mismo componente en diferentes niveles. Se usan microscopía óptica. Se observa en el forjado en frío de tonillo del acero SAE 1038 sus partes el flujo, el tamaño y el patrón de grano. Los patrones tradicionales de grano y flujo permanecen en uso hoy en día para evaluar el diseño de procesos de troquelado y forjado, así en cuanto al control de calidad de homogeneidad a la deformación de forjado a nivel fundamental [25].

Las técnicas de prueba de determinación el alargamiento de grano promedio en materiales metálicos son principalmente procedimientos de medición y, debido a su base puramente geométrica, son independientes del metal o aleación en cuestión. De hecho, los procedimientos básicos también se pueden usar para la estimación del grano promedio, cristal o tamaño de celda en materiales no metálicos [25].

El método de comparación se puede usar si la estructura del material se aproxima a la apariencia de uno de los cuadros en comparación estándar. Las intersecciones y los métodos siempre son aplicables para determinar el tamaño de grano promedio. Sin embargo, ellos gráficos de comparación no pueden usarse para la medición de granos individuales.

El tamaño de grano, de acuerdo al estándar ASTM E112 [30] nos indica en la tabla 3.3. Los límites de grano, son el lugar en que ocurren, preferentemente, las reacciones en estado sólido. En general, la energía libre de una cantidad de masa de metal dada disminuye a medida que aumenta el alargamiento de grano. La causa del cambio de energía es la disminución de la energía interfacial asociada a los límites de grano. Esta disminución de energía es la fuerza impulsora que tiende a producir el crecimiento del grano [30].

En la mayoría de las condiciones de aplicación de los metales, la velocidad de crecimiento del grano es muy pequeña, y sólo a temperaturas elevadas el crecimiento se produce rápidamente. Un material de grano fino es más duro y resistente con más juntas de grano donde se acumulan más tensiones que un material de grano grueso. Por todo lo anterior debe verificarse que la dureza es inversamente proporcional al tamaño de grano [25].

Tabla 3.3. Valores del número de tamaño de grano G ASTM y diámetro de grano promedio

Tamaño de grano ASTM (G)	Diámetro de grano promedio μm
00	508.0
0	359.2
0.5	302.1
1.0	254.0
1.5	213.6
2.0	179.6
2.5	151.0
3.0	127.0
3.5	106.8
4.0	89.8
4.5	75.5
5.0	63.5
5.5	53.4
6.0	44.9
6.5	37.8
7.0	31.8
7.5	26.7
8.0	22.5
8.5	18.9
9.0	15.9
9.5	13.3
10.0	11.2
10.5	9.4
11.0	7.9
11.5	6.7
12.0	5.6
12.5	4.7
13.0	4.0
13.5	3.3
14.0	2.8

3.3. Deformación plástica

El acero SAE 1038 siendo un material a medio carbono tiene una propiedad que lo utilizan en la industria para dar un preformado al acero aplicando una fuerza para ser deformado plásticamente forjado en frío este grado de deformación sucede antes de que se fracture. Por lo tanto, Tenemos el alambre recocido que es la medida total de alambre enderezado para la fabricación del tornillo y para la deformación de sus partes forjado en frío son el cuadro de cabeza, cabeza y roscado.

Para el cálculo de la deformación unitaria se utilizó la ecuación 3.5, para determinar la elongación que cambia en longitud y dividiendo entre su valor original causada por la compresión [15].

$$e = (h_0 - h) / h_0 \quad 3.5)$$

Donde:

e = Deformación unitaria

h_0 = Longitud inicial (mm)

h = Longitud final (mm)

3.4. Exponente del endurecimiento por deformación

El cambio en el material que sufre el acero SAE 1038 al pasar de zona elástica a la plástica por lo que su microestructura presenta un endurecimiento y la ductilidad disminuye. La deformación hace una alteración en cuadro de cabeza, cabeza, roscado aumentado su dureza y así teniendo su modificación en su microestructura incrementando su exponente de endurecimiento por deformación plástica n.

Para calcular el exponente n necesitamos, los resultados de ensayos de tensión, la resistencia a la cedencia se encuentra en la parte de la gráfica esfuerzo-deformación en la cual hay un incremento considerable de la deformación por el aumento de fuerza. El esfuerzo máximo al que puede resistir un material, en ecuación 3.6 se obtiene el exponente n con el logaritmo natural [31].

$$n = \ln (S_u / S_y) \quad 3.6)$$

Donde:

n = Exponente de endurecimiento por deformación

ln = Logaritmo natural

S_y = Resistencia a la cedencia (MPa)

S_u = Resistencia máxima a la tensión (MPa)

CAPITULO 4

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Evolución microestructural

4.1.1. Microscopia óptica

Del análisis microestructural realizado con el microscopio óptico sobre los diferentes pasos de forjado en frío de tornillos de acero SAE 1038 (alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado) se encontró que el efecto microestructural sobre el grano ferrítico resultó en un aumento gradual de deformación plástica conforme se aplicaron los pasos de forjado con respecto al comportamiento del grano trefilado del alambre inicial recocido.

En figura 4.1a) se muestra el alambre enderezado con una microestructura formada de bandas blancas de granos ferríticos con diferentes tamaños (pequeños, medianos y grandes), y bandas oscuras conteniendo partículas de diferentes tamaños. Ambos tipos de bandas están alternadas y alineadas en una sola dirección de trefilado. El forjado de cuadro de cabeza presentó en su microestructura un cambio notable en la dirección (inclinación) de las bandas de granos ferríticos y partículas debido a la deformación plástica aplicada, ver figura 4.1b).

El forjado de cabeza de tornillo presentó la mayor deformación plástica resultando la mayor inclinación (ángulo) de ambos tipos de bandas de granos y partículas, como se ilustra en figura 4.1c). El roscado estándar que se forjó sobre el cuerpo del tornillo, generó una evidente deformación plástica de los granos de ferrita para formar los dientes bien definidos, ver figura 4.1d).

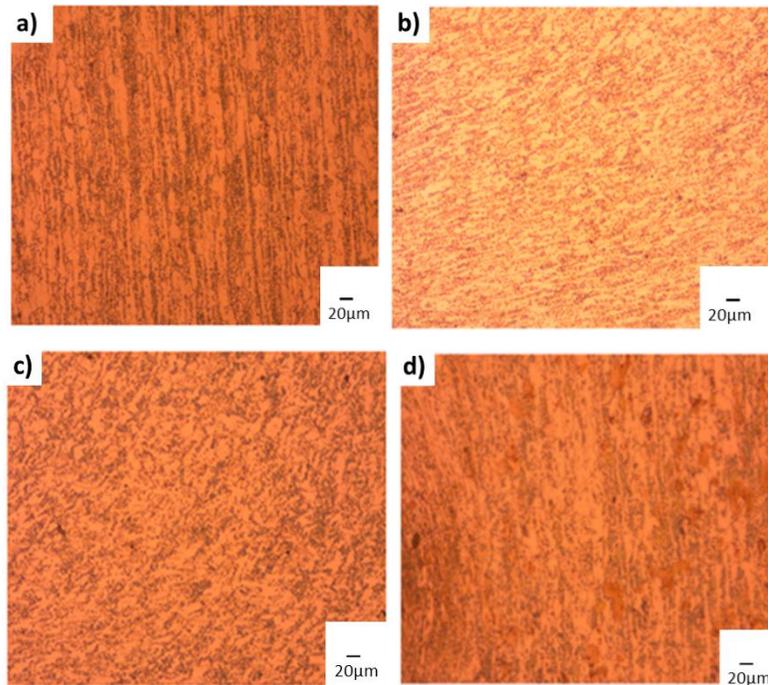


Figura 4.1. Micrografías obtenidas por MO de los tornillos forjados en frío del acero 1038: a) alambre enderezado con bandas alternadas, b) cuadro de cabeza con bandas que cambiaron de dirección, c) cabeza de tornillo con la mayor deformación plástica de granos y d) roscado con bandas de granos de ferrita alternados.

4.1.2. Microscopio electrónico de barrido

La caracterización microestructural a mayor magnificación para los diferentes pasos de forjado en frío de tornillos de acero SAE 1038 se realizó mediante el análisis con el MEB con evaluación más detallada en su composición y estructura. En figura 4.2a) se observa una matriz ferrítica y partículas de diferentes tamaños (pequeño, mediano y grande) que tienen varias formas (semiredondas y alargadas) con diferentes dimensiones, para el alambre recocido enderezado. Para el cuadro de cabeza forjado se presentaron granos ferríticos alargados por consecuencia de la deformación plástica y presencia de partículas semiredondas y alargadas, las cuales están agrupadas en bandas, como se observan en figura 4.2b).

La figura 4.2c) corresponde al forjado de cabeza en tornillo, que es la zona donde se muestran granos de ferrita más deformados plásticamente, además se observan partículas dispersas en toda la matriz deformada. El roscado del tornillo generó una serie de dientes que se moldearon plásticamente, resultando granos de ferrita grandes y deformados

permanentemente y observando partículas dispersas en toda la matriz ferrítica, como se ilustra en figura 4.2d).

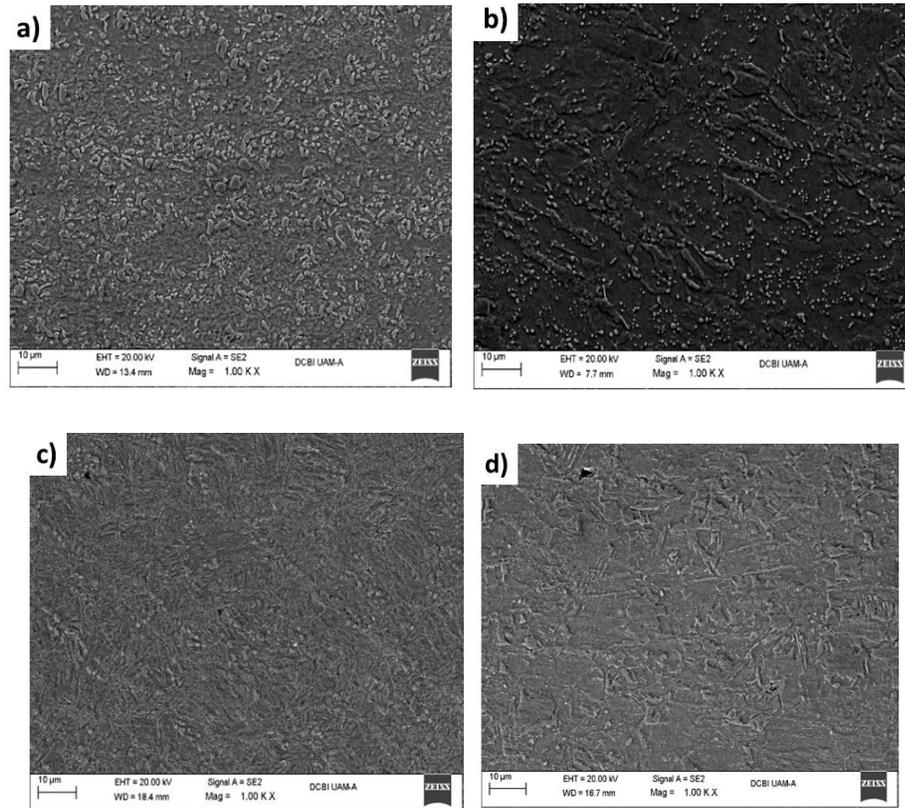


Figura 4.2. Micrografías obtenidas por MEB de muestras de tornillos forjados de acero SAE 1038: a) partículas de tamaños y formas diferentes en alambre enderezado, b) granos alargados con cambios de dirección en cuadro de cabeza, c) granos con la mayor deformación plástica en cabeza de tornillo, y d) granos con deformación moderada en roscado.

4.1.3. Numero de tamaño de grano G ASTM

El número de tamaño de grano (G) y alargamiento de grano del alambre enderezado se calcularon sobre diez micrografías mediante el método de los tres círculos de Abrams incluido en estándar ASTM E 112 [30]. Los resultados del conteo de intersecciones de los límites de grano, numero G_{pi} y alargamiento de grano (d_{pi}) se muestran en tabla 4.1. Se observa que el número G presento un rango de (8.3 a 8.9), mientras que el alargamiento del grano mostro un intervalo de (16.1 a 20.2 μm).

Tabla 4.1. Número de tamaño de grano G y alargamiento de grano del alambre enderezado de acero SAE 1038

Micrografía	P_i	\overline{P}_L	G_{P_i}	$\overline{d}_{P_i} (\mu m)$
1	147	58.8	8.4	19.1
2	139	55.6	8.3	20.2
3	174	69.6	8.9	16.1
4	68	67.2	8.8	16.7
5	158	63.2	8.6	17.8
6	170	68	8.8	16.6
7	156	62.4	8.6	18.0
8	159	63.4	8.6	17.7
9	163	65.2	8.5	18.9
10	157	62.8	8.6	17.9

En diez micrografías del cuadro de cabeza de tornillos forjados en frío se calcularon los parámetros microestructurales G_{pi} y d_{pi} reportados en tabla 4.2. El rango del número G_{pi} fue (8.1 a 8.6), por otro lado el intervalo del d_{pi} fue (17.7 a 21.2 μm).

Tabla 4.2. Número G y alargamiento de grano en cuadro de cabeza de tornillos forjados de acero 1038

Micrografía	P_i	\overline{P}_L	G_{P_i}	$\overline{d}_{P_i} (\mu m)$
1	137	54.8	8.2	20.5
2	133	53.2	8.1	21.2
3	149	59.2	8.5	18.9
4	157	62.8	8.6	17.7
5	148	59.2	8.4	18.9
6	146	58.4	8.4	19.2
7	147	58.8	8.4	19.1
8	142	56.8	8.3	19.8
9	135	54	8.2	20.9
10	135	54	8.2	20.9

Se observó que la microestructura de la cabeza forjada del tornillo presento la mayor deformación del tamaño de grano resultando granos ferríticos alargados, por lo que el número G_{pi} y alargamiento d_{pi} se presentan en tabla 4.3 correspondientes a diez micrografías. Los valores de G_{pi} se presentaron en el menor rango de (6.6 a 8.6) mientras que el alargamiento de grano alcanzo el mayor intervalo de (18.2 a 36.9 μm).

Tabla 4.3. Número G y alargamiento de grano de cabeza de tornillos forjados de acero 1038

Micrografía	P_i	\overline{P}_L	G_{P_i}	$\overline{d}_{P_i} (\mu m)$
1	123	49.2	7.9	22.6
2	110	44	7.6	25.4
3	105	42	7.7	24.4
4	79	31.6	6.6	36.9
5	89	35.6	7.0	31.8
6	98	39.2	7.2	29.7
7	87	34.8	6.9	33.2
8	83	33.2	6.8	35.5
9	105	42	7.4	27.7
10	154	61.6	8.6	18.2

Para el roscado de tornillos forjados, el conteo de las intersecciones de los límites de grano resulto en valores del número G_{pi} en el intervalo de (8.0 a 8.4). Además, los valores de d_{pi} alcanzaron el rango de (18.9 a 22.5 μm). Lo anterior se muestra en tabla 4.4

Tabla 4.4. Número G y alargamiento de grano de roscado de tornillos forjados de acero 1038

Micrografía	P_i	\overline{P}_L	G_{P_i}	$\overline{d}_{P_i} (\mu m)$
1	147	58.7	8.4	19.1
2	142	56.6	8.3	19.8
3	146	58.8	8.4	19.1
4	128	50.2	8.0	22.5
5	150	60.4	8.5	18.9
6	130	50.6	8.0	22.5
7	133	53.3	8.1	21.2
8	129	50.4	8.0	22.5
9	134	53.2	8.1	21.3
10	135	53.4	8.1	21.1

Resumiendo los valores de G_{pi} y d_{pi} , los promedios del número de tamaño de grano y alargamiento de grano para los cuatro los pasos de forjado en frío para tornillos automotrices se muestran en tabla 4.5. Se observa que el número G_{pi} promedio más alto fue 8.7 para el alambre recocido enderezado mientras que el menor G_{pi} fue 7.4 para la cabeza del tornillo. Además, el mayor alargamiento de grano promedio fue 31 μm para la cabeza forjada y el menor d_{pi} fue 16.5 μm para el alambre enderezado.

Tabla 4.5. Número G promedio y alargamiento de grano promedio para diferentes pasos de forjado de tornillos de acero 1038.

Condición de forjado	G_{P_i}	$\overline{d_{P_i}}$ (μm)
Alambre enderezado	8.7	16.5
Cuadro de cabeza	8.1	22.3
Cabeza del tornillo	7.4	31
Roscado de tornillo	8.3	21.7

El cambio microestructural del incremento en tamaño de grano originado por la deformación plástica durante los pasos de forjado en frío de los tornillos de acero SAE 1038 se midió mediante el conteo de las intersecciones entre los límites de grano y tres círculos de Abrams, resultando los valores del número de tamaño de grano G_{pi} ASTM. El efecto del forjado en frío sobre el número G_{pi} fue la deformación del grano encontrando una notable reducción del número G_{pi} conforme se aplicaban los pasos de forjado. Por lo tanto, el comportamiento del número de tamaño de grano G_{pi} en función de los pasos de forjado en frío de tornillos se presenta en figura 4.3 donde se observa una disminución del G_{pi} conforme se aplicaron los pasos de forjado, resultando la mayor reducción del 18% en la cabeza del tornillo, seguida de 6% en cuadro de cabeza y por ultimo 4% en roscado con respecto al alambre enderezado inicial. La mayor reducción del número G_{pi} se encontró en la cabeza del tornillo, lo cual se relacionó con la mayor deformación plástica del tornillo forjado.

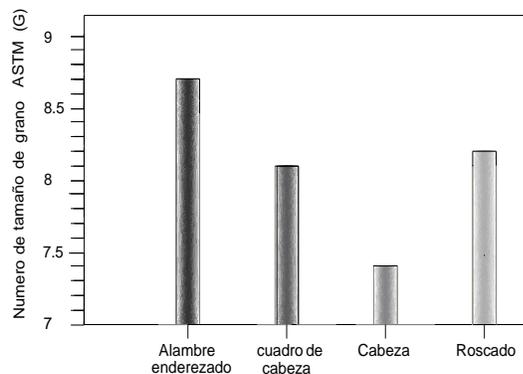


Figura 4.3. Numero de tamaño de grano G_{pi} ASTM para los diferentes pasos de forjado en frío en tornillos de acero SAE 1038.

4.1.4. Alargamiento de grano promedio

Se obtuvo el alargamiento de grano promedio de las micrografías de prueba del alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza del tornillo y roscado de tornillos forjados en frío de acero SAE 1038. Este alargamiento de grano se determinó mediante una tabla comparativa del número G y diámetro de grano, reportada en el estándar ASTM E 112 [30]. En figura 4.4 se observa que el efecto de los pasos de forjado sobre el grano ferrítico deformado plásticamente fue un incremento de alargamiento considerable del grano promedio, resultando un aumento de 109 % en la cabeza, seguido de 44% en cuadro de cabeza y por último 36 % en con roscado respecto al alambre enderezado inicial. Por lo tanto, el mayor aumento del alargamiento de grano se encontró en la cabeza del tornillo, lo cual se relacionó con la mayor deformación plástica generada por el forjado.

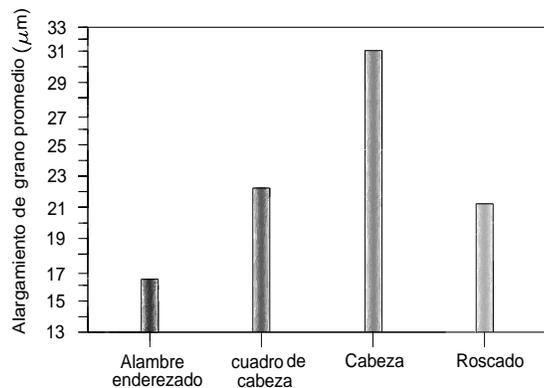


Figura 4.4. Alargamiento de grano promedio para los diferentes pasos de forjado de tornillos de acero SAE 1038.

4.2. Análisis mecánico

4.2.1 Deformación plástica

Inicialmente, el acero SAE1038 está recocido por lo que tiene una considerable ductilidad favoreciendo la deformación plástica teniendo la ventaja de forjar piezas pequeñas. El efecto de los pasos de forjado en frío sobre el alambre de acero fue una evidente deformación plástica gradual facilitando el conformado de los tornillos automotrices, la cual se calculó con la deformación elástica ingenieril.

Se observó que la máxima deformación permanente se ubicó en la cabeza del tornillo con respecto al alambre inicial. En figura 4.5 se presenta la deformación plástica en función de los pasos de forjado, por lo que la cabeza alcanzó 20 % de deformación, seguida por el cuadro de cabeza con 8.5 %, roscado con menor deformación de 1.5 % y finalmente, el alambre enderezado solo presentó 0.2 % de deformación, con respecto al alambre inicial recocido.

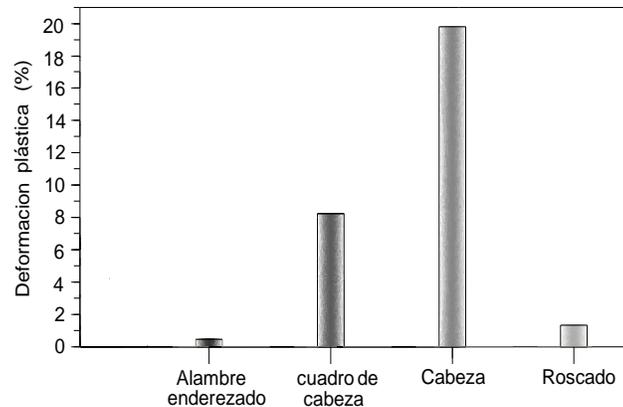
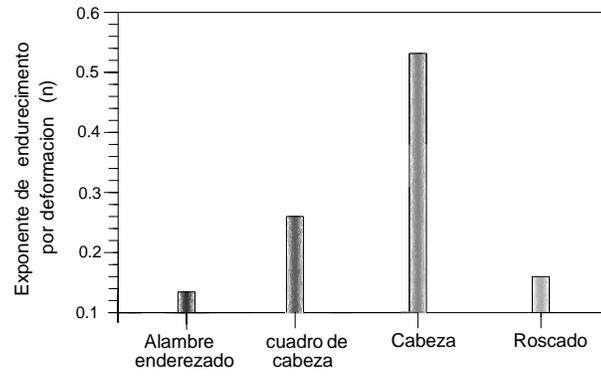


Figura 4.5. Deformación plástica para diferentes pasos de forjado en frío de tornillos de acero SAE 1038

4.2.2. Exponente de endurecimiento por deformación plástica

El exponente de endurecimiento por deformación (n) se calculó con el logaritmo natural de los valores de resistencia mecánica S_y y S_u [31] de los ensayos de esfuerzo-deformación reportados previamente [16]. El efecto de forjado en frío sobre el exponente n para los cuatro pasos fue su incremento gradual conforme aumentó la plasticidad para forjar los tornillos, por lo que n depende de la deformación. En figura 4.6 se observan los valores de n para los pasos de forjado en frío, resultando el mayor incremento de n (304 %) en la cabeza, seguida por cuadro de cabeza con aumento del 208 % y por último el roscado con 102 %, en comparación con el alambre inicial, lo cual se relacionó con la mayor deformación plástica [2].



4.6. Exponente del endurecimiento por deformación plástica para diferentes pasos de forjado en tornillos de acero SAE 1038

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La evolución microestructural de tornillos de acero SAE 1038 forjados en frío considerando el alambre enderezado, cuadrado de cabeza, cabeza y roscado, resulto en microestructuras con granos deformados plásticamente formadas por bandas alternadas de granos de ferrita y otras de partículas dispersas de varios tamaños, formas semiredondas y alargadas. Estas bandas cambiaron de dirección (inclinación) conforme se aplicaron los pasos de forjado, resultado la mayor inclinación en la cabeza del tornillo debido a la máxima deformación plástica del 20 %.

Para el número de tamaño de grano G promedio se obtuvo una reducción conforme se aplicaban los pasos de forjado, resultando la mayor disminución del 18 % en la cabeza, con respecto al alambre enderezado inicial, debido a la deformación permanente. El alargamiento de grano ferrítico promedio mostro un incremento considerable por la deformación plástica conforme se aplicaban los pasos de forjado, alcanzando mayor aumento del alargamiento de 109 % en la cabeza del tornillo con respecto al alambre enderezado inicial, asociado con la mayor deformación plástica del 20 %.

Un parámetro importante generado por el forjado en frío fue el exponente de endurecimiento por deformación plástica n , el cual mostro un incremento para los pasos de forjado, principalmente en la formación de la cabeza del tornillo con aumento del 304 % con respecto al alambre inicial como consecuencia de la mayor deformación plástica, resultando un endurecimiento del acero.

5.2 Recomendaciones

Después del análisis experimental desarrollado en esta tesis, se recomienda llevar a cabo un análisis microestructural y mecánico comparativo con otro acero diferente en composición química y comparar los resultados.

Bibliografía

- [1] H. Li, L. He, K. Gai, R. Jhang, R. Jiang, C. Zhang, M. Li. Numerical simulation and experimental investigation on the induction hardening of a ball screw. *Material and Design*. 2015. Vol. 87; pp 863-867.
- [2] E. Fetullazade, Hamza K., Akyildiz S. Saritas S. Effects of the machining conditions on the strain hardening and the residual stresses at the roots of screw threads. *Materials and Design*. 2010. Vol. 31; pp 2025-2031.
- [3] G. L. de Faria, L. B. Godefroid, L. C. Cândido, T. O. Silotti. Metallurgical characterization and computational simulation of a screw spike aiming to improve its performance in railways. *Engineering Failure Analysis* 66. 2016. pp 1– 7.
- [4] A. O. Prado, E. R. Trejo, J. L. R. Hernández. Análisis de Falla en Tornillo A325. Oudiatem Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales. Laboratorios de ingeniería mecánica. México 2013. pp 15.
- [5] UNE-EN 10027-1. Sistema de designación de aceros. España 2017. pp 33.
- [6] B. Arroyo¹, J.A. Álvarez, R. Lacalle, S. Cicero. F, Gutiérrez-Solana. Análisis de fallo de perno galvanizados de alta resistencia utilizados en torres metálicas. *Anales de Mecánica de la Fractura* 34. 2017. pp 1-11.
- [7] J. Sánchez G. Minería y metalurgia en la edad moderna. Ed. Akal; S.A, Madrid España, 1997, pp 20.
- [8] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6532#1>. Escrito por AZoM en Septiembre 21 2012. pp 1.
- [9] S. Kalpakjian, Steven R.Schmid. *Manufactura ingeniería y tecnología volumen 1 tecnología de materiales*. Ed. PEARSON, Séptima edición, Estado de México 2014. pp 43, 137, 141, 339, 342, 348.
- [10] L. Montoya G. análisis del endurecimiento por deformación en frío durante el forjado de tornillos especiales de acero al carbono. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, División de estudios de posgrado e investigación, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México 2013. pp 7, 15, 16, 17, 18, 30, 33, 35, 36, 37, 38, 73.
- [11] F. R. Morral, E. Jimeno, P. Molera. *Metalurgia General Tomo II*. Ed. Reverte S.A, España 2004. pp 817,829, 838, 845, 944, 945, 950.

- [12] Sydney H. Avner. Introducción a la metalurgia física. Ed. McGraw Hill, segunda edición, México 1988. pp 29,118, 119, 120, 121, 127, 128, 129.
- [13] B. V.Arista¹, O. M.Amargo¹, V. A. C. Escamilla, L. Montoya-García¹ y V.M. López-Hirata². Análisis microestructural del endurecimiento por deformación en tornillos forjados en frío del acero SAE 1038. Congreso Internacional de Ingenierías 2013. pp 1.
- [14] L. G. D. Samaniego, C. A. Cruz Fierro. Simulación de laminado en frío de aceros al carbono usando ABAQU. Ingenierías. Vol. 7; Julio-Septiembre 2004. pp 41
- [15] John A. Schey. Procesos de manufactura. Ed. McGRW-HILL, tercera edición, México 2007. pp 315, 316, 318, 330, 338, 391.
- [16] R. R. Gómez. Análisis fractográfico mediante microscopía electrónica de barrido en tornillos especiales. Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica, División de estudios de posgrado e investigación, Instituto Tecnológico de Tlalneptla, Estado de México 2015. pp 7, 10,16,
- [17]<https://www.google.com.mx/search?q=imagenes+de+porta+rollos+de+alambre+para+alimenta+a+una+maquina+de+tornillos&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwjS-pC4h-T>
- [18] J. L. G. Velázquez. Metalurgia mecánica. Ed. limusa, impreso en México 200. pp, 11, 104.
- [19] F. E. Glesecke, A. Mitchell; H, C. Spencer, I. Leroy H. Dibujo y comunicación gráfica. Tercera edición, Pearson educación México 2006. pp 393,394.
- [20] F. Bendi. Alrededor del trabajo de los metales. Ed. Reverte S.A; Barcelona Buenos Aires Caracas, México 1973. pp 128,129.
- [21] Rodet L, Mott, P. E. Diseño de elementos de máquinas. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 2ª edición México 1992. pp 726, 728, 731.
- [22] A. Castillo M. Especificación Técnica de Par Torsional + Ángulo y sus características metrológicas en VWM. Simposio de metrología, Santiago de Querétaro, México 22 al 24 de octubre 2008. pp 5.
- [23] I. O. Rendon. Estudio metalográfico de aceros empleados para impartir docencia en Ingeniería de Materiales. Tesis maestría, Departamento de ingeniería de los materiales y del transporte, Universidad de Sevilla 2017. pp 31-58.
- [24] ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimen, American Society for Testing and Materials, USA, 2017, pp 12

- [25] ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, American Society for Testing and Materials, USA, 2015, pp 23
- [26] R, L. Bernau. Elemento de metalografía y de acero al carbono. Ed. Andrés Bello, Santiago de Chile 1958. pp 56, 57, 58, 60, 68, 70, 78.
- [27] J. F. A. Bello. Nuevo microanálisis cuantitativo de metales empleando microscopio electrónica de barrido con dispersión de energía de rayos x. Tesis Doctoral, Departamento de ciencia de materiales e ingeniería metalúrgica, Universidad Complutense de Madrid, octubre 1999. pp 1-250.
- [28] G. T. Alonso, A. J. Señor, N. C. Steven, A. J. Estenos. Influencia del revenido en la estructura y las propiedades de dureza, resistencia a la tracción y resiliencia del acero cubano al cromo manganeso-silicio-níquel. Ingeniería Mecánica. 2009. Vol.12; N°3; pp 51-56.
- [29] Heat Treaters Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels. ASM international 1995 .pp 112
- [30] ASTM E112- 96 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. American Society for Testing and Materials, USA, 2004. pp 26
- [31] J. L. Martínez, J. A. Martínez, A. L. Martínez, Á. J. Callejón, J. A. L. Martínez, S. S. Salinas. Cálculo y diseño de máquinas. Problemas resueltos I, 2^a edición, Ed. Universidad de Almería, 2018. pp12.