



*Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia*

Trabajo de Diploma

*Comportamiento Microestructural del acero AISI 1045
endurecido y sometido a esfuerzo de tensión – deformación.*

Jesús Geovani Olivares Romero.

*Moa
2010*



*Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia*

Trabajo de Diploma

*Comportamiento Microestructural del acero AISI 1045
endurecido y sometido a esfuerzo de tensión – deformación.*

Autor: Jesús Geovani Olivares Romero.

Firma: _____

Tutores: MSc. Tomás Fernández Columbié.

Firma: _____

Ing. María Victoria Rojas Fernández.

Firma: _____

Ing. Roney E. Correa Suárez.

Firma: _____

*Moa
2010*



DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo el amor que se merecen:

A mi madre Martha Luisa Romero Barallobre,

.....quien me ha alumbrado el camino con su brillante luz en todo mi andar y me ha dado apoyo sin apreciar los límites del sacrificio.

A mi padre Jesús Manuel Olivares Laurencio,

..... quien me ha dado siempre su disposición y me ha guiado por el camino correcto.

A mi hermano Henry Nairobi Olivares Romero,

..... a quien me une más que lazos de consanguinidad, sentimientos profundamente sanos y transparente respeto.

A mis compañeros y amigos,

..... quienes siempre están dispuestos a ayudarme, incluso en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi Patria y a mi invencible Revolución.



AGRADECIMIENTOS.

- ❖ *Agradezco profunda y sinceramente a mis tutores Tomás Fernández Columbié, Roney E. Correa Suárez y María Victoria Rojas.*
- ❖ *Al profesor Tomás Fernández Columbié; por brindarme apoyo y muestras de aliento, permitiéndome vencer las adversidades del camino en la realización de esta tesis.*
- ❖ *A todos los profesores del Departamento de Metalurgia que contribuyeron en mi formación profesional.*
- ❖ *A todos mis compañeros del ISMM, quienes me daban apoyo para la realización de este trabajo.*
- ❖ *A mis amigos por su excelente y transparente amistad.*
- ❖ *El agradecimiento más especial y de todo corazón a mis padres, hijos, hermano y mi familia en general, por dar de sí el espíritu optimista de luchar hasta el final por un propósito y brindarme su apoyo incondicional.*

“A cada uno de ustedes vaya mi más sincero agradecimiento”.



Pensamiento



“Todos los esfuerzos tiene que conducir al incremento sostenido de la productividad del trabajo, a la par que aseguremos el pleno empleo de los recursos laborales, a la reducción de los costo y el aumento de la rentabilidad de las empresas, en suma a la eficiencia”

Fidel Castro Ruz.



RESUMEN

La presente investigación tiene como propósito determinar el comportamiento microestructural del acero AISI 1045, sometido a deformación plástica y traccionado. Se utilizaron variables como el avance (S); número de revoluciones (n) y fuerza aplicada (N), para obtener la curva tenso-deformación y evaluar su comportamiento. Se describe el procedimiento tecnológico de fabricación de las probetas luego de ser traccionadas y seccionadas, realizándose el encapsulado de estas en moldes y luego se agrega la resina de Epoxi ROYAPOX – 5050 hasta cubrir completamente el volumen entre estos, utilizando la metodología de endurecimiento a que fueron sometidas por medio de una acción de rodadura en diferentes condiciones cumpliendo con el diseño de experimento planteado, a fin de evaluar la influencia de aquellos parámetros que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento. Se utilizaron técnicas de microscopía óptica para la caracterización metalográfica y la determinación del estado microestructural de las muestras, al mismo tiempo se realizó ensayo de microdureza. A partir del análisis de los resultados, fue posible establecer el comportamiento de la curva tensión-deformación la cual muestra una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas. Finalmente se describe el procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante rodadura, que permite incrementar el tiempo de explotación de piezas fabricadas de acero AISI 1045, con un significativo efecto económico, social y ambiental.



SUMMARY

The present investigation has as purpose to determine the behavior microestructural of the steel AISI 1045, subjected to plastic deformation and tracted. Variable were used ace the advance (S); number of revolutions (n) and applied forced (N), to obtain the curves tighten-deformation and to evaluates you their behavior. The manufacturing technological procedure of the test tubes described after being tracted and cut, being carried out the one encapsulated of these in molds and then the resin of Epoxy ROYAPOX added-5050 until covering the volume completely among these, using the hardening methodology to that were subjected by means of to rolling action under different conditions fulfilling the design of outlined experiment, in order to evaluates you the influence of those parameters that could have to significant effect in the quality of the hardening process. They were used technical of optic microscopy for the characterization metallographic and the determination of the state microestructural of the samples, at the same cheats was carried out microstiffness rehearsal. Starting from the analysis of the results, it was possible to establish the behavior of the curves tension-deformation which shows to growing tendency of their mechanical estates. Finally the technological procedure of hardening is described by means of rolling that allows increasing the cheats of exploitation of steel fabricated shapes AISI 1045, with to significant economic, social and environmental effect.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	5
1.1 Generalidades en el proceso deformacional de un acero común	5
1.2 Tensiones y deformaciones en los procesos de endurecimiento por deformación plástica superficial	6
1.2.1 Tipos de deformaciones existentes en el proceso de deformación por rodadura.....	9
1.3 Endurecimiento por deformación en frío. Acritud	10
1.4 Microestructura de los aceros al carbono	12
1.4.1 Ferrita (Hierro α).....	12
1.4.1.1 Perlita	13
1.4.2 Estructuras cristalográficas.....	13
1.4.3 Redes Cristalinas	14
1.4.3.1 Clasificación de las redes cristalinas.....	15
1.5 Deslizamiento y maclado	16
1.5.1 Dislocaciones y endurecimiento.....	18
1.6 Conclusiones del Capítulo	20
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1 Caracterización del material a deformar plásticamente por rodillo	21
2.1.2 Análisis microestructural.....	23
2.1.3 Análisis de fase por el diagrama hierro carbono	23
2.2 Diseño de experimento.....	24
2.3 Máquinas y equipos empleados en la experimentación.....	26
2.3.1 Pulidora metalográfica MONTASUPAL	27
2.3.2 Características de la máquina	27
2.3.3 Torno de filetear modelo 16K20	27
2.3.4 Microscopio óptico	28
2.3.4.1 Equipo para medición de dureza.....	28
2.4 Preparación metalográfica de la probeta.....	29
2.4.1 Corte de las muestras	29
2.4.2 Desbaste y pulido.....	30
2.4.3 Lijado grueso.....	30
2.4.3.1 Lijado fino	31
2.4.3.2 Paños para pulido.....	31
2.5 Ataque de las muestras para su examen microscópico.....	32
2.6 Elaboración mecánica de las probetas	32
2.6.1 Velocidad de corte de las probetas.....	33
2.6.2 Profundidad de corte de las probetas	33
2.6.3 Tiempo de maquinado de las probetas	33
2.7 Encapsulado de probetas	34
2.7.1 Propiedades de la resina Epoxi ROYAPOX – 5050	34
2.7.2 Campo de aplicación	35
2.7.3 Preparación y colada.....	35
2.8 Conclusiones del capítulo.....	36
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSION	37



3.1 Análisis de la composición química.....	37
3.1.1 Influencia de los elementos químicos en el endurecimiento en frío	37
3.2 Análisis de la elaboración mecánica de las probetas.....	39
3.2.1 Obtención de la profundidad de corte.....	40
3.2.2 Determinación del tiempo de maquinado.....	40
3.3 Montaje de muestras	41
3.3.1 Montaje en frío	41
3.4 Análisis Metalográfico	41
3.5 Análisis microestructural.....	42
3.6 Análisis de la microdureza.....	47
3.7 Valoración Económica.....	48
3.8 Costo de la pieza endurecida por deformación plástica superficial	49
3.9 Valoración del impacto medio ambiental.....	49
3.10 Conclusiones del capítulo.....	51
CONCLUSIONES GENERALES:	52
RECOMENDACIONES:	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	54



INTRODUCCIÓN

La crisis económica que caracteriza estos tiempos ha provocado para bien la introducción de nuevas prácticas industriales cuya finalidad es adecuar los recursos de las empresas en un mundo moderno extremadamente dinámico y competitivo.

La recuperación de partes y piezas constituye una de estas nuevas prácticas y ha dado origen a un concepto totalmente nuevo en el campo de la ingeniería de fábricas. Terología del griego Terien que significa “cuidar”, “preservar”, tener cuidado por; engloba el concepto de la tecnología de la conservación y constituye una especialidad multidisciplinaria de la ingeniería cuya función y objetivo es la adecuación en base a minimizar los costosos efectos del desgaste sobre valiosos equipos productivos.

Para ello se recurre a la aplicación de la más avanzada tecnología metalúrgica y de componentes metálico-orgánico acorde a los más recientes avances de la ciencia de los metales, incidiendo favorablemente en los flujos netos de las empresas debido a la reducción de los costos de mantenimientos y mayor productividad de los equipos.

El empleo de estas ciencias y técnicas disminuyen la contaminación ambiental admiten más ahorro y menos consumo de portadores energéticos, fundamental en nuestro país, con el desarrollo cada vez mayor de la industrialización a pesar de las restricciones. Obteniéndose el reemplazo de algunas adquisiciones por fabricaciones nacionales de calidad considerable, con un pequeño costo de manufactura.

La duración útil y la fiabilidad de los componentes de máquinas están relacionadas con el estudio de las leyes y mecanismos del deterioro (pérdidas de materiales y tiempo) que soportan mientras se encuentran en etapa de explotación.

Para conseguir una estructura apropiada, en cuanto al material y el tratamiento térmico escogido (apaleando a la hora de elegir estos materiales los diferentes requerimientos económicos, tecnológicos y de explotación), y por resultante para alcanzar un aumento ventajoso de la firmeza de los órganos de trabajo de las máquinas es obligatorio el estudio de la conducta de los aceros sometidos a esfuerzos.



Las funciones eficientes y las propiedades mecánicas se han tratado de ganar por disímiles vías, por razón de aplicación mediante el conjunto de técnicas para tratamientos térmicos y recubrimientos duros. A excepción de una de las formas que promete perspectivas alentadoras para alcanzar fortaleza preliminar del acero AISI 1045 es el endurecimiento de metales por deformación plástica superficial, estableciendo una muestra de procedimiento novedoso que suplanta las operaciones del método anteriormente mencionado, ofreciéndole propiedades físico-mecánicas muy buenas con un bajo costo.

En la investigación bibliográfica hecha, se representa una gran diversidad de enfoques en correspondencia a la descripción de la técnica de obtención de tenacidad, dureza, y ductibilidad así como las observancias de su conducta mecánico y funcional del acero 1045, sin embargo la intención del trabajo es exactamente continuar con esta investigación.

Situación Problemática

El proceder de las variaciones mecánicas superficiales por razón de deformación plástica por rodillado es un procedimiento de obtención de dureza de las capas, caracterizado por la combinación de las variables fuerza; avance y número de revoluciones, en el comportamiento microestructural del acero deformado por cargas generada por un rodillo donde se demuestra la acción del deslizamiento o las dislocaciones de las redes cristalinas y no las transformaciones de fases, a modo de fundamentación del mecanismo de endurecimiento de piezas simétricas rotativas. Este método muy novedoso necesita de resultados prácticos como la obtención de la curva tensión - deformación del acero AISI 1045 deformado por rodadura cuando es sometido a esfuerzos de tracción, para certificar la conducta del material. Esta técnica se diferencia del tratamiento térmico en gran medida ya que disminuye el consumo de portadores energéticos y daños al medio ambiente por emisión de gases, calor, aceite y sales, siendo un procedimiento de endurecimiento de materiales que logra alta dureza.



Problema

No existe una caracterización del comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido por deformación plástica superficial por rodadura cuando es sometido a esfuerzos de tensión – deformación.

Hipótesis

Si son deformadas piezas de acero AISI 1045 empleando el rodillo como elemento deformante con variables como fuerza (P), número de revoluciones (n) y avance (S) y luego sometida a ensayo de σ - ϵ , se podrá determinar el comportamiento microestructural del mismo.

Objetivo general

Determinar el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 sometido a deformación plástica y luego traccionado.

Objeto de la investigación

Acero AISI 1045 sometido a esfuerzos de tracción después de ser endurecido por deformación plástica superficial con rodillo.

Campo de acción

Microestructura del acero AISI 1045.

Objetivos Específicos

1. Definir las regularidades del comportamiento del acero AISI 1045 endurecido por rodillo cuando es sometido a ensayos de tracción.
2. Realizar el procedimiento tecnológico para la obtención de las microestructuras de las diferentes probetas de acero AISI 1045 después de ser deformadas y traccionadas.
3. Establecer el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 después de ser deformado y traccionado, así como el análisis de los resultados.



Tareas a realizar

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el acero AISI 1045.
2. Analizar los efectos de las variables empleadas en el endurecimiento por deformación del acero AISI 1045 y su comportamiento en la curva tensión -deformación.
3. Ejecución experimental para la validación y corroboración de la formulación desarrollada para la determinación del comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido y luego traccionado.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del comportamiento microestructural del acero AISI 1045 sometido a proceso de deformación y luego traccionado.



CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de aplicación de la fuerza. En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargará en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular, aunque el esfuerzo y la deformación ocurren simultáneamente en el ensayo, los dos conceptos son completamente distintos.

Si a todos los valores de la carga aplicados progresivamente lo dividimos por el área inicial de la probeta, obtenemos los diferentes valores del esfuerzo convencional o nominal aplicados; y si a todos los valores de (d_i) , observados y medidos lo dividimos por la longitud inicial de prueba (l_0) , obtenemos los diferentes valores de deformación convencional ingenieril o nominal del ensayo. Estos valores se pueden representar en un sistema de ejes ortogonales obteniendo el diagrama de ensayo de tracción para diferentes materiales.

La primera región que encontramos (elástica) en la mayoría de los materiales metálicos y algunos cerámicos presentan una variación o dependencia lineal que nos indica que dentro de un rango de valores existe una proporcionalidad directa entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida por la pendiente de la curva en esta zona.

1.1 Generalidades en el proceso deformacional de un acero común

Los diagramas esfuerzo - deformación de diversos materiales varían ampliamente y diferentes ensayos de tensión con el mismo material pueden producir resultados diferentes de acuerdo con la temperatura de la probeta y la velocidad de carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes en los diagramas de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles.

Se ha determinado que en estos procesos de compresión directa surgen tensiones residuales una vez finalizado los mismos (Dieter, 1967 y Álvarez, 1999), se plantea que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual



producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo.

1.2 Tensiones y deformaciones en los procesos de endurecimiento por deformación plástica superficial

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta retícula interna, es necesaria la introducción de energía a la pieza.

A diferencia de la Deformación Plástica Superficial, las tensiones de compresión remanentes durante el temple, surgen como resultado de las transformaciones estructurales, ante las cuales la austenita se transforma en martensita con una estructura menos densa. Con el aumento del coeficiente de fricción externa y de la superficie de contacto del instrumento con la superficie de tratamiento aumenta también las irregularidades de la deformación plástica como consecuencia del nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión (Korotsiche, 1989).

Según Alfonso (2002), una de las clasificaciones más aceptadas de las tensiones residuales es la de Davidenkov (1946), acorde a la cual existen tres géneros de tensiones que se diferencian entre sí por el volumen donde se equilibran:

Tensiones de primer género: (macroscópicas, zonales o tecnológicas): Se equilibran en el volumen de todo el cuerpo. Estas tensiones están orientadas en correspondencia con la forma del artículo. En presencia de ellas, la separación de cualquier parte de la pieza conduce a la ruptura del equilibrio entre el resto de las partes, lo que en muchos casos provoca deformaciones (alabeos y distorsiones) del artículo. Además, pueden ser perjudiciales (las de tracción) o beneficiosas (generalmente las de compresión), (Lajtin, 1985, Pero-Sanz, 2000).

Tensiones de segundo género: (microscópicas o cristalíticas): Se equilibran en el volumen de algunos cristales o bloques. Estas tensiones pueden o no estar orientadas (en dirección al esfuerzo que produjo la deformación plástica), llamadas también microtensiones (Lajtin, 1985; Pero-Sanz, 2000; Alfonso, 1995; Alfonso, 2002).



Tensiones de tercer género: (deformaciones estáticas de la red cristalina): Se equilibran en los límites de pequeños grupos de átomos y en los metales deformados en los grupos de átomos que se encuentran cercanos a la frontera de los granos, es decir a los planos de deslizamiento.

Las deformaciones también pueden estar relacionadas con la presencia de dislocaciones. El desplazamiento de los átomos de las posiciones ideales puede surgir en los cristales de las soluciones sólidas debido a la diferencia entre las dimensiones de los átomos y a la interrelación química entre estos ya sea del mismo o de diferentes géneros que componen la solución, son llamadas también submicroscópicas, (Lajtin, 1985; Pero- Sanz, 2000; Alfonso, 1995; 2002).

En relación con materiales metálicos de red cristalina cúbica de caras centradas y con baja energía de las fallas de apilamiento de las dislocaciones parciales, propuso una corrección a esa misma ecuación para lograr su aprovechamiento a bajas deformaciones. Más recientemente, Samuel (2006), en un trabajo de profusa experimentación ha obtenido que las curvas resultantes de la ecuación de Hollomon no representen satisfactoriamente a los segmentos de deformación plástica uniforme ni de los materiales de baja ni de los de alta energía de fallas de apilamiento (Ludwigson, 1971).

Moreno (2005) plantea que el trabajo en frío aumenta la cantidad de tensión necesaria para el deslizamiento. Este hecho se puede relacionar con la teoría de la dislocación, ya que la red cristalina deformada del metal impide el movimiento de las dislocaciones y la dislocación bloqueada solamente puede desplazarse si se incrementa la tensión. De esta forma, un metal endurecido por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo metal recocido antes de que ocurra la deformación. Esto es fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones.

Lin (2001) y Moya (1996) al efectuar trabajos relacionados con los procesos deformacionales, concluyen en su trabajo planteando que, en el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida da lugar a la obtención de un metal más resistente que el que se podría producir por cualquiera de otros tratamientos, solo hay que tener en cuenta lo siguiente: en la actualidad no se suministran comercialmente aceros laminados a temperaturas inferiores a 0 °C.



Al evaluar el comportamiento de las tensiones del trabajo en frío, considera que a diferencia de la deformación plástica superficial, las tensiones de compresión remanentes, durante el temple, surgen como resultado de las transformaciones estructurales, antes las cuales la austenita se transforma en martensita con una

estructura menos densa. Con el aumento del coeficiente de la fricción externa y de la superficie de contacto del instrumento con la superficie de tratamiento aumentan las irregularidades de la deformación plástica con consecuencia en el nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión (Korotsiche 1989).

Olsson (2001) estudió modelos avanzados en plasticidad para aleaciones de acero inoxidable y realizó un gran número de ensayos en probetas cargadas uniaxial y biaxialmente. Graficó las curvas esfuerzo - deformación como esfuerzo verdadero (S) versus deformación ingenieril (e) y observó experimentalmente que la curva esfuerzo-deformación se acercaba a una línea recta para grandes deformaciones. Propuso que la curva esfuerzo verdadero vs deformación ingenieril se puede aproximar con la ecuación de Ramberg - Osgood hasta una deformación del 2 %, y una línea recta desde este punto en adelante. La línea recta se obtiene como un ajuste promedio de la curva esfuerzo-deformación.

La fatiga superficial se relaciona fundamentalmente con estados tensionales del tipo plano; es decir, aquellos donde no existen tensiones normales a la superficie de la pieza. Los valores de tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de las cargas, entre otros factores que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de tracción y compresión (las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales) y los átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999; Pero-Sanz, 2000).

Alfonso (1995) y Ott (1996) realizan mediciones de tensiones de primer género para piezas sometidas a procesos de maquinado, y al evaluar el control de las tensiones de primer género plantean que tiene una gran importancia práctica, ya que permite elevar considerablemente la seguridad de las instalaciones, máquinas y mecanismos durante su explotación.



Al examinar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en frío se puede observar que a cada valor de tensión le corresponde una determinada deformación. Sin embargo, en realidad cualquier material bajo la acción de una tensión constante, puede en determinadas condiciones deformarse progresivamente con el tiempo. Este fenómeno recibe el nombre de fluencia (Boyle y Spence, 1989).

Es conocido que durante la operación de rodillado se genera un estado tensional volumétrico de compresión no uniforme, dado por la fuerza compresiva constante y por las reacciones de oposición del material ante la misma, en las otras dos direcciones, (Martynenko, 2002).

En la teoría de la plasticidad se aborda los métodos de cálculo de tensiones y deformaciones en un cuerpo deformado. Es necesario, como lo es también para la teoría de la elasticidad, establecer ecuaciones de equilibrio y compatibilidad, además de determinar las relaciones experimentales entre la tensión y la deformación (Pero-Sanz, 1999).

La relación general entre la tensión y la deformación debe contener:

- Las relaciones elásticas de tensión-deformación.
- La condición de tensión para la cual comienza el flujo plástico.
- Las relaciones plásticas de tensión-deformación o el incremento de las mismas.

Plantea en su artículo Mazein (2001), que las tensiones residuales y las deformaciones que aparecen en el proceso de elaboración, determinan en gran nivel la exactitud de las piezas y la calidad de su capa superficial. Para elevar la efectividad de los procesos tecnológicos de la Deformación Plástica Superficial hace falta tener un modelo del estado tensión-deformación que se forma en el resultado de la elaboración.

1.2.1 Tipos de deformaciones existentes en el proceso de deformación por rodadura

- 1. Deformaciones elásticas.** En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial, no existe cambios en su microestructura.



2. **Fluencia o cadencia.** Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente.
3. **Deformaciones plásticas.** Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.
4. **Estricción.** Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. Las tensiones no disminuyen hasta la rotura.

1.3 Endurecimiento por deformación en frío. Acritud

La deformación plástica en frío de un agregado policristalino por un proceso cualquiera de conformado; laminación, estirado, trefilado, embutición, compactado de polvo, plegado, enderezado, suele traducirse en una deformación permanente. Esta tiene lugar en el interior de los cristales con la acomodación de las juntas de los granos (Pickering, 1983; Álvarez, 1999; Callister, 1999 y Pero-Sanz, 2000).

La acritud es una propiedad característica del estado metálico, que no presentan los polímeros ni los materiales cerámicos. El material resultará más duro cuanto menor sea el espesor final, es decir, cuanto mayor haya sido la reducción en frío, puede decirse que acritud es el aumento de dureza que adquiere un material por deformación en frío. El grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al material metálico, naturaleza del esfuerzo y velocidad de aplicación de éste, pero sobre todo depende del grado de deformación en frío que el material experimenta y de la naturaleza del material (sistema cristalino, energía de defectos de apilamiento, tamaño de grano, pureza del metal). La acritud guarda relación con el sistema cristalino al que pertenece el metal o aleación (Smelyanky, et al., 1990).



Entre los obstáculos que se oponen al movimiento de las dislocaciones, los más importantes son:

- ✓ Pilas de dislocaciones concentradas contra un obstáculo.
- ✓ Superficies de defectos originales en la estructura cristalina, principalmente <vacíos o vacancia> y <átomos intersticiales>
- ✓ Superficies de defectos inducidas por la disociación de las propias dislocaciones móviles.
- ✓ Concentración de dislocaciones en los bordes de los granos.
- ✓ Átomos solubles.
- ✓ Partículas precipitadas.
- ✓ Otras dislocaciones estables.
- ✓ Las propias superficies externas de los materiales, que en ocasiones forman películas (por ejemplo, superficies oxidadas), que entorpecen la salida al exterior de las dislocaciones móviles).

En los cristales metálicos del sistema cúbico, la deformación comienza en unos planos de deslizamiento determinados, que constituyen el sistema primario de deslizamiento; pero a medida que la deformación continúa, van apareciendo deformaciones en otros planos, constituyendo los sistemas secundario y terciario de deslizamientos. La capacidad de los cristales cúbicos de deformarse en más de un sistema, guarda estrecha relación con la gran acritud que adquieren en la deformación, muy superior a la de los cristales hexagonales, las curvas tensión-deformación varían mucho con la naturaleza del metal, su pureza, la orientación del cristal respecto a la probeta, la temperatura, el tamaño y forma del cristal y las condiciones de la superficie de la muestra ensayada.

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material (Álvarez, et al., 2004 y Lubriner, 1986).



Al someter un metal con estructura cúbica a la acción de cargas que sobrepasen el límite de fluencia, después de eliminarlas persistirá la deformación. Si se vuelve a poner al metal bajo la acción de cargas, su actitud para la deformación plástica habrá disminuido y el límite de fluencia se elevará. Esto significa que el metal se ha endurecido por acritud (Barceinas y Juárez, 2001).

1.4 Microestructura de los aceros al carbono

Durante la revisión bibliográfica realizada (Guliaev, 1983), se encontró que los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros al carbono son: ferrita, cementita, perlita, sorbita, troostita, martensita, bainita, y rara vez austenita, aunque nunca como único constituyente. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos. Las microestructuras que presenta el diagrama de equilibrio para los aceros al carbono son:

1.4.1 Ferrita (Hierro α)

El hierro alfa (α) (ferrita) existe desde -273 hasta 912 °C y posee la estructura cristalina BCC. Es una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0,008 % de carbono, por esto se considera como hierro puro, la máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02 % a 723 °C. La ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo, tiene una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kgf/mm², llegando hasta un alargamiento del 40 %. La ferrita se observa al microscopio como granos poligonales claros.

En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita, en los aceros de menos de 0,6 % de carbono, formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros de 0,6 a 0,85 % de carbono en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita. La ferrita también aparece como elemento eutectoide de la perlita formando láminas paralelas separadas por otras láminas de cementita, en la estructura globular de los aceros de herramientas aparece formando la matriz que rodea los glóbulos de cementita, en los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer mezclada con la martensita cuando el temple no ha sido bien efectuado (Fernández, 2008, Callister, 1999).



1.4.1.1 Perlita

Alfonso (1995); Guliaev (1983) y Callister (1999) coinciden en plantear que es el microconstituyente eutectoide compuesto por el 86,5 % de ferrita y el 13,5 % de cementita, es decir, hay 6,4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 kgf/mm^2 y un alargamiento del 15 %. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita. Esta estructura laminar se observa en la perlita formada por enfriamiento muy lento. Si el enfriamiento es muy brusco, la estructura es más borrosa y se denomina perlita sorbítica. Si la perlita laminar se calienta durante algún tiempo a una temperatura inferior a la crítica ($723 \text{ }^\circ\text{C}$), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo entonces la denominación de perlita globular.

1.4.2 Estructuras cristalográficas

Guliaev (1989); Pero-Sanz (2000) y Moreno (2005) coinciden en plantear que la mayoría de los metales elementales alrededor del 90 % cristalizan en tres estructuras cristalinas densamente empaquetadas: cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) y hexagonal compacta (HCP). La estructura HCP es una modificación más densa de la estructura cristalina hexagonal sencilla. La mayor parte de los metales cristalizadas en esas estructuras densamente empaquetadas debido a que se libera energía a medida que los átomos se aproximan y se enlazan cada vez más estrechamente entre sí. De este modo, dichas estructuras densamente empaquetadas se encuentran en disposiciones u ordenamientos de energía cada vez más baja y estable.

La solubilidad del carbono en el hierro depende de la forma cristalográfica en que se encuentra el hierro. La solubilidad del carbono en el hierro (cúbica de cuerpo centrado) es menor que el 0,02 % y en el hierro (cúbica de caras centradas) es hasta el 2 %.

Se distinguen tres grupos de aceros al carbono: eutectoides, que contienen cerca de un 0,8 % de carbono, cuya estructura está constituida únicamente por perlita; Hipoeutectoides, que contienen menos del 0,8 % de carbono, con estructura formada por ferrita y perlita; e Hipereutectoides, que contienen del 0,8 al 2 % de carbono y cuya estructura consta de perlita y cementita.



1.4.3 Redes Cristalinas

Las redes cristalinas se caracterizan fundamentalmente por un orden o periodicidad. La estructura interna de los cristales viene representada por la llamada celdilla unidad que se repite una y otra vez en las tres direcciones del espacio. El tamaño de esta celdilla viene determinado por la longitud de sus tres aristas (a , b , c), y la forma por el valor de los ángulos entre dichas aristas (α , β , γ) (Barceinas y Juárez, 2001).

El conjunto de elementos de simetría de un objeto que pasan por un punto, definen la simetría total del objeto (grupo puntual de simetría). Hay muchos grupos puntuales, pero en los cristales éstos han de ser compatibles con la periodicidad (repetitividad por traslación) por lo que hay sólo 32 posibles grupos puntuales que se denominan clases cristalinas.

Los cristales son una disposición periódica de átomos o moléculas en el espacio, en el que hay puntos en los que un observador está rodeado por el mismo número y tipo de átomos. Los cristales poseen simetría traslacional, esto significa que desde cualquier punto del cristal podemos llegar a otro punto, que no se diferencia del anterior. Es decir, el entorno de cada punto de la red es idéntico para cualquier traslación, los cristales están constituidos por dos elementos, por una parte la estructura regular, o red regular, de puntos en el espacio y por otro lado el motivo, el conjunto de átomos o moléculas que se repiten en cada uno de estos puntos reticulares (Buraya, 2001).

Los esfuerzos tangenciales aunque producen ruptura de los enlaces atómicos no ocasionan, en general, la ruptura del cristal metálico, pues la sencillez y regularidad de la distribución atómica da lugar a que la red se restablezca a cada avance de un espacio interatómico, con lo que la cohesión se restablece y el efecto de los sucesivos deslizamientos produce una deformación plástica (Lajtin, 1985).

Al aplicar estas condiciones a un conjunto de cristales o agrupación de granos cristalinos diversamente orientados, se puede observar que su comportamiento real dista mucho del que debiera ser. Esta anomalía reside en el enorme efecto reforzador que sobre el deslizamiento cristalino ejercen los contornos de los granos y otro tanto sucede con los cambios de dirección que las diversas orientaciones de dichos granos imponen, todo lo cual da lugar a un considerable incremento de la resistencia a la deformación. Es de



importancia conocer la influencia que ejercen las tensiones en las diferentes capas del metal (Barceinas y Juárez, 2001).

1.4.3.1 Clasificación de las redes cristalinas

A partir de los resultados expuestos por Kruschov (1957), se analiza en cuanto a la dureza incrementada en el material por la deformación plástica del mismo en la superficie. De acuerdo con Lin (2001) se ha demostrado que los metales simples de estructura cristalina cúbica son más desgastados que los que poseen una estructura hexagonal, y por tanto, menos endurecido por deformación plástica debido a que estos poseen un solo plano simple de desplazamiento normalmente activo, mientras que los cúbicos tienen una gran cantidad de planos equivalentes, multiplican el deslizamiento y las altas concentraciones de dislocaciones y por tanto, un alto trabajo de endurecimiento.

Los metales no son cuerpos amorfos sino cristalinos o sea sus átomos están dispuestos en un espacio de acuerdo a un orden geométrico determinado que se repite con determinada regularidad formando una red cristalina.

Los cristalógrafos han demostrado que son necesarias solo siete tipos diferentes de celda unidad para crear todas las redes puntuales. La mayor parte de estos siete sistemas cristalinos presentan variaciones de la celda unida básica. A. J. Bravais mostró que catorce celdas unidad estándar podían describir todas las estructuras reticulares posibles. Hay cuatro tipos de celdas unidad. Estas son:

1. Red cúbica centrada en el cuerpo (CC): En una red cúbica centrada en el cuerpo los átomos -considerados como esferas rígidas- se encuentran situados en los vértices y en el centro de un cubo. Se puede observar que el átomo central de la celda unidad está rodeado de otros ocho vecinos más cercanos; se dice, en este caso, que su índice de coordinación es ocho. Ej: hierro alfa ($\text{Fe } \alpha$), molibdeno (Mo), sodio (Na).

2. Red cúbica centrada en las caras: (FCC) La red tiene forma de cubo de parámetro con 8 átomos en los vértices del cubo y 6 en los centros de cada una de las caras. La densidad de compactación es del 74 %. El índice de coordinación es 12. Ej: hierro gamma ($\text{Fe } \gamma$), níquel (Ni), cobalto (Co), cobre (Cu), aluminio (Al), titanio (Ti).



3. Red hexagonal compacta (HC). La red tiene forma de prisma recto cuya base es un hexaedro. Tiene dos parámetros, los lados de la base del prisma a y su altura c . Doce átomos están dispuestos en los vértices de la red, 2 átomos en el centro de la base y 3 átomos en el interior de la red. La densidad de compactación es 74 % y el índice de coordinación es 12. Ej: titanio (Ti), cobalto (Co), cadmio (Cd), magnesio (Mg).

4. Red Tetragonal centrada en el cuerpo (BCC): Tiene forma de prisma recto de base cuadrada. Los átomos están dispuestos de igual forma que en la CC, presenta dos parámetros, el lado de la base a y la altura c . La relación c/a recibe el nombre de grado de tetragonalidad. El índice de coordinación es igual a 8.

1.5 Deslizamiento y maclado

Comparado con las condiciones de rodadura pura, el deslizamiento junto con la rodadura proporciona efectos de extremo adicionales. La presencia de deslizamiento puede incrementar la concentración de tensiones en el extremo de salida. El extremo de entrada, de acuerdo con Hu Nai-Sai (2002) puede beneficiarse por una reducción en la presión local en condiciones de deslizamiento.

Por tanto, la influencia del deslizamiento en los esfuerzos subsuperficiales y las fallas de contacto pueden encontrarse a través de las alteraciones de la presión de contacto y no por la fricción superficial.

Existen aspectos fundamentales que diferencian al Deslizamiento del Maclaje. En el deslizamiento la orientación arriba y abajo del plano de deslizamiento es la misma, antes y después de la deformación, mientras que en el maclado hay un cambio de orientación a través del plano de macla. El deslizamiento usualmente se considera que ocurre en múltiplos del espaciamiento atómico, mientras que en el maclado los movimientos atómicos son menores a una distancia atómica. El deslizamiento ocurre sobre planos relativamente anchos, mientras que en una región maclada cada plano atómico está involucrado en la deformación. El maclado ocurre en una dirección definida sobre un plano cristalográfico específico. No se sabe si hay o no un esfuerzo crítico cortante resuelto para el maclado. Sin embargo, el maclado no es un mecanismo de deformación dominante en metales los cuales poseen varios sistemas de deslizamiento posibles.



El maclado generalmente ocurre cuando los sistemas de deslizamiento están restringidos o cuando algo incrementa el esfuerzo crítico cortante resuelto, de manera que el esfuerzo para maclado es inferior al de deslizamiento. Esto explica la formación de maclas a bajas temperaturas o a altas velocidades de deformación en metales BCC y FCC, o en metales HCP en orientaciones que no favorecen el deslizamiento sobre el plano basal. Las deformaciones de la red necesarias para producir una macla son pequeñas, tal que la deformación neta que puede producirse por maclado es también pequeña.

Un material policristalino se deforma también por deslizamiento, pero en este caso, sobre cada grano (cristal) se ejercen dos tipos de restricciones, a) una dislocación es detenida por una frontera de grano tan pronto atraviesa su propio cristal. Sólo después de que se ha acumulado muchas dislocaciones en la frontera, el esfuerzo local se incrementa lo necesario para originar deslizamiento en el grano contiguo, b) el hecho de que no más de cinco sistemas de deslizamiento independientes deben operar para permitir que un grano se deforme y pase a la forma arbitraria impuesta por los granos vecinos (Badiola, 2004).

Los cristales son una disposición periódica de átomos o moléculas en el espacio, en el que hay puntos en los que un observador está rodeado por el mismo número y tipo de átomos.

Los cristales poseen simetría traslacional, esto significa que desde cualquier punto del cristal podemos llegar a otro punto, que no se diferencia del anterior. Es decir, el entorno de cada punto de la red es idéntico para cualquier traslación, los cristales están constituidos por dos elementos, por una parte la estructura regular, o red regular, de puntos en el espacio y por otro lado el motivo, el conjunto de átomos o moléculas que se repiten en cada uno de estos puntos reticulares (Lajtin, 1985).

Por otra parte, el estado de tensiones en el grano puede activar otros sistemas de deslizamiento. Estos pueden interactuar con él o los sistemas ya existentes dificultando aún más la activación de los mismos. Esto origina el fenómeno conocido como endurecimiento latente.

El endurecimiento de los metales y sus aleaciones es el resultado del incremento de la resistencia de todos o los más débiles enlaces atómicos que determinan la resistencia de los sólidos cristalinos. Los cambios en la energía, longitud y carácter del enlace químico que tiene lugar durante el aumento de la resistencia del metal, están acompañadas de



ligeros cambios en el radio atómico, distancias interplanares y las distancias de los enrejados cristalinos. Estas cantidades varían con la temperatura y la presión, las cuales causan cambios efectivos en la resistencia y las propiedades físicas (Smith, 2003).

1.5.1 Dislocaciones y endurecimiento

En su uso normal y cotidiano un material esta sometido a pequeñas tensiones, estas generan muescas, mellas, esto da lugar a dislocaciones, siendo las mixtas las más frecuentes, como las dislocaciones facilitan el ablandamiento del material, al ser usados durante un largo tiempo, cada vez hay más dislocaciones y cada vez está más blando el material produciéndose fallos catastróficos, por eso debemos seleccionar un material capaz de contrarrestar el gran numero de dislocaciones generadas por las muchas tensiones de uso, uno de estos materiales es el acero, hierro con distintas proporciones de carbono siempre por debajo del 2 %, este carbono esta disuelto en el hierro de forma intersticial, al estar el carbono en los intersticios supone una gran distorsión en la red. Además el carbono puede estar en forma de carburo de hierro (cementita) y tanto en un caso como en otro impide el libre movimiento de las dislocaciones, endureciendo el material por endurecimiento por disolución.

Aparte de este endurecimiento existe otro, el endurecimiento por trabajo, en este caso endurecemos el material sometiéndolo a grandes tensiones (en su elaboración y no en su uso), generando gran cantidad de dislocaciones, que empezarán a moverse encontrándose con un freno muy efectivo, los límites de grano, acumulándose las dislocaciones en una zona concreta. En este movimiento las dislocaciones tienden a irse a la superficie deformándolo, esta deformación actúa sobre el grano colindante dificultando el movimiento de la dislocación. Además las dislocaciones ejercen acciones repulsivas entre ellas, impidiendo su libre movimiento. Por tanto cuando sometemos a un material a altas tensiones por uno de estos tres efectos se produce un endurecimiento del material por trabajo.

Podemos también endurecer un material disminuyendo el tamaño de grano, ya que cuanto más pequeño sea este, mayor será la superficie de grano y habrá más zonas que se pueden deformar.



Las durezas producidas tanto por trabajo como por endurecimiento de grano pueden paliarse mediante tratamiento térmico donde se alcanzan altas temperaturas y se permite la difusión y reorganización de átomos, en esta reorganización pueden eliminarse dislocaciones y además disminuyen las deformaciones en la red a consecuencia de las tensiones que habíamos aplicado.

Los deslizamientos son producidos por los esfuerzos cortantes, que actúan en la dirección de los planos cristalinos que fluyen, cuando su magnitud es mayor que la resistencia característica del cristal. La posibilidad de deslizamiento de un sistema viene también determinada por la longitud del camino que las dislocaciones pueden recorrer sin obstáculos. Evidentemente un borde de grano es un impedimento espacial que se encuentra la dislocación, ya que no le es posible atravesar la frontera del grano.

La deformación plástica se efectúa por el movimiento de las dislocaciones, es un proceso de desplazamiento de una parte del cristal con respecto a otra. Por ejemplo dentro del cristal, un par de dislocaciones en movimiento genera centenares de nuevas dislocaciones y como resultado de esto la densidad de las dislocaciones aumenta, lo que ocasiona el endurecimiento. Además se producen importantes variaciones en la estructura del metal como es la deformación de la red cristalina y la reorientación de los granos en la dirección de la deformación; el mismo pasa de forma equiaxial a tener ejes desiguales (alargados y aplastados) (Smelyanky y Blumenstein, 2001).

Badiola (2004) y Lubriner (1986) plantean que en la teoría de las dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura resulta del movimiento de dislocaciones por deslizamiento bajo la acción de la tensión aplicada. Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico, y consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro. Las dislocaciones se crean en un campo de red cúbica deformada. La energía de la red cristalina se caracteriza por el llamado vector de Burgers.



1.6 Conclusiones del Capítulo

- ✓ En las fuentes bibliográficas consultadas existe diversidad de criterios sobre el fenómeno de tracción de los materiales, sin embargo, en ninguna de ella se establece la curva σ - ϵ del acero AISI 1045 cuando es deformado por rodadura.
- ✓ Se determina que el flujo plástico de los materiales ocurre por la deformación que experimentan los mismos al ser sometidos a esfuerzos, destacándose en ellos zonas que caracterizan su comportamiento inicial hasta su ruptura final.



CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

La deformación plástica superficial por rodillo, también llamado acabado sin viruta, es un trabajo en frío en la superficie del metal donde se aplica una fuerza que excede el límite de resistencia a la deformación del metal. Esto se realiza principalmente en diámetros interiores y exteriores de piezas previamente maquinadas, con herramientas rotatorias que contienen rodillos.

La resistencia (fluencia y rotura) es una propiedad o característica de un material o elemento mecánico. Esta propiedad puede ser inherente al material o bien originarse de su tratamiento y procesado. Habitualmente sólo se dispone de información correspondiente al ensayo de tracción. Los componentes de máquinas en general trabajan bajo estados de tensión multidireccional. El objetivo de las teorías de fallo estático es relacionar el fallo en un estado unidireccional (ensayo de tracción) con el fallo bajo cualquier estado de tensiones.

2.1 Caracterización del material a deformar plásticamente por rodillo

El acero AISI 1045 presenta gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste, posee alta tenacidad, plasticidad. El análisis químico estándar del acero aparece en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química estándar del acero AISI 1045

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Contenido (%)	0,45	0,25	0,65	0,40	0,10	0,40

En la figura 2.1, se observa la imagen del SPECTRO-LAB empleado para determinar la composición química del acero AISI 1045



Figura 2.1 SPECTRO-LAB.

Determinación de composición química mediante el método de emisión óptica para aceros de baja aleación, aceros aleados, hierro fundido y aleaciones de base níquel; determinando la presencia de más de 20 elementos químicos. Este método es empleado en barras, planchas y piezas mayores de 12 mm de ancho y no superiores a 70 mm de largo. Para este análisis se emplea el SPECTRO-LAB.

Este ensayo consiste en suministrar una intensidad de corriente a los electrones que conforman un átomo, estos se excitan y pasan de un nivel de energía inferior a otro superior emitiendo esta en forma de luz y calor. La luz de la cámara de chispeo es transmitida por una fibra óptica hasta la ranura de entrada, esta hendidura deja pasar la luz hasta la rejilla que transforma la misma en sus longitudes de onda. Las hendiduras de salida están posicionadas en el círculo de Rowland para dejar pasar solo las longitudes de onda de su interés, esta luz es captada por los fotomultiplicadores convirtiendo esta en un flujo de electrones.

Dentro de las principales características del SPECTRO-LAB encontramos: calidad del argón de 99,998 % de pureza, voltaje (v) de 220 a 230 de corriente alterna ± 10 %, frecuencia de 50 a 60 Hz, temperatura de trabajo de 6 a 40 °C, humedad del aire del 20 al 80 % y un peso de 400 kg.

2.1.2 Análisis microestructural

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de la probeta traccionada y sin deformar, también se tuvo en cuenta la microestructura del acero AISI 1045 en estado de suministro, pero con un previo normalizado. Ambas microestructuras aparecen en las figuras 2.2 y 2.3. Estas se emplearán para establecer el comportamiento del material de las probetas después del ensayo de tracción.



Figura 2.2. Probeta del AISI 1045 sin deformar

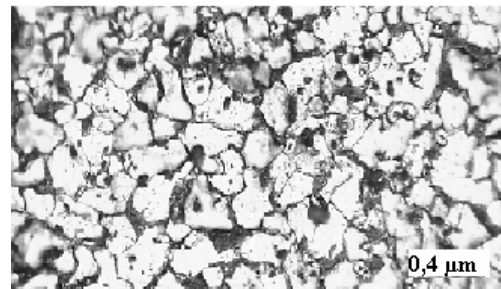


Figura 2.3. Acero AISI 1045 sin deformar pero traccionada.

Según los ensayos realizados y la imagen en la figura 2.2, se confirma que el material a emplear en los experimentos es un acero AISI 1045 con una estructura metalográfica ferrítica perlítica.

2.1.3 Análisis de fase por el diagrama hierro carbono

Para facilitar la comprensión de todas las transformaciones que se producen en los cristales de hierro técnico se emplea el diagrama hierro - carbono (Figura 2.4), el cual permite determinar las transformaciones de fases del hierro en dependencia de la temperatura de tratamiento al que es sometido.

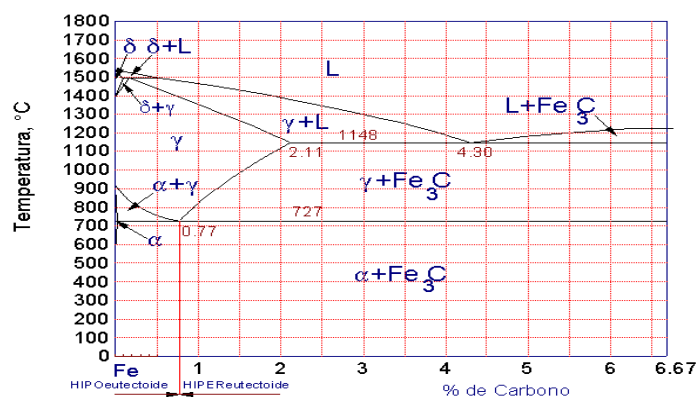


Figura 2. 4. Diagrama hierro - carbono.



La adición de elementos de aleación al hierro influye en las temperaturas a que se producen las transformaciones alotrópicas. Entre estos elementos, el más importante es el carbono.

El diagrama hierro - carbono, aún cuando teóricamente representa unas condiciones de metaestables, se puede considerar que condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentas representa cambios de equilibrio.

2.2 Diseño de experimento

A partir de un diseño de experimentos propuesto (Piñeiro, 2009) se realiza el proceso de deformación, no así el comportamiento microestructural, se tomó como base el mismo que aparece en la tabla 2.1, a partir de ese diseño se obtuvieron diferentes valores del material al ser deformado, aparecen en las tablas desde las 2.2 hasta la 2.11, considerando que para cada carga se debe experimentar un cambio en la estructura cristalina del material es lo que justifica la presente investigación.

Tabla 2.1. Matriz de planificación del experimento.

Niveles	Factores		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)
Nivel superior (+1)	110	2 500	0,250
Nivel medio (Δ)	54	1 500	0,125
Nivel inferior (-1)	27	500	0,075
Número de ensayo			
1a	27	500	0,250
1b	27	500	0,125
1c	27	500	0,075
2a	54	1500	0,250
2b	54	1500	0,125
2c	54	1500	0,075
3a	110	2500	0,250
3b	110	2500	0,125
3c	110	2500	0,075

Para realizar el análisis microestructural de las 9 probetas se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas, considerando que en dependencia de cada carga existirán deformaciones diferentes. Los valores de las muestras aparecen desde las tablas 2.2 hasta la 2.10.

Tabla 2.2. Ensayo de tracción a la 1ra probeta. Fuerza de 500 N; $n = 27$ rev/min y $S = 0,25$ mm/rev

Probeta 1											
MPa	0	95,0	190,0	285,0	380,0	475,0	570,0	665,0	760,0	855,0	753,0
mm	0	0,0267	0,0534	0,0801	0,1068	0,1335	0,1602	0,1860	0,2130	0,2400	0,2670

Tabla 2.3. Valores del ensayo de tracción a la 2da probeta. Fuerza 1 500 N; $n = 27$ rev/min y $S = 0,125$ mm/rev

Probeta 2											
MPa	0	97,6	195,2	292,8	390,4	488,0	585,6	683,2	780,8	878,4	769,0
mm	0	0,0264	0,0528	0,0792	0,1056	0,1320	0,1584	0,1848	0,2112	0,2376	0,264

Tabla 2.4. Valores del ensayo de tracción para la 3ra probeta. Fuerza 2 500 N; $n = 27$ rev/min y $S = 0,075$ mm/rev

Probeta 3											
MPa	0	102,1	204,2	306,3	408,4	510,5	612,6	714,7	816,8	918,9	810,0
mm	0	0,0263	0,0526	0,0789	0,1052	0,1315	0,1578	0,1841	0,2104	0,2367	0,2630

Tabla 2.5. Valores del ensayo de tracción para la 4ta probeta. Fuerza 500N; $n = 54$ rev/min y $S = 0,25$ mm/rev

Probeta 4											
MPa	0	90,7	181,4	272,1	362,8	453,5	544,2	634,9	725,6	816,3	708,0
mm	0	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,270

Tabla 2.6. Valores del ensayo de tracción para 5ta probeta. Fuerza = 1 500N; $n = 54$ rev/min y $S = 0,125$ mm/rev

Probeta 5											
MPa	0	96,5	193,0	289,5	386,0	482,5	579,0	675,5	772,0	868,5	759,0
mm	0	0,0267	0,0534	0,0801	0,1068	0,1335	0,1602	0,1869	0,2136	0,2403	0,267

Tabla 2.7. Valores del ensayo de tracción para la 6ta probeta. Fuerza = 2 500 N; $n = 54$ rev/min y $S = 0,075$ mm/rev

Probeta 6											
MPa	0	101,2	202,4	303,6	404,8	506,0	607,2	708,4	809,6	910,8	800,0
mm	0	0,0262	0,0524	0,0786	0,1048	0,131	0,1572	0,1834	0,2096	0,2358	0,2620

Tabla 2.8. Valores del ensayo de tracción a la 7ma probeta. Fuerza 500 N; $n = 110$ rev/min y $S = 0,25$ mm/rev

Probeta 7											
MPa	0	90,4	180,8	271,2	361,6	452,0	542,4	632,8	723,2	813,6	704,0
mm	0	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,270



Tabla 2.9. Valores del ensayo de tracción a la 8va probeta. Fuerza = 1500 N; $n = 110$ rev/min y $S = 0,125$ mm/rev

Probeta 8											
MPa	0	91,4	182,8	274,2	365,6	457,0	548,4	639,8	731,2	822,6	716,0
mm	0	0,0268	0,0536	0,0804	0,1072	0,1340	0,1608	0,1876	0,2144	0,2412	0,2680

Tabla 2.10. Valores del ensayo de tracción a la 9na probeta. Fuerza = 2500 N; $n = 110$ rev/min y $S = 0,075$ mm/rev

Probeta 9											
MPa	0	98,1	196,2	294,3	392,4	490,5	588,6	686,7	784,8	882,9	774,0
mm	0	0,0255	0,0510	0,0765	0,1020	0,1275	0,1530	0,1785	0,2040	0,2295	0,2550

La matriz del diseño de experimento para establecer el comportamiento de la microdureza aparece en la tabla 2.11

Tabla 2.11. Matriz de planificación del experimento.

Niveles	Respuestas			Salidas		
	n (rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	H(HV)		
Nivel superior (+1)	110	2 500	0,250			
Nivel medio (Δ)	54	1 500	0,125			
Nivel inferior (-1)	27	500	0,075			
Número de ensayo				HV1	HV2	HV3
1a	27	500	0,250	HV1a	HV2a	HV3a
1b	27	500	0,125	HV1b	HV2b	HV3b
1c	27	500	0,075	HV1c	HV2c	HV3c
2a	54	1500	0,250	HV1a	HV2a	HV3a
2b	54	1500	0,125	HV1b	HV2b	HV3b
2c	54	1500	0,075	HV1c	HV2c	HV3c
3a	110	2500	0,250	HV1a	HV2a	HV3a
3b	110	2500	0,125	HV1b	HV2b	HV3b
3c	110	2500	0,075	HV1c	HV2c	HV3c

Como se puede observar en la tabla anterior, con el diseño de experimento propuesto se han enumerados las probetas con HV1a, HV2a y HV3a, es decir que se realizarán tres mediciones como mínimo para establecer la dureza que posee cada probeta en dependencia en la forma en que fueron deformadas.

2.3 Máquinas y equipos empleados en la experimentación

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto en el trabajo se emplearon diferentes máquinas, para darle uso a las mismas se trató en lo posible que las mismas tuvieran las mejores condiciones y evitar errores causales por problemas de desajustes.

2.3.1 Pulidora metalográfica MONTASUPAL

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con lijas del tipo 100, 120, 150, 180, 220, 280.

2.3.2 Características de la máquina

Voltaje.	.	.	.	.	.	.	.	250 v
Corriente.	.	.	.	.	.	.	.	2.5 A
Número de revoluciones.	.	.	.	.	.	.	.	300 -1 000 rev/min
Potencia del motor.	.	.	.	.	.	.	.	5 HP

2.3.3 Torno de filetear modelo 16K20

Altura del centro sobre bancada: 215 mm. Distancia entre punto hasta 2000 mm. Potencia del motor $N_m = 10 \text{ kw}$; rendimiento del torno $\eta = 0,75$. Frecuencia de rotación del husillo (rev/min): 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600. Avances longitudinales (mm/rev): 0,05; 0,06; 0,075; 0,09; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1; 1,6; 2; 2,4; 2,8. Avances transversales (mm/rev): 0,025; 0,03; 0,0375; 0,045; 0,05; 0,0625; 0,075; 0,0875; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1; 1,2; 1,4. Máxima fuerza de corte axial admisible por el mecanismo de avance, $P_x = 600 \text{ kgf/mm}^2$. En la figura 2.5, se observa la imagen del torno 16K20 empleado en el corte de las probetas.



Figura 2.5 Torno de filetear modelo 16k20.

2.3.4 Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. En la figura 2.6, se observa la imagen del microscopio empleado en la observación de las muestras.

El microscopio es un instrumento óptico compuesto por al menos dos lentes que tienen como función la obtención de imágenes mayores por refracción de un objeto pequeño.



Figura 2.6. Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM-100

2.3.4.1 Equipo para medición de dureza

Para determinar las durezas de cada material se toman muestras de cada una de ellas, se pulen debidamente con lija de 400 granos de partículas abrasivas por mm^2 para evitar que alguna suciedad u óxido provocara errores en los resultados. Las mediciones de la dureza se realizaron por el método Vickers (HV), y se efectuarán al menos tres mediciones para cada muestra en diferentes lugares. Para realizar este ensayo se utilizará un durómetro Vickers. En la tabla 2.3 aparecen las características del equipo.



Tabla. 2.3. Características del durómetro.

Carga aplicable en kg	
Previa: 15	Total: 1 a 120
Tiempo aplicación de la carga (s): 15	
Tipo de penetrador: Pirámide de diamante.	
Cambio de la carga: Manual.	

En este caso se utilizará un penetrador de pirámide de diamante de 136° y una carga aplicada de 15 kg.

2.4 Preparación metalográfica de la probeta

El análisis mediante microscopio metalográfico permite resolver aspectos relacionados a la microestructura de un metal. Por ejemplo, forma y tamaño de los granos, las fases presentes además de su distribución, defectos e inclusiones. Por ejemplo, los constituyentes metálicos que pueden encontrarse en aceros al carbono a temperatura ambiente son ferrita, cementita, perlita, martensita. También algunos constituyentes no metálicos como sulfuros, óxidos y silicatos.

Las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente pulidas para poder realizar la observación microscópica, por lo que se propone la realización de un conjunto de operaciones que permitan lograr la calidad superficial deseada. Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

- Corte, desbaste, encapsulado de probetas, pulido, desengrasado y lavado, Ataque químico.
- Corte.

2.4.1 Corte de las muestras

Si bien las dimensiones de la superficie a examinar varían en cada caso, es suficiente, siempre que sea posible, disponer de secciones mínimas de 10 x 10 mm, y no mayores de 25 x 25 mm, y con probetas con altura de 20 mm.(Casillas, 1987).

En la etapa de corte, si el material es relativamente blando puede realizarse mediante sierra mecánica o manual. Sin embargo, si se trata de aleaciones frágiles, como fundiciones y algunos bronceos ricos en estaño se pueden romper con un martillo. Las muestras de materiales duros, difíciles de cortar, tales como aceros templados y



aleaciones no férricas endurecidas por envejecimiento se pueden cortar fácilmente con discos abrasivos.

Se debe refrigerar adecuadamente la probeta durante el proceso de corte, la temperatura producida por el roce puede alterar radicalmente la estructura original, por lo menos en la superficie obtenida por el corte.

2.4.2 Desbaste y pulido

El desbaste, a grandes rasgos, consiste en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El pulido con los papeles abrasivos se realiza variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Al concluir de pasar el papel abrasivo más fino se realiza la operación conocida como pulido fino, en el que se emplea la pasta abrasiva conocida comercialmente como “Pasta GOI”, añadida sobre discos provistos de paños o motas. Después de esta operación se obtiene una superficie pulida.

En el pulido se emplearon lijas del tipo No, 320 y 400, a las cuales les corresponden el mismo número en granos de partículas abrasivas por mm^2 según (ISO 9001), respectivamente.

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

2.4.3 Lijado grueso

Es conveniente redondear las aristas en el desbaste, ya sea con esmeriles, a fin de eliminar los ángulos que podrían llegar a provocar la rotura del papel esmeril o del paño durante el pulimento. Por esta razón es preferible que las probetas sean redondas o al menos que no tengan ángulos y cantos vivos.

Las primeras etapas de lijado se realizan con papel de lija con tamaño de granos 120 y 240 respectivamente, su objetivo es obtener una superficie plana, libre de toda distorsión o huellas producto del corte, y además lograr que todas las marcas del lijado sigan una misma dirección.



2.4.3.1 Lijado fino

Se realiza semejante al anterior, con la diferencia que esta vez el proceso se inicia con lija de tamaño de granos 320 y de ésta hacia adelante. Cada vez que se cambia de lija se opera de la forma descrita anteriormente, a fin de obtener nuevas rayas perpendiculares a las anteriores.

Cuando la observación visual de la muestra solo tiene rayas producidas por la última lija empleada y las anteriores se han eliminado totalmente, se procede al pulido de la muestra.

El pulido se detiene cuando la muestra no presenta rayas ni colas de cometas al observarla en el microscopio con 100 aumentos. Este primer análisis debe mostrar únicamente inclusiones e imperfecciones del material. Si las rayas aún existen, es recomendable realizar todo el proceso nuevamente.

En ambas operaciones de pulido se debe utilizar abrasivos, los usados con frecuencia son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio. Siendo la alúmina (óxido de aluminio) el más satisfactorio y universalmente usado y que presenta los mejores resultados en el pulido final.

2.4.3.2 Paños para pulido

La textura superficial de los paños de pulir varía desde la que no tienen pelo, como la seda natural y el tejido empleado para cubrir las alas de aeroplanos, hasta aquellos con pelo relativamente largo, como el terciopelo y la pana, que son de aplicación muy general.

Dentro de los más comunes y utilizados, se encuentran los paños de mesa de billar, paños de lana de distintas finuras y lonas de diferentes pesos. La selección del paño de pulir, depende del material a pulir y el propósito al cual este destinado el estudio metalográfico.

Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.



2.5 Ataque de las muestras para su examen microscópico

Consiste en atacar la superficie ya pulida con algún reactivo químico, su objetivo es hacer visibles las características estructurales de la muestra que se está analizando, de tal manera que se pueda diferenciar con claridad su microestructura. La superficie se debe protegerse de la oxidación y efectos atmosféricos que pudiesen afectarles.

Para determinar el tipo de reactivo se debe tener en consideración el material y la finalidad que se busca.

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo de espejo, para observar la estructura metalográfica formada después de la deformación del material bajo carga por rodadura. Según ASTM E-262 - Practice A. Para este ataque químico se utilizó Nital al 4 %

Ácido Nítrico (HNO_3)	5 mL
----------------------------------	------

Alcohol (etanol)	100 mL
------------------	--------

2.6 Elaboración mecánica de las probetas

Para la elaboración de las probetas, se realiza el corte de metales con un torno 16K20 de nacionalidad rusa, garantizando un constante y severo régimen de enfriamiento evitando que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso de corte pudieran aparecer transformaciones en la estructura.

Corte de las probetas $L = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. (Norma NTC 595)

Todas las probetas se someten al régimen de maquinado por lo que se asume la posibilidad de que en las superficies de las mismas haya estado presente el fenómeno de la acritud aunque en poca escala.

Para garantizar el buen acabado superficial obtenido y previo al tratamiento, la probeta se cilindrará exteriormente entre plato y punto, con los siguientes datos de corte:

$n = 250 \text{ rev/min}$, $S = 0,2 \text{ mm/rev}$.

Para el mecanizado se empleará una cuchilla de 45° código del vástago PSSNR 2525 M 12, con una plaquita SNMG 12 04 08 y otra de tronzar código del vástago PTG NR 2525



M22, con una plaquita TNMG 22 04 04, ambas de sujeción mecánica SANDVIK y calidad QM 4025 (SANDVIK Coromant KoroKey, 1996).

2.6.1 Velocidad de corte de las probetas

La velocidad de corte de las probetas debe ser adecuada ya que el mismo depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de las herramientas de corte.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Donde:

V_c = Velocidad de corte; m/min .

D = Diámetro de la pieza; mm.

n = Número de revolución; rev/min.

1 000 = Factor de conversión de metro a milímetro.

2.6.2 Profundidad de corte de las probetas

La profundidad de corte de las probetas es la dimensión de la capa de metal que arranca la cuchilla de una pasada. Si una pieza cilíndrica de diámetro D se tornea de una pasada de la cuchilla hasta el diámetro d , entonces la profundidad de corte es igual a la mitad de la diferencia entre los diámetros.

$$t = \frac{D - d}{2} \quad (2.2)$$

Donde:

t = Profundidad de corte; mm.

D = Diámetro de la pieza antes y después de la elaboración; mm.

2.6.3 Tiempo de maquinado de las probetas

El tiempo de maquinado para las probetas es el tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, también conocido por tiempo básico o tiempo total de maquinado.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad (2.3)$$

Donde:

T_m = Tiempo de maquinado; mm.

L = Longitud a maquinar; mm.

i = Números de pasadas.

n = Números de revoluciones; rev/min.

s = Avance; mm/rev

La probeta se tronzó con una longitud de 10 mm al aire, con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial, con los siguientes datos de corte (Casillas, 1987).

2.7 Encapsulado de probetas

Cuando las muestras son pequeñas o de difícil manejo en las operaciones de desbaste y pulido, es necesario montarlas en un material adecuado para hacer posible la preparación, como se observa en la figura 2.7. La muestra se coloca en un molde y luego se agrega la resina hasta cubrir completamente el volumen entre la muestra y el molde. Es utilizada preferentemente en el montaje de muestras sensibles al calor o a la presión.

En este caso empleamos la resina de Epoxi ROYAPOX – 5050.



Figura 2.7. Montaje de la muestra empleando resina.

2.7.1 Propiedades de la resina Epoxi ROYAPOX – 5050

ROYAPOX 5050 es una resina Epoxi, que se presenta en forma de dos componentes y una vez polimerizada a temperatura ambiente, forma una masa incolora, dura y algo flexible. Presenta buenas cualidades de resistencia a la humedad y buenas propiedades



mecánicas y dieléctricas. La resina ROYAPOX 5050 conserva sus propiedades a temperaturas comprendidas entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.7.2 Campo de aplicación

La resina ROYAPOX 5050 puede utilizarse en la impregnación ó relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura.

La resina se suministra en dos componentes separados y predosificados: ROYAPOX 5050 y ENDURECEDOR 5050. La relación de mezcla en peso (Resina/Endurecedor) es de 100/40. Los recipientes estancos y precintados, deben ser almacenados a temperatura ambiente ($15 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), de esta forma tendrán más de 1 año de tiempo de vida. En la tabla 2.11 se relacionan las características de la resina Epoxi ROYAPOX – 5050.

Tabla 2.11. Características de la resina Epoxi ROYAPOX – 5050.

Características	ROYAPOX 5050	Endurecedor 5050	Mezcla 100/40
Viscosidad a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mPa.s)	4000±1000	30±10	1000 ± 200
Densidad a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (grs/cm ³)	1,15 ± 0,01	0,99±0,02	1,0 ± 0,01
Pot Life a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (min)	50		
Polimerización total	3 h. a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Dureza Shore D	85		
Resistencia a la tracción [MPa]	70		
Alargamiento a la rotura (%)	7		
Absorción agua 24 h, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (% peso)	0,2		
Rigidez dieléctrica, 50 Hz, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (KV/mm)	20		
Resistencia superficial (Ohm)	5 ,1012		
Resistencia específica (Ohm.cm)	1.3 .1015		
Factor de disipación tg, 50 Hz, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0094		
Constante dieléctrica, 50 Hz, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	3,9		
Resis. defor térmica pto. Martens $^{\circ}\text{C}$	60		
Conductividad térmica (W/mK)	0,15		

2.7.3 Preparación y colada

La resina ROYAPOX 5050 se puede mezclar con su endurecedor a temperatura ambiente, según la dosificación 100/40. Pero para conseguir una mejor calidad en el acabado de la aplicación, recomendamos precalentar la resina a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. El empleo de máquinas mezcladoras - dosificadoras automáticas, favorece la manipulación de este producto. Si se desea desencapsular la resina polimerizada, se



deberá aplicar nuestro agente desmoldeante en el molde. Para piezas encapsuladas que deban presentar máximas características eléctricas recomendamos realizar la colada bajo vacío.

2.8 Conclusiones del capítulo

- ✓ Se seleccionó el acero AISI 1045 para someter a la deformación plástica superficial explicando sus características y composición química ya que el mismo posee una gran capacidad de endurecimiento en frío.
- ✓ La matriz experimental a desarrollar en el proceso de deformación plástica superficial con rodillo, sobre las piezas simétricas rotativas de acero 45, permite establecer el comportamiento microestructural de las probetas después de ser traccionadas.
- ✓ Se describieron los métodos y procedimientos, así como las máquinas y equipos que permitirán dar cumplimiento al desarrollo al proceso de la observación microestructural del acero AISI 1045 cuando es sometido a un ensayo de tracción luego de ser endurecido plásticamente con rodillo.



CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSION

La deformación de los materiales se caracteriza por la composición química, las propiedades mecánicas y físicas del material, teniendo en cuenta la superficie a deformar. La elección de los parámetros durante el ensayo determinan en gran medida los resultados que queremos obtener.

El análisis de estos resultados permite evaluar el comportamiento del material AISI 1045 bajo estas condiciones de operación.

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, las expresiones matemático estadísticas que describan las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero AISI 1045 sometido a la acción de tracción luego de ser deformados por rodadura que genera un rodillo al trasladarse sobre una pieza simétrica rotativa en las condiciones descritas en los experimentos. Así mismo se revela a partir del análisis metalográfico, y los modelos experimentales obtenidos; el mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045 en las referidas condiciones.

3.1 Análisis de la composición química

Se realizó empleando un espectrómetro de Masa ESPECTROLAB con electrodo de tungsteno bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, Moa. La composición química real del material estudiado aparece en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Composición química del acero AISI 1045.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
Contenido (%)	0,46	0,24	0,98	0,01	0,019	0,19	0,02	0,06	0,005	0,01	0,16
Elemento	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Ce	B	Zn	Fe	
Contenido (%)	0,0047	0,00	0,01	0,002	0,009	0,01	0,005	0,001	0,0034	97,82	

3.1.1 Influencia de los elementos químicos en el endurecimiento en frío

Para estudiar el comportamiento de las cualidades superficiales de las piezas tratadas en la Deformación Plástica Superficial por Rodillo se hace necesario saber la influencia que ejerce cada elemento durante el proceso.



Carbono: es el ingrediente fundamental en el acero, ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad. El aumento del carbono en el conformado por rodadura eleva de forma creciente una resistencia al desgaste.

Cromo: la adición del elemento cromo origina la formación de diversos carburos de cromo que son muy duros; sin embargo, el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza producido simplemente al incrementar su contenido de carbono. La adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura.

Níquel: la adición de níquel al acero amplía el nivel crítico de temperatura, no forma carburos u óxidos. Esto aumenta la resistencia sin disminuir la ductilidad. El cromo se utiliza con frecuencia junto con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que aporta el cromo. En la deformación en frío aumenta la resistencia y conformabilidad del acero.

Manganeso: se adiciona a todos los aceros como agente de desoxidación y desulfuración, pero si el contenido de manganeso es superior al 1 %, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso. Reduce el intervalo crítico de temperaturas.

Silicio: eleva la resistencia, la elasticidad y la conductividad magnética del acero. Un elevado contenido de silicio en el acero dificulta la conformación del acero. En los aceros al carbono no debe exceder de 0,3 a 0,4 %.

Molibdeno: el molibdeno forma carburos y también se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad. El molibdeno baja sustancialmente el punto de transformación. Debido a esto, el molibdeno es de lo más eficaz para impartir propiedades deseables de templabilidad en aceite o en aire. Exceptuando al carbono, es el que tiene el mayor efecto endurecedor y un alto grado de tenacidad.

Azufre: forma con el hierro combinaciones químicas, sulfuros de hierro, que hacen que el acero calentado al rojo sea quebradizo. Este elemento es perjudicial en el proceso de tratamiento térmico, el mismo se disuelve en el hierro, no obstante en el conformado en frío no hay elevadas temperaturas que provoque una alteración en la formación de fase.



El fósforo: se encuentra siempre disuelto en los granos de ferrita a los que comunica gran fragilidad. Es un elemento perjudicial porque reduce considerablemente la tenacidad y origina fragilidad en frío.

El cobre: ofrece una elevada conductividad del calor, y aporta al acero ductilidad, introduce resistencia a la corrosión. En el trabajo en frío eleva la resistencia y dureza del acero y en proporciones inferiores a 0,5, aumenta también su conformabilidad.

Como se aprecia en la bibliografía consultada, está relacionada la influencia de los elementos de aleación con las propiedades mecánicas y funcionales de los aceros AISI 1045. Es significativo el papel que tiene el manganeso (en el rango de 0,65 a 0,90 %) conjuntamente con el carbono en el incremento de la resistencia mecánica, particularmente la resistencia a la dureza, al igual que la capacidad de endurecimiento por rodadura; las cuales constituyen las propiedades que se quieren obtener en las piezas que se fabrican con este material.

3.2 Análisis de la elaboración mecánica de las probetas

Los regímenes de corte dependen de las propiedades del material, del tipo de cuchilla y el tipo de elaboración, el acero AISI 1045, es un material de buena maquinabilidad y permite un buen acabado superficial, no obstante en estos materiales puede aparecer el fenómeno de acritud por lo que fueron refrigeradas.

Casillas (1987), Fernández, (2008), recomiendan que para el maquinado de estos aceros la frecuencia de rotación (n), se debe tomar entre valores de 125 a 250 rev/min, y el s = 0,3...0,4, considerando la fiabilidad del equipo adoptamos como:

n = 250 rev/min y s = 0,2 mm/rev. Sustituyendo en la ecuación (2.1), entonces:

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 22 \cdot 250}{1000} = 0,131 \text{ m/s}$$

La velocidad de corte que se empleará durante el proceso agilizará el proceso, obteniendo un buen acabado, pero además evitará el deterioro de la herramienta cortante.



3.2.1 Obtención de la profundidad de corte

Para una barra de acero laminado con diámetro igual a 20 mm según la ecuación (2.2), entonces sería:

$$t = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}$$

La profundidad de corte a desbastar sería es 5 mm, si se tiene en cuenta que en las operaciones de torneado al desbastar en una pieza cilíndrica, 5 mm representa entonces desbastar 2 mm, y como son 10 mm a quedar por las características que establece la norma NTC 595 (probeta tipo M II) para la elaboración.

3.2.2 Determinación del tiempo de maquinado

El tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo durante el refrentado, sustituyendo en la ecuación (2.3), sería:

$$T_m = \frac{11,5}{250 \cdot 0,2} \cdot 1 = 0,23 \text{ min}$$

Este resultado es solo para una probeta y como se prepararán 10 probetas para esta operación, entonces el tiempo total sería 2,30 min.

El tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo durante el corte, sustituyendo en la ecuación (2.3), sería:

$$T_m = \frac{9}{250 \cdot 0,2} \cdot 1 = 0,18 \text{ min}$$

Este resultado es solo para una probeta y como se tronzaron 10 probetas en esta operación, entonces el tiempo total sería 1,8 min

$$\sum T_m = T_{mR} + T_{mT} = 4,1 \text{ min}$$

Es decir, que el tiempo que ha de invertirse en estas dos operaciones es de 4,1 min, en este tiempo no se considera otros tiempos del proceso tecnológico como tiempo auxiliar (ta), tiempo de descanso y necesidades personales (tdnp), tiempo de servicio al puesto de trabajo (tspt), entre otros.



3.3 Montaje de muestras

Como las muestras son pequeñas y de difícil manejo en las operaciones de desbaste y pulido, fue necesario montarlas en la resina Epoxi ROYAPOX – 5050, la cual endurece en frío.

3.3.1 Montaje en frío

La reacción química se mezcló 100/40, luego fue vertida en el área donde se encontraban las probetas, las cuales se colocaron en un recipiente plástico de 15 mm de diámetro x 10 mm de altura, que permitiera la manipulación para el desbaste y el pulido, su posterior ubicación en el microscopio óptico para la toma de las impresiones metalográficas.

Pulidas las probetas se atacó con nital al 4 %, este reactivo químico a esta proporción resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos del acero AISI 1045. Pone en manifiesto las uniones de los granos de ferrita, la perlita se ennegrece y la cementita se mantiene blanca.

3.4 Análisis Metalográfico

Para dar cumplimiento al diseño de experimento propuesto y evaluar el comportamiento microestructural según las diferentes formas en que fueron deformadas y traccionadas las probetas se analizan las tablas desde la 2.2 hasta la 2.10

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero AISI 1045. Se tomó como referencia dos muestras metalográficas considerando la muestra patrón sin deformar y la otra muestra patrón traccionada sin deformar.

La justificación de la probeta sin deformar está dado en que como no se ha sometido a ningún proceso la estructura cristalina se mantiene invariante, sin embargo la probeta sin deformar y traccionada está sujeta a cambio en su red cristalina producto de las tensiones. Considerando el gráfico $\sigma - \epsilon$, el material al ser traccionado transita por 5 etapas como se puedes observar en la figura 3.1.

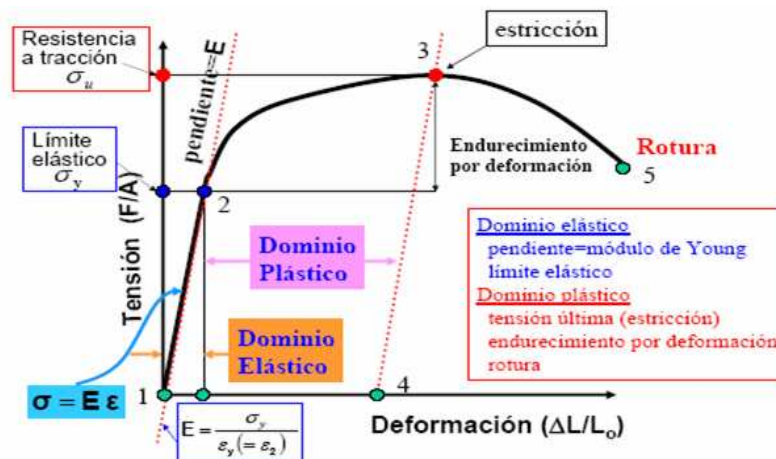


Figura 3.1 Muestra la curva ingenieril tenso- deformación de un acero común.

1. Deformaciones elásticas. Como en esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial, no existe cambio en su microestructura.

2. Fluencia o cedencia. Aquí se logran liberar las dislocaciones (mecanismo de endurecimiento) el material comienza a presentar cambios en la red cristalina.

3. Deformaciones plásticas. Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica. Ya el material experimenta transformaciones considerables y cambia el tamaño del grano.

4. Estricción. Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. Las tensiones no disminuyen hasta la rotura.

3.5 Análisis microestructural

Fueron observadas probetas sin deformar en el centro, y con deformación en los bordes, de acuerdo con el diseño de observación expuesto en el capítulo anterior en el epígrafe 2.2, con un rango de aumento de 400X.

Se analizará el comportamiento de las probetas en correspondencia con el diseño de experimento, desde el valor mínimo hasta el máximo.

Para el nivel mínimo donde el valor de la fuerza fue 500 MPa, 27 rev/min y los avances de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev respectivamente.

Fuerza de 500 N y $n = 27$ rev/min

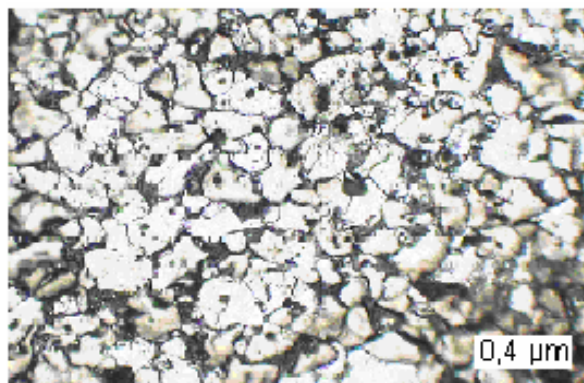


Figura 1. Acero sin deformar

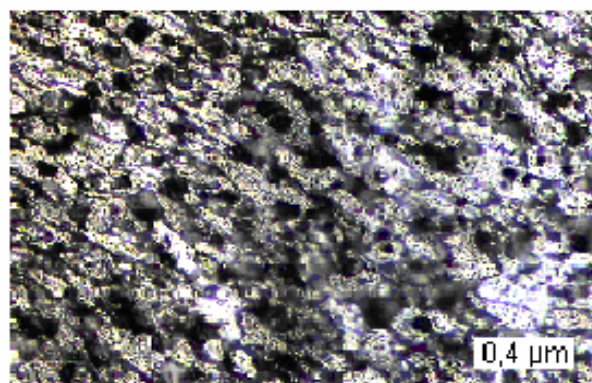


Figura 1a. Acero deformado con avance de 0,075 mm/rev

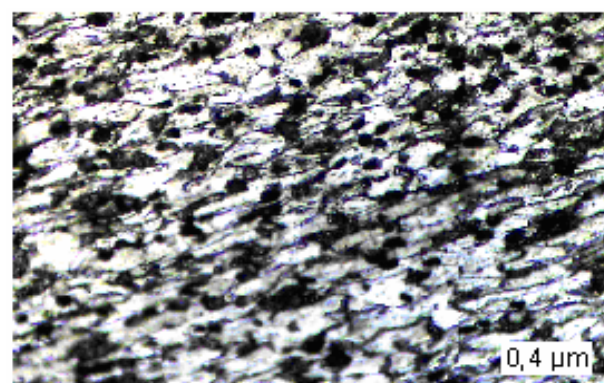


Figura 2. Acero deformado con avance de 0,125 mm/rev

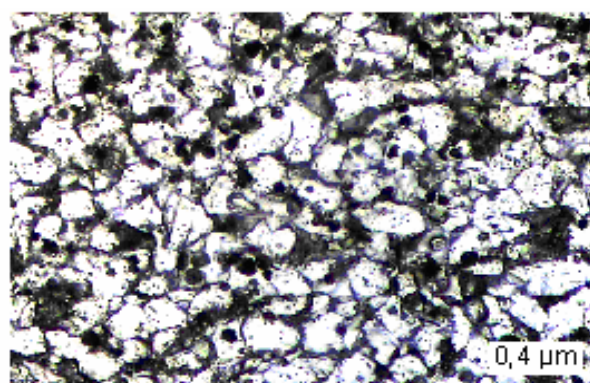


Figura 3. Acero deformado con avance de 0,25 mm/rev

Al comenzar el proceso, se observa en la figuras 1a, 2, 3, como comienza el proceso de deformación de la red cristalina del material con el alargamiento de los granos. La capa endurecida ofrece resistencia al ser traccionada, en comparación con la tensión de rotura de un material sin deformar 673,7 [MPa], aquí se necesitó de 855 [MPa] para provocar la rotura, al introducir valores de fuerza externo en el material el mismo se va tensionando y apareciendo el fenómeno de acritud.

Fuerza de 1 500 N y $n = 54$ rev/min

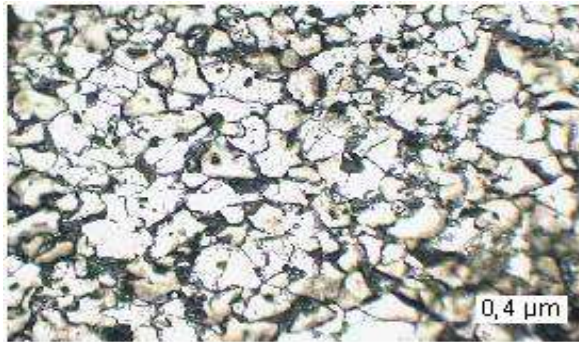


Figura 1. Acero sin deformar

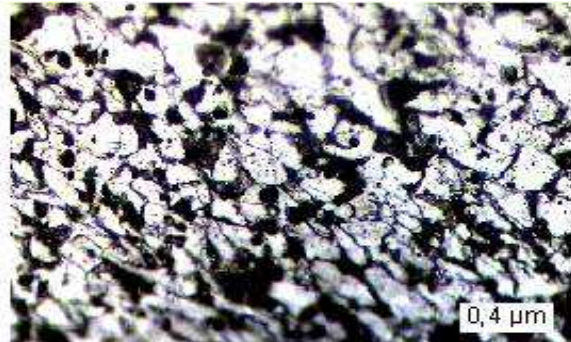


Figura 4. Acero deformado con avance de 0,075 mm/rev

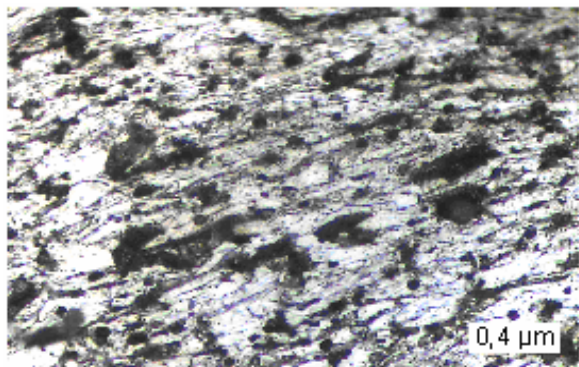


Figura 5. Acero deformado con avance de 0,125 mm/rev

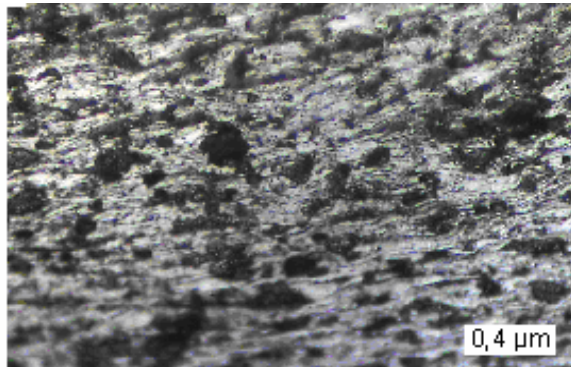


Figura 6. Acero deformado con avance de 0,25 mm/rev

En las figuras 4, 5, 6, correspondiente al nivel medio, en iguales condiciones de operación, pero con el aumento de la fuerza y el número de revolución, se observa mayor agrupación de los granos en la red cristalina, aquí para esta fuerza se incrementan las tensiones, el material ofrece mayor resistencia a ser deformado, los granos presentan una disminución más acentuada, sigue endureciendo por que se ha incrementado el nivel de fuerza y las tensiones remanentes son más intensas.

Las variables empleadas son proporcionales una con otra ya que en la medida que se incrementan las mismas se va incrementando el nivel de deformación.

Fuerza de 2 500 N y $n = 110$ rev/min.

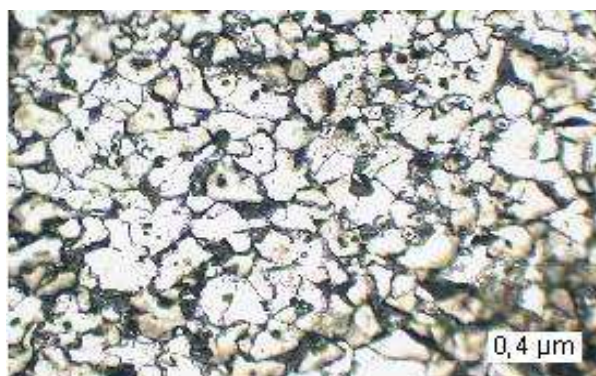


Figura 1. Acero sin deformar

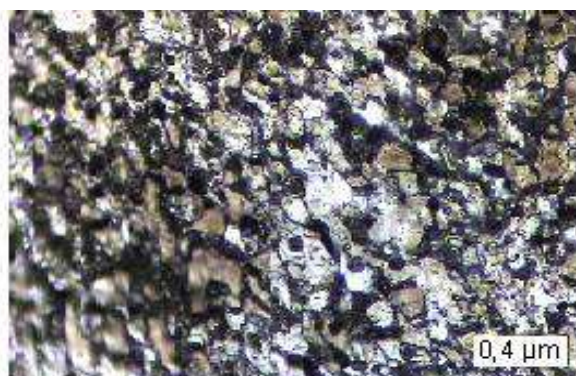


Figura 7. Acero deformado con avance de 0,075 mm/rev

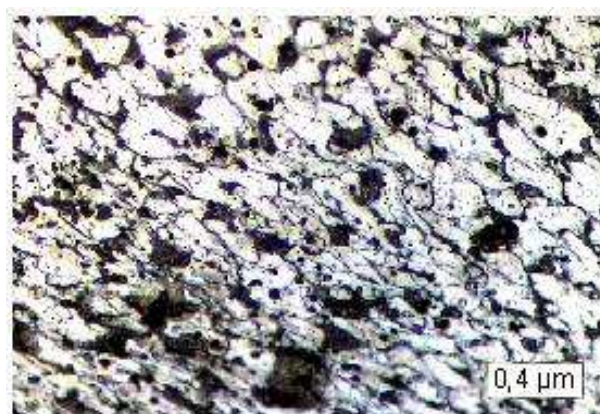


Figura 8. Acero deformado con avance de 0,125 mm/rev

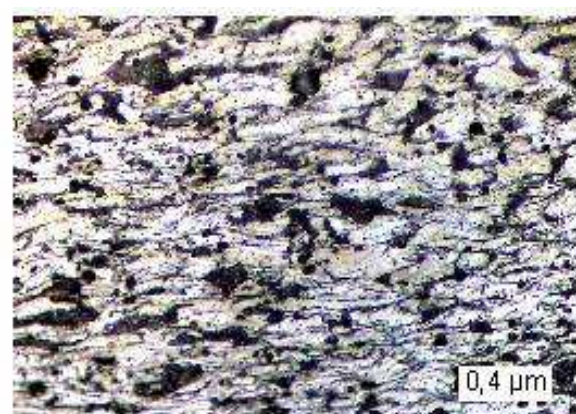


Figura 9. Acero deformado con avance de 0,25 mm/rev

En el máximo nivel se observa mayor compactación de los granos, lo cual está motivado por el incremento de las variables n , S y P .

En las probetas sometidas a deformación, podemos observar una estructura bifásica de ferrita - perlita lo que demuestra que el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura y luego traccionado, ocurre por el fenómeno de las dislocaciones y no por el cambio de fase. Los límites de los granos se hacen más finos en la medida que se va incrementando la fuerza que se introduce a través de la herramienta de deformar y la tracción, se observa el deslizamiento en los granos.

Después de ser sometidas a la acción de cargas por rodadura y traccionadas en las probeta se notan vestigios de deformación plástica, con bloques de la estructura en mosaico divididos en pequeñas proporciones y una deformación clara de la red cristalina,



típico del fenómeno de la acritud. Las micrografías mostradas con un aumento del microscopio (400x) corresponden a los diferentes niveles en la que fueron deformadas.

Como se aprecia, la capacidad de endurecimiento (H) tiene un comportamiento creciente en la misma medida que se incrementan las variables del proceso de experimentación (n; S, y P), este resultado se corresponde con la hipótesis de que al incrementar las tensiones de compresión surge un estado tensional que lo deforma, incrementando su dureza final, de esta forma se reducen los niveles de desgaste mejorando el comportamiento del material en correspondencia con el mecanismo de endurecimiento.

El endurecimiento del metal de la capa superficial de la pieza en la Deformación Plástica Superficial por rodillo se desarrolla como resultado del arrugado de la microirregularidades producidas por el tratamiento.

Debido a que la deformación plástica representa en sí el movimiento de las dislocaciones por los planos de deslizamiento con su salida a la superficie de los cristales, es que el surgimiento de cualquier tipo de obstáculo, capaz de dificultar el movimiento de las dislocaciones provoca el endurecimiento del policristal y el incremento de su resistencia (Alfonso, 2002). Entre los referidos obstáculos están, ante todo, otras dislocaciones que se encuentran en el cristal. Este frenaje al movimiento se logra a través de la reducción del tamaño de grano, como ha sido demostrado como consecuencia del endurecimiento por deformación plástica (acritud).

El incremento de la dureza en las probetas, de 205 a 448 HV, a partir de un valor inicial promedio igual a 170 HB en las probetas patrón, se produce entre otras causas, por la reducción que provoca en el tamaño del grano la acción de las cargas por rodadura. Los bordes de los granos son una barrera para el desplazamiento de las dislocaciones (Callister; 1999; Guliáev; 1983; Subramanyam et al, 1999 y Buraya, 2001). Al reducirse el tamaño de grano, aumenta el número de barreras que frenan el desplazamiento de las dislocaciones; esto se debe a que el desorden atómico existente en el borde de grano traerá como resultado una discontinuidad de los planos de deslizamiento de un grano a otro. Es decir, la reducción del tamaño del grano ferrítico lo hace más duro y más resistente debido a que aumenta el área total de fronteras de grano que impiden el movimiento de las dislocaciones (Alfonso, 2002).



3.6 Análisis de la microdureza

En correspondencia con la distribución de las probetas deformadas y la tabla establecida en el capítulo II epígrafe 2.2, la distribución de las medidas de microdurezas realizadas (tres) por cada muestra, estos resultados se recogen en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Mediciones de microdureza.

Número de ensayo	Salidas			Media
	HV1	HV2	HV3	HV
1a	205	210	224	213
1b	205	210	225	213
1c	204	216	224	214
2a	316	324	328	322
2b	314	326	326	322
2c	312	324	326	320
3a	416	418	427	420
3b	416	418	430	421
3c	414	448	432	431

Los resultados obtenidos en la microdureza guardan relación con el comportamiento microestructural, se pueden observar que en las medidas que fueron introducidas las variables Fuerza (P), avance (S) y número de revolución (n), y esta fue incrementándose, los granos del material se fueron deformando y apilándose dando lugar a que la superficie del material se endureciera, la dureza fue incrementando de 205 hasta 448 HV.

El endurecimiento del material no ocurre por el cambio de fase, en el diagrama hierro carbono, para un acero de red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) como el acero AISI 1045 de medio contenido de carbono, presenta buenos planos de deslizamiento, puede endurecer en frío o en caliente.

Cuando endurece en caliente se requiere elevar la temperatura por encima de 727 °C y enfriarlo en agua o aceite, obteniéndose en su estructura martensita, no hay presencia de acritud, ya que esta es una actitud que presentan los aceros de adquirir dureza en frío, como es el caso de las estructuras obtenidas.



Se puede plantear que el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 está motivado por dos causas:

1. Al ser sometida al proceso de deformación superficial por rodillo, que provoca la acritud por tensiones de compresión
2. Al ser traccionada, que provoca la aparición de acritud motivo a las tensiones de tracción.

3.7 Valoración Económica

Al abordar la valoración técnico económica del proceso de Deformación Plástica Superficial por rodadura, como alternativa tecnológica para la dureza superficial de las piezas, y a partir de las ventajas de este tratamiento establecidas en el Capítulo I por la revisión bibliográfica, se parte del hecho de que el mismo es altamente beneficioso para mejorar la calidad superficial de las piezas en forma integral, porque mejora la rugosidad superficial y las cualidades físico mecánicas de la superficie. Todo ello sin dudas repercute económicamente durante el proceso de explotación de las piezas así tratadas, al incrementar su durabilidad por tener mayor resistencia al desgaste y a la corrosión, aumenta su fiabilidad por tener mayor resistencia a la rotura por incremento de la resistencia de las piezas y mayor resistencia a la fatiga, lo que condiciona un funcionamiento más eficiente de la maquinaria en general.

Para la estimación de los costos de fabricación que se desean determinar se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que en formato de hoja de cálculo se utiliza como Norma empresarial en la Empresa Mecánica del Níquel Comandante “Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa, para calcular las fichas de costo. Dicho documento, elaborado conjuntamente por los Ministerios de Finanzas y de Economía y Planificación, es por el cual se rige la empresa, realizando sus adecuaciones según las características particulares de cada tipo de pieza.

La metodología empleada está destinada para el estimado del cálculo del costo de fabricación para diferentes procesos tecnológicos que se llevan a cabo en dicha industria, poseyendo además una amplia y actualizada base de datos que comprende tarifas salariales, máquinas herramienta y sus consumos de energía eléctrica, precios de

materiales, entre otros. A los efectos de la valoración económica de los resultados de la presente tesis, resulta factible emplear esta norma por cuanto posee una base de información de larga data en dicha empresa, además de su probada efectividad en las transacciones económico-financieras de dicho centro.

A fin de revelar las ventajas en el orden técnico-económico, se procederá a relacionar el costo del proceso, el gasto de materiales en que se ha incurrido. Estos elementos aparecen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Costo total del proceso.

Descripción		Unidades	Cantidad	Tasa (CUP)	Tasa (CUC)	Importe (CUP)	Importe (CUC)
Materiales	Acero AISI 1045	kg	0,050	1,25		0,06	
	Cuchilla de refrentado	kg	0,039	10,00		0,39	
	Cuchilla de tronzado	kg	0,004	20,00		0,08	
	Resina de Epoxi Royapox 5050	kg	0,050		0,86		0,04
	Lijas	U	0,800		1,28		1,02
	Alcohol clase A	L	0,100		0,50		0,05
	Ácido nítrico	L	0,005		17,49		0,09
Mano de Obra Dir	Tornero A	Horas	0,068	4,18		0,28	
	Técnica de Laboratorio	Horas	1,000	3,62		3,62	
Costos Indirectos	Energía Torno	KW/h	0,680	0,66		0,45	
	Energía Microscopio	kW/h	2,000	0,66		1,32	
	Energía Pulidora	KW/h	1,750	0,66		1,16	
	Emisión óptica	U	1,000	1,04	0,25	1,04	0,25
	Clasificación de materiales	U	1,000	0,15	0,47	0,15	0,47
	Total para una Probeta					8,55	1,92
Total para diez Probeta						85,53	19,23

3.8 Costo de la pieza endurecida por deformación plástica superficial

Una vez calculados los tiempos para la elaboración de la pieza Deformada Plásticamente, y traccionada, teniendo en cuenta la incidencia de máquinas, operarios, energía eléctrica, el costo estimado de fabricación de la pieza por el proceso es de 85,53 CUP y los costos por concepto de cobro en CUC es: 19,23.

3.9 Valoración del impacto medio ambiental

En el proceso de maquinado se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, ya que en su composición poseen elementos que pueden ser lixiviables, bajo la acción de las temperaturas altas y las lluvias, pasan a las aguas



subterráneas contaminándolas. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.

El empleo de tratamientos térmicos para lograr durezas superficiales en las piezas conlleva al menos a un mayor consumo de energía eléctrica donde casi siempre la pieza adquiere un temple volumétrico (como en el caso del temple y revenido) con el lógico despilfarro de energía, también porque emplean equipos que son altamente consumidores de energía eléctrica.

Adicionalmente, para diferentes variantes de tratamiento térmicos se utilizan en ocasiones una serie de productos químicos y de combustibles, sólidos y gaseosos, que generan gases contaminantes al medio ambiente (vapores de sales, monóxido de carbono), además de desechos sólidos (grasas sólidas, aceites, restos de combustibles líquidos). También es conocido que la mayor parte de los residuos generados por la industria de tratamiento térmico proviene de los baños usados (por ejemplo, soluciones de cianuro), agentes enfriadores empleados, aguas residuales de la limpieza de piezas, medios abrasivos utilizados, material refractario y procesos de revestimiento que en mayor o menor medida afectan sensiblemente a la salud humana y son potencialmente peligrosos como agentes contaminantes del entorno. Las implicaciones económicas y sociales que todo esto representa son universalmente conocidas, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen.

En este sentido resulta importante reiterar que la aplicación del proceso tecnológico conocido como Deformación Plástica Superficial por rodillo, en muchos casos, evita o hace innecesario el empleo de estas tecnologías contaminantes del medio ambiente y altas consumidoras de energía, pues las propiedades físico-mecánicas se pueden lograr de las reservas internas del material de la propia pieza, que se manifiestan a partir de la deformación en frío de su superficie en forma controlada. Incluso dicho proceso posee la ventaja adicional de que no induce efectos colaterales negativos en la pieza como en el caso del temple donde hay que aplicar tratamientos adicionales para eliminar las tensiones surgidas.



3.10 Conclusiones del capítulo

- ❖ Los resultados del análisis metalográfico, revelan en las muestras deformadas y traccionadas de acero AISI 1045 una estructura de ferrita - perlítica, antes y después del tratamiento con rodadura. No se detectó la presencia de aparición de nuevas fases por el trabajo de compresión dinámica. Se comprobó la reducción del tamaño del grano.
- ❖ La ocurrencia del endurecimiento a través del mecanismo de deslizamiento se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos y el aumento de la acritud.
- ❖ El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante la deformación Plástica Superficial por rodillo de piezas fabricadas de acero AISI 1045, es técnicamente factible y económicamente racional debido a que su costo de fabricación es de 19,23 CUC y 85,53 CUP.
- ❖ Desde el punto de vista social y ambiental se contribuye a evitar los riesgos de contaminación y la expulsión a la atmósfera de polvos nocivos que son perjudiciales a la salud humana.



CONCLUSIONES GENERALES:

Se determinaron las regularidades del comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido mediante Deformación Plástica Superficial por rodillo, donde se produce un incremento de la dureza de 205 a 448 HV, proporcionándole al acero una estructura cristalina similar a la obtenida antes de ser sometida a ensayos de microscopía óptica.

- ❖ La observación metalográfica demuestran la ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento que endurece el acero por acritud. No se detectó cambio de fase en la estructura por efecto de la compresión.
- ❖ La ocurrencia del mecanismo de deslizamiento se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos, y el aumento de la acritud y de los parámetros que caracterizan la capacidad de endurecimiento del material como resultado del trabajo de deformación en frío.
- ❖ Del análisis metalográfico, se revelan que las muestras deformadas y traccionadas de acero AISI 1045 tienen una estructura de ferrita - perlítica, el tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos y el aumento de la acritud basado en un proceso tecnológico de fabricación que no genera impactos negativos al medio ambiente y técnicamente factible y económico.



RECOMENDACIONES:

- ❖ Aplicar el procedimiento tecnológico descrito en el trabajo para el endurecimiento mediante Deformación Plástica Superficial de las piezas simétricas rotativas fabricadas de acero AISI 1045.
- ❖ Generalizar los resultados de esta investigación en las industrias del níquel, y otras empresas donde se utilizan componentes fabricados de aceros AISI 1045 y que deben ser sometidos a régimen de tratamiento térmico para incrementar su resistencia al desgaste y la fatiga.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. Alfonso, E. et. al. 1995. Investigación del mecanismo de formación de la acritud y tensiones residuales en las capas superficiales durante el proceso de corte de piezas endurecidas, p.52- 56, Construcción de Maquinarias (Santa Clara). No. 1.
2. Alfonso, E. 2002. Apuntes sobre la interrelación composición–microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas.
3. Álvarez, et al E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. 1999. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería.
4. Álvarez, et al E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. 2004. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería.
5. Badiola, V. 2004. Materiales Departamento. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Diseño de Máquinas I, España.
6. Barceinas, S y A.Juárez, H. 2001. Propiedades, Fortalecimiento y Comportamiento de los Materiales, Capítulo IV.
7. Boyle, J.y Spence, J. 1989. Stress analysis for creep. Londres: Butteerwoths.
8. Buraya, D. 2001. Cristal Structure Analisys. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Materials Science and Engineering (3–0) 3. Disponible en la World Wide Web. <http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm>.
9. Callister, W. 1999. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.
10. Casillas, A. 1987. “Cálculo de taller”. 5ª ed., Madrid, España. Pág. 316-321.
11. Coromant Korokey. 1996. Guía de aplicación de herramientas. Pág. 38-43.
12. Davidenkov, N. 1946. Analysis of the state of stress in the neck of a tension test specimen. En Proceedings of American Society of Testing Materials, tomo 46, pags. 1147 – 1158.
13. Dieter, G. 1967. Metalurgia Mecánica. MacGraw-Hill Book Company, Inc.
14. Fernández, T.C, Rodríguez, I.G; Alcántara, D.B. 2008. Estructura cristalina del acero AISI 1045 deformado plásticamente. Año XIV, No. 4. ISSN 1027 – 2127. Diciembre.
15. Guliaev, A. 1983. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. Pág. 53-89.
16. Guliaev, A. 1983. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. Pág. 17-22.



17. Hu-Nai-Sai y Zhou Hui-Jiu. 2002. The Effect of Surface Plastic Deformation on Fatigue Strength and its Mechanism. University Xian, China.
18. Korotcishe.L. 1989. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. Pág 53-64.
19. Kruschov, M.M. 1957. Resistance of metals to wear by abrasion, as related to hardness. “Proceedings of Conference on Lubrication and Wear”. London 55- 59.
20. Lajtin, Y. 1985. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. p 359–360.
21. Lin, Y.C. Yan, B.H., Huang, F.Y. 2001. “Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi method”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 18, No. 9, Pages 673 - 682, UK.
22. Lubriner, J. 1986. Plasticity Theory. University of California at Berkeley. Charter 2, pág 77-86.
23. Ludwigson. 1971. Modified Stress-Strain Relation for FCC Metals and Alloys, Metallurgical Transactions, Vol. 2, pp 2825-2828.
24. Martynenko, O.V, 2002. “The interconnection of strained condition in the area of contact with the kinematics of points of deformed surface points by the rollers plastic deformation of the surface”, Proceeding of Fundamental and application problems of machine building technology International Conference, Technology , March 1-September 10, Tula Technical University, Russia.
25. Mazein, P.G. Prusakov, D.V., Tchunin, A.V. 2001. “Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations”, Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue #1, (10). January-March, Russia.
26. Moreno, P. A. 2005. “Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas "Dpto. Mecánica de medios continuos. Universidad de Sevilla. Obtenido de la Red mundial el Lunes 28 de Febrero .
27. Moya, J.C. 1996. “Investigación teórico-experimental de la influencia del proceso de rodilado en las cualidades microgeométricas y fisico-mecánicas del acero 30XH3A”, Trabajo de Titulación de Maestría, UCLV, Cuba.
28. Olsson A. 2001. Stainless Steel Plasticity – Material Modelling and Structural Applications”, PhD Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
29. Ott, G.A. 1996. The Influence of Roll Metallurgy on the Wear Characteristics of Forged Hardened Steel Rolls. Rolls 2000, Birmingham.



30. Pero-Sanz, J.A. 1999. "Ciencia de los materiales. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, España.
31. Pero-Sanz, J.A. 2000. "Ciencia de los Materiales. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 3ra Edición. Pág 393-502. España.
32. Pickering, F.B. 1983. Proceedings of High Manganese Steel, ASTM A 128 AB. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 34 p.
33. Piñeiro, A.C. 2009. Obtención de la curva tenso-deformacional del Acero AISI-1045 endurecido por Deformación Plástica Superficial con rodillo.
34. Samuel, 2006. Stress-Strain Relations in Assessing the Strain Hardening Parameters, Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 39, pp. 203-212.
35. Smelianky, et al. 1990. "Empleo de las posibilidades plásticas de los metales en la capa superficial de las piezas durante la elaboración por rodilado exterior." Revista "Novedades de la Construcción de Maquinarias". Moscú. Pág. 54-58. No. 8. URSS.
36. Smelianky, V.M., Blumenstein, V.Yu. 2001. "Technological succession mechanics succession appropriatenesses of the plasticity resource exhaustion at the stage of surface plastic deformation", Proceeding of International Conference of Materials", May, Russia.
37. Subramanyan, D K; et al. 1999. Austenitic Manganese Steel. ASTM. Specialty Steel and Heat Resistant Alloys. ASTM Hanbook. USA. pag 822-840.
38. Smith, W.F. 2003. "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales", Mc Graw-Hill, España.