



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO. INGENIERIA MECANICA

TRABAJO DE DIPLOMA

TITULO

COMPORTAMIENTO
DE LAS CAPAS SUPERFICIALES
DURANTE LA DEFORMACION PLASTICA
POR RODADURA

AUTOR: José Javier Almaguer Wilson

TUTORES: MSc. Tomás Fernández Columbié
Ing. Dayanis Alcántara Borges

Curso 2008 – 2009
“Año 50 de la Revolución”



Declaración de Autoridad:

Yo: José Javier Almaguer Wilson.

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Nuñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

José J. Almaguer Wilson

MSc. Tomás Fernández Columbié

Ing. Dayanis Alcántara Borges



AGRADECIMIENTOS:

Quisiera agradecer a muchas personas de todo corazón por el apoyo y la confianza que tuvieron en mi en uno de los peores momentos de mi vida (ellos saben quienes son), solo que no alcanzaría esta pequeña cuartilla. Pero si hay lugar para las personas que tuvieron que ver directamente en la realización del presente trabajo. A Nomo y a Geudis que me ayudaron a cortar las probetas, a Castillo y a Pavel que me ayudaron en la preparación de las mismas y a Jacho y Jhonitin que me ayudaron a dar lija, a Adita por prestarme su computadora para trabajar. A mis tutores y a Monchi y especialmente a Aixa Wilson y José Almaguer, mis padres.



Resumen:

.El trabajo muestra las técnicas empleadas en un diseño de experimento que permite evaluar el comportamiento de las variables independientes fuerza (P), desde 500 hasta 2500 N, número de revolución (n) mínimo 27, medio 54 y máximo 110 rev/min y avance (s), 0,075, 0, 125 y 0,25 mm/rev, para determinar el comportamiento de la variable dependiente dureza (H), cuando una probeta de acero AISI 1045 es sometida a tratamiento superficial por rodadura para crear un estado compresivo que lo deforme e incremente su resistencia al desgaste y la fatiga. Se realiza el procesamiento estadístico de las variables involucradas en el proceso donde se demuestra el incremento de la dureza desde 220 hasta 262 HV. Se empleó el método de microscopía óptica para analizar el efecto del endurecimiento por deformación, estableciendo el mecanismo de endurecimiento del acero por el deslizamiento de los granos en la red cristalina por el fenómeno de la acritud.

Abstract:

This work presents the techniques used in an experimental design leading to evaluating the behaviour of an independent variable force (P), ranging from 500 up to 2500 N, 27 minimum revolution number (n), average 54 and maximum 110 rev/min and 0.075, 0, 125 and 0.25 mm/rev advance for determining the dependent hardness (H) pattern when AISI 1045 steel test tubes were subjected to surface rolling for creating a compressive state deforming and increasing its resistance to abrasive wear and fatigue. The variables involved in the process were statistically analysed, revealing increased hardness ranging from 220 up to 262 HV. Optical microscopy was used for analysing the effect of hardening caused by deformation, establishing a mechanism for hardening steel by the elements in the crystalline network sliding due to burnishing.



TABLA DE CONTENIDO

SINTESIS.		PAG
INTRODUCCIÓN.		1
CAPITULO I: MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION.		6
1.1.	Introducción	6
1.1.1.	Principio de la Deformación Plástica Superficial por rodillo.	8
1.1.2	Generalidades acerca del acero AISI 1045 y su empleo industrial.	9
1.1.2.1	Composición química del Acero AISI 1045.	10
1.1.2.1.1	Propiedades físico mecánica del Acero AISI 1045.	12
1.3.	Microestructura de los aceros al carbono.	13
1.3.1.	Ferrita (hierro α).	13
1.3.3.1	Perlita.	14
1.3.2.	Estructuras cristalográficas.	14
1.3.3.	Redes cristalinas.	15
1.3.3.1	Clasificación de las redes cristalinas	16
1.4.	Deslizamiento y maclado.	17
1.4.1.	Dislocaciones y endurecimiento.	19
1.4.2.	Fundamento de las tensiones y las deformaciones en los procesos de Deformación Plástica Superficial.	21
1.4.3.	Endurecimiento por deformación en frío (acritud).	23
1.5.	Conclusiones del capítulo I.	25
CAPITULO II: MATERIALES Y METODOS:		26
2.1.	Introducción.	26
2.1.1.	Generalidades del proceso.	26
2.2.	Análisis del material deformado plásticamente por rodillo.	26
2.2.1	Análisis microestructural.	27
2.2.2.	Diagrama hierro carbono.	28
2.3.	Diseño del experimento.	29
2.3.1.	Propuesta del modelo del diseño del experimento.	29
2.4.	Presión ejercida por la herramienta.	30
2.4.1.	Número de revoluciones del husillo.	30
2.4.1.1	Avance de la herramienta.	30
2.4.1.2	Dureza superficial.	30
2.5	Máquinas y equipos empleados en la experimentación. .	31
2.5.1.	El torno 16 D 20.	31
2.5.2	Herramienta de Corte	31
2.6	Preparación metalográfica de la probeta	32
2.6.1	Generalidades	32
2.6.1.1	Selección de la muestra	33
2.6.1.2	Corte de la probeta	33
2.6.1.3	Montaje de la probeta	33
2.6.1.4	Desbaste	33
2.6.1.5	Pulido	34
2.6.1.6	Observación microscópica	34



2.6.1.7	Ataque químico	35
2.7	Corte de la probeta	35
2.7.1	Velocidad de corte	35
2.8	Selección del elemento desformante	37
2.9	Método de identificación de las microestructuras en las probetas	38
2.10	Conclusiones del capítulo II	40
CAPITULO III: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSION:		41
3.1	Introducción.	41
3.1.1	Definición de conceptos.	41
3.2	Análisis de la elaboración mecánica de las probetas.	42
3.2.1	Corte.	42
3.2.1.1	Desbaste y pulido.	43
3.2.1.2	Lavado y desengrasado.	44
3.2.1.3	Ataque químico.	44
3.2.1.4	Observación con microscópica óptica.	44
3.3	Valoración económica.	47
3.3.1	Generalidades.	47
3.3.1.1	Costos de materiales empleados.	48
3.4	Impacto ambiental.	49
3.5	Conclusiones del capítulo III.	50
CONCLUSIONES.		51
RECOMENDACIONES.		51
BIBLIOGRAFÍAS.		52



Introducción:

El proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple es un método alternativo ventajoso respecto a los esquemas tecnológicos tradicionales empleados para aumentar la calidad de las superficies de las piezas, con mayor eficiencia técnico-económica y menor contaminación del medio ambiente. Existen diversos procedimientos para el empleo de la deformación plástica superficial como alternativa de endurecimiento de las piezas, siendo el rodilado o rodillado por rodillo simple o monorrodillo, un proceso muy empleado en la deformación plástica superficial. El mismo resulta sencillo, de fácil aplicación, y es posible emplearlo en una gran variedad de piezas y de metales.

Las propiedades mecánicas y funcionales idóneas en el acero AISI 1045 para la eficaz explotación del equipamiento que lo utiliza, se han tratado de obtener por diferentes vías; mediante la aplicación de tecnologías de tratamientos térmicos y recubrimientos duros.

Uno de los procedimientos que ofrece perspectivas alentadoras para lograr el endurecimiento del acero AISI 1045 es el endurecimiento de metales por deformación plástica superficial con rodillo constituyendo un ejemplo de método novedoso que sustituyen operaciones como el tratamiento térmico, brindándole a los materiales excelentes propiedades físico-mecánicas con el mínimo de costos y sin contaminación del medio ambiente.

La deformación plástica superficial en frío es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza, el aumento del grado de deformación está muy vinculado con la aparición del fenómeno de endurecimiento y a medida que el grado de deformación es mayor, son necesarias más tensiones para continuar deformando. Por tanto el aumento del grado de deformación en frío aumenta la resistencia del metal a la deformación (Álvarez, 2004).

Los procesos deformacionales que tienen lugar en microirregularidades de las superficies en contacto están en dependencia de las presiones que se originen en las áreas reales de contacto. Si el valor de estas presiones no alcanza el límite de fluencia del material más blando las deformaciones que predominan son elásticas y el mecanismo de desgaste predominante es el de fatiga superficial. Por otro lado, el desgaste por deslizamiento tiene una gran relevancia sobre el mecanismo de desgaste por fatiga de contacto por rodadura,



ya que un aumento en el porcentaje de deslizamiento/rodadura puede causar una mayor pérdida de masa de las superficies en contacto (Bhushan, 2001; Clayton, 1996).

Lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean, esto se traduce como un aumento de la acritud en las subcapas del material.

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 cuál se inicia el fallo del material (Alvarez., 2004; Lubliner, 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-Sánchez y Juárez-Hernández, 2001).

Han sido varias las vías utilizadas para combatir el desgaste abrasivo y frenar las pérdidas que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una alta dureza superficial (Clauser, 1985).

La fatiga de contacto por rodadura ha sido identificada como la propagación de grietas iniciadas en la superficie, alrededor de defectos superficiales tales como asperezas o dientes. La iniciación de la grieta alrededor de tales defectos se piensa que esté controlada por el campo de los esfuerzos normales y cortantes.

La presión de contacto está representada por una serie de cargas puntuales que actúan en cada nodo de la superficie. La deflexión en cualquier punto del modelo puede ser determinada mediante la superposición de las deflexiones causadas por cada carga discreta (Chen, 2000).

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 puede beneficiarse por una reducción en la presión local en condiciones de deslizamiento



(Pero-Sanz, 2000). Por tanto, la influencia del deslizamiento en los esfuerzos sub-superficiales y las fallas de contacto pueden encontrarse a través de las alteraciones de la presión de contacto y no por la fricción superficial.

La industria minera constituye, en muchos países, uno de los principales renglones de la economía, el incremento de la eficiencia y la diversificación de su producción en la búsqueda de productos más competitivos, demanda de tecnologías y con ello equipos y aparatos para su desarrollo. Un componente importante del equipamiento utilizado se encuentra en fase de deterioro progresivo, exigiendo grandes esfuerzos para sustituir y recuperar los dispositivos, partes y piezas que conforman el equipamiento un ejemplo de ello lo constituyen los pasadores de las esteras de los equipos de laboreo minero.

A pesar de la gran variedad de factores que influyen en la situación planteada, tales como tipo de material, acabado superficial, régimen de explotación, entre otros aspectos se distingue por su significación en el alargamiento del período efectivo de trabajo de estos elementos: las propiedades mecánicas y tecnológicas que puedan desarrollar (Alvarez y González, 1993). Una de estas propiedades es la dureza, la cual alcanza valores considerables, lo que debía garantizar la longevidad apropiada durante la explotación de los mismos. El acero AISI 1045 es considerado en la práctica industrial como un material de buena calidad que combina elevada tenacidad-ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste a pesar de su relativa baja dureza (Bayoumi y Abdellatif, 1995).



Situación problemática:

Durante el endurecimiento por deformación plástica en frío se generan tensiones residuales a compresión aumentando la resistencia a la fatiga y la durabilidad se puede aumentar en ocasiones en decenas de veces. Se puede considerar que las tensiones residuales a compresión en las capas superficiales aumentan la resistencia al desgaste si las condiciones de fricción no llevan al aplastamiento o a la redistribución de estas tensiones. La resistencia al desgaste depende de la microdureza. El endurecimiento inicial superficial por deformaciones plásticas en frío disminuye el desgaste por frotamiento.

Durante la deformación plástica por rodadura, se distinguen tres zonas características una delante del rodillo sin deformación aún, la que está directamente en contacto con el elemento deformante, y una posterior ya fuera del contacto, en el límite de los cuales se cambia el aspecto del estado deformacional. El estudio de dichos fenómenos permitió establecer que la capa superficial del metal se forma como resultado de la trayectoria de la deformación plástica del metal, teniendo esto lugar en condiciones de deformaciones de signo variable y bajo el surgimiento de diferentes cargas internas inducidas no simétricas de carácter cíclico.

Problema:

Las teorías existentes no fundamentan el comportamiento mecánico y microestructural, de las capas en piezas simétricas rotativas fabricadas de acero AISI 1045 en condiciones de aplicación de cargas por rodadura generada por un rodillo.

Hipótesis: Después de haber aplicado carga por rodadura generada por un rodillo, a piezas simétricas rotativas fabricadas de Ac AISI 1045, es posible, a través de la observación microscópica, establecer el comportamiento mecánico microestructural y fundamentar el comportamiento de sus capas.

Objetivo:

Determinar el comportamiento microestructural de las capas deformadas en piezas fabricadas de Ac AISI 1045 en condiciones de aplicación de cargas por rodadura generada por un rodillo.



Objeto:

Comportamiento microestructural de las capas en piezas fabricadas de Ac AISI 1045.

Objetivos específicos:

1. Definir las regularidades del comportamiento microestructural de las capas deformadas en piezas fabricadas acero AISI 1045 por el método de rodadura generada por un rodillo.
2. Determinar el comportamiento de fase en las diferentes capas en piezas deformadas por el método de rodadura generada por un rodillo.
3. Realizar un análisis de las capas deformadas para las diferentes condiciones de endurecimiento.

Tareas:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Preparación de las probetas y realización de los ensayos del experimento.
3. Obtención de las regularidades del comportamiento microestructural de las capas deformadas por rodadura fabricadas de acero AISI 1045.
4. Valoración de los resultados obtenidos y fundamentación del comportamiento microestructural en capas deformadas por rodadura fabricadas de acero AISI 1045.
5. Valoración económica e impacto ambiental.

CAPITULO I

CAPITULO I. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION

I.I. Introducción.

Los equipos y maquinarias empleados en la industria cubana, MINBAS, MINAZ, SIME, MICONS, utilizan para la construcción de gran parte de sus agregados y accesorios el acero AISI 1045, teniendo en cuenta las propiedades que este posee de incrementar su dureza al ser sometido a tratamiento térmico. El acero AISI-1045 es considerado en la práctica industrial como el material que combina elevada tenacidad – ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste a pesar de su relativa baja dureza.

De acuerdo con los criterios de (Caubet, 1971 y Guliaev, 1983), el acero AISI-1045 en las condiciones de rozamiento, acompañado de grandes presiones, tiene una gran resistencia al desgaste. Este acero se utiliza fundido con menos frecuencia, permite una deformación fácil en frío, y posee la alta tenacidad y plasticidad típica de los aceros, al mismo tiempo que ofrece una buena resistencia al desgaste, esto se debe a que el proceso de endurecimiento va acompañado de la deformación plástica del metal, trayendo consigo un incremento en la fatiga residual compresiva interna y a un considerable aumento en la dureza de la superficie.

El acero AISI -1045 puede lograr unificar las propiedades de resistencia al desgaste en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de piezas de maquinarias, es un material con facilidad de conformar su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga este endurece por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación. (Várela, 2003).

Para elevar la resistencia de los metales son utilizados diferentes tipos de tratamiento térmico, los cuales constituyen adicionalmente a los métodos ya referidos otras formas de consolidación de la dureza en los materiales, es ampliamente utilizado el temple de alta frecuencia, temple en horno, cianuración, cementación, entre otros. Por lo que es muy importante considerar la composición química y la estructura del material que será tratado térmicamente. Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas a que se someten los aceros para



conseguir las propiedades y características más adecuadas a su empleo o transformación. No modifican la composición química pero sí otro factor como las propiedades mecánicas. No obstante con estos métodos de endurecimiento traen consigo grandes consumo de portadores energéticos y daños al medio ambiente por emisión de gases, calor aceite, sales.

Se ha podido establecer que la Deformación Plástica Superficial por rodillo comenzó a emplearse en Alemania en la década de los años 20 del pasado siglo, y en la década siguiente fue introducido en los Estados Unidos fundamentalmente para mejorar la resistencia al desgaste de los ejes de las ruedas de ferrocarril y de árboles en general. Ya en la década del 60 este proceso tenía gran aceptación fundamentalmente en la industria automotriz. Actualmente se ha convertido en un proceso de acabado por deformación plástica superficial muy popular, (Hasegawa, 2001, Ogburn, F, 2001).

La Deformación Plástica Superficial por rodadura que emplea el rodillo como elemento deformante, es un proceso de elaboración en frío en la superficie de una pieza. La pequeña deformación plástica superficial originada por esta operación consiste en el desplazamiento del material de los "picos o crestas" a los "valles o depresiones" de las microirregularidades superficiales, (Rose, 2003). Este flujo ocurre bajo una presión controlada del rodillo que excede el punto de fluencia del material de la superficie de la pieza no endurecida, creándose una capa de metal consolidada que provoca el aumento de las propiedades funcionales en la superficie. Este proceso debe aplicarse preferentemente después del torneado. (Gabb ; Kantzos ; Prevey y Telesman, 2002)

La necesidad de determinar con mayor precisión, las regularidades del comportamiento de las propiedades mecánicas-funcionales y microestructural superficial de piezas simétricas rotativas fabricadas de acero AISI 1045 en presencia de las cargas por rodaduras que genera un rodillo al trasladarlo sobre una superficie previamente maquinada, el efecto que ellas provocan en la capacidad de endurecimiento del material y la explicación de su mecanismo de endurecimiento, nos conlleva a la presente investigación.

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema que se aborda en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos invariantes y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

Serán abordados aspectos relacionados con la caracterización del acero AISI 1045 y la interrelación composición química – estructura – propiedades, además de las particularidades estructurales del material durante el trabajo de deformación en frío, con énfasis en el análisis de su mecanismo de endurecimiento y las tensiones residuales que se generan en el proceso.

En el presente capítulo se establece como objetivo:

- Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.1.1. Principio de la Deformación Plástica Superficial por rodillo.

La deformación plástica superficial en frío es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza, el aumento del grado de deformación está muy vinculado con la aparición del fenómeno de endurecimiento y a medida que el grado de deformación es mayor, son necesarias más tensiones para continuar deformando. Por tanto el aumento del grado de deformación en frío aumenta la resistencia del metal a la deformación, (Alvarez, 1999, Korotcishe, 1989)

La magnitud de la deformación plástica, depende de la restricción a que es sometido el material deformado plásticamente (granos con acritud) por el metal que lo rodea, y que permanece en estado elástico (granos indicadores). El nivel de tensionamiento del metal que no ha sido deformado plásticamente, lo caracterizan según (Barret, 1989 y Cullity, 1967, Korotcishe, 1989) las tensiones residuales de primer género. Es por ello que la magnitud de las tensiones residuales, después de la deformación plástica, serán un indicador del estado tensional de la pieza durante la primera etapa de la destrucción denominada Período de Iniciación de la Grieta (Key to Steel, 2002). Las tensiones mecánicas ejercidas sobre la zona de la superficie de la pieza durante el rodillado, conducen a una modificación sostenida del estado de tensión residual. Por muy complejo que resulte el proceso de la deformación plástica, siempre puede descomponerse éste en un conjunto de subprocesos u operaciones elementales, que analizadas aisladamente pueden dar luz sobre el desarrollo del proceso.

Estos procesos por Deformación Plástica Superficial se eligen en dependencia de las dimensiones, la configuración geométrica, el material de la pieza a tratar, condiciones de producción, entre otros factores, y para la aplicación efectiva de los mismos en la

producción es necesario realizar investigaciones, ensayos y experimentos previos que permitan alcanzar el efecto óptimo, teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar (Hernández, 2004, Korotcishe, 1989)

Según (Odintsov, 1987), el método de Deformación Plástica Superficial permite incrementar la profundidad en la capa deformada plásticamente. En todos los casos de deformación plástica es necesario aplicar unas sollicitaciones o esfuerzos suficientes para que, una vez transmitidos a los materiales a través de los utillajes apropiados, permitan sobrepasar el límite de fluencia del material, y se inicie el flujo de materia plástica que configure el producto deseado. A medida que un material se va deformando, puede sufrir transformaciones internas y redistribuciones de tensiones, que produzcan agrietamientos o malformaciones que invaliden el producto final obtenido. Este efecto impone un límite a los esfuerzos a aplicar.

La fatiga de contacto por rodadura ha sido identificada como la propagación de grietas iniciadas en la superficie, alrededor de defectos superficiales tales como asperezas o dientes. La iniciación de la grieta alrededor de tales defectos se piensa que esté controlada por el campo de los esfuerzos normales y cortante. La presión de contacto está representada por una serie de cargas puntuales que actúan en cada nodo de la superficie. La deflexión en cualquier punto del modelo puede ser determinada mediante la superposición de las deflexiones causadas por cada carga discreta. (Bower y Johnson 1989)

1.1.2. Generalidades acerca del acero AISI 1045 y su empleo industrial.

Se llaman aceros de construcción a aquellos que se emplean para la fabricación de elementos de máquinas, estructuras y construcciones. El contenido de carbono en este grupo de aceros comúnmente no supera el 0,5-0,6%. El acero de construcción debe poseer alta resistencia, plasticidad y viscosidad en combinación con excelentes propiedades de ingeniería. El acero debe elaborarse fácilmente por presión (laminado, forjado, estampado, etc) y por corte y baja tendencia a las deformaciones y formaciones de grietas durante el temple (Lajtin, Y, 1985, SABINET, 2005)

El empleo industrial de este material en nuestro país es muy difundido, porque tiene amplia aplicación, el mismo presenta, una fácil maquinabilidad, es un acero muy dúctil, forjable, alcanzando valores de dureza de 56-58 HRC, cuando se somete a proceso de

temple, es un acero medio de contenido carbono, su producción es nacional el cual requiere de un valor mínimo de costo de producción. Por consiguiente, este es un material adecuado para ejes, pasadores, tornillos, etc, (Bengton, 1991)

A nivel mundial, existe en la actualidad una variedad de criterios para explicar el mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045, sobre todo a partir de la diversidad de métodos y procedimientos empleados en el proceso de deformación plástica. Se puede establecer que este es un tipo de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial en frío utilizado internacionalmente. Este proceso ha sido estudiado en Cuba por la comunidad universitaria, fundamentalmente de manera experimental, y aplicado en algunas empresas mecánicas, de manera empírica. Existe un conjunto de conocimientos y experiencias sobre el proceso. La aplicación del mismo es simple y no requiere de una inversión capital para su realización. (American Heller, 2005, Bright Burnishing, 2005, Burnishing Tools, 2005, Díaz. 2005, Mech-India, 2005,)

En nuestro país se conocen reportes de estudios sobre el tema desde hace aproximadamente 30 años en el Departamento de Construcción de Maquinaria de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oriente. En el Departamento de Procesos Tecnológicos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Las Villas se acometieron las primeras acciones hace 25 años. Se obtuvieron resultados preliminares del orden teórico-experimental y también a escala industrial reducida, desarrollándose incluso el herramental necesario. En toda esta etapa los resultados obtenidos fueron fragmentados y no tuvieron la sistematicidad necesaria. (Díaz, 2002, Mallo, 1987)

1.1.2.1. Composición química del acero AISI 1045.

La composición química estándar de este acero según Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE, se refleja a continuación en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Composición química estándar del acero AISI 1045



C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	Ni%
0,45	0,25	0,65	0,40	0,10	0,40

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 el 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 provoquen 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.

1.1.2.1.1. Propiedades físico, mecánicas del acero AISI 1045.

En diferentes bases de datos (Materiales, 1996, Key to Steel, 2002) se hace referencia a las propiedades físico y mecánicas a temperatura ambiente, obtenidas en el acero AISI 1045. Estas son:

❖ Propiedades físicas del acero 1045.

- Densidad.....7,85 Kg/dm³
- Módulo de elasticidad.
 - 100 °C-205 kN/mm²
 - 200 °C-195 kN/mm²
 - 300 °C-185 kN/mm²
 - 400 °C-175 kN/mm²
 - 600 °C-155 kN/mm²
- Conductividad térmica.....50 kW/m·K



- Capacidad calorífica.....460 J/kg·K
- Resistencia eléctrica específica..... 0,12 Ω ·mm/m

❖ **Propiedades Mecánicas:**

Tensión Límite de Fluencia mínima [Mpa].....	350
Tensión Límite de Fluencia de Cizallamiento [MPa].....	175
Tensión Límite de Resistencia [MPa].....	430
Elongación mínima [%].....	35
Estricción mínima [%]	35
Dureza [HB].....	170
Resiliencia (J/ mm ²).....	100

1.3. Microestructura de los aceros al carbono:

Durante la revisión bibliográfica realizada 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:

1.3.1. Ferrita (Hierro α)

El hierro alfa (a) (ferrita) existe desde -273 °C 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%C, formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros de 0.6 a 0.85%C 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, 2001, Schijve, 2003, Kallister, 1999)

1.3.1.1. Perlita.

Otros autores, U.Kocks, P.Franciosi, M.Kawai, 1991, Guliaev, 1989, Kallister, W, 1999, coinciden en plantear que es el micro constituyente 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/mm² 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°C), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo entonces la denominación de perlita globular.

1.3.2. Estructura Cristalográfica.

Según Guliaev, 1989, Pero-Sanz, 2003, Moreno, 2003, 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 C, cuya estructura está constituida únicamente por perlita: Hipoeutectoides, que contienen menos del 0,8% de C, con estructura formada por ferrita y perlita; e Hipereutectoides, que contienen del 0,8 al 2% de C y cuya estructura consta de perlita y cementita.

1.3.3. Redes Cristalinas.

Según Barceinas, y Hernández, 2001, 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).

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. (F. Shackelford, 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. (Gay, P. 1977).

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 vital importancia conocer la influencia que ejercen las tensiones en las diferentes capas del metal (Bhushan, y Gupta, 1991)

1.3.3.1. Clasificación de las redes cristalinas.

A partir de los resultados expuestos por (Kruschov, M.M, 1957), se analiza en cuanto a la dureza incrementada en el material por la deformación plástica del mismo en la superficie. De acuerdo con (Lim, 1969) 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.

Ahora bien 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 unidad 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 (c.c): 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.: Fe (α), Mo, Na, etc.

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: Fe (γ), Ni, Co, Cu, Al, Ti, etc.

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.: Ti, Co, Cd, 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 (c.c) 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.

1.4. 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 sub-superficiales 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. Askeland, 2003

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 (Molinari, Canova, Ahzi, 1987)

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)

1.4.1. 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 C siempre por debajo del 2%, este carbono esta disuelto en el hierro de forma intersticial, al estar el C 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 limites 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, Blumenstein, 2001).

Según 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 crea en un campo de red cúbica deformada. La energía de la red cristalina se caracteriza por el llamado vector de Burgers.

1.4.2. Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de 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.

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

1. 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, Korotcishe. 1989)

2. 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, 1992, Alfonso, 2002, Korotcishe, 1989)

3. Tensiones de tercer género (deformaciones estáticas de la red cristalina): Se equilibran en los límites de pequeños grupos de átomos. En los metales deformados ellas se equilibran en los grupos de átomos que se encuentran cercanos a la frontera de los granos, a los planos de deslizamiento. La deformación puede estar relacionadas con la presencia de dislocaciones. El desplazamiento de los átomos de las posiciones ideales puede surgir también en los cristales de las soluciones sólidas debido a la diferencia entre las dimensiones de los átomos y a la interrelación química entre los átomos del mismo género y de géneros diferentes, que componen la solución, son llamadas también submicroscópicas. (Lajtin, 1971, Pero-Sanz, 2000, Alfonso, 1992, Alfonso, 2002, Korotcishe, 1989)

El trabajo en frío según Moreno, 2005, Korotcishe, 1989 y la compañía Arde-Pórtland, 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 incrementó 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. En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida, (Lim, 1969, Moya, 1996) da lugar a la obtención de un metal más resistente que el que se podría producir por cualquiera de otros tratamientos, solos hay que tener en cuenta lo siguiente: en la actualidad no se suministran comercialmente aceros laminados a temperaturas inferiores a 0 °C.

Según Key to Steel, 2002, 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 dichas 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 cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Duffus, 1997, Callister, 1999, Pero-Sanz Elorz, 2000)

Según Alfonso, E, 1995, Martín, 2000, el control de las tensiones de primer género tiene una gran importancia práctica, ya que permite elevar considerablemente la seguridad de las instalaciones, máquinas y mecanismos durante su explotación.

Los autores, Boyle, y Spence, 1989, plantean que 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.

Es conocido que durante la operación de rodilado 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, (Martylenko, 2002)

Según Pero- Sanz, 1992, en la teoría de la plasticidad se abordan 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 y determinar las relaciones experimentales entre la tensión y la deformación.

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.

1.4.3. Endurecimiento por deformación en frío: Acritud.

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

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, Kalpin, Barinov, 1990)

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. 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.

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. (Alvarez, Lancestremere, Mareglia, Barr, 2004, 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)

En Pero-Sanz, 2000, Kallister, 1999, Lajtin, 1985, Alvarado, 1983, plantean que: Otro mecanismo de deformación de los metales es el conocido por maclaje, el cual se produce cuando una porción del cristal toma una orientación que está relacionada de modo simétrico con la del resto del cristal sin deformar. El maclado es un mecanismo, complementario al deslizamiento, por el cual la aleación queda endurecida al igual que sucedía con el deslizamiento

Las tensiones requeridas para producir una configuración de macla en un cristal son pequeñas, pero la magnitud de la deformación obtenida por maclaje es también pequeña. En el maclado cada uno de los numerosos planos vecinos sufre deslizamiento. Al terminar el proceso de deformación, la parte deformada del cristal resulta una imagen espejo de la



parte no deformada. Los dos tipos de deformaciones plásticas están conectadas en la red cristalina, con el desplazamiento de un tipo particular de la imperfección de la estructura llamada dislocación, (Pochettino, y Sánchez, 1999).

1.5. Conclusiones del Capítulo I.

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

1. La bibliografía consultada, aporta información sobre las propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero AISI 1045; pero en ninguno de ellos se muestran las regularidades del comportamiento microestructural de la Deformación Plástica Superficial generadas por un rodillo.
2. El análisis bibliográfico nos permitió determinar lo mecanismo de endurecimiento por deformación plástica superficial empleado, sin embargo no se refleja el comportamiento del mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045, si existe cambio sobre la fase en la deformación plástica, o si el endurecimiento es por acritud del acero, cuando el material es sometido a las cargas por rodadura.

CAPITULO III

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS

2.1. Introducción

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.

En este capítulo se plantea como objetivo:

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los experimentos.

2.1.1. Generalidades del proceso.

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de un procedimiento general, no solo basta con la elección del material y su valoración física, química y estructural. También se requiere tener en cuenta la teoría de la toma de decisiones y el flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles y criterios tecnológicos en los procesos por deformación plástica superficial.

De las conclusiones del capítulo I del presente trabajo, se desprende la necesidad de formular e introducir dicho procedimiento con vista a lograr resultados confiables que estén avalados científicamente, ya que en toda la bibliografía revisada no se encontraron métodos de proceder declarados para abordar el estudio y la obtención de la microestructura en piezas por este tipo de tratamiento mecánico.

Se establece el diseño del plan experimental y se describen las normas y procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el comportamiento mecánico microestructural del endurecimiento por trabajo de deformación en frío.

2.2. Análisis del material deformado plásticamente por rodillo.

Selecciona para los experimentos como un acero de medio contenido de carbono AISI 1045 con BCC. Esta selección obedece a que es un acero al carbono muy difundido, conocido y representativo en la fabricación de piezas de la industria mecánica en Cuba y específicamente de piezas tipo ejes, además puede ser rectificado y tratado térmicamente

El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón 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.

Tabla. 2.1. Composición química del acero AISI 1045.

C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %	Fe %	P %
0,44	0,26	0,88	0,13	0,01	0,01	98.21	0.20

En el análisis de los resultados se confirma que el material a emplear en los experimentos es un acero AISI 1045 con una estructura metalográfica ferrito-perlítica (41,2 % de ferrita y 58,8 % de perlita) cuya imagen se puede apreciar en la Figura 2.1.

2.2.1. Análisis microestructural: Para la observación se empleó un microscopio óptico binocular de fabricación China marca NOVEL ubicado en el laboratorio de ciencias de los materiales en el ISMMM Moa, este está dotado con un portaobjetos giratorio e iluminador vertical Watson. La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas.

Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

La observación de cada superficie a analizar es necesario fotografiarla para procesar la información.

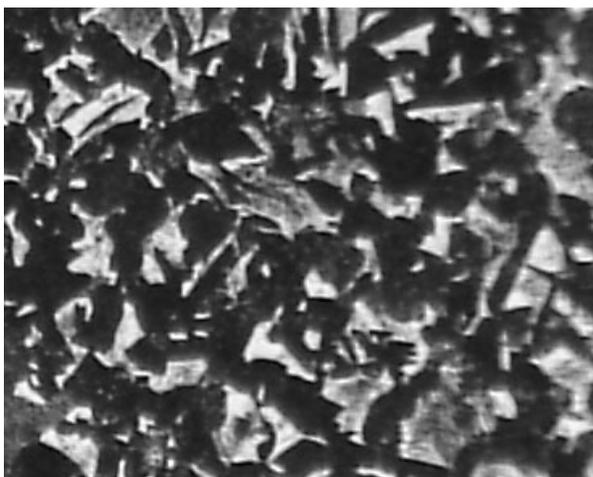


Figura 2.1. Estructura metalográfica ferrito-perlítica del acero AISI 1045 empleado. (100X)

2.2.2. 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 2.2), el cual permite determinar las transformaciones de fases del hierro en dependencia de la temperatura de tratamiento al que es sometido.

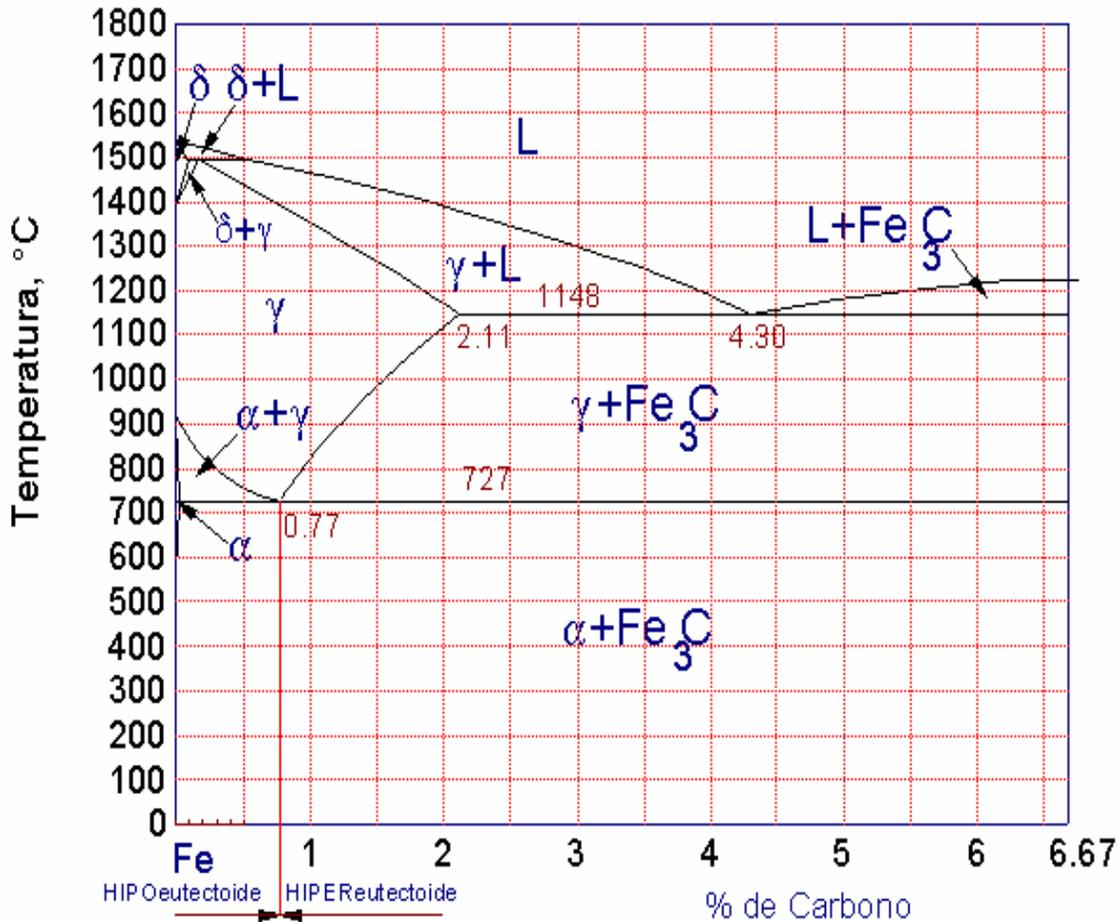


Figura. 2.2. Diagrama Hierro-Carbono.

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, aun cuando teóricamente representa unas condiciones metastables, se puede considerar que en condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentas representa cambios de equilibrio.

2.3. Diseño del experimento.

2.3. 1. Propuesta del modelo del diseño experimental.

Para la confirmación de la hipótesis científica se escogió el diseño de experimento realizado en el proceso de Deformación plástica superficial (Hernández, H,G, 2004)

Donde se analizó el comportamiento de tres niveles y dos factores, con tres replicas. Para un total de 27 experimentos. (Tabla 2.2)

Tabla 2.2. Resultados de la matriz de planificación del experimento.

Niveles	Respuestas			Salidas		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	H(HV)		
Nivel superior(+1)	27	2 500	0,25	H(HV)		
Nivel medio(Δ)	54	1 500	0,125			
Nivel inferior(-1)	110	500	0,075			
Número de ensayo				HV1	HV2	HV3
1a	27	500	0,250	205	210	224
2a	27	1500	0,125	216	224	228
3a	27	2500	0,075	216	218	227
4a	54	500	0,250	220	246	248
5a	54	1500	0,125	216	247	250
6a	54	2500	0,075	218	221	254
7a	110	500	0,250	218	229	255
8a	110	1500	0,125	223	237	257
9a	110	2500	0,075	224	238	255

Las probetas se sometieron a la acción de rodadura en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento.

Las variables involucradas en el proceso de endurecimiento del acero AISI 1045, a partir de las cuales se realizará el comportamiento microestructural son:

- Número de revolución del husillo.
- Presión ejercida por la herramienta deformante.
- Avance.
- Dureza final.

La elección de cada uno de los niveles se eligió por el mayor o menor grado de endurecimiento que se quiere lograr en el material, o lo que es lo mismo, por la mayor o menor homogeneidad en la estructura.

Para evaluar el comportamiento de cada una de las probetas, se analizó los parámetros de entrada del experimento (tabla. 2.3), este indicador nos permitirá establecer en que medida ha incidido el grado de Deformación Plástica introducida al material.

Tabla 2.3. Parámetros de entrada del experimento.

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Min.	Medio	Máx.
Fuerza (N)	P	500	1 500	2 500
Número de revolución.	n	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0,075	0,125	0,25
Dureza (HV)	H	HV	HV	HV
Diámetro del rodillo (mm)		50		

2.4. Presión ejercida por la herramienta deformante (P): Variable cuantitativa, directamente proporcional a las variables (n) y (S). Es una influencia a considerar en el endurecimiento superficial de la pieza y en consecuencia sobre el efecto de endurecimiento que se produzca. Es una magnitud que se relaciona con las propiedades mecánicas a obtener en la pieza para el incremento de la resistencia al desgaste y la fatiga, estando vinculado en primer lugar con el número de revoluciones del husillo (n) y en segundo lugar con el avance de la herramienta de deformar. Las cargas aplicadas fueron de 500, 1 500 y 2 500 MPa (Hernández, ,2004)

2.4.1. Número de revoluciones del husillo (n): Es una variable cuantitativa, se empleará en el rango desde 27 hasta 110 rev/min (obteniéndose un nuevo resultado en cada cambio), lo que permitirá variar las propiedades mecánicas por giros. Teniendo en cuenta cada número de revoluciones del husillo, se podrá conocer el valor total de la deformación obtenida (Hernández, 2004)

2.4.1.1. Avance de la herramienta (S): Variable que define el comportamiento de la capa deformada, está relacionado con los valores de dureza, a mayor avance mayor dureza en la capa deformada, pero menos profundidad en la misma (Hernández, H, G, 2004)

2.4.1.2. Dureza Superficial (H): Variable cuantitativa, define el comportamiento del proceso, es la que se medirá al concluir la Deformación Plástica Superficial.

Se valorará la influencia del avance, el cual se considera una interacción entre el avance y la velocidad del husillo. Un incremento en el avance a baja velocidad del husillo aumenta la microdureza mientras que un incremento en el avance a altas velocidades del husillo aumenta la macrodureza (Hernández, H, G, 2004)



Considerando que la validación de las normas y procedimientos y el nivel de acreditación de los laboratorios y equipamiento que se utilizarían para desarrollar las mediciones permitía una alta precisión con muy pocas posibilidades de que se introdujeran errores sistemáticos; lo cual implicaba el número mínimo de réplicas que garantizará la confiabilidad de los resultados; se decidió que en las corridas experimentales se realizarán solo tres réplicas (Hernández, H, G, 2004)

2.5. Máquinas y Equipos empleados en la experimentación.

2.5.1. El torno 16 D 20.

Se encuentra ubicado en el área de máquinas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Dr. Antonio Nuñez Jiménez, está destinado a la realización de diversos trabajos de torneado y roscado, al corte rápido de materiales templados y difíciles de trabajar. Permite utilizar plenamente las posibilidades de resistencia de las herramientas provistas de aleaciones duras, de cerámica mineral, diamante o el boro. Presenta las mejores cualidades del sistema de mando, está centralizado el mando de todas las operaciones de trabajo y auxiliares.

❖ Características principales del torno.

- Potencia del motor eléctrico. 10 kW
- Tensión.400 V
- Frecuencia de rotación del husillo.16...2 400 rev/min
- Avance:
 - Longitudinal. 0, 05...2, 8 mm/rev
 - Transversal..... .0,025...1,4 mm/rev
- Fuerza máxima laborable sobre el mecanismo de avance.....400 kgf
- Diámetro máximo de la pieza que se instala sobre la bancada.....400 mm.

2.5.2. Herramienta de corte

Para seleccionar la herramienta de corte se debe tener presente la magnitud del trabajo a realizar, tipo de trabajo, así como las características de la pieza a elaborar (laminada, fundida, forjada, ect), profundidad de corte, velocidad de corte, avance. Estos parámetros relacionados definirán los ángulos principales de la cuchilla y el mango de la misma.

Estas probetas se cortan con cuchilla de tronzar del tipo Sandvik, código del vástago PSSN R 25 25 M 12, con una plaquita SNMG 12 04 08-PM de calidad 4025(SANDVIK

Coromant KoroKey, 1996) con constante refrigeración y baja velocidad de corte para evitar el calentamiento de la misma. Al realizar estos cortes quedan en la superficie una gran cantidad de rayas que es necesario eliminarlas.

2.6. Preparación metalográfica de la probeta.

2.6.1. Generalidades

La metalografía microscópica estudia las características estructurales y de constitución de los productos metalúrgicos con la ayuda del microscopio metalográfico, para relacionarlos con sus propiedades físicas y mecánicas. La parte más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta pulida y atacada empleando aumentos que con el microscopio óptico oscilan entre 100 y 2000X.

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución del metal o aleación, pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño, y distribución de grano, inclusiones y microestructura metalográfica en general. La microestructura puede reflejar la historia completa del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal.

La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, reventar un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características del metal.

Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

1. Selección de la muestra.
2. Toma o corte de la muestra.
3. Montaje y preparación de la muestra.
4. Ataque de la muestra.
5. Análisis microscópico.
6. Obtención de microfotografías.

2.6.1.1. Selección de la muestra: La localización de la parte que va a ser estudiada debe hacerse de tal modo que represente todo el metal o puede ser el sitio de la falla de una pieza o el límite entre una soldadura y el metal base.

El tamaño adecuado de la probeta debe ser tal que pueda sostenerse con la mano durante su preparación.

2.6.1.2. Corte de la probeta: Puede realizarse con seguetas, cortadora de cinta o disco abrasivo, teniendo la precaución de evitar el calentamiento que puede ocasionar alteraciones estructurales.

2.6.1.3. Montaje de la probeta: El montaje de las muestras se hace en materiales plásticos sintéticos como bakelita, lucite, o acrílico isotérmico que después del moldeo son relativamente duros y resistentes a la corrosión y no causan empastamiento de los papeles abrasivos durante el desbaste y pulido.

El montaje consiste en comprimir un plástico fundido sobre la muestra metálica y dejar enfriar el sistema bajo presión hasta la solidificación del plástico o resina sintética.

La preparación de la probeta consiste en el desbaste y el pulido.

2.6.1.4. Desbaste: Es la operación siguiente al corte y al montaje de la probeta la cual se realiza con papel abrasivo del tipo No. 180, 400 y 600 según las normas ISO 9001, Se aconseja pasar la probeta por toda la serie, pues eliminar algún abrasivo retarda la operación en vez de acelerarla, dicho pulido se lleva a cabo con papel abrasivo montado 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. Una presión excesiva sobre el papel abrasivo puede causar rayas profundas y difíciles de eliminar posteriormente, además se provoca una distorsión intensa sobre el metal de la superficie, alterando el aspecto de la estructura. Esta distorsión no se puede evitar completamente pero puede reducirse mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido.

Conviene emplear un papel nuevo para cada probeta, los papeles usados se emplean para finalidades específicas porque sus partículas abrasivas desgastadas tienden a producir distorsión del metal superficial.

También debe tenerse en cuenta que la superficie opuesta de la probeta debe ser paralela para facilitar el soporte en el microscopio.

Al final del desbaste, deben lavarse con agua abundante tanto las probetas como las manos del operador para evitar que las partículas del abrasivo o del metal en la etapa del desbaste pasen a las pulidoras lo cual los haría inservibles.

2.6.1.5. Pulido: Tiene por objeto, eliminar las rayas finas producidas en la última operación del desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento a espejo.

El éxito del pulido y el tiempo empleado en la operación, depende en gran parte del cuidado con que se haya realizado el desbaste. Si una probeta tiene rayas profundas que no se han eliminado en las últimas operaciones de desbaste, no podrán ser eliminadas durante el pulido con pérdida de tiempo y trabajo. Esta operación se lleva a cabo en una pulidora metalográfica, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo (Cr_2O_3).

La presión a aplicar sobre la probeta, depende de la dureza de la aleación y debe disminuirse a medida que avanza el pulido, deberá ser tal que se logre hacer desaparecer en unos pocos minutos las rayas del último papel (600) cuidando de no excederse en la presión por el peligro de desgarramiento del paño.

Debe lavarse la probeta en un chorro de agua caliente, secar con la ayuda de un secador, sin tocar la cara pulida, enjuagarla con alcohol y secarla finalmente con aire seco o caliente. Observar en el microscopio; si persisten las rayas provenientes del desbaste en el último papel, continuar con el pulido en la forma ya descrita, todo el tiempo que sea necesario para que éstas desaparezcan.

La combinación adecuada de estas variables, permitirá alcanzar un óptimo pulido, aunque difícilmente se logre evitar algo de distorsión; para eliminar esta última, no queda otro recurso que el de ataque y pulido alternados.

2.6.1.6. Observación con microscópica: Permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas, y grafito.

Antes de atacar la probeta debe desengrasarse con alcohol y secarse con aire frío o caliente. Después de pulidas y atacadas químicamente las muestras, se procede a la observación en el microscopio óptico. Estas observaciones se le realizan, en la parte desgastada y deformada por rodadura y a la parte que se deforma debido a la presión ejercida en el ajuste por interferencia. Además se observó una muestra patrón de acero de este mismo tipo sin aplicarle ningún método de endurecimiento en especial.

2.6.1.7. Ataque: El ataque químico se realiza 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 del desgaste y la deformación de la probeta. Para este ataque químico se utiliza el Nital (5 ml HNO₃ y 100 ml C₂H₅OH). Para el ataque, se toma la probeta con la pinza y se sumerge con la cara pulida hacia abajo en el reactivo de ataque contenido en el cristalizador. Se tiene la probeta sumergida un segundo, se extrae, se lava con alcohol, se seca y se observa al microscópio, se registra el campo observado a diferentes aumentos. Se vuelve a pulir y se repite la operación descrita anteriormente manteniendo sucesivamente la probeta sumergida durante 2, 10, 20, 40 y 80 segundos, registrando el campo observado después de cada ataque. Mediante el ataque es posible poner de manifiesto el tamaño, forma y distribución del grano (fases o microconstituyentes), las heterogeneidades en la estructura y las segregaciones.

2.7. Corte de la probeta.

La probeta se cortara en un torno industrial con una longitud de 10 mm al aire. 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 con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial

2.7.1. Velocidad de corte.

Se define como velocidad de corte la velocidad lineal de la periferia de una herramienta acoplada a una máquina herramienta o la velocidad lineal del diámetro mayor que esté en contacto con la herramienta en la pieza que se esté mecanizando en un torno. Su elección viene determinada por el material de la herramienta, el tipo de material a mecanizar y las características de la máquina. Una alta velocidad de corte permite realizar el mecanizado en menos tiempo pero acelera el desgaste de la herramienta.

La velocidad de corte se expresa en m/min. La velocidad adecuada de corte depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de las herramientas, las probetas se elaboraron con los siguientes datos de corte (Casillas, 1987)
 $n = 250 \text{ rev/min}$ $S=0,05 \text{ mm/rev}$.

➤ **Cálculo de la Velocidad de corte.**



$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ m/min.} \quad (2.1)$$

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.

➤ **Profundidad de corte.**

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

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

Donde:

t = Profundidad de corte; mm.

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

d = Diámetro de la pieza después de la elaboración; mm.

➤ **Tiempo de maquinado.**

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

2.8. Selección del elemento deformante (rodillo).

El elemento deformante (rodillo) (Cogsdill Tools, 2005, Elliot Tools, 2004, Bright Burnishing, 2005, Odintov, 1987), es fabricado de acero rápido (HSS), aceros aleados con

romo, de aleaciones duras o de carburo cementado (metal duro), muy pulido. Debe poseer una alta dureza, entre 58 y 65 HRC y una alta resistencia al desgaste.

La forma del perfil de trabajo del rodillo influye marcadamente en los resultados obtenidos en el proceso de elaboración de la superficie (Odintov, 1987). El perfil del rodillo empleado se puede observar en la Figura 2.1.

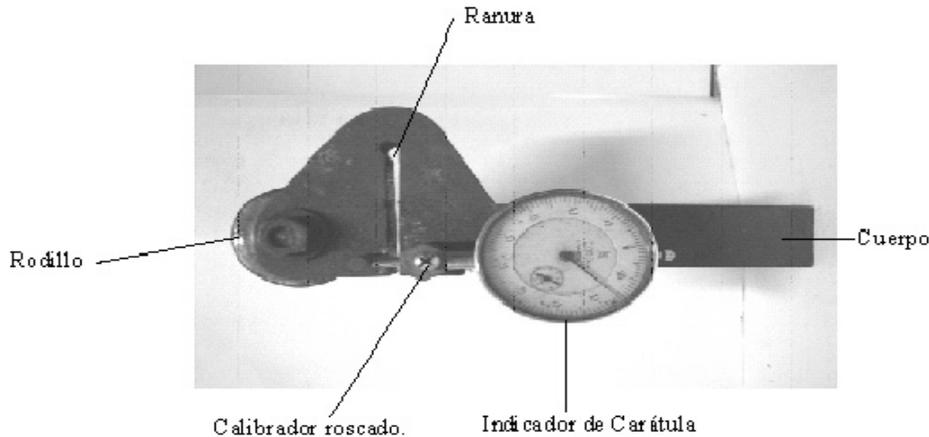


Figura 2.1. Forma del perfil de trabajo del rodillo.

Cuando se va a seleccionar el perfil de trabajo del rodillo hay que tener presente que, si se aumenta el ancho de la banda cilíndrica, se crean las condiciones más favorables para trabajar con avances mayores, pero esto provoca que sea necesario aumentar la fuerza a aplicar sobre la pieza en bruto para obtener la deformación que se exige. Se puede plantear que cuanto menor es el radio del rodillo, tanto menor será la fuerza que hay que aplicar sobre este para obtener la profundidad de capa deformada estimada con anterioridad, pero menor será la productividad del proceso, la cual solo aumentará si se aumenta la velocidad del proceso. En la práctica se pueden emplear rodillos con radios de redondeo del perfil entre 4 y 50 mm. Si durante el proceso se observa el deterioro de la capa superficial de la pieza, entonces el radio del perfil del rodillo se debe aumentar.

El rodillo (1) tiene 50 mm de diámetro, es de acero AISI 5140 con una dureza de 65 HRC, un acabado Ra de 0,5 μm y un radio en el perfil de 2 mm, con banda cilíndrica y radio abierto, que se corresponde con el tipo de superficie que se va a tratar y que posee salida libre para la herramienta. La justificación del empleo de este tipo de rodillo radica en que para el endurecimiento de piezas de poca rigidez es necesario utilizar rodillos con un radio

de perfil pequeño, lo que permite obtener el mayor aumento de la dureza con esfuerzos relativamente pequeños.

El cuerpo (2), es una barra de sección rectangular en forma de cuchilla que es la que permite instalarla en el portaherramientas de las máquinas herramienta. Una vez instalada la herramienta, se ajusta el calibrador roscado (3) donde va acoplado un indicador de carátula (4), con una precisión de $0,005 \mu\text{m}$ que, mediante el mismo, permite determinar con exactitud la fuerza que se transmite a la pieza y esta a su vez al rodillo, y que es ejercida sobre la pieza y absorbida por la ranura (5), que presenta el dispositivo.

Para garantizar la rigidez del sistema se ajustaran los parámetros debidamente, las vibraciones de las herramientas ocurren a altas velocidades del husillo provocando impactos continuos entre la misma y la superficie de la pieza en bruto.

2.9. Método de identificación de la microestructura de las probetas.

Con el objetivo de dar un mejor entendimiento a la hora de identificar la microestructura de las probetas, se establece un sistema de números y letras en correspondencia en el orden en que fueron deformadas

Para la Réplica a

Para fuerza comprensiva de 500 N, con 27 rev/min.

Para $S = 0,075 \text{ mm/rev}$

1 - Para microestructura del centro de la probeta.

1_a - Para microestructura del borde de las probetas.

Para $S = 0,125 \text{ mm/rev}$.

2 - Para microestructura del borde de la probeta.

Para $S = 0,25 \text{ mm/rev}$.

3 - Para microestructura del borde de la probeta.

Para fuerza comprensiva de 1 500 N, con 54 rev/min.

Para $S = 0,075 \text{ mm/rev}$

1 - Para microestructura del centro de la probeta.

4 - Para microestructura del borde de la probeta.

Para $S = 0,125 \text{ mm/rev}$.

5 - Para microestructura del borde de la probeta.



Para $S = 0,25$ mm/rev.

6 . Para microestructura del borde de la probeta.

Para fuerza compresiva de 2 500 N, con 110 rev/min.

Para $S = 0,075$ mm/rev

7 . Para microestructura del borde de la probeta.

Para $S = 0,125$ mm/rev.

8 . Para microestructura del borde de la probeta.

Para $S = 0,25$ mm/rev.

9 . Para microestructura del borde de la probeta.

Considerando que la validación de las normas y procedimientos y el nivel de acreditación de los laboratorios y equipamiento que se utilizaran para desarrollar las mediciones que permiten una alta precisión con muy pocas posibilidades de que se introdujeran errores sistemáticos; lo cual implicaba el número mínimo de réplicas que garantizará la confiabilidad de los resultados; se decidió que en las corridas experimentales se realizarán solo tres réplicas.

Paralelamente, antes de la realización del proceso tecnológico, se realizará un control previo de la dureza superficial y del diámetro exterior.

Complementando el procedimiento propuesto, se realiza la valoración económica donde se efectuaran los cálculos estimados de los costos de fabricación de la pieza deformada. Además de la presentación del procedimiento, en este capítulo está implícito el comienzo de la aplicación del mismo en el experimento, y se valida a partir de los resultados posteriores y de la obtención de modelos matemáticos.

2.10. Conclusiones del capítulo II



1. Se han fundamentado las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación estructurados metodológicamente con un enfoque dialéctico, sistémico y controlado que posibilitan la ejecución ordenada del proceso investigativo.
2. La realización de los ensayos anteriormente señalados permite obtener una información detallada acerca de la composición química, la dureza, así como la microestructura del material analizado. Además permiten establecer el comportamiento microestructural del acero deformado por deformación plástica superficial por rodillo.
3. Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías, software y equipamiento que garantizan la precisión y fiabilidad a los resultados.

CAPITULO III



CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSION:

3.1. Introducción.

La maquinabilidad de los materiales se caracteriza por la resistencia al corte y por la calidad de la superficie a labrar. La maquinabilidad depende de la composición química, las propiedades mecánicas y físicas del material. La elección de la cuchilla está dada por la calidad de la superficie a obtener, la cual debe presentar un buen acabado superficial ya que las ondulaciones y rugosidades definen el contacto de los cuerpos sólidos, estas herramientas están diseñadas para altas velocidades de corte y pocas pasadas.

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 regularidades que describen del comportamiento mecánico y microestructural del acero AISI 1045 sometido a la acción de las cargas 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, obtenidos; el mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045 en las referidas condiciones.

El objetivo del capítulo es:

1. Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.1.1. Definición de conceptos.

- **Deformación plástica:** Deslizamiento de las dislocaciones. Las dislocaciones se deslizan por planos de deslizamiento. Los sistemas de deslizamiento vienen dados por un plano de deslizamiento (compacto) y por una dirección de deslizamiento (compacta).
- **Acritud:** Favorece la inmovilidad de las dislocaciones, lo que implica el impedimento de la deformación plástica. El esfuerzo real es siempre creciente.



3.2. Análisis de la elaboración mecánica de las probetas.

3.2.1. Corte.

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. Se realizó con una cuchilla Sandvik, código del vástago CNGA R 25 25 M 12, con una plaquita T-MAX-CUT 12 04 12 de calidad T 025 20(SANDVIK Coromant KoroKey, 1996). 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.

Las ecuaciones mostradas en las fórmulas 2.1; 2,2 y 2.3, del epígrafe 2.4 capítulo II, permite determinar los regímenes de elaboración de las probetas.

Sustituyendo en 2.1

Velocidad de corte.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 30 \cdot 250}{1000}$$

$$V_c = 23,25 \text{ m/min.}$$

Sustituyendo en 2.2

Profundidad de corte:

$$t = \frac{D}{2}$$

$$t = \frac{30}{2}$$

$$t = 15 \text{ mm}$$

Sustituyendo en 2.3

Tiempo de maquinado.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i$$

$$T_m = \frac{15}{250 \cdot 0,05} \cdot 27$$

$T_m = 33 \text{ min.}$

En la figura 3.1, se observa la muestra para la observación metalográfica con diámetro 30 mm y espesor de 3 mm se prepararon según norma ASTM E 3-95.

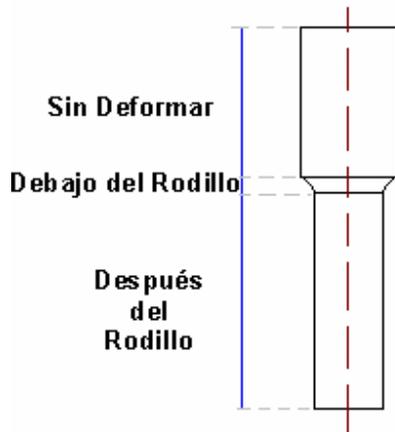


Figura 2.3. Esquema de la probeta del experimento.

La velocidad de corte o el camino a recorrer por el filo de la cuchilla respecto a la superficie maquinada de la pieza en unidad de tiempo es 23,25 m/seg y profundidad de corte de 15 mm, nos permite establecer que se puede realizar en una sola pasada, en un tiempo de 33 min.

3.2.1.1. Desbaste y pulido.

Teniendo en cuenta las características de las probetas en cuanto al espesor de las mismas, el montaje se realizó en un dispositivo de fibra previamente maquinado, con el objetivo de lograr la mayor uniformidad posible el desbaste y pulido.

En el desbaste primeramente se obtuvo una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de la máquina pulidora y papeles abrasivos del tipo No 180, 400 y 600 (ISO 9001), variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, montando la lija 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. Al concluir de pasar el papel abrasivo más fino se realizó la operación conocida como pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como "Pasta GOI", añadida sobre discos provistos de paños o motas, hasta que se logró una superficie pulida.



Por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL (ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM), para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

3.2.1.2. Lavado y desengrasado: Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, y secada con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono eliminando todo vestigio de grasa y pastas de pulir.

3.2.1.3. Ataque químico: Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido, 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 %.

Sé empleo como reactivo de ataque el Nital al 4%, por que este 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.

3.2.1.4. Observación con microscopía óptica

Para la observación se empleó un microscopio óptico binocular marca ΠIOMO METAN P1 ubicado en el laboratorio de ciencias de los materiales en el ISMM de Moa, este está dotado con un portaobjetos giratorio e iluminador vertical Watson. La observación se realizó empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes mas precisas.

Para colocar las probetas en el microscopio se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió una nivelación adecuada de estas.

La observación de cada superficie a analizar fue fotografiada para procesar la información.

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero AISI 1045.

Fueron observadas probetas sin deformar en el centro, y con deformación en los bordes (figura 3.1), de acuerdo con el diseño de observación expuesto en él capítulo anterior en el epígrafe 2.9, con un rango de aumento de 500X.

Se toma como base de comparación para el comportamiento de la deformación la muestra determinada en el espectrómetro, epígrafe 2.2, del capítulo II.

Se analizará el comportamiento de las capas 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 presión fue 500 MPa, 27 rev/min.

Presión de 500 N y $n = 27$ rev/min

Centro

Bordes

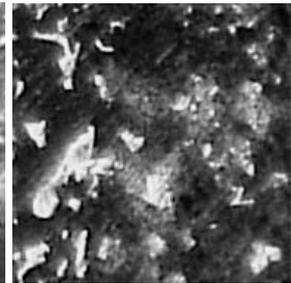
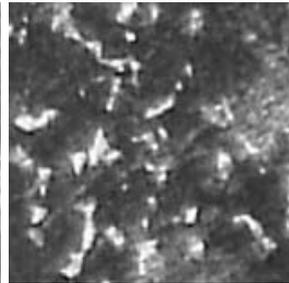
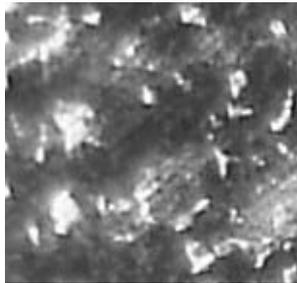
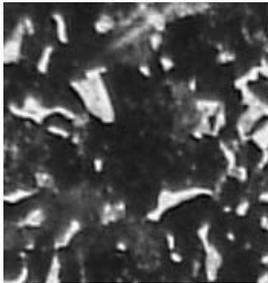


Figura 1

Figura 2

Figura 3

Figura 4

Presión de 1 500 N y $n = 54$ rev/min

Centro

Bordes

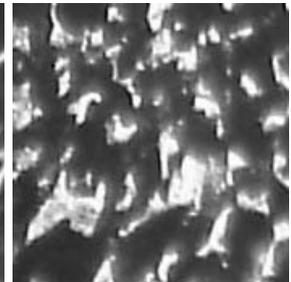
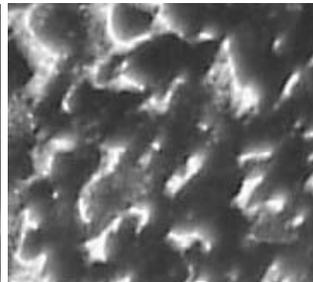
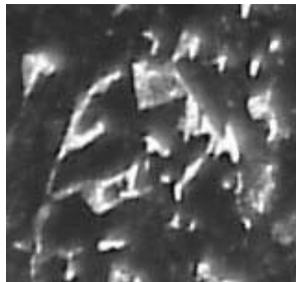
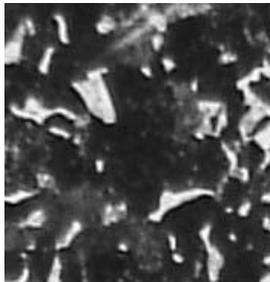


Figura 1

Figura 5

Figura 6

Figura 7

En las figura 5, 6, y 7, correspondiente al nivel medio, en iguales condiciones de operación, pero con el aumento de la presión y el número de revolución, se observa mayor agrupación de los granos en la red cristalina.

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

Centro

Bordes

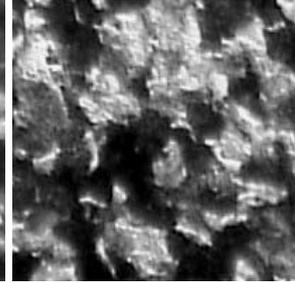
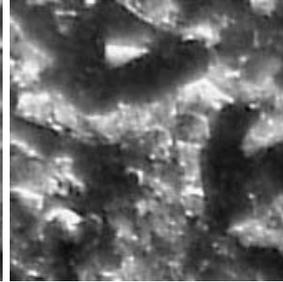
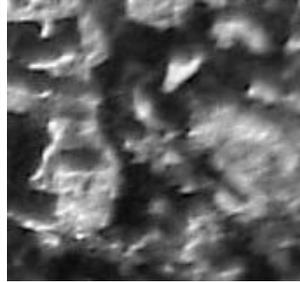
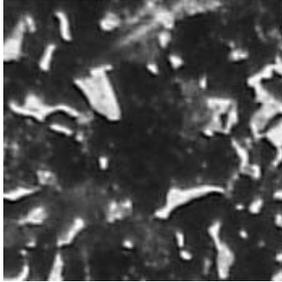


Figura 1

Figura 2

Figura 3

Figura 4

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 sometido al proceso de deformación por rodadura, ocurre por el fenómeno de las dislocaciones y no por el cambio de fase. Por el diagrama Hierro –carbono es un acero Eutectoides, ya que su componente en carbono es menor de 0,8%C (estructura de perlita) y este tipo de estructura cambia de fase desde 273 °C hasta 912 °C, lo cual no se logra en la Deformación Plástica superficial.

En las figuras de las microestructura antes relacionadas se observa que los límites de los granos se hacen más finos en la medida que se va incrementando la fuerza introducida a través de la herramienta de deformar, se observa el deslizamiento en los granos.

Después de ser sometidas a la acción de cargas por rodadura, en la 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 (500x) 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 las micro-irregularidades 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).

3.3. Valoración económica.

3.3.1 Generalidades

Al abordar la valoración técnico económica del proceso de Deformación Plástica Superficial por rodillo como alternativa tecnológica para el endurecimiento de piezas, y a partir de la 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 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, a la corrosión, a la rotura, aumenta su fiabilidad, por el incremento de la resistencia de las piezas y mayor resistencia a la fatiga. Adicionalmente, se obtiene una mayor precisión en los ajustes, 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 para calcular las fichas de costo.

3.3.1.1. Costos de materiales empleados.

Son los costos que tienen incidencia en el proceso de transformación del objeto o el producto a elaborar, en la tabla 3.1 se realiza el estimado de los materiales que se emplearon en la elaboración del experimento.

Tabla 3.1. Costos de materiales empleados.

Materiales	Cantidad	Precio(CUC)
Lijas (180, 400, 600)	6 pliegues	1 C/U
Cuchilla de tronzar (Sandvik)	1(vástago PSSN R 25 25 M 12, con plaquita SNMG 12 04 08-PM de calidad 4025	18.23

En la tabla 3.2, se elabora la ficha de costo por concepto de operaciones y operarios, así como el comportamiento del consumo eléctrico.

Tabla. 3.2. Costo de fabricación para el análisis metalográfico.

Costo de fabricación de la pieza.			
Tipo de material	Costo de material(\$)	Peso del semiproducto(kg)	Precio(CUC)
Aceros AISI 1045	1,25	0,5	6,45
Lijas	1		6
Cuchilla			18,23
Operario	Tarifa(\$)	Tiempo efectivo(h/\$)	Costo(\$)
Tornero A	1,78	0,55	0,979
Téc de Laborator.	1,78	4,0	7,12
Salario Básico (Sb) = Suma de los costos = \$ 38,77			
Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 3,87			
Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09 = \$ 42,64			
Gasto de Energía			
Máquinas	Tiempo trab(h)	Potenc máquina/kW	Energ consum(kW/h)
Torno	0,55	1,5	0,825
Sierra Sinfin	0,58	1,5	0,87
Microscopio	1,35	2	2,7
Pulidora	2,25	1,75	3,9
Costo Energía			
Torno	$C_{\text{torno}} = 0,06 \cdot E_c = 1,08$	Costo Energía Eléctrica.	
Sierra Sinfin	$C_{\text{SS}} = 0,06 \cdot E_c = 0,05$	$C_e = C_t + C_{\text{SS}} + C_M + C_P = \$ 0,48$	
Microscopio	$C_M = 0,06 \cdot E_c = 0,16$	Costo Total	
Pulidora	$C_P = 0,06 \cdot E_c = 0,23$	$C_T = P_p + S_b + S_c + S_s + C_e = \$ 43,12$	



➤ **Costos de producción del maquinado.**

El costo de producción viene dado por el gasto de materiales fundamentales y auxiliares, energía eléctrica y salario de la fuerza de trabajo en la fabricación de esta, durante el proceso de maquinado.

El costo total de elaboración de las probetas es de: 43,12 CUC

3.4. Impacto 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 que bajo la acción de las temperaturas altas y la 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 la deformación Plástica Superficial por rodadura, tiene un impacto ambiental insignificante, ya que el proceso de endurecimiento de metales por deformación plástica por el método de rodadura, es tecnología totalmente limpia, libre de gases, partículas sólidas o líquidos, solo se tiene en cuenta como impacto, la energía eléctrica que consume la máquina herramienta, (torno, fresadora o cepilladora) al realizarse el proceso. La cual se toma de la red nacional.

En este sentido resulta importante reiterar que la aplicación de la Deformación Plástica Superficial por rodillo simple, 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 dicha deformación 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 y evita además tener que rectificar al final.



Conclusiones del Capítulo III

1. En los experimentos realizados se demuestra que ocurre un incremento de la microdureza subsuperficial que se logra principalmente por el endurecimiento de la ferrita, que fue superior al de la perlita. Los mayores aumentos de la microdureza se obtienen cuando la fuerza y el avance de la herramienta tienden hacia sus niveles máximos analizados, 1 500 N y 0,25 mm/rev.
2. El efecto económico del proceso de elaboración de las probetas, producto de la Deformación Plástica Superficial es de un costo de **43,12 CUC**, existe un ahorro cuya magnitud está directamente relacionada con la cantidad de piezas a procesar
3. La deformación Plástica Superficial por rodillo, como alternativa tecnológica, puede ser un proceso más económico que otras variantes tradicionalmente empleadas para mejorar las propiedades físico-mecánicas de las piezas y sus cualidades superficiales.



Conclusiones Generales:

1. Las tensiones residuales en las capas superficiales de la pieza después de la deformación Plástica Superficial por rodadura constituye una consecuencia de la deformación plástica irregular que conlleva a una disminución del material.
2. Los parámetros de deformación (n , P , S) constituyen factores principales para el trabajo de endurecimiento de metales, y ellos pueden ser considerados a partir de las variables del proceso experimental: Número de revoluciones del husillo, Fuerza y Avance (cada una de ellas evaluadas en tres niveles), mediante la utilización de un diseño factorial de planificación de experimentos que ofrece la posibilidad de estimar la incidencia de dichas variables en el comportamiento mecánico y funcional del acero AISI 1045.
3. La Deformación Plástica Superficial por rodillo ocurre por el desplazamiento o dislocación de los cristales al desplazarse uno sobre otro, provocando una división dentro de los granos producto de la fuerza externa que actúa sobre el material.
4. Los resultados del análisis metalográfico, revelan en las muestras deformadas 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.

Recomendaciones:

1. Realizar el proceso de simulación a través de los MEF que permita establecer el comportamiento en la disminución del diámetro del material después de ser sometida al tratamiento de Deformación Plástica Superficial por rodillo.
2. Considerar en futuras investigaciones, la utilización de técnicas de difracción por Rayos X para la posible detección de los planos (111) y las direcciones (110), que permita seleccionar los reflejos más susceptibles de reflejar las deformaciones plásticas.
3. Proponer el proceso de Deformación Plástica Superficial como variante tecnológica para el incremento de la dureza en piezas simétricas rotativas y sustituir las operaciones de tratamiento térmico.



Bibliografías:

1. Alfonso, E; Martín, J. Aplicación de la Ley de Wolf-Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física "DIDACFISU' 2000". Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". 2000. 7p. Disponible en la World Wide Web en: De La Ley DeWolf-Bragg.html
2. Alfonso, E. et.al. 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). N1. Ener-Abril. 1995.
3. Alvarez, E; González, J. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.
4. Alvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J., Barr, J. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires.Facultad de Ingeniería, 2004.
5. American Heller Corporation. "Skiving & Burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003, <http://www.americanheller.com>.
6. Badiola, V. Materiales Departamento. Ingenierías Mecánica, Energética y de Materiales, Diseño de Máquinas I, 2004, España.
7. Barceinas, S y A.Juárez, H. Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
8. Barnett, M.R. Y Jonas, J.J. Influence of ferrite rolling temperature on microstructure and texture in deformed low C and IF steels ISIJ international (ISIJ int.) ISSN 0915-1559 Iron and Steel Institute of Japan international 1997, vol. 37, n°7, pp. 697-705 (31 ref.) Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, JAPON (1989) (Revue).
9. Barret, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p
10. Bengton, U. Design requeriments materials properties a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
11. Bencere Products. "Burnishing and Super Finishing",England, Obtenido de la Red mundial el 15 de Abril del 2003, <http://www.bencere.co.uk>.
12. Boada, O. "Métodos tecnológicos para aumentar la durabilidad de las piezas", Revista



- Construcción de Maquinaria, Año 10, No. 3, Septiembre-Diciembre 1985, Cuba.
13. Boada, O., Díaz, S., Campos, Y. "Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial", Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo-Agosto 2003, Pág. 53-58, Cuba. ISSN1029-516X.
 14. Boada, O., Sviagolski, Y. "Dispositivo para rodilar superficies cilíndricas con fuerza de apriete controlada del rodillo" Revista Construcción de Maquinaria, Año 8, No. 2, Mayo-Agosto 1983, Cuba.
 15. Bower, A F; Johnson, K L. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 37, no. 4, pp. 471-493. 1989.
 16. Boyle, J.y Spence, J. Stress analysis for creep. Londres: Butterworths, 1989.
 17. Bright Burnishing Tools. "What is roller burnishing?", India, Obtenido de la Red mundial el 3 de Mayo del 2003, <http://www.brightburnishingtools.com>.
 18. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.
 19. Caraballo, M.A; et al. Aplicaciones industriales del uso de los explosivos en el trabajo con los metales. CDRom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. 1997.
 20. Caraballo, M. A. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 2. 2004.
 21. Caraballo, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 1. 2004.
 22. Caraballo, M. A. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos, del acero al manganeso empleado en los equipos de laboreo minero. Tesis en opción al título de Master. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1999.
 23. Caraballo, M. A.; et al. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. Revista Minería y Geología. Vol XIV, No 2. 1997.
 24. Casals, B. Soldadura y embutición por explosión del titanio en la fabricación de



- recipientes a presión. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997.
25. Caubet, J.J. "Teoría y Práctica Industrial del rozamiento". España, 1971
 26. Cogsdill Tool Products, Inc. "Roller burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 8 de mayo del 2003, <http://www.cogsdill.com>
 27. Cullity, B. D. Elements of X – Ray Diffraction. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame. Instituto Cubano del Libro. Ediciones Revolucionarias. La Habana. 1967. 514p.
 28. Díaz, S., Boada, O. "Caracterización del bruñido por rodillo simple en la elaboración del acabado superficial de piezas". Revista Centro Azúcar, Universidad Central de Las Villas, No. 4, Octubre-Diciembre 2004. ISSN 0253-5757.
 29. Díaz, S., Robert, T. "Efecto del bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045", Revista Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C., Volumen 2, Número 7, Año 4, Septiembre 2005, México. ISSN 1665-7381.
 30. Dieter, G. Metalurgia Mecánica. MacGraw-Hill Book Company, Inc. 1967.
 31. Dorofev, Y.N. "Production of regular micro-reliefs by a cycloidally moving tool", Soviet Engineering Resource, Volume 6, Nº 5, 1986, Pages 11-13, USSR.
 32. El-Axir, M.H. "An investigation into roller burnishing", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 11, September 2000, Pages 1603-1617, UK.El-Axir, M.H.
 33. El-Axir, M.H. Ibrahim, A.A. "Some surface characteristics due to center rest ball burnishing", Journal of Materials Processing Technology, Volume 167, Issue 1, August 2005, Pages 47-53, The Netherlands.
 34. El-Khabeery, M.M. "Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials", Journal of Materials Processing Technology, Volume 132, Issue 1-3, January 2003, Pages 82-89, The Netherlands.
 35. El-Khabeery, M.M., El-Axir, M.H. "Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 12, September 2001, Pages 1705-1719, UK.



36. Ecoroll GmbH. "Roller burnishing", Germany, Obtenido de la Red mundial el 28 de Abril del 2005, <http://www.ecoroll.de>
37. Efun da, Inc. "Burnishing, Roller Burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 21 de febrero del 2005, <http://www.efunda.com>.
38. Elliot Tool Co. "Carbide roll burnishing tools", USA, Obtenido de la Red mundial el 25 de abril del 2003, <http://www.elliotttool.com>.
39. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág 53-89
40. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág 17-22
41. Gabb, T.P. Telesman, J., Kantzos, P., Prevey, P.S. "Improved method being developed for surface enhancement of metallic materials", *Advanced Materials and Processes*, Volume 160, No. 1, January 2002, Pages 69-72, USA.
42. Han, C.H., Pyoun, Y.S., Kim, C.S. "Ultrasonic micro-burnishing in view of eco-materials processing" *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal*, Volume 4, No. 1, 2002, Pages 25-28, Australia.
43. Hasegawa, S. "The road to smoother surfaces", *Manufacturing Engineering*, Volume 126, No. 2, February 2001, Pages 70, 72, 74, 76, 78, USA
44. Hassan, A.M., Al-Bsharat, A.S. "Influence of burnishing process on surface roughness, hardness and microstructure of some non-ferrous metals", *Wear*, Volume 199, Issue 1, 1 November 1996, Pages 1-8, UK.
45. Hassan, A.M., Abd Al-Wahhab, O.M. "The effects of roller burnishing parameters on the surface and subsurface hardness of aluminum components", *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, Volume 5, Issue 3, January 1997, Pages 241-248, USA.
46. Hassan, A.M. "The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 72, Issue 3, 15 December 1997, Pages 385-391, The Netherlands.
47. Hassan, A.M., Al-Jalil, H.F. Ebied, A.A. "Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 83, No. 1-3, 1 November 1998, Pages 176-179, The Netherlands.
48. Hassan, A.M., Al-Dhifi, S.Z.S. "Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process", *Journal of Materials Processing*



- Technology, Volume 96, No. 1-3, 1 November 1999, Pages 73-80, The Netherlands.
49. Hassan, A.M., Maqableh, A.M. "The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components", Journal of Materials Processing Technology, Volume 102, No. 1-3, 15 May 2000, Pages 115-121, The Netherlands.
 50. Hernández, H.G. Estudio del comportamiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica por rodadura. Informe Técnico. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2005
 51. Hernández, S. "Metodología de la Investigación." Editorial McGraw-Hil. México. 1997.
 52. Hu-Nai-Sai y Zhou Hui-Jiu The Effect of Surface Plastic Deformation on Fatigue Strength and its Mechanism. University Xian, China. 2002.
 53. Key To Steel. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
 54. Key To Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>.
 55. Korotcishe.L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág 53-64.
 56. Kruschov, M.M. Resistance of metals to wear by abrasion, as related to hardness. "Proceedings of Conference on Lubrication and Wear". London 55- 59. 1957.
 57. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359 – 360.
 58. Lebedko, A.I. "Increasing the service life of textile machinery by surface strain hardening", Metalovedienie Termicheskoie Obrabotka Met., No. 4, April 1982, Pages 54-55, USSR.
 59. Lee, S.S.G., Tam, S.C. Loh, N.H. "An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 free-form surface", Journal of Materials Processing Technology, Volume 29, No. 1-3, January 1992, Pages 203-211. The Netherlands.
 60. Lee, S.S.G., Tam, S.C. Loh, N.H." Ball burnishing of 316L stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, Volume 37, Issue 1-4, February 1993, Pages 241-251, The Netherlands.
 61. Lin, Y.C. Yan, B.H., Huang, F.Y. "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, 2001, Pages 673-682, UK.
62. Loh, N.H., Tam, S.C., Miyazawa, S. "A study of effects of ball-burnishing parameters on surface roughness using factorial design", Journal of Mechanical Working Technology, Volume 18, No. 1, January 1989, Pages 53-61, The Netherlands.
 63. Lubriner, J. Plasticity Theory. University of California at Berkeley. Charter 2, p 77-86.
 64. Malishev, A. Tecnología de los Metales. Editorial. MIR. URSS. 1983. Pag 258-289.
 65. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.
 66. Martínez, C. R. Ingeniería de Lubricación y Tribología. Fundamentos de tribología. Pág, 29-36, 43-47. 2006.
 67. Martynenko, O.V, "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 2002, March 1-September 10, 2002, Tula Technical University, Russia.
 68. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996
 69. Mazein, P.G. Prusakov, D.V., Tchunin, A.V. "Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations", Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue #1, (10). January-March 2001, Russia.
 70. Mech-India. "Process of burnishing", India, Obtenido de la Red mundial el 25 de Marzo del 2005, <http://www.mech.india.com>.
 71. Monaghan & Associates Inc. "Roller burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 22 de abril del 2003, <http://www.monaghaninc.com>.
 72. Moreno, P. A. "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 de 2005.
 73. Moya, J.C. "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, 1996, Cuba.
 74. Normas Cubanas:



75. NC 04-77:86. Determinación del contenido de la fase ferrítica en aceros austeníticos.
76. NC 10-55:86. Metalografía. Microfotografías. Escala de las Imágenes.
77. NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.
78. NC 10-57:86. Metalografía. Determinación del Tamaño del grano en los Metales. Métodos de Ensayo.
79. 75. Ogburn, F. "Roll to the finish", Cutting Tool Engineering, Volume 53, No. 6, June 2001, Pages 54-57, USA.
80. 76. Odintsov, L.G. Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial", Editorial Construcción de Maquinaria, 1987. Pág 385-422, URSS.
81. 77. Pacana, A.y Korzynski, M. "Roller burnishing parameters analyses with Taguchi method", Scientific Bulletins of Rzesow University of Technology, No. 193, Mechanics 58, 2002, Poland.
82. 78. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los materials. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 1999.
83. 79. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los materials. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. Pág 393-502. España.
84. 80. Pickering, F.B. Proceedings of High Manganese Steel, ASTM A 128 AB. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 1996. 34 p.
85. 81. Pochettino, A.A y Sánchez, P. Modelización del Endurecimiento por Trabajado en Materiales Metálicos. Aplicaciones a Materiales de Estructura Hexagonal Compacta. Vol. 157-162, 835-840, 1994.
86. 82. Pleiman, R.B. "Roller Burnishing comes to nonlinear surfaces", Modern Machine Shop, Volume 57, No. 9, February 1985, Pages 68-71, USA.
87. 83. Prevey, P.S. "Effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN718, Nickel base alloys", ASM International, Heat Treating Including Advances in Surface Engineering: An International Symposium in Honor of Professor Tom Bell and Professor Jerome N. Cohen Memorial Symposium on Residual Stresses in the Heat Treatment Industry Proceedings of the 20th Conference; Volume 1, 2000, Pages 426-434, USA.
88. 84. Prevey, P.S. Cammett, J. "Low cost corrosion damage mitigation and improved



- fatigue performance of low plasticity burnished in Al base alloy", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 10, No. 5, October 2001, Pages 548-555, USA.
89. 85. Smelianky, V. M., Kalpin Y. G., Barinov V.V. "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. 1990. URSS.
90. 86. Smelianky, V.M., Blumenstein, V.Yu. "Technological succession mechanics succession appropriatenesses of the plasticity resource exhaustion at the stage of surface plastic deformation", *Proceeding of International Conference of Materials*", May 2001, Russia.
91. 87. Surfing Tools, "Products". India, Obtenido de la Red mundial el 6 de abril del 2005, <http://www.surfinetools.com>.
92. 88. Tubielewicz, K., Zaborski, A. "Top layer of enhanced quality steel after burnishing", *Tribología*, Volume 28, N°. 5-6, 1997, Pages 956-962, Poland.
93. 89. Tubielewicz, K., Jezierski, J., Znorko, D.A. "Calculation pressures and the contact field in the contact zone of a burnishing roller and worked material", *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej*, No. 76, 2000, Pages 93-99, Poland.