



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ  
FACULTAD METALÚRGIA ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO. ING. MECÁNICA

# Trabajo de Diploma

**EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TÍTULO:** Capas deformadas por rodadura empleando rodillo simple.

**AUTOR:** Eddy Landis Frómeta Pineda.

**TUTORES:** Ing. Dayanis Alcántara Borges.

MsC. Tomás Fernández Columbié.

MsC. Isnel Rodríguez González.

Curso 2007-2008  
“Año 50 de la revolución”



## Declaración de autoridad

Yo: Eddy Landis Frómeta Pineda.

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

-----  
Eddy Landis Frómeta  
Pineda

-----  
Ing. Dayanis Alcántara  
Borges.

-----  
MsC. Tomás Fernández  
Columbié

-----  
MsC. Isnel Rodríguez  
González



## **Pensamiento**

*..... Y siempre mediremos, por encima de todo un técnico y un científico no por su conocimiento, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus conocimientos.*

*Fidel Castro Ruz.*



## **Dedicatoria**

*A las personas más comprensivas y tiernas, que me han dado el amor más puro que puede existir, las únicas personas que han permanecido siempre conmigo en las buenas y las malas desde que vine al mundo, mis padres Mirelda Pineda y Eddy E. Frómeta, que los quiero con la vida y son mi razón de existir.*

*A mi novia Yunaisis que siempre la querré y espero verla convertirse en una profesional.*

*A mi hermana Yanet que me ha apoyado en todo momento y es mi ejemplo a seguir.*

*A mi sobrinito Yohan Alberto que le sirva de ejemplo.*

*A mis amigos y familia en especial a mis queridos abuelos Ana Elvira, Miguelina y Miguel que siempre quisieron verme ser un Ingeniero.*

*En fin a todas las personas que me quieren.*



## **Agradecimientos**

*A la revolución por brindarme esta oportunidad de estudiar hasta alcanzar el éxito de convertirme en un profesional.*

*A mis padres Mirelda Pineda y Eddy E. Frómeta, a mi hermana Yanet por darme ánimo de seguir adelante.*

*A mis tutores McS Tomás Fernández, McS. Isnel Rodríguez, Ing. Dayanis Alcántara por confiar en mi y brindarme su ayuda.*

*A mi princesita Yunaisis, a todos mis amigos en especial Ricardo, Jordan, Uberto, Gilberto, Dailín, Oscar Poublete, a mis compañeros de cuarto y de aula principalmente a Mabel, por soportarme y apoyarme durante todo este tiempo.*

*A todos los que de una forma u otra contribuyeron con la realización de este trabajo y entre ellos a Digna y su hija que han sabido ayudarme en los momentos difíciles.*

*A mi familia por su apoyo, especialmente a todos los que confiaron en mi y me dieron ánimo para seguir adelante.*

**A todos muchas Gracias.**



## Resumen

El trabajo realiza una investigación, sobre la influencia generada por un rodillo de radio R en la Deformación Plástica Superficial del acero AISI 1045 para definir las regularidades del comportamiento de la dureza y determinar la dureza en las superficies de las capas deformadas por el proceso de deformación plástica superficial. Obteniéndose modelos lineales de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (A, D, B), las cuales están relacionadas con los valores de número de revolución, fuerza y avance.

Finalmente se describe el procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante rodadura, que permite aumentar el tiempo de explotación de piezas fabricadas de acero AISI 1045, con un significativo efecto económico, social y ambiental.



## **Abstract**

The work carries out an investigation, on the influence generated by a radio roller R in the Superficial Plastic Deformation of the steel AISI 1045 to define the regularities of the behavior of the hardness and to determine the hardness in the surfaces of the layers deformed by the process of superficial plastic deformation. Being obtained lineal models of least squares statistically significant that show a growing tendency of their mechanical and functional estates in the same measure that the independent variables of the experimentation process are increased (n, P, S), which are related with the securities of revolution number, force and advance.

Finally the technological procedure of hardening is described by means of rolling that allows to increase the time of exploitation of steel fabricated shapes AISI 1045, with a significant economic, social and environmental effect.

## Índice

## Páginas

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Marco teórico.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Principio de la Deformación Plástica Superficial por rodillo.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Generalidades acerca del acero AISI 1045 y su empleo industrial</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Composición química del acero AISI 1045.....</b>	<b>8</b>
<b>1.5. Propiedades físico-mecánicas del acero AISI 1045.....</b>	<b>9</b>
<b>1.6. Clasificación de las operaciones elementales de deformación.....</b>	<b>10</b>
<b>1.7. Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de deformación plástica superficial (Ley de Hooke).....</b>	<b>12</b>
<b>1.8. Comportamiento de la capa superficial de las piezas durante la deformación superficial por rodilado exterior.....</b>	<b>19</b>
<b>1.9. Conclusiones del Capítulo 1.....</b>	<b>23</b>
<b>Capítulo 2. Materiales y Métodos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Introducción.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. Generalidades.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3. Máquinas y Equipos empleados en la experimentación.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.1. Caracterización del torno 16D20.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2 Equipo para la medición de dureza.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4. Elaboración mecánica de las probetas para la deformación.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.1. Tiempo de maquinado en el corte con segueta mecánica.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2. Maquinado de la probeta.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.3. Velocidad de corte.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.4. Profundidad de corte.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.5. Potencia consumida para el corte.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.6. Tiempo de maquinado.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5. Selección del elemento deformante (rodillo).....</b>	<b>29</b>
<b>2.6. Regímenes para la deformación plástica superficial por rodillo.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7. Metodología que se aplica para la investigación experimental.....</b>	<b>34</b>
<b>2.7.1. Fuerza ejercida por la herramienta deformante (P).....</b>	<b>34</b>
<b>2.7.2. Número de revoluciones del husillo (n).....</b>	<b>35</b>
<b>2.7.3. Avance de la herramienta (S).....</b>	<b>35</b>
<b>2.7.4. Dureza Superficial (H).....</b>	<b>35</b>
<b>2.8. Conclusiones del capítulo 2.....</b>	<b>38</b>
<b>Capítulo 3. Resultados experimentales y su discusión.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Introducción.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Resultado de los regímenes para el maquinado de la probeta.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Resultado de los regímenes para la deformación plástica superficial por rodillos.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4. Método estadístico de planificación del experimento.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.1. Análisis factorial completo.....</b>	<b>45</b>

<b>3.4.1.1. Comportamiento de la dureza en relación con la fuerza.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1.2. Comportamiento de la dureza en relación con el avance.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4.1.3. Comportamiento de la dureza en relación con la profundidad..</b>	<b>51</b>
<b>3.4.1.4. Análisis del comportamiento de la Fuerza en relación con la Profundidad.....</b>	<b>54</b>
<b>3.5. Valoración Económica.....</b>	<b>56</b>
<b>3.5.1. Comparación de los costos por diferentes procedimientos.....</b>	<b>57</b>
<b>3.6. Valoración del impacto medio ambiental.....</b>	<b>58</b>
<b>3.7. Conclusiones del Capítulo 3.....</b>	<b>60</b>
<b>Conclusiones generales.....</b>	<b>61</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>63</b>
<b>Anexos</b>	

## **Introducción**

El empleo racional de nuevas técnicas y el aumento cada vez mayor de la mecanización y el empleo de tecnología a pesar de las limitaciones de recursos, representan aspectos donde se han alcanzado logros incuestionables en todo el país en la industria de la construcción de maquinarias. En nuestro país constituye algo primordial el desarrollo de tecnologías que permitan más ahorro de recursos, menos gasto de energía y menos contaminación ambiental. La problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas están relacionados con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante sus períodos de explotación, para poder recomendar una estructura adecuada, en cuanto al material y tratamiento térmico seleccionado (teniendo en cuenta a la hora de seleccionar estos materiales las diferentes exigencias económicas, tecnológicas, de explotación e higiénicas), para lograr un incremento en la vida útil de los órganos de trabajo de las máquinas y por tanto para la economía del país.

El acero en la actualidad es la más importante de las aleaciones metálicas conocidas, no habiendo existido en ninguna época otro material que tanto haya contribuido al progreso de la humanidad.

## **Situación Problemática**

La búsqueda de soluciones tecnológicas a partir de las reducciones del consumo de portadores energéticos en los procesos de fabricación de piezas, de manera tal que se obtengan propiedades mecánicas en los materiales según los requerimientos establecidos y la posibilidad de sustituir las operaciones de tratamiento térmico por la deformación plástica por rodadura en frío como variante tecnológica para incrementar la resistencia al desgaste en algunas piezas de acero AISI 1045 trae consigo la implementación de herramientas específicas para estos procesos.

Para obtener capas tratadas superficialmente se requiere de tratamientos térmicos como son: Cementación, nitruración, temple por alta frecuencia, no obstante a lo referido anteriormente estos tratamientos térmicos requieren de especialistas en los mismos, además son altos consumidores de portadores energéticos y afectan el ecosistema. Durante el proceso de Deformación por



rodadura se forman capas producto del mismo, un ejemplo de esto esta presente en los pasadores de los equipos de laboreo minero.

### **Problema**

Desconocimiento en la caracterización de las capas superficiales del acero 45 empleado en ejes de maquinas y equipos, para la selección de un método adecuado para dar mayor tiempo de vida a los mismos.

### **Hipótesis**

Si se aplican cargas a piezas cilíndricas fabricadas de acero 45 como son: **fuerza del rodillo (D), número de revolución (A), avance (B), es posible caracterizar las capas superficiales (C)**, que se originan en ejes de maquinas y equipos sometidos a fricción por rodadura.

### **Objetivo**

Determinar el comportamiento de las capas superficiales de las probetas de acero AISI 1045 deformadas en frío, en condiciones de aplicación de cargas por rodadura generada por un rodillo.

### **Objeto**

Probetas de acero AISI 1045.

### **Objetivos específicos**

1. Definir las regularidades del comportamiento de la dureza en la capa deformada por el método de rodadura generada por un rodillo.
2. Determinar la dureza en las superficies de las capas deformadas por el proceso de deformación plástica superficial.
3. Establecer el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso y que permite incrementar la dureza en las capas deformadas durante la deformación plástica superficial.

### **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 de la dureza en las capas deformadas durante el proceso de deformación plástica superficial del acero AISI 1045, deformado por rodadura.
4. Valoración de los resultados obtenidos y fundamentación del comportamiento de las capas deformadas.
5. Valoración económica e impacto ambiental.

## Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación

### 1.1. Introducción

Los equipos, dispositivos y maquinarias empleados en las industrias cubanas (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; 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, 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. (Varela, 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, 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. 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, et al, 2002).

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.

## **1.2. 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, (Álvarez, 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, 1957; 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 adecuado, 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.

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. (Coger, Jonson, 1989).

### **1.3. 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) y por corte y baja tendencia a las deformaciones y formaciones de grietas durante el temple (Lajtin, 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 (Bengton, 1991).

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).

#### 1.4. Composición química del acero AISI 1045

La composición química estándar del acero AISI 1045 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:** 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.

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

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

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

Como se aprecia en la bibliografía consultada, está relacionada la influencia de los elementos de aleación con las propiedades mecánicas y funcionales del acero 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.

### **1.5. 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-mecánicas, obtenidas en el acero AISI 1045. Estas son:

**Tabla1.2** Propiedades Físicas del acero AISI 1045.

Propiedades físicas del acero AISI 1045	Magnitud y unidad
Densidad	7,85 Kg/dm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	a 100 °C, 205 kN/mm <sup>2</sup>
	a 200 °C, 195 kN/mm <sup>2</sup>
	a 300 °C, 185 kN/mm <sup>2</sup>
	a 400 °C, 175 kN/mm <sup>2</sup>
	a 600 °C, 155 kN/mm <sup>2</sup>
Conductividad térmica	50 kW/m·K
Capacidad calorífica	460 J/kg·K
Resistencia eléctrica específica	0,12 Ω·mm/m

En la tabla 1,3 se reflejan las propiedades mecánicas del acero 45

**Tabla1.3** Propiedades Mecánicas del acero AISI 1045.

Propiedades mecánicas del acero AISI 1045	Magnitud y unidad
Tensión Límite de Fluencia mínima	350 MPa
Tensión Límite de Fluencia de Cizallamiento	175 MPa
Tensión Límite de Resistencia	430 MPa
Elongación mínima	35%
Estricción mínima	35%
Dureza.	170 HB
Resiliencia	100 J/ mm <sup>2</sup>

### 1.6. Clasificación de las operaciones elementales de deformación

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

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, 1957 y Cullity, 1967), 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 rodilado, conducen a una modificación sostenida del estado de tensión residual.

Los 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 deseado, teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar (Hernández, 2005; Korotcishe, 1989).

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. 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.

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 fuerza de contacto y no por la fricción superficial.

### **1.7. Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de deformación plástica superficial (Ley de Hooke)**

Robert Hooke en (1635-1703) estableció la ley fundamental que relaciona la fuerza aplicada y la deformación producida. Para deformaciones que no sean muy grandes, es decir, que no superen el límite elástico. Cuando una fuerza externa actúa sobre un material causa un esfuerzo o tensión en el interior del material que provoca la deformación del mismo. En muchos materiales, entre ellos los metales y los minerales, la deformación es directamente proporcional al esfuerzo. No obstante, si la fuerza externa supera un determinado valor, el material puede quedar deformado permanentemente, y la ley de Hooke ya no es válida. El máximo esfuerzo que un material puede soportar antes de quedar permanentemente deformado se denomina límite de elasticidad.

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

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

Según Alfonso, 2002, una de las clasificaciones más aceptadas de las tensiones residuales es la de Davidienkov, 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)

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)

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. Las deformaciones pueden 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, 1995; Alfonso, 2002).

El trabajo en frío (Moreno, 2005 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 incrementa la tensión. De esta forma, un metal endurecido por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo metal recocido antes de que ocurra la deformación.

Esto es fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones. En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida (Lajtin, 1973) 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 (Callister, 1999; Pero-Sanz, 2000).

Según (Alfonso, 1995; Martynenko, 2002), 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, (Martynenko, 2002)

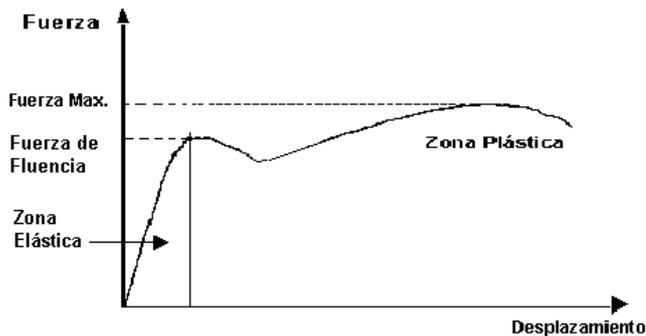
Según Pero- Sanz, 1992, en la teoría de la plasticidad se abordan los métodos de cálculo de tensiones y deformaciones en un cuerpo deformado. Es necesario, como lo es también para la teoría de la elasticidad, establecer ecuaciones de equilibrio y compatibilidad y determinar las relaciones experimentales 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.

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.

Para conocer las peculiaridades de la deformación plástica del material es necesario analizar su comportamiento de desplazamiento contra la fuerza aplicada al mismo, el cual se muestra en la figura.1.1. En su artículo Mazein, 2001 plantea, 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.



**Figura.1.1.** Muestra del gráfico de deformación plástica.

Las curvas tienen una primera parte lineal llamada zona elástica, en donde la probeta se comporta como un resorte, si se retira la carga en esa zona, la probeta regresa a su longitud inicial.

Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el punto de fluencia, desde aquí el material comienza a adquirir una deformación permanente. A partir de este punto, si se retira la carga la probeta quedaría más larga que al principio y se define que ha comenzado la zona plástica del ensayo de tracción. El valor límite entre la zona elástica y la zona plástica es el punto de fluencia.

Tanto Pero-Sanz, 1992, como Díaz, 2002, coinciden en plantear que en materiales estables poco sensibles a la velocidad de deformación, como el acero, la curva real de tensión ( $\sigma$ ) deformación ( $\epsilon$ ), conocida también como curva de fluencia, y que solo es válido desde el comienzo en la zona de fluencia plástica o de estabilidad plástica hasta la carga máxima a partir de la que se inicia la estricción local. El modelo teórico es el de Ludwick, que se expresa como:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1.1)$$

Donde:

$\sigma$  = Tensión correspondiente a la carga aplicada (MPa)

$\varepsilon$  = Deformación del material.

$n$  = Coeficiente de acritud o de endurecimiento por deformación en frío.

$K$  = Constante de plasticidad.

La función anterior crece uniformemente, y cualquier incremento de tensión mayor que cero ( $d\sigma > 0$ ) provoca un incremento positivo en la deformación  $d\varepsilon > 0$ ; los materiales estables, de importancia ingenieril desde el punto de vista de la conformación, están dentro de este grupo de materiales.

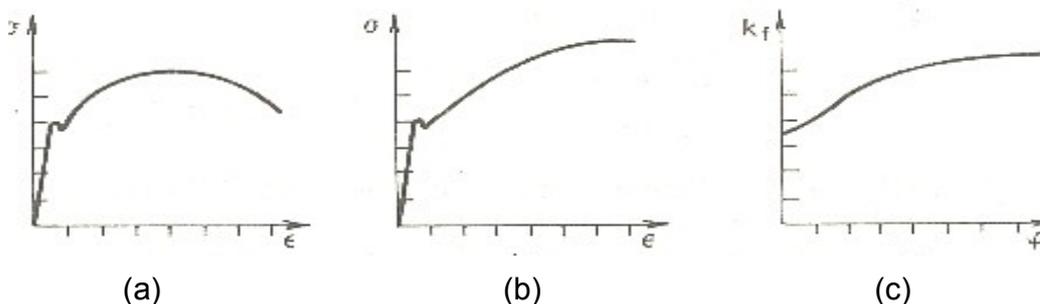
Junto al modelo anterior han aparecido en la literatura técnica (Smith, 2001), para el estudio de la relación entre las tensiones y las deformaciones, otros modelos que permiten caracterizar el comportamiento del material bajo determinadas condiciones tecnológicas. Sin lugar a dudas, el modelo representado en la ecuación (1.1) se ajusta adecuadamente a los propósitos de la experimentación de este trabajo.

Se ha determinado que en estos procesos de compresión directa surgen tensiones residuales una vez finalizados los mismos. En Dieter, 1967 y Álvarez, 1995, se plantea que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo.

Hay varios procesos tecnológicos importantes, entre lo que se encuentra la deformación plástica superficial por Rodillo, que producen elevadas tensiones residuales de compresión con un valor máximo en la superficie o en capas inmediatas debajo de ella y que disminuyen con rapidez al aumentar la distancia desde la superficie, lográndose un gradiente de tensiones brusco. Los granos superficiales y subsuperficiales, que fueron alargados plásticamente, quedarán en un estado de compresión. Estas altas tensiones permiten un aumento de la resistencia a la rotura por fatiga y también un aumento de la resistencia al agrietamiento por corrosión (Pero- Sanz, 2000; Schejve, 2004; Álvarez, 1995).

No se puede dejar de abordar, en un trabajo que trate sobre la deformación plástica en frío, el tema de las tensiones y las deformaciones por la importancia que este tiene y porque ambas son parte del fundamento teórico del proceso de deformación que se analiza. En su tesis (Martynenko, 2002), plantea que desde que se formularon las bases teóricas de la plasticidad hasta el presente, los estudios ingenieriles han estado preponderantemente dirigidos hacia el análisis de la distribución de tensiones y deformaciones en los materiales bajo un tipo de deformación, y en la predicción del rango límite de esta deformación en relación con la resistencia intrínseca del material.

En la figura 1.2. a), se muestra la representación de una curva convencional de tensión contra deformación de un material que se comporta de manera dúctil, obtenida en el ensayo de tracción. Es sabido que el valor de la tensión es el cociente de la fuerza aplicada a la probeta sobre el área inicial de la misma, por lo cual a partir de una deformación determinada el valor de tensión necesario para seguir deformando la probeta disminuye pues la sección transversal disminuye. Si se plantea en ( $\sigma$ ) el valor real de la fuerza aplicada sobre el área instantánea, ocurre lo que aparece en la figura 1.2. b). Al tratar de lograr deformaciones plásticas apreciables las deformaciones elásticas tienen valores pequeños, comparados con aquellas, por lo que generalmente se desprecian y esto visto gráficamente en la curva equivale a eliminar la parte elástica inicial de la misma, y se obtiene la figura 1.2. c) donde se muestra la curva plástica o de fluencia del material (Mallo. 87).



**Figura 1.2.** Transformaciones de una curva de tensión-deformación convencional (de fluencia del material) obtenida en un proceso de tracción: a) curva convencional, b) curva de tensiones reales, c) curva de tensiones reales una vez eliminada la parte elástica.

La idea de caracterizar la plasticidad para operaciones de conformación sobre la base del ensayo de tracción es predominante desde hace tiempo; pero tal aproximación está siendo considerada y sobre esa misma base, buscándose otras aproximaciones para caracterizar el proceso de deformación plástica.

En (Mallo, 87) se plantea que el análisis exhaustivo del desarrollo de los procesos por deformación plástica se está intentando realizar mediante el seguimiento en cada instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia. Un estudio aproximado de la transformación de la superficie de fluencia se puede realizar mediante los criterios del endurecimiento por deformación en frío.

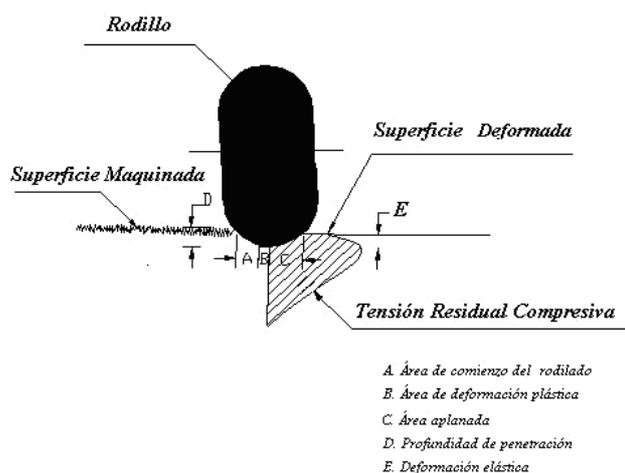
También se puede destacar que los modelos plásticos y elastoplásticos, a pesar de tomar en cuenta el fenómeno de la rotura del material, no resuelven de forma general e integral el fenómeno de modelación del estado tensional-deformacional en un punto de un material dado, porque desprecian, al igual que los modelos elásticos, la esencia de los fenómenos físicos reales.

Según (Odintsov, 1987) los principales factores de fortalecimiento del proceso de deformación plástica superficial son la profundidad e intensidad de la deformación de la capa superficial y el sistema de tensiones resultantes. Teniendo en consideración estos indicadores de la calidad de la capa superficial, en el caso de usar rodillos para alcanzar la deformación plástica superficial, la mayor influencia la tienen la fuerza de deformación, la magnitud máxima de las tensiones normales y tangenciales que actúan en el punto de deformación, y también la relación de sus valores, que determinan la dirección de las deformaciones y desplazamientos del metal en la zona de contacto.

Como resultado de la revisión bibliográfica se ha determinado que en estos procesos de compresión directa surgen tensiones residuales una vez finalizados los mismos. En (Dieter, 1967) se plantea que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo.

Hay varios procesos de deformación plástica superficial, entre los que se encuentra la deformación por rodillo, que producen elevadas tensiones residuales de compresión con un valor máximo en la superficie o en capas inmediatas debajo de ella y que disminuyen con rapidez al aumentar la distancia desde la superficie, lográndose un gradiente de tensiones brusco. Los granos superficiales y subsuperficiales, que fueron alargados plásticamente, quedarán en un estado de compresión. Estas altas tensiones permiten un aumento de la resistencia a la rotura por fatiga y también un aumento de la resistencia al agrietamiento por corrosión.

En la Figura 1.3, se puede apreciar un esquema del comportamiento de la distribución de las tensiones residuales compresivas y observar cómo los valores más altos se encuentran en las capas subsuperficiales, zona muy cercana a la superficie. Además, se muestran las diferentes zonas de trabajo de este proceso.



**Figura 1.3.** Esquema de la acción de deformación por rodillo y la distribución de la tensión residual compresiva.

### **1.8. Comportamiento de la capa superficial de las piezas durante la deformación superficial por rodillado exterior.**

El incremento de las propiedades de explotación de las piezas, como resultado de la elaboración por deformación plástica superficial tiene lugar, en gran medida, por la consolidación del metal, por el surgimiento de tensiones residuales de compresión y la formación de una rugosidad superficial con perfil óptimo.

En correspondencia con los nuevos conocimientos de la naturaleza de la fatiga de los metales, estos defectos superficiales de la capa pueden, bajo la acción de las cargas actuantes durante la explotación de las piezas desarrollarse aún más, por ello la capacidad de trabajo de las piezas puede estar condicionada no solamente por el nivel de la capa deformada consolidada y de las tensiones residuales compresivas, sino también del grado de utilización de la capacidad plástica del metal. Sin embargo, el método de su cálculo en la teoría y en la práctica de la deformación plástica superficial no está suficientemente desarrollado y ello justifica la realización de investigaciones sobre su influencia en la capa superficial después de la deformación en la resistencia de las piezas.

La regularidad del uso o empleo de la capacidad plástica se ha establecido por medio de la determinación experimental de los parámetros del estado deformacional - tensional de los planos principales (planos de avance) de los focos de deformación y el cálculo de los programas de cargado de la capa superficial en las coordenadas: grado de deformación del desplazamiento y el índice del estado tensional. El estado tensional fue determinado según la teoría de la cinemática de la deformación de los metales. El grado de deformación de desplazamiento fue determinado con el auxilio del método de las redes coordenadas.

El modelo descrito da una explicación científica sobre lo conocido de la práctica de rodilado, en correspondencia con lo cual las superficies destruidas durante la elaboración en regímenes no deseables se encuentran en los vértices de las ondas. La magnitud del surgimiento de grietas depende de la intensidad del curso plástico secundario, los cuales a su vez dependen del régimen de fuerza del rodilado, del avance y de la forma del perfil del rodillo.

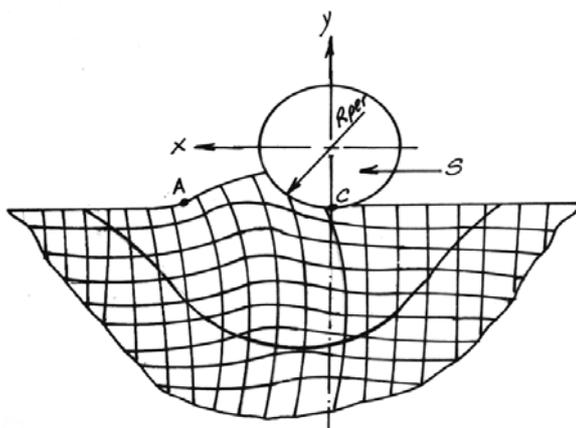
Es posible, bajo el establecimiento de su vinculación cualitativa en el régimen de rodilado garantizar tecnológicamente el estado de la capa superficial según el parámetro de plasticidad. El cambio del diámetro o de la fuerza de rodilado, lo cual es habitual en la práctica de la deformación plástica superficial como factor tecnológico básico, no es complicado. En este caso es necesario según los valores del diámetro, avance del rodillo, radio de la pieza y el diámetro del rodillo y de la pieza en bruto determinar por las

dependencias conocidas para el cálculo del área de contacto y multiplicarla por la presión media en el área de contacto, lo cual para las aplicaciones ingenieriles se puede tomar como igual a la dureza del material a elaborar.

El cuadro del estado deformacional-tensional de la capa del metal se representa en la figura 1.4. El estado tensional fue determinado según la teoría de la cinemática de la deformación de los metales. El grado de deformación de desplazamiento fue determinado con el auxilio del método de las redes coordenadas. Según los criterios de (Smelianki, Blumenstein, 2001).

De esta manera para el cálculo de las tensiones, hace falta determinar las deformaciones de la superficie en la zona de contacto, o que es lo mismo, la cinemática de los puntos de la zona de deformación. Como trayectoria de los movimientos de los puntos de la superficie al elaborar se toma la familia de las cicloides, suponiendo que el punto inferior del rodillo de deformar en su corte dado perpendicularmente al eje, en el momento dado se desplaza sin deslizamiento. Una cicloide es una curva que describe un punto perteneciente a una rueda que gira sin deslizarse. Con más precisión se puede decir que es el lugar geométrico generado por el punto de una llanta o circunferencia rodando sobre una línea recta.

Teniendo en cuenta la interrelación entre las tensiones y las deformaciones que se determinan, se puede determinar la distribución de las tensiones por la superficie de contacto en la superficie frontal del rodillo.



**Figura. 1.4** Sección esquemática del estado de deformación de la capa con avance de la herramienta.

Como se aprecia en la figura anterior, 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 fuera del contacto, en el límite de los cuales se cambia el aspecto del estado deformacional. El valor de la velocidad del grado de deformación del desplazamiento es mayor en la cúspide de la onda deformacional, y según se acerca al punto más bajo del rodillo se disminuye, o sea, que bajo el rodillo la magnitud es insignificante. El valor máximo del estado tensional surge un poco delante del punto (parte más baja del rodillo) en sentido o dirección del avance.

El valor mayor del parámetro tiene lugar cercano a la cúspide de las ondas. En la profundidad de la capa superficial tiene lugar un carácter análogo de la distribución de los parámetros del estado tensional-deformacional, aunque su valor se disminuye progresivamente en la profundidad de los (FD).

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. Por ello, los parámetros del estado físico-mecánico de la capa superficial, en particular la plasticidad, deben determinarse considerando este estado complejo de las cargas actuantes.

## 1.9. Conclusiones del Capítulo 1

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas y examinadas permite plantear las siguientes conclusiones:

- La bibliografía consultada, aporta información sobre principio de la Deformación Plástica Superficial por rodillo además de las propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero AISI 1045, pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales, y en ninguno de ellos nos revelan las regularidades del comportamiento de las capas mediante la Deformación Plástica Superficial generadas por un rodillo.
- El proceso conocido como Deformación Plástica Superficial por rodillo simple está establecido como un proceso de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial, resultando una variante tecnológica apropiada para proporcionar mayor resistencia al desgaste, mayor resistencia a la corrosión, mayor resistencia a la fatiga y una mayor durabilidad.
- El análisis bibliográfico nos permitió determinar la clasificación de las operaciones elementales de deformación plástica superficial, así como los fundamentos de las tensiones y las deformaciones (Ley de Hooke) y el comportamiento de la capa superficial de las piezas durante la deformación superficial por rodilado exterior.

## **Capítulo 2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Introducción**

El segundo capítulo desarrolla los conceptos fundamentales relacionados con la fuente de energía utilizada en la deformación plástica superficial del acero AISI 1045, la justificación de su empleo y las variables que le caracterizan con sus niveles.

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 endurecimiento por trabajo de deformación en frío.

Se describe además, el análisis de regresión para determinar la influencia de la deformación plástica superficial por rodillo de piezas simétricas rotativas fabricadas de acero AISI 1045.

Finalmente, se desarrollan los procedimientos tecnológicos para el endurecimiento por rodadura del acero AISI 1045 de piezas de equipos y maquinarias que emplean este tipo de acero.

#### **En este capítulo se plantea como objetivo**

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

### **2.2. Generalidades**

Del capítulo anterior se desprende la necesidad de formular e introducir el procedimiento de la medición de la dureza en tres partes diferentes de la probeta, en la superficie redilada, en la superficie que se está rodilando y en la superficie sin rodilar (en dicha superficie se procede a la medición en una sola probeta, debido a que el valor de la dureza será la misma en esta superficie para las restantes) con vista a lograr resultados confiables que estén avalados científicamente.

Como todo tratamiento por deformación plástica en frío se parte de tres elementos primordiales: la herramienta, la máquina herramienta y el material a emplear. Se

establecen, a partir de un estudio y caracterización de las experiencias y tendencias actuales nacionales e internacionales, las acciones inmediatas a acometer.

Con todos los datos obtenidos de los controles realizados antes y después del deformado se lleva a cabo la investigación experimental, cuyo procesamiento estadístico se realiza con ayuda del software Excel 2000 y Statgraphics Plus 5.1.

Los resultados son discutidos y se obtiene adecuadamente el modelo empírico-matemático que permite la determinación de la dureza de la capa y los modelos que describen el comportamiento, en la superficie rodilada, en la superficie sin rodilar y en la superficie que se está rodilando bajo el efecto de los parámetros de la deformación plástica superficial por rodillos.

Complementando el procedimiento propuesto, se realiza la valoración económica donde se efectuaron los cálculos estimados de los costos de fabricación de la herramienta de deformar y 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.

### **2.3. Máquinas y Equipos empleados en la experimentación**

La eficacia de la estructura de la producción es una consecuencia que depende de cuan correcta haya sido en su elaboración la solución de las cuestiones vinculadas con el nivel de aprovechamiento del equipo tecnológico, con el ciclo prolongado de producción y con la organización de un trabajo rítmico.

#### **2.3.1. Caracterización del torno 16D20**

Los trabajos de torneado y la experimentación se realizaron en el torno 16D20, en el mismo se pueden efectuar todas las operaciones en cuerpos de revolución, presenta las mejores cualidades del sistema de mando, en el cual está centralizado 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.

### 2.3.2. Equipo para la medición de dureza

Para determinar la dureza de cada probeta en las tres partes diferentes se tomaron muestras de cada una de ellas, se pulen debidamente con lija de 400 granos de partículas abrasivas por  $\text{mm}^2$  para evitar que alguna suciedad u óxido provocara errores en los resultados. Las mediciones de la dureza se realizaron por el método Rocwell (HRC), y se efectuaron al menos tres mediciones para cada probeta en las tres partes diferentes y en diferentes lugares. Para realizar este ensayo se utilizó un durómetro Vickers.

### 2.4. Elaboración mecánica de las probetas para la deformación

Las operaciones de corte para la toma de las probetas, se realizaron con una segueta mecánica para corte de metales, garantizando un constante y severo régimen de enfriamiento evitando que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso de corte pudieran aparecer transformaciones en la estructura. Se realizó un tipo de probeta.

Corte de las probetas: L= 100 mm X 50 mm. Norma ASTM E 92

#### 2.4.1. Tiempo de maquinado en el corte con segueta mecánica

Por cada probeta se emplearon 2 minutos debido a que son 27 probetas, se consumieron 54 minutos.

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

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

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

En el torneado se empleó una cuchilla de 45° con sujeción mecánica Sandvik, código del vástago PSSN R 25 25 M 12, con una plaquita SNMG 12 04 08-PM de calidad 4 025 (SANDVIK Coromant KoroKey, 1996).

#### 2.4.2. Maquinado de la probeta

- **Frecuencia de rotación del husillo**

Se denomina frecuencia de rotación al número de vueltas que realiza el husillo de la máquina para ejecutar el proceso de maquinado.

$n = 250$  rev/min según Fernández, T. 2007

#### 2.4.3. Velocidad de corte

Se define como velocidad de corte a 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.

$S = 0,2$  mm/rev.

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

Donde:

$V_c$  = Velocidad de corte.

1000 = Factor de conversión de metro a milímetro.

#### 2.4.4. 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.

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

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

#### 2.4.5. Potencia consumida para el corte

Es la potencia necesaria que requiere o necesita la máquina herramienta para vencer las fuerzas que se oponen en las operaciones a realizar.

$$N_c = \frac{P_z \cdot V_c}{6120}; \text{ kW.} \quad (2.3)$$

Donde:

N<sub>c</sub> = Potencia consumida.

$$P_z = C_{fz} \cdot t^{xyz} \cdot S^{yz} \cdot K_{fz}; \text{ kgf.} \quad (2.4)$$

Donde:

P<sub>z</sub> = Fuerza de corte.

C<sub>fz</sub> = Factor que depende de las propiedades mecánicas del metal que se elabora.

xyz y yz exponente del grado de t y S.

K<sub>fz</sub> es el coeficiente de corrección.

#### 2.4.6. 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.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i; \text{ min.} \quad (2.5)$$

Donde:

T<sub>m</sub> = Tiempo de maquinado; mm.

L = Longitud a maquinar; mm.

i = Números de pasadas.

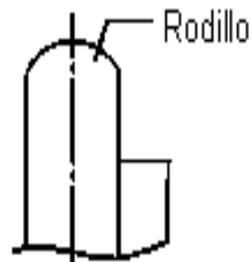
n = Números de revoluciones; rev/min.

s = Avance; mm/rev

## 2.5. Selección del elemento deformante (rodillo)

El elemento deformante (rodillo) (Cogsdill Tools. 2005, Elliot Tools. 2004, Bright Burnishing. 2005, Odintov, L.G. 1987), es fabricado de acero rápido (HSS), aceros aleados con cromo, 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, L.G. 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) (Anexo 1), tiene 50 mm de diámetro, es de acero AISI 5140 con una dureza de 65 HRC, un acabado Ra de 0,5  $\mu\text{m}$  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



Donde:

$P_p$  = Esfuerzo en el rodillo; N.

$R_2$  = Radio de la superficie de endurecimiento de la pieza; mm.

$R_1; R_3$  = Radios de la sección de trabajo del rodillo, mm.

$E$  = Módulo de elasticidad de la pieza; MPa

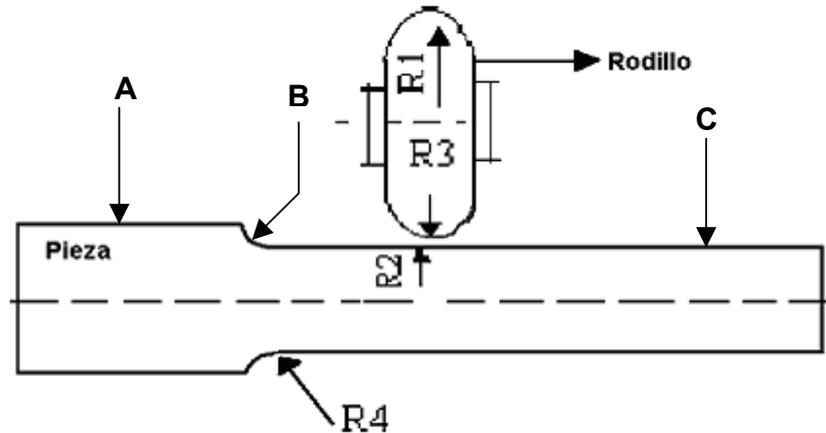


Figura. 2.2. Radios de curvaturas del rodillo y de la pieza.

Variando el esfuerzo sobre la herramienta de deformar, se puede de forma dirigida cambiar la magnitud y el carácter de la distribución de las tensiones creadas en la zona de contacto y de este modo influir sobre el efecto de endurecimiento, el nivel y el carácter de distribución de las tensiones remanentes y determinarlo por la siguiente ecuación.

$$P_p = 12,5\sigma_T \left( \frac{d}{100} \right)^2 \quad (2.8)$$

Donde:

$P_p$  = Fuerza ejercida por el rodillo sobre el material; N.

$\sigma_T$  = Máxima tensión del material a la tracción; N/mm<sup>2</sup>.

$d_{eje}$  = Diámetro del eje (probeta); mm.

12.5 = Coeficiente para la deformación plástica superficial con rodillos.

100 = Coeficiente que realiza la transformación de mm a m.

El esfuerzo de deformación  $P_p$  está formado por tres componentes: axial ( $P_x$ ), radial ( $P_y$ ) y tangencial ( $P_z$ );  $P_x, P_z$ , por su magnitud mucho menor que  $P_y$ , por eso  $P \approx P_y$ , para evitar

el resbalamiento del rodillo, provocado por la fuerza  $P_x$ , es conveniente situarlo bajo un ángulo  $\beta = 4-10^\circ$  hacia el eje de la pieza en tratamiento.

En dependencia del esfuerzo y de la resistencia del material, la profundidad del endurecimiento ante el tratamiento por rodillo se determina por:

$$h = \sqrt{\frac{P}{2\sigma T}} \quad (2.9)$$

Donde:

$h$  = Profundidad de la capa endurecida; mm.

$P$  = Fuerza ejercida por la herramienta; N.

$\sigma T$  = Máxima tensión del material a la tracción; N/mm<sup>2</sup>

Con el aumento del coeficiente de la fricción externa y de la superficie de contacto del rodillo con la superficie de tratamiento, aumentan las irregularidades de la deformación plástica y como consecuencia el nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión. Las tensiones surgen durante la compresión mutua de dos cuerpos en contacto, bajo la acción de una fuerza externa, estando el material en un estado tensional volumétrico, al no poderse deformar libremente en esta zona. Las tensiones de contacto tienen un carácter puramente local y disminuyen consecuentemente a medida que se alejan de la zona. El área real de tensiones máxima de contacto para la superficie de cuerpos curvos cuando se encuentran en contacto se determina a partir de la fórmula de Hertz, siempre que el estado tensional sea volumétrico. La expresión para determinar la magnitud del área de la deformación con rodillos según Alvarez, G, 1989 es:

$$\sigma_{\text{máx}} = 0,245 \cdot n_p \cdot \sqrt[3]{Fn \cdot E^2 \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2} \quad (2.10)$$

Donde:

$\sigma_{\text{máx}}$  = Tensiones máximas en el área de contacto; MPa.

$F_n$  = Fuerza sobre la zona de contacto; N.

$R_{1,2,3,4}$  = Radios de curvatura del rodillo y la pieza respectivamente; mm

$n_p$  = Coeficiente de seguridad de pandeo que depende de la relación:  $\frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1}$

Teniendo en cuenta el carácter de la deformación, las características operacionales, las condiciones de carga establecidas como fundamento y el criterio de (Stiopin. 1979), se valora el comportamiento de las tensiones locales, las cuales aparecen en los lugares de transmisión de la presión de un cuerpo a otro, formándose un área de contacto circular, que se considera el área reducida para las deformaciones por fluencia y el procedimiento matemático para relacionar los esfuerzos y las deformaciones considerando el radio para la mayor carga de trabajo.

$$r = 2,15 \cdot \sqrt{\frac{P}{E} \left( \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \right)} \quad (2.11)$$

Donde:

r = radio del área del contacto circular; mm<sup>2</sup>.

P = Fuerza o carga de trabajo; N.

E = Modulo de elasticidad de la pieza; MPa.

d<sub>1,2,3,4</sub> = Diámetro de la pieza y del rodillo respectivamente; mm.

En el caso que se analiza para una relación tensión-deformación se resume que, durante el proceso de deformación plástica, el material sometido a este proceso, se logra el compactamiento de sus granos por el aplastamiento de los mismos lo que permite incrementar su dureza por acritud. Las tensiones de aplastamiento se consideran uniformemente distribuida sobre el área de aplastamiento y por lo tanto, la condición de resistencia al aplastamiento puede determinarse por la fórmula 2.7:

$$a_{\text{máx aplast}} = \alpha \cdot \sqrt[3]{P \cdot E^2 \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2} \right)^2} \quad (2.12)$$

Donde:

$\sigma_{\text{máx aplast}}$  = Tensión máxima de aplastamiento; MPa.

$\alpha$  = Coeficiente que depende de la relación  $\frac{A}{B}$

P = Fuerza o carga de trabajo; N.

E = Módulo de elasticidad de la pieza; MPa.

d<sub>1,2,3,4</sub> = Diámetro de la pieza y del rodillo respectivamente; mm.

Para el caso de la deformación que se analiza, los materiales son de diferentes dureza, las superficies de estos cuerpos en contactos se analizan como un cilindro de  $R_2$  y un rodillo de  $R_1$ , la relación depende de los radios de curvatura principales de los cuerpos en contacto, denotándose como curvatura principal, las curvaturas máxima y mínima, situada en dos planos mutuamente perpendiculares, que pasan por el centro de la curvatura.

## 2.7. Metodología que se aplica para la investigación experimental

### • Propuesta del modelo del diseño experimental

Para la confirmación de la hipótesis científica se escogió un diseño de experimento factorial completo (Gutierrez, F. y R. De la Vara, 2003), con dos variables y tres niveles. Este método de planificación estadística de la investigación, establece el número de ensayos (N) a realizar.

Las probetas se someten 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. Teniendo en cuenta que no se dispone de elementos, que permita fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan la calidad del proceso de endurecimiento del acero AISI 1045, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar de tema, se considera que son las más importantes:

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

#### 2.7.1. Fuerza ejercida por la herramienta deformante (D)

Variable cuantitativa, directamente proporcional a las variables (A) y (B). 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, está vinculada, en primer lugar con el número de revoluciones del husillo (n) y en segundo lugar con el avance de la herramienta. Se aplicaran cargas de

500, 1 500 y 2 500 N. Las cargas se establecen en correspondencia con la dureza a obtener.

### **2.7.2. Número de revoluciones del husillo (A):**

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.

La selección del número de revolución nos permite evaluar el comportamiento de la pieza en todos sus puntos, ya que cualquier punto hace por minuto el mismo número de revoluciones, con este parámetro se logra que la dureza a obtener sea homogénea en toda longitud y diámetro.

### **2.7.3. Avance de la herramienta (B)**

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.

El avance está limitado por las fuerzas que actúan durante el proceso de elaboración de la pieza, las cuales pueden conducir a la rotura de la herramienta.

### **2.7.4. Dureza Superficial (C)**

Variable cuantitativa, define el comportamiento del proceso, es la que se medirá al concluir la Deformación Plástica Superficial.

Actualmente se admite que la dureza es uno de los parámetros más importante de los materiales. Se acepta también que este parámetro es el más importante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste.

Como se ha dicho, el endurecimiento por deformación está relacionado con el incremento de la tensión requerida para producir deslizamiento debido a una deformación plástica anterior. En este proceso se aumenta la aptitud para la deformación plástica.

La elección de cada uno de los niveles está determinada 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.

**Tabla 2.1.** Parámetros de entrada del experimento.

Parámetros	Niveles			
	Símbolo	Mínimo	Medio	Máximo
Fuerza (N)	P	500	1500	2500
Núm de Rev (rev/min)	n	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0.075	0.125	0.25
Duerza (HRB)	H	HRB	HRB	HRB
Diámetro de rodillo (mm)	50			

El número de experimento cuando intervienen k factores con tres niveles cada uno (-1,  $\Delta$  y +1), se determina con un arreglo de la función exponencial:  $N = 3^k$

Donde:

N = Número de experimentos.

K = Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que  $k = 2$  luego, el número de experimento sería:  $N = 3^2 = 9$  experimentos.

La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla. 2.2

**Tabla 2.4** Matriz de planificación del experimento.

Niveles	Respuestas			Salidas		
	A (rev/min)	D(N)	B (mm/rev)	H (HRB)		
Nivel superior (+1)	27	2 500	0,25			
Nivel medio ( $\Delta$ )	54	1 500	0,125			
Nivel inferior (-1)	110	500	0,075			
Número de ensayo				HRB (C <sub>1</sub> )	HRB (C <sub>2</sub> )	HRB (C <sub>3</sub> )
1a	27	500	0,075	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
1b	27	500	0,075	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
1c	27	500	0,075	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
2a	27	1500	0,075	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
2b	27	1500	0,075	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
2c	27	1500	0,075	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
3a	27	2500	0,075	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
3b	27	2500	0,075	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
3c	27	2500	0,075	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
4a	54	500	0,125	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
4b	54	500	0,125	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
4c	54	500	0,125	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
5a	54	1500	0,125	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
5b	54	1500	0,125	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
5c	54	1500	0,125	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
6a	54	2500	0,125	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
6b	54	2500	0,125	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
6c	54	2500	0,125	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
7a	110	500	0,25	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
7b	110	500	0,25	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
7c	110	500	0,25	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
8a	110	1500	0,25	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
8b	110	1500	0,25	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
8c	110	1500	0,25	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c
9a	110	2500	0,25	HRB 1a	HRB 2a	HRB 3a
9b	110	2500	0,25	HRB 1b	HRB 2b	HRB 3b
9c	110	2500	0,25	HRB 1c	HRB 2c	HRB 3c

En total, para el desarrollo de los experimentos se utilizarán 27 probetas deformada por rodadura (probetas marcadas todas del 1 al 9, seguido de la letra "a" para la primera réplica, la letra "b" para la segunda, y la letra "c" para la tercera réplica).

## 2.8. Conclusiones del capítulo 2

- Las ecuaciones desarrolladas definen el comportamiento del método de deformación plástica superficial por rodadura en función del carácter de la fricción de los dos cuerpos en contacto y posibilitan la estimación de la dureza en el acero AISI 1045 cuando es sometido a este proceso.
- Los parámetros de deformación (A, D, B) 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.
- El procedimiento tecnológico descrito anteriormente establece la secuencia tecnológica para el endurecimiento mediante la deformación plástica superficial con rodillos, de piezas fabricadas de acero AISI 1045.

## **Capítulo 3. Resultados experimentales y su discusión**

### **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 expresiones matemático estadísticas que describan las regularidades del comportamiento mecánico y funcional 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, y los modelos experimentales obtenidos; el mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045 en las referidas condiciones.

Finalmente, se realiza una evaluación del procedimiento tecnológico para el endurecimiento mediante rodadura, de piezas simétricas rotativas fabricados de acero AISI 1045.

#### **En este capítulo se plantea como objetivo**

1. La realización de la valoración 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.

La fuerza de compresión actúa sobre toda la zona de contacto de forma distribuida y uniformemente a lo largo del sector.

### 3.2. Resultado de los regímenes para el maquinado de la probeta

Para hallar el valor de la velocidad de corte con la que trabaja la máquina se emplea la fórmula (2.1)

$$V_c = \frac{3.14 \cdot 50\text{mm} \cdot 250\text{rev}/\text{min}}{1000}$$

$$V_c = 39,25 \text{ m/min}$$

Esta  $V_c$  de corte permite realizar el proceso de arranque del metal, además evita el calentamiento en la superficie y el endurecimiento de la misma por la acritud.

El resultado de la fórmula (2.2) es la dimensión de la capa de metal que arranca la cuchilla de una pasada.

$$t = \frac{50\text{mm} - 40\text{mm}}{2}$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

La potencia consumida por la máquina para el corte en la ecuación (2.3) nos proporciona como resultado:

$$N_c = \frac{P_z \cdot 39,25\text{m}/\text{min}}{6120}$$

$$N_c = 3.0 \text{ kW}$$

La potencia de corte calculada nos permite realizar el proceso ya que la máxima potencia que consume la máquina es de 7,5 kW.

La ecuación (2.4) nos facilita el resultado de la fuerza de corte empleada por la máquina.

$$P_z = 475,41 \text{ kgf}$$

El tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo reflejado en la ecuación (2.6) nos muestra como resultado:

$$T_m = \frac{100}{250 \cdot 0.2} \cdot 1$$

$$T_m = 2 \text{ min}$$

Debido a que se utilizaron 27 probetas para la realización del experimento el tiempo de maquinado total fue de 54 min.

### 3.3. Resultado de los regímenes para la deformación plástica superficial por rodillos.

La resistencia de las piezas de las máquinas no sólo depende del grado de endurecimiento, sino de la presencia en la superficie de la pieza de tensiones residuales.

Se determina la fuerza de compresión que actuará sobre la zona de contacto, por lo que la magnitud del endurecimiento por deformación en frío dependerá del esfuerzo  $P_p$  según la ecuación (2.6).

$$\sigma_{pr} = a^3 \sqrt{\frac{P_p E}{R_2^2}}$$

Ajustándose a la fórmula (2.6), se determina el coeficiente a, teniendo en cuenta la fórmula (2.7).

$$a = \frac{1}{\frac{2 \cdot 19.68 \text{mm}}{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{25 \text{mm}} + \frac{1}{2 \text{mm}} \right)}}$$

$$a = 0,16$$

Calculado el valor de a, se determina la tensión de compresión de acuerdo con la ecuación (2.6).

$$\sigma_{pr} = 0.25^3 \sqrt{\frac{50.98 \text{kgf} \cdot 2.14 \cdot 10^5 \text{kgf} / \text{mm}^2}{19.68 \text{mm}^2}}$$

$$\sigma_{pr} = 33.05 \text{Kgf/mm}^2$$

En la fórmula (2.8) se determina la presión con que se deformará el material, por lo que se tiene que:

$$P_p = 12,5 \cdot 68,6 \text{kgf/mm}^2 \left( \frac{39,36 \text{mm}}{100} \right)^2$$

$$P_p = 87.49 \text{Kgf/mm}^2$$

Este valor establece la presión necesaria para el comienzo de la deformación del material, el comportamiento de la fuerza, teniendo en cuenta los radios de la pieza y del rodillo en la

zona de contacto el material fluirá deformándose ya que excede el límite máximo de fluencia.

Al analizar la profundidad de la capa endurecida por la ecuación (2.9) se tuvo en cuenta las diferentes fuerzas a la que fue sometido el material.

Para fuerza de 500 N

$$h = \sqrt{\frac{50.98 \text{kgf}}{2 \cdot 68.6 \text{kgf} / \text{mm}^2}}$$

$$h = 0.609 \text{ mm}$$

Para fuerza de 1 500 N

$$h = \sqrt{\frac{152.9 \text{kgf}}{2 \cdot 68.6 \text{kgf} / \text{mm}^2}}$$

$$h = 1,055 \text{ mm}$$

Para fuerza de 2 500 N

$$h = \sqrt{\frac{254.9 \text{kgf}}{2 \cdot 68.6 \text{kgf} / \text{mm}^2}}$$

$$h = 1,362 \text{ mm}$$

Al establecer los valores de la profundidad de la capa endurecida se demuestra que en la medida que se aumenta la fuerza se incrementa la profundidad de la capa endurecida.

Las tensiones máxima a la que se somete el material se calcula por la expresión (2.10) y los resultados es como sigue.

$$\sigma_{\text{máx}} = 0,245 \cdot 7.64 \text{mm} \cdot \sqrt{Fn(N) \cdot (2.14 \cdot 10^4 \text{kgf} / \text{mm}^2)^2 \left( \frac{1}{25 \text{mm}} + \frac{1}{19.68 \text{mm}} + \frac{1}{2 \text{mm}} + \frac{1}{19.85 \text{mm}} \right)^2}$$

Para  $F_n = 500 \text{ N}$

$$\sigma_{\text{máx}} = 48.98 \text{kgf/mm}^2$$

Para  $F_n = 1500 \text{ N}$

$$\sigma_{\text{máx}} = 84.84 \text{Kgf/mm}^2$$

Para  $F_n = 2500 \text{ N}$

$$\sigma_{\text{máx}} = 109.52 \text{Kgf/mm}^2$$

Esto representa el área real de tensiones máxima de contacto para la superficie de cuerpos curvos cuando se encuentran en contacto, el resultado de las tensiones máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), nos dará la medida del comportamiento de las tensiones locales, las cuales son la componente de la deformación plástica en la que se encuentra el material.

El área de contacto circular, que se considera el área reducida para las deformaciones por fluencia y el procedimiento por la ecuación (2.11).

$$r = 2,15 \cdot \sqrt{\frac{50.98 \text{Kgf}}{2.14 \cdot 10^4 \text{Kgf} / \text{mm}^2} \left( \frac{50 \text{mm} \cdot 39.36 \text{mm}}{50 \text{mm} + 39.36 \text{mm}} \right)}$$

P= 500N

$$r = 4.5 \cdot 10^4 \text{ mm}$$

P = 1500 N

$$r = 9.7 \cdot 10^4 \text{ mm}$$

P =2500 N

$$r = 12.6 \cdot 10^4 \text{ mm}$$

Este resultado nos permite evaluar la formación del área de contacto circular, que se considera el área reducida para las deformaciones por fluencia además relaciona los esfuerzos y las deformaciones considerando el radio para la mayor carga de trabajo.

Al determinar las tensiones de aplastamiento considerada uniformemente distribuida sobre el área de aplastamiento y por la condición de resistencia al aplastamiento por la fórmula (2.12) el resultado sería:

$$a_{\text{máxaplast}} = \alpha \cdot \sqrt[3]{P \cdot E^2 \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2} \right)^2}$$

Para  $F_n = 500 \text{ N}$

$$\sigma_{\text{maxaplast}} = 15.33 \text{ Kgf/mm}^2$$

Para  $F_n = 1500 \text{ N}$

$$\sigma_{\text{maxaplast}} = 26.58 \text{ Kgf/mm}^2$$

Para  $F_n = 2500 \text{ N}$

$$\sigma_{\text{maxaplast}} = 34.96 \text{ Kgf/mm}^2$$

Este es el esfuerzo máximo que determina las tensiones máximas necesarias para lograr el aplastamiento de los granos durante la deformación Plástica Superficial.

### 3.4. Método estadístico de planificación del experimento

#### ❖ Ensayo de dureza

Se modeló estadísticamente a través del análisis de regresión, la influencia de las diferentes condiciones de aplicación de las cargas de rodadura generadas por el rodillo, en el comportamiento de diversas propiedades mecánicas y funcionales de muestras de acero AISI 1045. Dicho análisis se realizó atendiendo a los principios enunciados en el epígrafe 2.5 del capítulo II. Las variables independientes fueron fuerza "D" y avance "B", las cuales están relacionadas con los valores de dureza.

Las propiedades mecánicas y funcionales cuyo comportamiento se describe en los modelos que se desarrollan y éstas son: macrodureza y capacidad de endurecimiento (propiedades mecánicas).

Los resultados de los 81 ensayos de dureza realizados en las probetas se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.1.** Comportamiento de las variables del proceso.

Niveles	Respuestas			Salidas		
	A (rev/min)	D (N)	B (mm/rev)	H (HRB)		
Nivel superior (+1)	27	2 500	0,25	HRB (C <sub>1</sub> )	HRB (C <sub>2</sub> )	HRB (C <sub>3</sub> )
Nivel medio ( $\Delta$ )	54	1 500	0,125			
Nivel inferior (-1)	110	500	0,075			
Número de ensayo						
1a	27	500	0,075	22	409	525
1b	27	500	0,075	22	411	524
1c	27	500	0,075	22	409	525
2a	27	1500	0,075	22	418	551
2b	27	1500	0,075	22	418	550
2c	27	1500	0,075	22	418	550
3a	27	2500	0,075	22	447	560
3b	27	2500	0,075	22	447	561
3c	27	2500	0,075	22	449	560
4a	54	500	0,125	22	453	567
4b	54	500	0,125	22	450	566
4c	54	500	0,125	22	451	566
5a	54	1500	0,125	22	456	571
5b	54	1500	0,125	22	457	571
5c	54	1500	0,125	22	457	572
6a	54	2500	0,125	22	463	576
6b	54	2500	0,125	22	462	576
6c	54	2500	0,125	22	463	577
7a	110	500	0,25	22	467	580
7b	110	500	0,25	22	468	581
7c	110	500	0,25	22	468	579
8a	110	1500	0,25	22	470	582
8b	110	1500	0,25	22	473	581
8c	110	1500	0,25	22	471	583
9a	110	2500	0,25	22	483	589
9b	110	2500	0,25	22	482	589
9c	110	2500	0,25	22	483	590

En cada una de las probetas sometidas a la acción de la carga por rodadura, de acuerdo con el diseño del experimento anteriormente descrito en el Capítulo II, se consideran 3 mediciones: la primera en la superficie sin deformar C<sub>1</sub>, la segunda en la zona que se está deformando C<sub>2</sub> y la tercera en la superficie deformada C<sub>3</sub>.

### 3.4.1. Análisis factorial completo

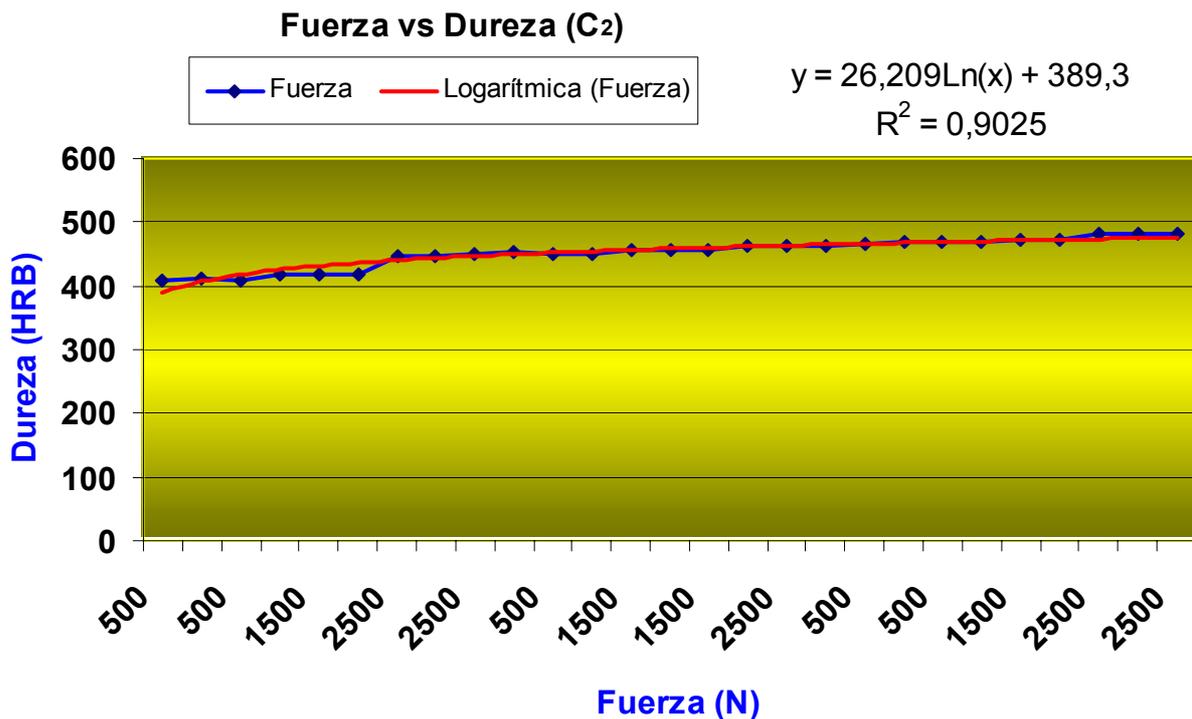
Para optimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo afectan. El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca.

En la tabla 5 Anexo V, se reflejan los resultados del análisis factorial completo para las variables involucradas en el proceso de experimentación.

Esto confirma el criterio de que lo determinante en las variaciones de la dureza del acero AISI 1045, son los factores n, S y P.

#### 3.4.1.1. Comportamiento de la dureza en relación con la fuerza

##### ➤ Análisis del comportamiento de la dureza en relación con la fuerza $C_2$



Gráfica 3.1-a) Dependencia de la dureza ( $C_2$ ) con relación a la fuerza.

A partir de las bases de datos del experimento fue posible obtener el comportamiento de las medias y los residuos de las variables fuerza y dureza, en la tabla 6 del anexo V, se reflejan los valores estimados para las medias de fuerza y dureza en (B).

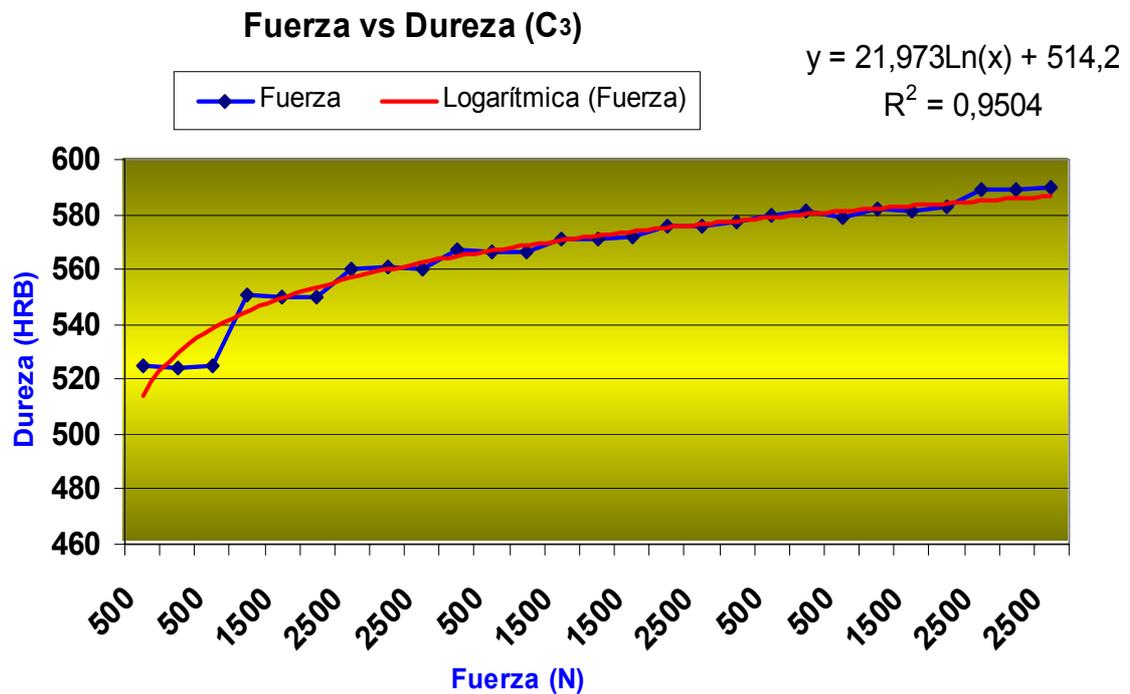
La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = 401,744 + 0,0338 \cdot \text{Fuerza}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 89,5101% de la variabilidad en la Dureza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 88,0115%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 8,6904. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 6,4716 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,0001, perteneciendo a la Fuerza. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado Fuerza (P) en la capa superficial  $C_2$ , es significativa para lograr el endurecimiento del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica Superficial empleando un rodillo como elemento deformante.

**⇒ Análisis del comportamiento de la dureza en relación con la fuerza C<sub>3</sub>**

**Gráfica 3.1-b)** Dependencia de la dureza (C<sub>3</sub>) con relación a la fuerza.

A partir de las bases de datos del experimento fue posible obtener el comportamiento de las medias y los residuos de las variables fuerza y dureza, en la tabla 6 del anexo V, se reflejan los valores estimados para las medias de fuerza y dureza en (B).

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = 528,229 + 0,0263332 \cdot \text{Fuerza}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

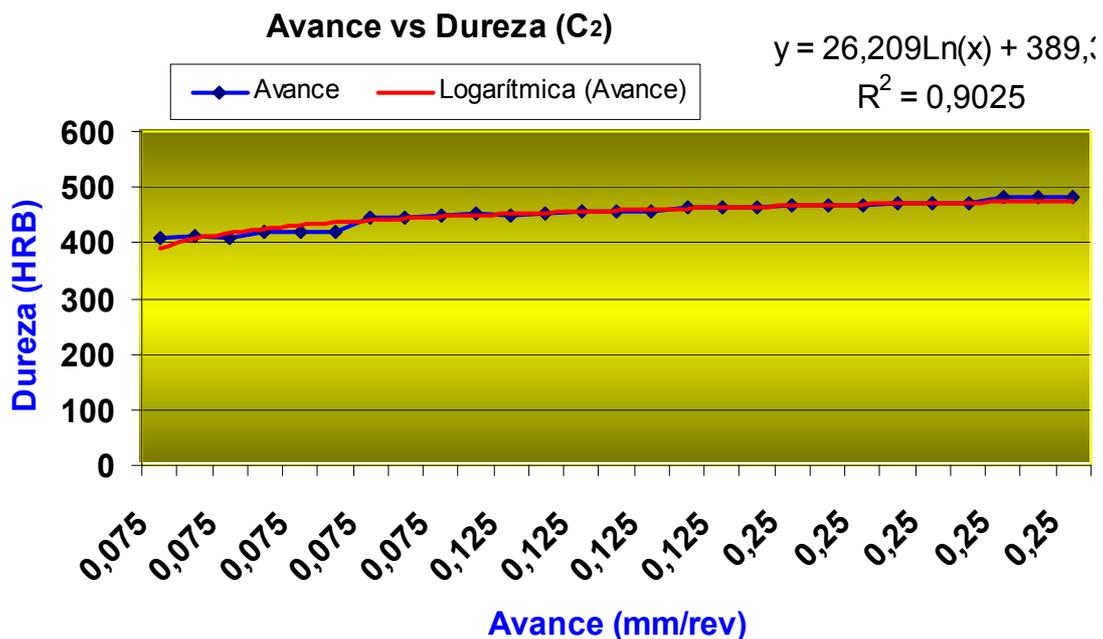
El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 84,9013% de la variabilidad en la Dureza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 82,7444%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 8,10235. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 5,69319 es el valor medio

de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,0004, perteneciendo a la Fuerza. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado Fuerza (P) en la capa superficial C<sub>3</sub>, es significativa para lograr el endurecimiento del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica Superficial empleando un rodillo como elemento deformante.

### 3.4.1.2. Comportamiento de la dureza en relación con el avance

#### ➤ Análisis del comportamiento de la dureza (C<sub>2</sub>) en relación con el avance



**Gráfica 3.2-a).** Dependencia de la dureza (C<sub>2</sub>) con relación al avance.

La gráfica 3.2-a) muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = 401,423 + 350,526 \cdot \text{Avance}$$

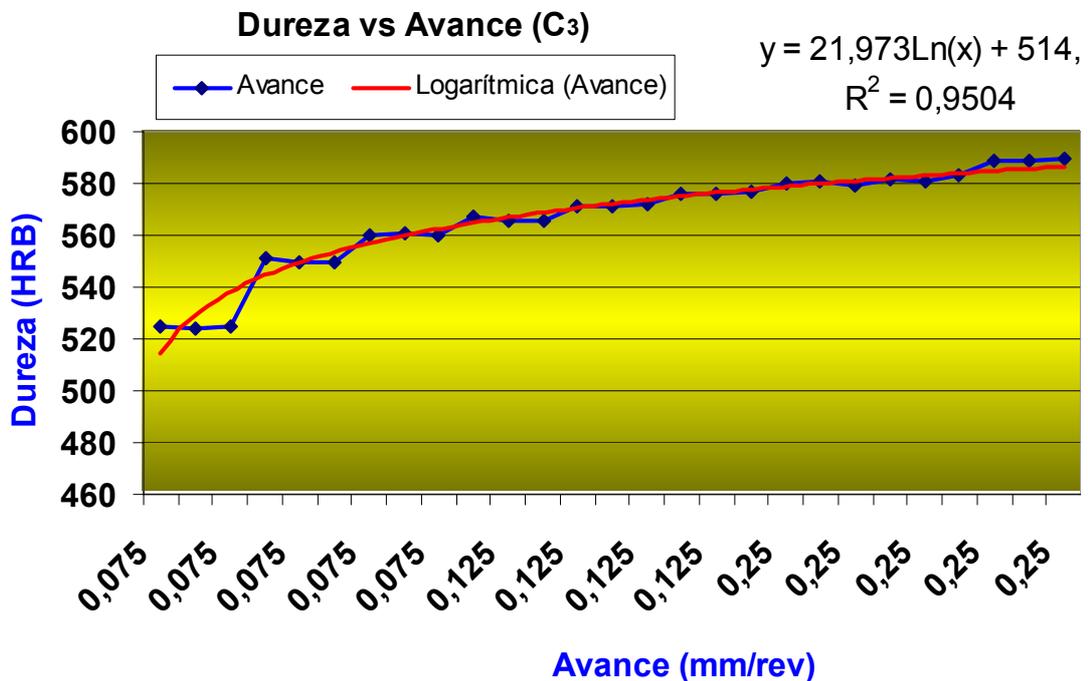


Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 77,0505% de la variabilidad en la Dureza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 73,7721%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 12,5266. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 9,67226 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,0019, perteneciendo al avance. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado avance (mm/rev) en la capa superficial deformada  $C_2$ , es estadísticamente significativo para lograr el endurecimiento del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica Superficial empleando un rodillo como elemento deformante.

### ➤ Análisis del comportamiento de la dureza ( $C_3$ ) en relación con el avance



Gráfica 3.2-b). Dependencia de la dureza ( $C_3$ ) con relación al avance.

La gráfica 3.2-b) muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = 513,003 + 349,439 \cdot \text{Avance}$$

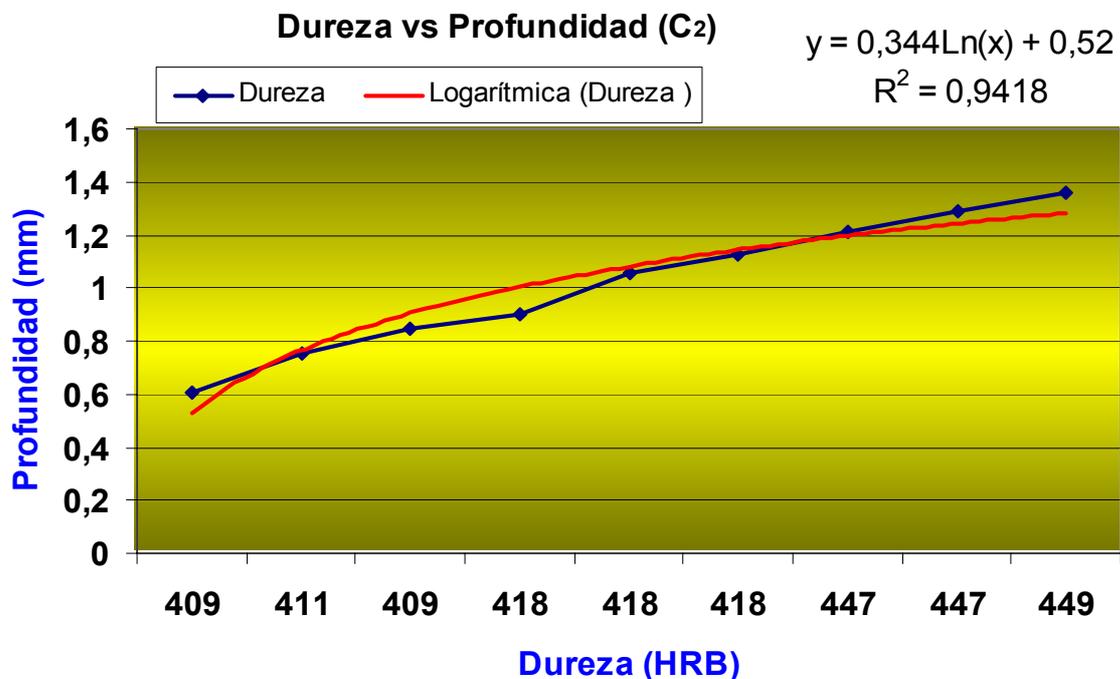
Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 84,9123% de la variabilidad en la Dureza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 82,7569%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 8,09941. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 5,9790 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,0004, perteneciendo al avance. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado avance (mm/rev) en la capa superficial deformada  $C_3$ , es estadísticamente significativo para lograr el endurecimiento del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica Superficial empleando un rodillo como elemento deformante.

### 3.4.1.3. Comportamiento de la dureza en relación con la profundidad

#### ➤ Análisis del comportamiento la dureza ( $C_2$ ) en relación con la profundidad



**Gráfica 3.3-a).** Dependencia de la dureza ( $C_2$ ) con relación a la profundidad.

La gráfica 3.3-a) muestra las gráficas de dependencia y los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

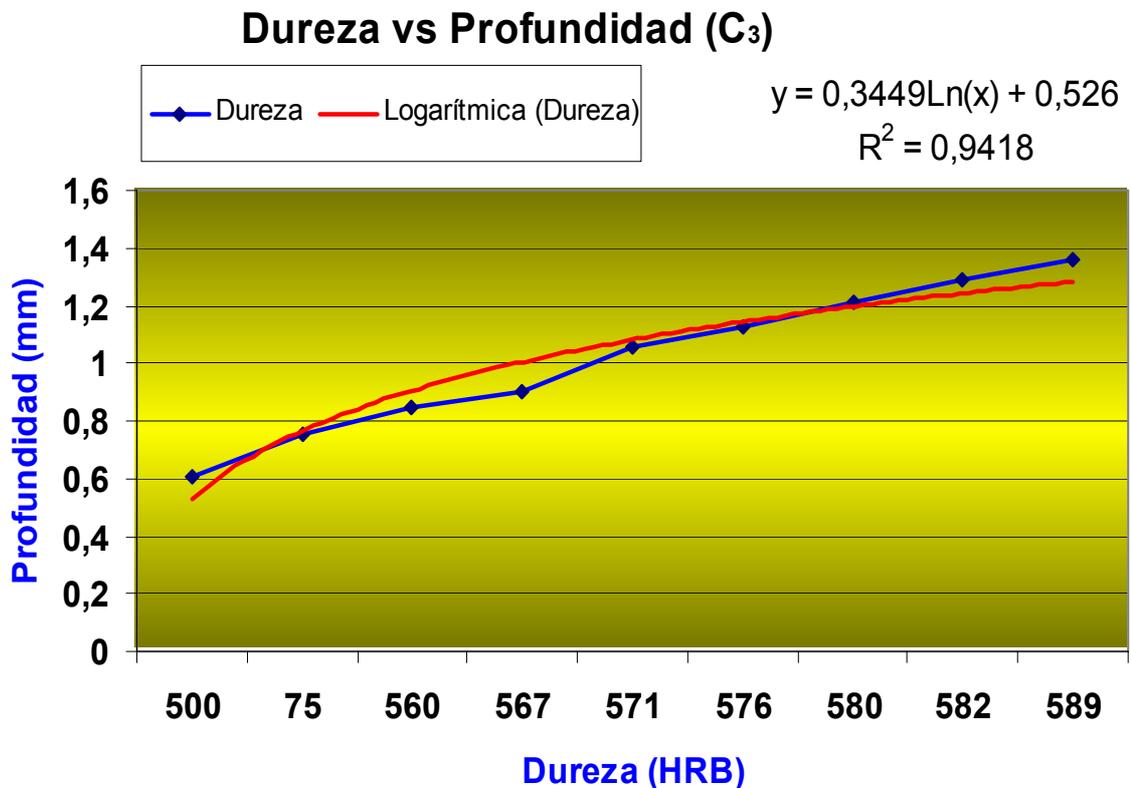
$$\text{Dureza} = 363,483 + 86,4166 \cdot \text{Profundidad}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.



El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 91,0983% de la variabilidad en la Dureza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 89,8267%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 7,80158. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 5,73515 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,0001, perteneciendo a la avance. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado Profundidad (mm) en la capa superficial deformada  $C_2$ , es estadísticamente significativo para lograr el aumento de la Dureza de las capas del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica.

➤ **Análisis del comportamiento la dureza (C<sub>3</sub>) en relación con la profundidad**

**Gráfica 3.3-b).** Dependencia de la dureza (C<sub>3</sub>) con relación a la profundidad.

La gráfica 3.3-b) muestra las gráficas de dependencia y los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = 493,111 + 72,4671 \cdot \text{Profundidad}$$

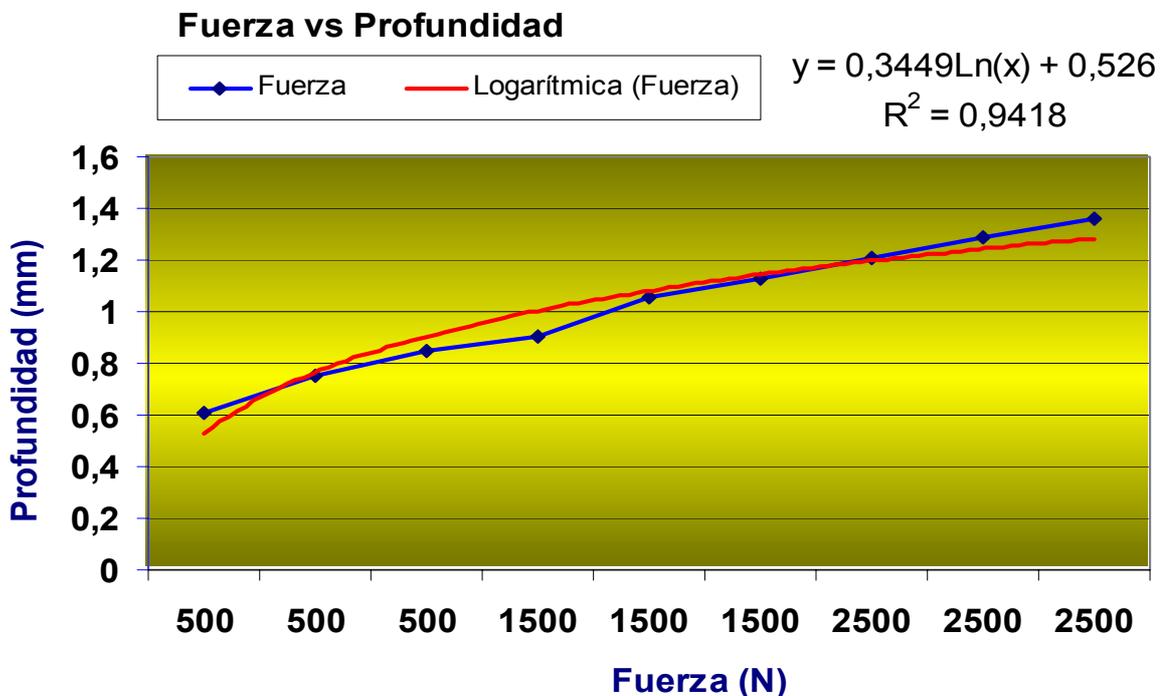
Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 90,1878% de la variabilidad en la Dureza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 88,786%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 6,53169. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 4,51094 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para

determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,00001, perteneciendo a la avance. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado Profundidad (mm) en la capa superficial deformada C<sub>3</sub>, es estadísticamente significativo para lograr el aumento de la Dureza de las capas del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica.

#### 3.4.1.4. Análisis del comportamiento de la Fuerza en relación con la Profundidad



**Gráfica 3.4.** Gráfica de dependencia de la profundidad con relación a la fuerza.

La figura 3.3 muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la Dureza y una variable independiente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Fuerza} = -1086,13 + 2512,16 \cdot \text{Profundidad}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 98,2589% de la variabilidad en la Fuerza. El estadístico  $R^2$  ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 98,0102%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 6,53169. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 70,7747 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

Para decidir la simplificación del modelo, hay que tener en cuenta que el p-valor más alto en la variable independiente es 0,0000, perteneciendo a la Fuerza. Puesto que el valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto se puede establecer que el parámetro denominado Fuerza (N), es estadísticamente significativo para lograr la profundidad del acero AISI 1045 mediante la Deformación Plástica Superficial empleando un rodillo como elemento deformante.

### 3.5. Valoración Económica

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

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

La metodología empleada está destinada para el estimado del cálculo del costo de fabricación para diferentes procesos tecnológicos que se llevan a cabo en dicha industria, teniendo además una amplia y actualizada base de datos que comprende tarifas salariales, máquinas herramienta y sus consumos de energía eléctrica, precios de materiales, entre otros. A los efectos de la valoración económica de los resultados de la presente tesis, resulta factible emplear esta norma por cuanto posee una base de información de larga data en dicha empresa, además de su probada efectividad en las transacciones económico-financieras de dicho centro.

A fin de revelar las ventajas en el orden técnico-económico, se procederá a la comparación entre una pieza obtenida por Deformación Plástica Superficial por rodillo (Tabla 8, anexo VI), y una obtenida mediante una variante tecnológica de tratamiento

térmico (Tabla 9, anexo VII). La valoración del estimado se hará con un fondo anual de 286 días laborables.

❖ **Costo de la pieza endurecida por Deformación Plástica Superficial.**

Una vez calculados los tiempos para la elaboración de la pieza Deformada Plásticamente, y teniendo en cuenta la incidencia de máquinas, operarios, energía eléctrica, el costo estimado de fabricación de la pieza por el proceso por deformación plástica superficial, es 45,416 CUC.

❖ **Costo de la pieza con tratamiento térmico y rectificado**

Después de calculados los tiempos de cada operación, incluido el torneado previo y el posterior rectificado, se puede apreciar la ficha del costo de fabricación de la pieza, cuyo valor estimado es de 96,41 CUC.

Al evaluar el comportamiento de la fabricación de las piezas por ambos procesos con un fondo anual de 286 días laborables se tiene que:

- **Deformación Plástica Superficial: \$ 12988,976CUC**
- **Tratamiento térmico y rectificado: \$ 27573,26 CUC**

### **3.5.1. Comparación de los costos por diferentes procedimientos**

Como puede apreciarse, el costo de fabricación de la pieza mediante la variante de temple y revenido alto es mayor que por la Deformación Plástica Superficial por rodillo simple, demostrándose que este es un proceso más económico para mejorar las cualidades y las propiedades físico-mecánicas de la superficie de las piezas, y que es ecológicamente más limpio que los esquemas tecnológicos tradicionales. Se logra un ahorro de 14584,284 CUC. Se demuestra que en los tratamientos térmicos, a medida que las piezas aumentan su masa y se incluyan tratamientos intermedios, aumenta el costo de fabricación.

### 3.6. Valoración del impacto medio ambiental

En el proceso de maquinado se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, ya que en su composición poseen elementos que pueden ser lixiviables, bajo la acción de las altas temperaturas y las lluvias, pasan a las aguas subterráneas contaminándolas. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.

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

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

En este sentido resulta importante reiterar que la aplicación del proceso tecnológico conocido como Deformación Plástica Superficial por rodillo, en muchos casos, evita o hace innecesario el empleo de estas tecnologías contaminantes del medio ambiente y altas consumidoras de energía, pues las propiedades físico-mecánicas se pueden lograr de las



reservas internas del material de la propia pieza, que se manifiestan a partir de la deformación en frío de su superficie en forma controlada. Incluso dicho proceso posee la ventaja adicional de que no induce efectos colaterales negativos en la pieza como en el caso del temple donde hay que aplicar tratamientos adicionales para eliminar las tensiones surgidas.



### 3.7. Conclusiones del Capítulo 3

- Se establecen las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero AISI 1045 endurecido mediante la Deformación Plástica Superficial por rodadura. Los modelos experimentales describen la interacción entre las mismas y cumplen satisfactoriamente todas pruebas estadísticas para su validación.
- El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante la deformación Plástica Superficial por rodillo de piezas fabricadas de acero AISI 1045, es técnicamente factible y económicamente racional. En un año de trabajo, el efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento por este método es de 12988,976 CUC y para el caso del tratamiento térmico la cifra de \$ 27573,26 CUC, en igual período, lo que constituye un ahorro de \$ 14584,284 CUC. Desde el punto de vista social y ambiental se contribuye a evitar los riesgos de contaminación y la expulsión a la atmósfera de polvos nocivos a la salud humana.
- Al realizar la valoración del impacto medioambiental se comprobó que este proceso es ecológicamente más limpio, ya que no genera desperdicios por no existir desprendimiento por arranque de virutas.

## Conclusiones generales

- Se establecieron las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero AISI 1045 endurecido mediante la Deformación Plástica Superficial por rodillo en diferentes superficies. Se produce un incremento de la dureza a 590 HRB (C), proporcionándole al acero condiciones similares a la obtenida por tratamiento térmico.
- 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.
- El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante Deformación Plástica Superficial por rodillo, de piezas fabricadas de acero AISI 1045, tiene un significativo efecto económico con respecto al método tradicional del tratamiento térmico, permite un ahorro de \$ 14584,284 CUC, en un año de trabajo.
- El proceso denominado como Deformación Plástica Superficial por rodillo simple resulta una variante tecnológica que tiene poca incidencia en el medio ambiente ya que resulta ser más limpio al no generar desperdicio por arranque de virutas.



## Recomendaciones

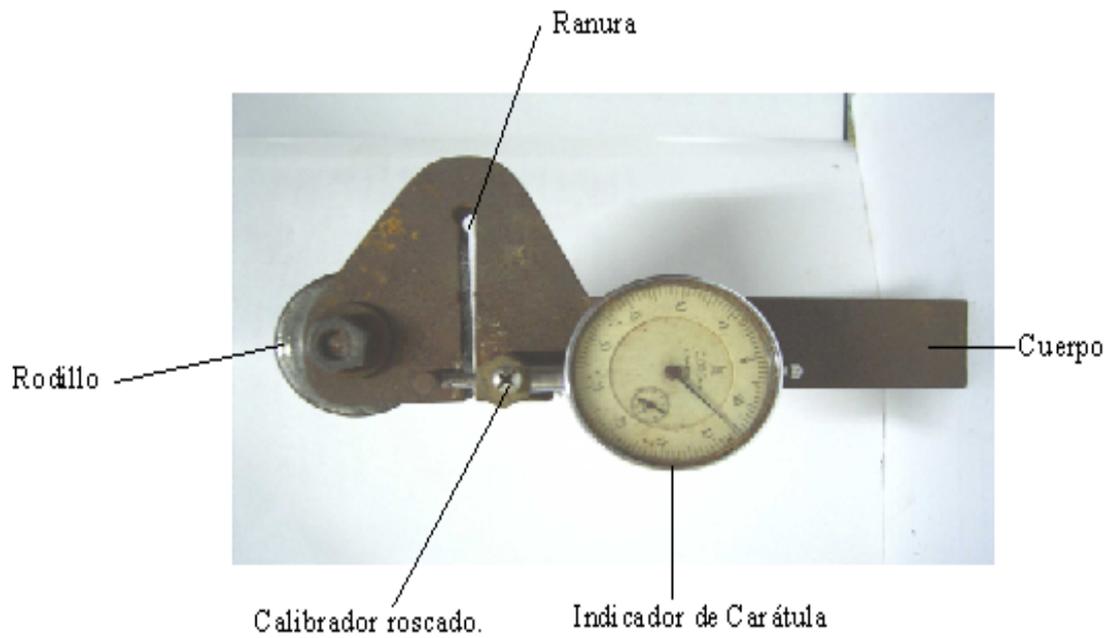
- Aplicar el procedimiento tecnológico descrito en el trabajo para el endurecimiento mediante Deformación Plástica Superficial empleando rodillo simple de las piezas simétricas rotativas fabricadas de acero AISI 1045.
- Generalizar los resultados de esta investigación en las industrias del níquel, y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



## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. 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). No. 1. 1995.
2. Álvarez, E; G, M. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.
3. Álvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires.Facultad de Ingeniería, 2004.
4. American Heller Corporation. "Skiving & Burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003, <http://www.americanheller.com>.
5. Badiola, V. Materiales Departamento. Ingenierías Mecánica, Energética y de Materiales, Diseño de Máquinas I, 2004, España.
6. Barceinas, S y Juárez, A.H. Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
7. Barret, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p
8. Bengton, U. Design requeriments materials properties a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
9. Boyle, J.y Spence, J. Stress analysis for creep. Londres: Butteerwoths, 1989.
10. Buraya, D. Cristal Structure Analisis. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Materials Science and Engineering (3-0) 3. Febrero de 2001. Disponible en la World Wide Web. <http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm>.
12. Bushan, B; Gupta, B.K. Handbook of tribology.McGrawHill. New York, 1991
13. Bright Burnishing Tools. "What is roller burnishing?",India, Obtenido de la Red mundial el 3 de Mayo del 2003, <http://www.brightburnishingtools.com>.
- 14.

### Anexo I

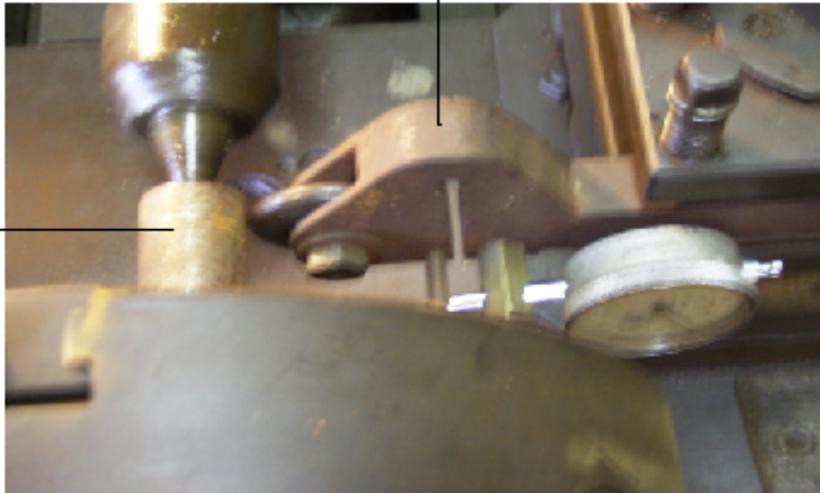


**Figura 1.** Herramienta empleada en la Deformación Plástica Superficial por rodillo.

## Anexo II

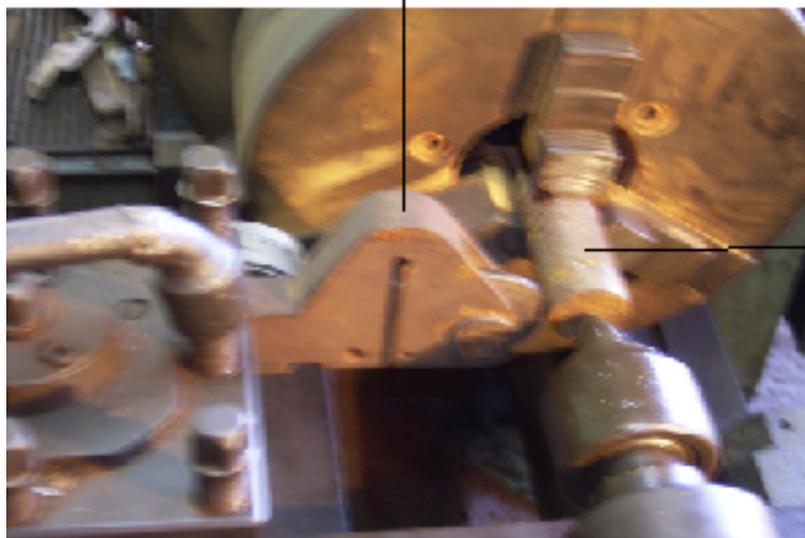
Herramienta de deformar ar.

Probeta



Herramienta de deformar ar.

Probeta.



**Figura 2 y 3.** Montaje entre plato y punto de la probeta para la deformación.

**Anexo III****Tabla 1.** Resultados de la matriz de planificación del experimento.

Niveles	Respuestas			Salidas		
	A(rev/min)	D(N)	B(mm/rev)	H (HRB)		
Nivel superior (+1)	27	2 500	0,25	H (HRB)		
Nivel medio ( $\Delta$ )	54	1 500	0,125			
Nivel inferior (-1)	110	500	0,075			
Número de ensayo				HRB (C <sub>1</sub> )	HRB (C <sub>2</sub> )	HRB (C <sub>3</sub> )
1a	27	500	0,075	22	409	525
1b	27	500	0,075	22	411	524
1c	27	500	0,075	22	409	525
2a	27	1500	0,075	22	418	551
2b	27	1500	0,075	22	418	550
2c	27	1500	0,075	22	418	550
3a	27	2500	0,075	22	447	560
3b	27	2500	0,075	22	447	561
3c	27	2500	0,075	22	449	560
4a	54	500	0,125	22	453	567
4b	54	500	0,125	22	450	566
4c	54	500	0,125	22	451	566
5a	54	1500	0,125	22	456	571
5b	54	1500	0,125	22	457	571
5c	54	1500	0,125	22	457	572
6a	54	2500	0,125	22	463	576
6b	54	2500	0,125	22	462	576
6c	54	2500	0,125	22	463	577
7a	110	500	0,25	22	467	580
7b	110	500	0,25	22	468	581
7c	110	500	0,25	22	468	579
8a	110	1500	0,25	22	470	582
8b	110	1500	0,25	22	473	581
8c	110	1500	0,25	22	471	583
9a	110	2500	0,25	22	483	589
9b	110	2500	0,25	22	482	589
9c	110	2500	0,25	22	483	590

**Anexos IV****Tabla. 2.** Análisis de varianza para las variables del experimento.

<b>Análisis de Varianza</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Cociente-F</b>	<b>P-Valor</b>
<b>Modelo</b>	<b>2920,0</b>	<b>3</b>	<b>973,333</b>	<b>39,39</b>	<b>0,0007</b>
<b>Residuo</b>	<b>123,557</b>	<b>5</b>	<b>24,7115</b>		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>3043,56</b>	<b>8</b>			
<b>R-cuadrado = 95,9404%</b>					
<b>R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93,5046%</b>					
<b>Error estándar de est. = 4,97106</b>					
<b>Error absoluto medio = 3,02892</b>					
<b>Estadístico de Durbin-Watson = 2,23908 (P=0,3609)</b>					
<b>Autocorrelación residual en Lag 1 = 0, 555702</b>					

**Tabla. 3.** Intervalo de confianza para todas las variables.

<b>95,0% intervalos de confianza para las estimaciones de los coeficientes</b>				
<b>Error</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Estimación</b>	<b>Estándar</b>	<b>Límite Inferior</b>	<b>Límite Superior</b>
<b>CONSTANTE</b>	<b>222,429</b>	<b>9,51625</b>	<b>197,967</b>	<b>246,892</b>
<b>A</b>	<b>0,312628</b>	<b>0,0923198</b>	<b>0,0753117</b>	<b>0,549944</b>
<b>D</b>	<b>0,00333333</b>	<b>0,0162722</b>	<b>-0,0384957</b>	<b>0,0451624</b>
<b>B</b>	<b>-13,3333</b>	<b>180,523</b>	<b>-477,385</b>	<b>450,718</b>

**Tabla. 4.** Análisis de regresión múltiple para las variables.

<b>Análisis de Regresión Múltiple</b>				
<b>Variable dependiente: H</b>				
<b>Error Estadístico</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>T</b>	<b>P-Valor</b>
<b>CONSTANTE</b>	<b>439,066</b>	<b>32,8026</b>	<b>13,3851</b>	<b>0,0000</b>
<b>A</b>	<b>191,346</b>	<b>68,3747</b>	<b>2,79849</b>	<b>0,0381</b>
<b>D</b>	<b>-0,0312894</b>	<b>0,0311236</b>	<b>-1,00533</b>	<b>0,3609</b>
<b>B</b>	<b>-138,753</b>	<b>110,616</b>	<b>-1,25437</b>	<b>0,2652</b>

**Anexo V****Tabla. 5.** Resumen del análisis factorial completo.

<b>Análisis factorial</b>			
<b>Factor Porcentaje de acumulativo</b>			
<b>Número</b>	<b>Autovalor</b>	<b>Varianza</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>1 (H)</b>	<b>2,05518</b>	<b>51,380</b>	<b>51,380</b>
<b>2 (A)</b>	<b>1,7518</b>	<b>43,795</b>	<b>95,175</b>
<b>3 (D)</b>	<b>0,163876</b>	<b>4,097</b>	<b>99,272</b>
<b>4 (B)</b>	<b>0,0291367</b>	<b>0,728</b>	<b>100,000</b>
	<b>Inicial.</b>		
<b>Variable comunidad</b>			
<b>Dureza</b>	<b>1,0</b>		
<b>Revolución</b>	<b>1,0</b>		
<b>Presión</b>	<b>1,0</b>		
<b>Avance</b>	<b>1,0</b>		

**Tabla 6.** Valores estimados para las medias de la fuerza y dureza.

<b>95,0% intervalo de confianza para la media de H: 245,333 +/- 10,6579 [234,675,255,991]</b>
<b>95,0% intervalo de confianza para la media de P: 1500,0 +/- 665,688 [834,312,2165,69]</b>
<b>95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:</b>
<b>Suponiendo varianzas iguales: -1254,67 +/- 612,044 [-1866,71,-642,623]</b>
<b>contrastes t de comparación de medias</b>
<b>Hipótesis nula: media 1 = media2</b>
<b>Hipótesis alt.: media1 &lt;&gt; media2</b>
<b>Suponiendo varianzas iguales: t = -4,34574 P-Valor = 0,000500637</b>

**Tabla. 7.** Valores estimados para las medias de la dureza y avance.

<b>95,0% de confianza para la media de H: 245,333 +/- 10,6579 [234,675,255,991]</b>
<b>95,0% de confianza para la media de S: 0,15 +/- 0,0600043 [0,0899957,0,210004]</b>
<b>95,0% de confianza para la diferencia de medias:</b>
<b>Suponiendo varianzas iguales: 245,183 +/- 9,79797 [235,385,254,981]</b>
<b>contrastes t de comparación de medias</b>
<b>Hipótesis nula: media1 = media2</b>
<b>Hipótesis alt.: media1 &lt;&gt; media2</b>
<b>suponiendo varianzas iguales: t = 53,0484 P-Valor = 0,0</b>



**Anexo VI**

**Tabla. 8.** Costo de fabricación de la Deformación Plástica Superficial.

<b>Costo de fabricación de la pieza.</b>			
<b>Tipo de material</b>	<b>Costo del material (\$)</b>	<b>Peso del semiproducto (kg)</b>	<b>Precio(\$)</b>
<b>Acero AISI 1045</b>	<b>1,25</b>	<b>0,5</b>	<b>16,87</b>
<b>Operario</b>	<b>Tarifa(\$)</b>	<b>Tiempo efectivo(h/\$)</b>	<b>Costo(\$)</b>
<b>Tornero A</b>	<b>1,78</b>	<b>6</b>	<b>10,68</b>
<b>Rectificador A</b>	<b>1,78</b>	<b>1</b>	<b>1,78</b>
<b>Cortador</b>	<b>1,54</b>	<b>0,58</b>	<b>0,89</b>
<b>Salario Básico (Sb) = Suma de los costos = \$ 13,35</b>			
<b>Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 1,335</b>			
<b>Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09 = \$ 13,21</b>			
<b>Gasto de Energía</b>			
<b>Máquinas</b>	<b>Tiempo trab(h)</b>	<b>Potencia máquina (kW)</b>	<b>Energía consumida (kW/h)</b>
<b>Torno</b>	<b>0,13</b>	<b>3</b>	<b>0,39</b>
<b>Sierra Sinfín</b>	<b>0,03</b>	<b>1,5</b>	<b>0,045</b>
<b>Rectificadora</b>	<b>1,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,65</b>
<b>Costo Energía</b>			
<b>Torno</b>	$C_{\text{torno}} = 0,06 \cdot E_c = 0,234$	<b>Costo Energía Eléctrica.</b>	
<b>Sierra Sinfín</b>	$C_{SS} = 0,06 \cdot E_c = 0,027$	<b>Ce= C<sub>t</sub>+C<sub>SS</sub>+C<sub>R</sub>=\$ 0,651</b>	
<b>Rectificadora</b>	$C_R = 0,06 \cdot E_c = 0,39$	<b>Costo Total</b>	
<b>CT= Pp+Sb+Sc+Ss+Ce = \$ 45,416</b>			



**Anexo VII**

**Tabla. 9.** Costo de fabricación de la pieza por tratamiento térmico

<b>Costo de fabricación de la pieza.</b>			
Tipo de material	Costo de material(\$)	Peso del semiproducto(kg)	Precio(\$)
Ac AISI 1045	1,25	0,5	16,87
<b>Operario</b>	<b>Tarifa(\$)</b>	<b>Tiempo efectivo(h/\$)</b>	<b>Costo(\$)</b>
Tornero A	1,78	5	8,9
Rectificador A	1,78	2	3,56
Cortador	1,54	0,58	0,89
Termista A	1,78	9,3	16,55
Téc de Laborator.	1,78	4	7,12
<b>Salario Básico(Sb)= Suma de los costos = \$ 29,9</b>			
<b>Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 2,99</b>			
<b>Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09 = \$ 37,72</b>			
<b>Gasto de Energía</b>			
Máquinas	Tiempo trab(h)	Potenc máquina(kW)	Energ consum(kW/h)
Torno	5	1,5	7,5
Sierra Sinfín	0,58	1,5	0,87
Rectificadora	2	0,5	1
Horno (Temple)	6,3	15	94,5
Revenido	3	15	45
<b>Costo Energía</b>			
Torno	$C_{\text{torno}} = 0,06.Ec = 0,45$	<b>Costo Energía Eléctrica.</b>	
Sierra Sinfín	$C_{\text{SS}} = 0,06.Ec = 0,05$	$Ce = C_t + C_{\text{SS}} + C_R + C_T + C_{\text{rev}} = \$ 8,93$	
Rectificadora	$C_R = 0,06.Ec = 0,06$		
Temple	$C_T = 0,06.Ec = 5,67$	<b>Costo Total</b>	
Revenido	$C_{\text{Rev}} = 0,06.Ec = 2,7$		
			<b>CT= Pp+Sb+Sc+Ss+Ce = \$ 96,41</b>