



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE METALÚRGIA - ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



Trabajo de diploma en opción al título de ingeniero mecánico



Título: Comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas cilíndricas de acero 45, durante la deformación plástica superficial con rodillo

Autor: Yasiel Molina Matos

Tutor(s): Ing. Benigno Leyva De la cruz
Ing. Dayanis Alcántara Borges
Msc. Tomás Fernández Columbiè

“ Año del 50 aniversario de la Revolución ”

Moa/ 2007-2008



Declaración de Autoría:

Yo: Yasiel Molina Matos

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.

Yasiel Molina MsC. Tomás Fernández Ing. Benigno Leyva Ing. Dayánis Alcántara



DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a la obra de la revolución por haber permitido que yo Yasiel Molina Matos pudiera formarme como un profesional.

Dedico este trabajo a mis padres Carlos Luis Molina y Elizabet Matos por haberme inculcado siempre lo mejor.

Dedico este trabajo a mis hermanos, familiares y amistades.

Dedico este trabajo de todo corazón a mi amigo, compañero y por que no hermano Yuriel Mayans Calzadilla que a pesar de no encontrarse entre nosotros, siempre lo recordare y lo llevare dentro de mi como uno de mis seres más querido y apreciado.

Dedico este trabajo a mi amiga y compañera Ariuska Cuza Paz, en fin a todos.



PENSAMIENTOS

1. Como mismo la naturaleza le reveló parte de su secretos a un conjunto de hombre en un tiempo; así se lo revelará otros en otro tiempo, solo resta que se hagan las preguntas adecuadas.

Albert Einstein

2. El socialismo es inconcebible sin técnicas edificadas según las últimas palabras de las más nuevas ciencias; sin una organización estatal planificada que subordine a decenas de millones de personas a una rigurosa observancia de una norma única, en lo concerniente a la producción y distribución de los productos.

Vladimir Illich Lenin



AGRADECIMIENTO

Agradezco la realización de este trabajo a mis padres que siempre me brindaron su ayuda incondicional para poder ver hecho realidad unos de sus sueños.

A mis tutores por su apoyo y ayuda en el desarrollo del presente trabajo;

A mis amigos, a todos aquellos que de una forma u otra brindaron su apoyo;

A mis hermanos y seres queridos y

A la Revolución Cubana y a nuestro comandante en jefe Fidel Castro Ruz.



Resumen

En el presente trabajo se realiza una investigación, referente a la influencia que puede generar la Deformación Plástica Superficial por rodillo sobre piezas cilíndricas construidas de acero 45, y al mismo tiempo se desarrollan los métodos para obtener el comportamiento de la tolerancia dimensional generadas por este método. Para la realización del mismo se introducen diferentes valores de número de revolución (n), avance(s), manteniendo constante el valor de la fuerza (P) aplicada. Mediante los cálculos estadísticos se puede determinar que la mayor influencia sobre esta son el (s) y el (n). Se determina que los modelos significativos muestran la tendencia en el comportamiento del valor de la tolerancia dimensional. A partir del análisis de los resultados, fue posible obtener los valores de la tolerancia dimensional para cada muestra. Y finalmente, se realiza la valoración del impacto medio ambiental que genera el método al medio, así como una valoración económica del proceso.

Summary

Presently work is carried out an investigation, with respect to the influence that can generate the Superficial Plastic Deformation for roller it has more than enough built cylindrical pieces of steel 45, and at the same time the methods are developed to obtain the behavior of the dimensional tolerance generated by this method. For the realization of the same one different values of revolution number are introduced (n), moving(s), maintaining constant the value of the force (P) applied. By means of the statistical calculations you can determine that the biggest influence on this they are the (s) and the (n). it is determined that the significant models show the tendency in the behavior of the value of the tolerance dimensional. Starting from the analysis of the results, it was possible to obtain the values of the dimensional tolerance for each sample. And finally, he/she is carried out the valuation of the half environmental impact that generates the method to the means, as well as an economic valuation of the process.

ÍNDICE

Contenido	Pág
Introducción-----	1
Capítulo I: Marco teórico de la investigación	
1.1- Introducción-----	5
1.2- Generalidades acerca del acero 45-----	7
1.2.1- Clasificación de las operaciones elementales de deformación-----	8
1.2.2- Factores que influyen en el proceso de tratamiento de deformación plástica por rodillo-----	9
1.2.3.- Métodos experimentales empleados para estudiar las tendencias de la deformación plástica por rodadillo-----	11
1.2.4- Composición química del acero 45-----	14
1.2.5- Propiedades físico-mecánica de acero 45-----	15
1.3- Fundamento de la tensiones y las deformaciones en los proceso de deformación plástica por rodillo-----	16
1.4- Tolerancia dimencional por deformación en frio-----	19
1.5- Conclusiones del capitulo I-----	25
Capitulo II: Materiales y métodos	
II.1- Introducción-----	26
II.1.1- Generalidades del proceso-----	26
II.2.- Selección del elemento deformante-----	26
II.3- Selección del material a deformar plásticamente por rodadura-----	28
II.4- Maquinas y equipos empleados en la experimentación-----	28-
II.4.1- Caracterización del TORNO16D20-----	28
II.4.2- Equipo para la determinación de la tolerancia dimensional-----	29
II.5- Elaboración mecánica de la probeta para la deformación-----	29
II.6- Diseño del experimento-----	32
II.6.1- Fuerza ejercida por la herramienta deformante-----	32
II.6.1.1- Número de revoluciones del husillo-----	33
II.6.1.2- Avance de la herramienta-----	33



II.6.1.3- Tolerancia dimensional-----	33
II.7- Procesamiento estadístico de los datos-----	35
II.7.1- Cálculo de varianza-----	36
II.7.2- Determinación de los coeficientes de regresión-----	39
II.8- Conclusiones del capítulo II-----	41
Capitulo III: Resultados experimentales y discusión	
III.1 – Introducción -----	42
III.2 – Análisis de la herramienta para la deformación plástica superficial-----	42-
III.2.1 – Análisis de la elaboración mecánica de la probeta-----	42
III.3 – Método estadístico de planificación del experimento-----	43
III.3.1 – Análisis la de tolerancia -----	43
III.3.1.1Análisis de varianza -----	43
III.3.1.2 – Intervalo de confianza para la estimación de los coeficiente -----	44
III.3.1.3 – Análisis de regresión para los variable involucradas -----	45
III.3.1.4 – Análisis factorial completo -----	45
III.3.1.5 – Comportamiento de la tolerancia -----	46
III.3.1.5.1 - Análisis del comportamiento de la tolerancia con relación a: n y S-----	46
III.3.1.5.2 - Análisis del comportamiento de la tolerancia con relación a; S-----	47
III.3.1.6 – Comportamiento de las variables del experimento-----	48
III.3.16.1 – Estimación de rugosidad mínima y el error de forma -----	49
III.4– Valoración económica -----	50
III.5.1 – Costo de la pieza tratada por deformación platica por rodadura -----	51
III.5.1.2 – Costo de la pieza tratada por tratamiento térmico y rectificado-----	51
III.5.1.3 - Comparación de los costo por diferentes procedimientos-----	51
III.6 – Valoración del impacto medio ambiental -----	52
III.7 – Conclusiones del capítulo III-----	53
- Conclusiones generales-----	
- Recomendaciones-----	
- Bibliografía-----	
- Anexos-----	

INTRODUCCIÓN

El hombre desde sus orígenes hasta nuestros días ha tratado de controlar los procesos de distintas formas, en función del nivel de conocimiento que posee acerca de estos. La primera forma que utilizó, - lógicamente-, fue la de asignarle un "código", a cada objeto de manera tal que pudiera reconocerlo y distinguirlo de los demás de su misma clase al percibirlo. Más adelante, y producto a las propias necesidades de su desarrollo concibió y aplicó el concepto número, realizando así las primeras mediciones por el simple conteo de los objetos. Posteriormente, organizó todo un sistema de conocimiento aplicable a la solución de los disímiles problemas que se le presentan. Hoy en día la aplicación de la tecnología a esta actividad es una realidad, pero la puesta en práctica eficiente requiere del conocimiento previo de las regularidades interna de los procesos.

Se llama irregularidades geométricas a las imperfecciones presentes en las características dimensionales de las piezas que se pueden interpretar como dispersiones que poseen dichas dimensiones con respecto aun perfil teórico o ideal. Estas se valoran en término de tolerancias, rugosidades y, errores de forma y posición.

En nuestro país constituye es una prioridad el desarrollo de tecnología que permitan más ahorro de recurso, menos gastos de energía y menos contaminación ambiental. La problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquina están relacionados con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante su periodo de explotación, para poder recomendar una estructura adecuada , en cuanto al material y tratamiento a seleccionar (teniendo en cuenta a la hora de seleccionar el material y método la diferentes exigencias económicas, tecnológicas, de explotación e higiene), para lograr un incremento en la eficiencia y eficacia del proceso tecnológico, expresado en una mayor vida útil de los órganos de trabajo de la máquina, lo que sin duda tendrá una repercusión económica en el país.

A pesar de la gran variedad de factores que conllevan como consecuencia al desgaste, como por ejemplo las condiciones de trabajo y explotación a que están sometidos los elementos de máquinas, tienen particular significación en la durabilidad de los elementos las propiedades mecánicas del material y las irregularidades geométricas que puedan tener dichos elementos. Dentro de esta propiedad por su importancia se

destaca la rugosidad, por estar directamente relacionada con la fiabilidad y la longevidad de los elementos de máquinas.

Las propiedades mecánicas y funcionales idóneas en el acero 45 para la eficaz explotación del equipamiento que la utiliza, se han tratado de obtener por diferentes vías; mediante la aplicación de tecnología de tratamiento térmico y termoquímico. Uno de los procedimientos que ofrece perspectiva alentadoras para lograr el endurecimiento preliminar por deformación en frío del acero 45 es el endurecimiento del metal por deformación plástica, constituyendo un ejemplo de método novedoso que sustituye operaciones como el tratamiento térmico o termoquímico, brindándole a los materiales excelentes propiedades físicas-mecánicas con bajo costo y menor contaminación del medio ambiente.

En la bibliografía consultada, se observa una gran variedad de enfoques con relación al método de endurecimiento del acero 45 y las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional; sin embargo no queda establecida la fundamentación de las regularidades que se manifiestan entre las irregularidades geométricas y parámetro del proceso tecnológico, propio del método, como la fuerza aplicada, número de revoluciones y avance, al que se somete el elemento mecánico para su tratamiento.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, se plantea que:

La **situación problemática** de la investigación la constituye:

Debido a la batalla por la eficiencia y eficacia que se lleva a cabo a todos los niveles en nuestro país, se hace necesario valorar cada variante tecnológica a aplicar.

Existen diversos procedimientos para el tratamiento del acero 45, siendo el rodilado o rodillado por rodillos simple o mono rodillo, un proceso que ofrece perspectiva alentadora. El mismo resulta de gran simplicidad, racionalidad y progresividad; además es posible emplearlo en una gran variedad de piezas y de metales. El proceso de deformación plástica superficial por rodillos simples es un método alternativo ventajoso respecto a los esquemas tecnológicos tradicionales empleado para aumentar la calidad de las superficies de la pieza, con mayor eficiencia tecno-económica y menos contaminación del medio ambiente. Es un proceso ecológicamente más limpio en comparación con otros métodos de endurecimiento de materiales, pues no se generan

desperdicios al no haber arranque de virutas, se puede prescindir en determinados casos de tratamiento térmico o termoquímico y se disminuye también el nivel de ruido, por lo que permite a los operario mejores condiciones de trabajo y una disminución de la contaminación del medio ambiente.

El resultado que se espera de este trabajo es un procedimiento que permita organizar los conocimientos técnicos y establecer de una manera científica valores de los principales parámetros de trabajo del régimen de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial por rodillos simple, desarrollando un incremento de la productividad del trabajo, ahorro de materia prima, energía eléctrica y otros recursos, bajo costo de operación, no se requiere de operario altamente especializado y se puede realizar con las maquinas convencionales existentes; se refleja un aumento de la producción que permite a la empresa poder contar con mayor capacidad productiva y posibilita el desarrollo en el país de un tratamiento adicional para mejorar las cualidades superficiales.

El **problema científico** a investigar lo constituye:

1. El desconocimiento, en parte, de las regularidades que se establecen entre la tolerancia y otros parámetros en piezas cilíndricas de acero 45 cuando son sometida al proceso de deformación plástica por rodadura.

Como **objeto de la investigación** se establece:

Probetas cilindricas elaboradas de acero 45.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:

Después de ser deformada plásticamente piezas cilíndricas de acero 45 con rodillo es posible determinar la tolerancia dimensional (T) a partir de la variable número de revoluciones (n) y avance (S).

A partir de la hipótesis planteada se defina como **objetivo** del trabajo:

Determinar el comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas elaboradas de acero 45, durante la deformación plástica superficial con rodillo.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Establecer el marco teórico de la investigación, a partir de una revisión bibliográfica;
2. Caracterizar los materiales y métodos a emplear durante la investigación;
3. Realizar el análisis y discusión de los resultados.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantea la siguiente **tarea** del trabajo.

1. Indagación acerca de las características del acero 45;
2. Establecimientos de los fundamentos de las tensiones y las deformaciones debido a la deformación plástica por rodillo;
3. Selección del elemento deformante y del material a deformar plásticamente con rodillo;
4. Elección de la máquinas y equipos empleados en la experimentación;
5. Descripción del proceso de elaboración mecánica de la probeta;
6. Diseño del experimento a realizar;
7. Procesamiento estadístico de los resultados obtenidos;
8. Análisis de los resultados obtenidos durante la experimentación y
9. Discusión de la información obtenida a partir del trabajo desarrollado..

El **campo de acción** de este trabajo lo constituyen:

Las irregularidades geométricas de piezas cilíndricas al ser sometida a la deformación plástica superficial con rodillo.



CAPITULO I. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION

1.1. Introducción

En las industrias cubanas los equipos y maquinarias empleado, utilizan el acero 45 para la construcción de los agregados y accesorio de las mismas. Teniendo en cuenta las propiedades que este posee de incrementar su dureza al ser sometido a tratamiento térmico y la capacidad que este posee de endurecimiento por deformación, y una elevada resistencia al desgaste a pesar de su relativa baja dureza. Este acero es considerado en la práctica industrial como el material capaz de combinar elevada tenacidad y ductilidad.

El acero 45 constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de piezas de maquinarias, puede lograr unificar las propiedades de resistencia al desgaste, es un material con facilidad de conformar, su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga, este endurece por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación. (Várela, 2003).

De acuerdo con los criterios de (Guliaev, A.P, 1983), el acero 45 posee la alta tenacidad y plasticidad característica de los aceros, en las condiciones de rozamiento, acompañado de grandes presiones, tiene una alta resistencia al desgaste. Este se encuentra con menos frecuencia fundido, permite una deformación fácil en frío, y esto es debido 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.

Un método novedoso de Deformación Plástica Superficial, lo constituye la Deformación a alta velocidad, donde el uso de cargas de contacto puede lograr mayor profundidad de endurecimiento que los métodos convencionales y lo hace con menor deformación que el endurecimiento por trabajo en frío convencional (Caraballo, M.A, 2006,)

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 irregularidades superficiales, (Rose, S, 2003).

La deformación plástica superficial en frío según (Álvarez, E. A.G, 1999) es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza, a medida que el grado de deformación aumento son necesarias más tensiones para continuar deformando, el grado de deformación está muy vinculado con el fenómeno de endurecimiento. Por tanto el aumento del grado de deformación en frío puede aumentar la resistencia del metal a la deformación.

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).

El trabajo en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodillos mejora las propiedades de la pieza, ejemplo: alta resistencia al desgaste, aumento de la dureza (Loh, N.H., et all, 1989), calidad de la superficie (Lee, S.S.C, et all, 1992), y un máximo incremento de la tensión residual en compresión (Fattouh, M. El-Khabeery, M. M, 2003). Los parámetros que determinan la calidad superficial son: presión, avance, material del rodillo, número de pasadas, material de la pieza.

Según (American Heller et all, 2005, Elliot Tools, 2004, Ogburn, 2001), plantean que el proceso de deformación plástica superficial en frío es más productivo que el bruñido por bola y por diamante Esta tecnología puede ser usada para aumentar la resistencia de la superficie de la pieza tanto como la disminución de la rugosidad superficial. El aumento de la resistencia superficial sirve principalmente en términos de una mejora en el comportamiento a la fatiga de la pieza bajo cargas dinámicas.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada serán abordados aspectos relacionados con la caracterización del acero 45 y la interrelación composición química-estructura-propiedades, además de las particularidades estructurales del material durante el proceso de deformación en frío.

En el presente capítulo se establece como objetivo.

. Efectuar un análisis de la bibliografía disponible que permita desarrollar la temática en cuestión y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2. Generalidades acerca del acero 45

El acero 45 es de producción nacional, el cual requiere de un valor mínimo de costo de producción. El empleo de este material en la industria cubana es muy difundido, por presentar una fácil maquinabilidad y una amplia aplicación. Según (Bengton, U. 1991), es un acero muy dúctil, forjable, cuando se somete a proceso de temple alcanza valores de dureza de 56-58 HRC, es un acero medio de contenido carbono. Por consiguiente, este es un material adecuado para ejes, pasadores, tornillos.

Son llamados aceros de construcción según (Várela, 2003), aquellos que se emplean para la fabricación de elementos de máquinas, estructuras y construcciones. El acero de construcción debe poseer alta resistencia, plasticidad y viscosidad en combinación con excelentes propiedades de ingeniería. El contenido de carbono en este grupo de aceros comúnmente no supera el 0,5-0,6 %. Este material debe elaborarse fácilmente por presión (laminado, forjado, estampado).

En la actualidad existen diferentes criterios para explicar el mecanismo de endurecimiento del acero 45, sobre todo a partir de la diversidad de métodos y procedimientos empleados en el proceso de deformación plástica. Este proceso que ha sido estudiado en Cuba por la comunidad universitaria, fundamentalmente de manera experimental, y aplicado en algunas empresas mecánicas, de manera empírica. Se puede establecer que este es un tipo de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial en frío utilizado internacionalmente. La aplicación del mismo es simple y no requiere de una inversión capital para su realización. (Díaz. S. 2005, et all, 2005).

Según (Díaz, S, 2002, Mallo, M, 1987) las primeras acciones se acometieron hace 25 años en el Departamento de Construcción de Maquinaria de la Facultad de Ingeniería

Mecánica de la Universidad de Oriente, y en el Departamento de Procesos Tecnológicos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Las Villas. Tema sobre el cual en nuestro país se conocían reportes de estudios realizados sobre el tema desde hace aproximadamente 30 años. Se obtuvieron resultados preliminares del orden teórico-experimental y también a escala industrial reducida, desarrollándose incluso el instrumental necesario. En toda esta etapa los resultados obtenidos fueron fragmentados y no tuvieron la sistematicidad necesaria.

El-Axir, 2005, analiza el comportamiento de la dureza y la rugosidad superficial bajo el efecto de la fuerza, el número de pasadas de la herramienta, el avance y la frecuencia de giro de la pieza. Indistintamente trata materiales no ferrosos como el aluminio comercialmente puro del tipo 2219-T8751, latón 60/40 y aceros aleados. Además El-Axir, 2000), al concluir el experimento, hace una serie de recomendaciones como son: emplear fuerzas superiores a 250 N para lograr un buen acabado superficial y superiores a los 350 N para obtener una alta dureza, utilizar valores de avance entre 0,06 y 0,2 mm/rev y de tres (3) a cinco (5) pasadas de la herramienta, así como un rango de frecuencia de giro de 150 a 230 rev/min. Los resultados obtenidos en la microdureza superficial se encuentran entre 241 y 362 HV y en la rugosidad superficial (Ra) están enmarcados en un rango de 0,5 a 3 μm . También se determinaron las tensiones residuales compresivas en la superficie y en la zona subsuperficial que se generaron al aplicar fuerzas superiores a 250 N con frecuencia de giro cercanas a las 350 rev/min con valores de 400 MPa. Este experimento tiene muchos puntos de coincidencia con el trabajo experimental que se proyecta realizar, no obstante existen diferencias de criterios sobre el diseño de la herramienta y en este trabajo se emplea un torno paralelo convencional 16 D 20.

1.2.1 Clasificación de las operaciones elementales de deformación

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, H. G, 2004)

La dimensión 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, C, 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.

A medida que un material se va deformando, puede sufrir transformaciones internas y redistribuciones de tensiones, que causen agrietamientos o malformaciones que invaliden el producto final logrado. La presión de contacto está representada por una serie de cargas puntuales que actúan en cada nodo de la superficie. La deflexión en cualquier punto del modelo puede ser determinada mediante la superposición de las deflexiones causadas por cada carga discreta. (Bower, A F, 1989)

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. 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. El extremo de entrada, puede beneficiarse por una reducción en la presión local en condiciones de deslizamiento. (Hu Nai-Sai, 2002).

1.2.2. Factores que influyen en el proceso de tratamiento por deformación plástica superficial mediante rodillo

Según los datos de la literatura consultada, El-Axir, 2000, Hasegawa, S, et all, 2000, Klocke, F, 1998 y Pacana, A, 2002, los factores que mayor influencia tienen en las cualidades y propiedades físico-mecánicas de las superficies tratadas son los siguientes

➤ **Fuerza compresiva constante de la herramienta:**

El valor de esta fuerza controlada depende de varios factores, entre otros:

- Tipo de material a elaborar, geometría del rodillo, forma de la pieza, rigidez de la pieza, dureza superficial que se quiere obtener.

Algunos trabajos (Pacana, A, 2002 y El-Axir, 2003), se refieren a este factor expresándolo como profundidad de penetración de la herramienta en la superficie de la pieza, que se traduce en una fuerza conociendo la calibración de la herramienta.

➤ **Avance de la herramienta:**

Para seleccionar correctamente los valores de avance se debe tener en cuenta:

- Geometría del rodillo, cualidades superficiales que se desean lograr (mayor dureza, mejor acabado o ambos)

➤ **Número de pasadas de la herramienta:**

Depende de varios factores tales como:

- Frecuencia de giro de la pieza, acabado superficial inicial de la pieza.

Depende de varios factores, entre otros:

- Tipo de material a elaborar, parámetros de régimen de elaboración, herramienta de deformar, dureza superficial inicial de la pieza, material de la pieza en bruto
- Geometría del rodillo, tipo de material a elaborar, cualidades superficiales que se desean lograr

También es analizado en El-Axir, 2003, como tiempo de duración del proceso y está directamente asociado a la velocidad, al avance y al ancho del rodillo.

Estos factores deben ser controlados para conseguir los beneficios y valores esperados de cada uno en los parámetros - respuestas (acabado superficial, dureza superficial, diámetro de la pieza, tensiones residuales compresivas, entre otros, profundidad de capa endurecida), de lo contrario una alta deformación plástica, por ejemplo por la aplicación de altas fuerzas y altos números de pasadas, excedería la capacidad del metal de aceptar tal deformación y ocurriría un sobreendurecimiento o sobreconsolidación de la capa tratada, que no es más que la fatiga de la misma, provocando un descascaramiento o desprendimiento en forma de capas y la aparición de peligrosas microgrietas, deteriorándose la superficie metálica de la pieza y provocándose cambios indeseables en la estructura y las propiedades físico-mecánicas de la misma.

1.2.3. Métodos experimentales empleados para estudiar las tendencias de la Deformación Plástica Superficial por Rodillo

Para estudiar el comportamiento de las cualidades superficiales de las piezas tratadas en la Deformación Plástica Superficial por Rodillo son muy útiles las técnicas de diseño de experimentos, permiten darle solución y explicación científica efectiva y económica a los problemas objeto de análisis.

Según (Hernández, S, 1997), la utilización del diseño de un modelo experimental se fundamenta, entre otros aspectos, en cuatro reglas básicas:

- Disminuir el número de corridas experimentales necesarias
- Cambiar el valor de los factores de acuerdo con reglas
- Utilizar en el procesamiento métodos matemáticos normalizados
- Poseer una estrategia de trabajo por etapas

De la bibliografía consultada se pudo establecer que para el estudio del efecto de este tratamiento en las cualidades superficiales de las piezas han sido empleados diseños experimentales del tipo factorial completo en (Loh, N.H, 1989a, Loh, N.H, 1989b, Lee, S.S, 1992 y El-Axir, 2003), también se ha usado el diseño factorial parcial, Box y Hunter en (El-Axir, 2000) y en otros casos se ha utilizado el Método de Taguchi (Lee, S.S, 1992 y Pacana, A, 2002), empleando indistintamente como variables de entrada la fuerza (o la profundidad de penetración), el avance, el número de pasadas (o el tiempo), la velocidad, la dureza y la rugosidad superficial previas, analizando como respuestas la dureza y la rugosidad superficial final, la falta de cilindridad y la reducción del diámetro.

➤ Herramientas:

Las herramientas que se utilizan en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodillo son:

- Herramienta multi-rodillos: Presenta formas diferentes según la configuración de la superficie a elaborar cuyas dimensiones están normalizadas en un rango de medida determinado, tanto para superficies exteriores como interiores. Va colocada en máquinas bruñidoras, y según sus características, también puede ser instalada en máquinas herramientas convencionales. Esta herramienta tiene posibilidades tecnológicas limitadas para la elaboración de superficies de diferentes diámetros. Su diseño y fabricación son

complejos. Es muy productiva por lo que se utiliza en producciones masivas y en series grandes. Su precio de venta oscila entre los 1 000 y 1 200 USD (808 y 970 CUC) (Bright Burnishing, 2005, Monaghan, 2005).

- Herramienta de rodillo simple o mono rodillo: Consta de un rodillo montado en un cojinete de rodamiento. Se puede mover en los dos ejes (transversal y longitudinal). Va montada en el portaherramientas de la máquina herramienta. Su diseño, fabricación y explotación es sencillo porque su sistema de carga fundamentalmente es mecánico. Es universal pues se le pueden colocar rodillos de diferentes diámetros y formas. El proceso de tratamiento es rápido y es fácil de montar y desmontar en la máquina herramienta, además de su comodidad para medir la fuerza. Se emplean en producciones unitarias y en pequeñas y medianas series. Su precio de venta varía entre 800 y 950 USD (646 y 768 CUC) (Bright Burnishing, 2005, Mech- India, 2005 y Monaghan, 2005).

➤ **Aplicaciones:**

- Según Bright Burnishing, 2005, Hasegawa, S, 2001, Sugino Corporation, 2004, pueden ser deformada plásticamente todas las piezas que se ensamblan y que requieren un gran nivel de dureza en las superficies de contacto y un fácil desmontaje (cilíndricas macizas o no), planas de perfil complejo (superficies de forma) entre algunas de ellas están:

- Láminas de rotores y estatores de motores eléctricos
- Partes y piezas de equipamiento hidráulico y neumático (bombas, turbinas, cilindros y compresores)
- Árboles y ejes (zonas donde van montados los cojinetes de rodamiento y otros elementos de máquinas)
- Piezas para la industria militar (ánima de las piezas de artillería convencional y reactiva), aeronáutica y aeroespacial (piezas de motores y turbinas), automotriz (pistones, camisas, cigüeñales, árboles de leva, asiento de válvulas), química, electrónica y textil, entre otras.

➤ **Ventajas de la Deformación Plástica Superficial por Rodillo:**

La Deformación Plástica superficial por Rodillo trae aparejado ventajas como son mejoras en las propiedades físico-mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. La resistencia a la fatiga aumenta de un 26 a un 35 por la acritud y la

aparición de altas tensiones residuales compresivas en la capa superficial. Cualquier esfuerzo en la pieza debe sobrepasar esos valores de tensiones residuales, que eliminan los focos que pudieran provocarla como son los poros, las hendiduras y las marcas o huellas dejadas por la herramienta después del maquinado. Aumenta la resistencia al desgaste, porque al deformarse la superficie casi se igualan el tamaño de las crestas y los valles provocando que el desgaste de dicha superficie, al entrar en contacto con otra, sea mínimo. También aumenta la resistencia a la corrosión, porque al reducirse la porosidad y las marcas de herramientas las sustancias reactivas o contaminantes tienen menos posibilidad de corroer la superficie deformada (Burnishing Tools, 2005, Hasegawa, S, 2000b, Mech- Sugino Corporation, 2005, Westerman, W. J, 1983).

- Es un método muy económico para obtener dureza superficial, además de no requerir una inversión capital para realizarlo, elimina o reemplaza costosas operaciones de tratamiento térmico con alto consumo de energía eléctrica. Este proceso conlleva bajos costos de operación y no se requiere para efectuar esta operación de operarios especializados. (Bright Burnishing, 2005, Sugino Corporation, 2004, Westerman, W. J, 1983).
- Las diferentes piezas de estas herramientas según (Bright Burnishing, 2005). son intercambiables, por lo que resulta sencillo, fácil y rápido el mantenimiento y el cambio de piezas gastadas o deterioradas tales como rodillos, rodamientos, ejes, lo que ayuda a prolongar la vida útil de la herramienta
- Existe la posibilidad de evitar los tratamientos térmicos y termo-químicos disminuyendo así la contaminación del medio ambiente por la no-emisión de gases. Es un proceso ecológicamente más limpio, pues no se generan desperdicios, al no haber arranque de virutas, y se ahorra materia prima. Se ahorra además energía eléctrica y otros recursos. Se disminuye también el nivel de ruido (Sugino Corporation, 2005, Westerman, W. J, 1983)

Según (Westerman, W. J, 1983), las 4 razones principales para la deformación plástica superficial en piezas con el empleo de rodillos son

- Mejor control de la tolerancia, aumento de la dureza, mayor resistencia a la fatiga, aumento de la vida útil.

- Puede realizarse en máquinas herramienta convencional y en máquinas herramienta con control numérico (Sugino Corporation, 2004, Surfing Tool, 2005, Westerman, W. J, 1983).

Además, están siendo reportados otros beneficios como:

- Reducción del ruido, disminución del desgaste, reducción de las vibraciones.

1.2.4. Composición química del acero 45

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

Tabla 1.1. Composición química estándar del acero AISI 1045

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

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

Cromo: la adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura, 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.

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

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

Azufre: 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, forma con el hierro combinaciones químicas, sulfuros de hierro, que hacen que el acero calentado al rojo sea quebradizo.

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

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

En resumen, se refleja el papel tan significativo 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.

1.2.5 Propiedades físico, mecánicas del acero 45

Las propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 1045 obtenidas a temperatura ambiente. En diferentes bases de datos (Materiales, 1996, Key to Steel, 2002) son:

➤ **Propiedades físicas del acero 45.**

- Densidad. 7,85 Kg/dm³
- Módulo de elasticidad.

100 °C-205 kN/mm²

200 °C-195 kN/mm²

300 °C-185 kN/mm²

400 °C-175 kN/mm²

600 °C-155 kN/mm²

- Conductividad térmica. 50 kW/m·K
- Capacidad calorífica. 460 J/kg·K
- Resistencia eléctrica específica. 0,12 Ω·mm/m

➤ **Propiedades Mecánicas:**

Tensión Límite de Fluencia mínima (MPa). 350

Tensión Límite de Fluencia de Cizallamiento (MPa). 175

Tensión Límite de Resistencia (MPa). 430

Elongación mínima (%). 35

Estricción mínima (%). 35

Dureza (HB).. 170

Resiliencia (J/ mm²). 100

1.3. Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de deformación plástica superficial por rodillo

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, L. 1989)

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

1. Tensiones de primer género (macroscópicas, zonales o tecnológicas): Se equilibran en el volumen de todo el cuerpo. Estas tensiones están orientadas en correspondencia con la forma del artículo. En presencia de ellas, la separación de cualquier parte de la pieza conduce a la ruptura del equilibrio entre el resto de las partes, lo que en muchos casos provoca deformaciones (alabeos y distorsiones) del artículo. Además, pueden ser perjudiciales (las de tracción) o beneficiosas (generalmente las de compresión), (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 (Pero-Sanz, 2000, Alfonso, E, 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, (Pero- Sanz, 2000, Alfonso, E, 2002).

El trabajo en frío según (Moreno, P.A, 2005), 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 (Pero- Sanz, 2000) 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 (Pero-Sanz, 2000)

El autor (Key to Steel, 2002), plantea 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.

Según (Pero- Sanz, 2000), 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.

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, Alvarez, E. A.G, 1999).

1.4. Tolerancia de la dimensión por deformación en frío

Según (Casanova H. 1986) y de acuerdo con lo establecido en la NC 16-13 1980 norma básica de intercambiabilidad ajuste y tolerancia. Se define como tolerancia a la diferencia entre las dimensiones límite máxima y mínima o la cantidad de magnitud absoluta entre las desviaciones superiores e inferiores. Dimensiones límite son aquellas que corresponden a las dos dimensiones extremos permisible de una pieza dentro de cuyo intervalo (incluida las dimensiones externas) deben encontrarse la dimensión efectiva de la pieza. Esta se normaliza de acuerdo con lo establecido por el sistema de tolerancias y ajustes. Las tolerancias y dimensiones establecidas en esta norma se refieren a las piezas cuyas dimensiones son determinadas a una temperatura de 20 ° C.

La zona de tolerancia se define como la región limitada por las desviaciones superiores o inferiores y esta se determina por la magnitud de la tolerancia y por su situación con respecto a la dimensión nominal. El conjunto de tolerancia que corresponden a un mismo grado de precisión para todas las dimensiones nominales se le denomina grado de tolerancia.

➤ **Características del sistema Internacional de Ajustes y Tolerancias:**

Como característica fundamental de este sistema se puede resaltar que es aplicable para uniones cilíndricas- lisa y uniones planas con placas paralelas proporcionando las bases normalizadas para asegurar la precisión requerida.

Las particularidades del sistema ISO son expresadas de las siguientes formas. (Martines. V. 1984)

1. La utilización de unidades de tolerancia relativas.
2. Expresión del tamaño de precisión en término de clase de precisión.
3. Introducción de dos sistema básico (agujero único y eje único), los cuales son la forma básico ajustable.
4. Aplicación de una graduación en los tamaños de precisión (intervalo).
5. Utilización de ajustes combinados sobre la base de zona de tolerancia.

Sobre la base de la experiencia generalizada de los procesos productivos y análisis estadístico de datos experimentales, se obtuvo la siguiente expresión para las unidades de tolerancia. Unidad de tolerancia es el factor expresado únicamente en función de la dimensión nominal y que sirve de base para determinar la tolerancia y se determina según la fórmula.

$$i = 4.45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0.001 \cdot D \quad (1.1)$$

D – valor promedio del diámetro (mm) para el intervalo dado, con arreglo a la serie de números preferidos.

i – unidades de tolerancia en μm dentro del rango 1 – 500.

Para el caso que tengamos diámetro comprendido entre 1 mm y 120 mm, la expresión será

$$i = 0.45 \cdot \sqrt[3]{D} \quad (1.2)$$

Para diámetro comprendido entre 500 mm y 10000 mm, se utilizará

$$i = 0.004D + 2.1 \quad (1.3)$$

Para cada uno de estos grupos puede calcularse el valor del diámetro promedio por la siguiente ecuación:

$$D_m = \sqrt{D_{\text{máx}} \cdot D_{\text{mín}}} \quad (1.4)$$

Según (Martines. V. 1984), existen 28 zonas de tolerancia normalizada para el agujero y 28 zona normalizada para el eje, cualquier combinación de esta forma dará un ajuste.

De acuerdo con (Martines. V. 1984), la serie de número preferido están diseñado de acuerdo a ciertas leyes, y satisfacción: una de las tareas principales de la normalización consiste en desarrollar un mínimo racional de tipos y dimensiones de productos, lo cual requiere de una estricta sistematización de los número a utilizar, la idea de dicho sistema es que no todo los valores obtenido de los cálculos o de los experimentos deben ser normalizado. Este sistema constituye la base para la normalización de las dimensiones. Por lo que la ISO introdujo una recomendación sobre el sistema de número preferido. La serie de número preferidos presentan las siguientes características.

- Son simples y fáciles de memorizar.



- Son indefinida en ambas direcciones, tanto para número pequeños como para número grandes.
- Presenta un sistema racional de graduación.
- Incluye todos los valores que resultan de multiplicar cada miembro de la serie por diez cualquier potencia tanto positiva como negativa.

La serie de número preferido se diseña de acuerdo a las leyes de la progresión aritmética y geométrica:

1. Serie aritmética: es aquella en la cual la diferencia entre dos número término consecutivo de la misma siempre es una magnitud constante.
2. Serie geométrica: es aquella en la cual la razón entre dos términos consecutivos de la misma es una magnitud constante.

De acuerdo con los criterios de (Makienco N.I.1982), el fin de cualquier tipo de elaboración de piezas consiste en fabricarlo con una precisión dada. Por precisión de elaboración se comprende la correspondencia de las dimensiones y de la forma de superficie que se trabaja con una precisión dada. La superficie que se trabaja presenta altas exigencias de precisión y calidad. A pesar de la alta precisión y gran perfección de la máquina herramienta contemporánea, es imposible obtener dimensiones o formas de piezas que correspondan con las especificadas, las piezas fabricadas tendrán alguna desviación en uno u otro sentido, los cuales dependen de:

1. La precisión de los tornos (los tornos no pueden ser absolutamente exactos y se fabrican con desviaciones establecidas).
2. La precisión de fabricación y el desgaste de la herramienta cortante (las herramientas cortantes se fabrican con tolerancia de fabricación).
3. la temperatura de pieza que se comprueba. Al elevarse la temperatura las piezas se dilatan. La dimensión de una pieza caliente se diferencia de la dimensión real a temperatura normal. ($T=20^0$)
4. El buen estado del instrumento de medición.
5. La habilidad del obrero al emplear el instrumento. Con la correspondiente calificación del obrero las fallas pueden ser insignificante.

El sistema ISO de acuerdo con los criterios de (Martínez F. 1984), establece 19 grados de Tolerancias o calidades, que son designado por IT 01 a IT17 es de 19 calidades diferentes que constituyen las tolerancias sobre las cuales se basa todo el sistema.

Los grados de tolerancias IT01 a IT04 se reservan para la fabricación de calibres y patrones, y en trabajo de alta precisión. En la construcción de maquinarias en general se emplean los grados IT5 a IT12. Los grados de tolerancias de IT13 a IT17 se utilizan para las desviaciones brutas, ya sean piezas aisladas que no ajustan con otras, Trabajo de forma o equipo agrícola.

La magnitud de la tolerancia fundamentalmente depende del diámetro de la pieza. Ya que cuando este aumenta, aumenta la tolerancia, y al mismo tiempo disminuye la precisión de la medición.

De aquí la tolerancia fundamental o IT se establece mediante la relación:

$$IT = a \cdot i \quad (1.5)$$

Donde:

$a \rightarrow$ coeficiente de calidad, que depende del grado de exactitud.

$i \rightarrow$ unidad de tolerancia que depende del diámetro o tamaño.

Tabla: 1.2 Para el grado más empleado en la construcción de maquinaria, los valores de a son los siguientes:

Para la calidad	5	6	7	8	9	10	11	12
El coeficiente a	7	10	16	25	40	64	100	160

Para el caso que se quiera establecer la tolerancia de una pieza a partir de mediciones simples realizada sobre piezas individuales se puede emplear la siguiente relación, de acuerdo con (Sardiñaz H. 1986))

$$\bar{X} + t \cdot S \quad (1.6)$$

Y de manera general puede adoptarse la siguiente expresión:

$$T = 6 \cdot S \quad (1.7)$$

Donde:

X- es la media aritmética o promedio del conjunto de dimensiones;

T- estadístico que depende del nivel de confianza y

S- Desviación típica

La fórmula anteriores son buenas para el cálculo de la tolerancia dimensional si el número de observaciones realiza sobre la pieza es grande (mayor que 30), ya que esto permite asegurar la normalidad de las observaciones.

Ahora bien, en (Miller.R, 2005) se plantea que la tolerancia de la dimensión puede ser calculada, -independiente de cómo este distribuida la variable, con arreglo a la siguiente expresión:

$$T = 2 \cdot K \cdot S \quad (1.8)$$

Donde:

K- es un coeficiente que se determina en tabla, a partir de nivel de significancia y la proporción y

S- es la desviación típica

➤ **Relación entre la tolerancia de la dimensión y el error de forma y posición:**

Existen relaciones recomendadas entre la tolerancia de forma y posición y la tolerancia de la dimensión para aquellos tipos de tolerancia de forma y posición que son parte componente de la tolerancia de la dimensión sobre la base del concepto de dimensión límite según la NC 16-30 (Casanova N. 1986)

La tolerancia de cilindricidad, circularidad, perfil de sección longitudinal, planicidad, rectitud y paralelismo, se establecen en aquellos casos en que deben ser menores que la tolerancia para la dimensión.

Se excluye el caso cuando las dimensiones límite difieren en las comprendida en la NC16-30. En este caso le tolerancia de forma y posición pueden o no formar parte de la tolerancia de la dimensión y su valor numérico puede superar el de la tolerancia de la dimensión.

Se recomiendan los siguientes niveles de precisión geométrica relativa, los cuales se caracterizan por la relación entre la tolerancia de forma y posición y la tolerancia de la dimensión.

- a) Precisión geométrica relativa normal: Para la tolerancia de forma y posición se utiliza un 60% de la tolerancia de la medida.
- b) Precisión geométrica relativa elevada: Para la tolerancia de forma y posición se utiliza un 40% de la tolerancia de la medida.

c) Precisión geométrica relativa alta: Para la tolerancia de forma y posición se utiliza un 25% de la tolerancia de la medida.

Estos niveles señalados para la precisión relativa no excluyen la posibilidad de que en los casos justificados se designe una tolerancia de forma o de posición, menor de un 25% de la tolerancia de la medida.

Formula que relaciona la tolerancia con el error de forma

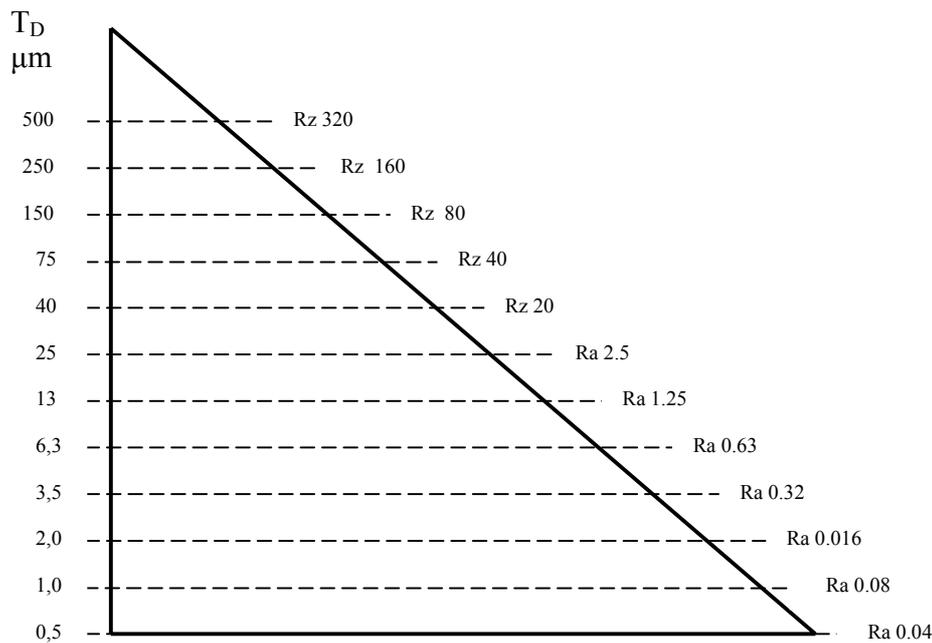
$$T_f = 0.25 \cdot T_D \text{ Para calidad alta} \quad (1.9)$$

$$T_f = 0.4 \cdot T_D \text{ - para calidad media} \quad (1.10)$$

$$T_f = 0.6 \cdot T_D \text{ Para calidad baja} \quad (1.11)$$

➤ **Relación entre la tolerancia dimensional y la rugosidad superficial:**

Entre la tolerancia de la dimensión y la rugosidad superficial se han establecidos relaciones. Las relaciones establecidas se muestran a continuación;(Rodríguez. H 1986).



Gráfica: 1.2 Valores mínimo de rugosidad superficial.

Lo anterior indica que conocido el valor de la tolerancia característico para una correspondiente superficie, se puede determinar por medio del auxilio de la gráfica antes expuesta el correspondiente valor de rugosidad mínimo.



1.5. Conclusiones del Capítulo I

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

1. El proceso conocido como Deformación Plástica Superficial por Rodillo Simple está establecido como un proceso de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial y tiene plena actualidad, 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, por lo que es recomendable su aplicación en las condiciones particulares de Cuba.
2. La bibliografía consultada, aporta información sobre las propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero 45, pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales, y en ninguno de ellos se muestran las regularidades del comportamiento de la tolerancia dimensional generadas por un rodillo.

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS

2.1. Introducción.

La Deformación Plástica Superficial por rodillo, se realiza principalmente, a diámetros exteriores e interiores de piezas maquinadas. Las herramientas con la que se materializa son rotatorias y contienen rodillo. Este es un proceso que se realiza en frío donde se le aplica una fuerza superior a la que genera una tensión superior al límite de fluencia del metal; a este proceso mediante el cual la pieza es endurecida al mismo tiempo que es deformada se le suele llamar acabado sin desgarre de viruta.

En este capítulo se plantea como objetivo:

Fundamentar y llevar a cabo los diferentes procedimientos que nos permitan determinar los valores de la tolerancia.

2.1.1. Generalidades del proceso

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de un procedimiento general, se requiere tener en cuenta la teoría de la toma de decisiones y el flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles y criterios tecnológicos en los procesos por deformación plástica superficial, no solo basta con la elección del material y su valoración física, química y estructural. También se debe tener en cuenta los tres tipos de máquinas herramienta que se pueden utilizar en esta operación (torno, fresadora, acepilladora) y que tienen sus características muy específicas, eligiendo la misma según el tipo de pieza a tratar, las prestaciones que ofrece y considerando su existencia en los talleres que se empleen.

2.2. Selección del elemento deformante (rodillo)

Para la selección del elemento deformante hay que tener en cuenta las características del mismo como por ejemplo: el perfil del rodillo empleado, el mismo influye marcadamente en los resultados obtenidos en el proceso de elaboración de la superficie (Odintov, L.G, 1987). Ver (figura # 2.1). El rodillo 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. (Cogsdill Tools, 2005, Bright Burnishing, 2005).

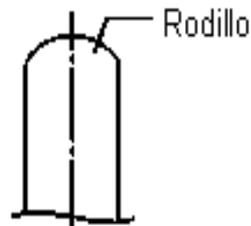


Figura 2.1. Forma del perfil de trabajo del rodillo.

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. Para 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, la fuerza que hay que aplicar sobre este para obtener la profundidad de capa que se desea deformar será menor, pero menor será la productividad del proceso, la cual solo aumentará, si se aumenta la velocidad del proceso.

La justificación del empleo de este tipo de rodillo radica en que para el endurecimiento de piezas de poca rigidez es necesario utilizar rodillos con un radio de perfil pequeño, lo que permite obtener el mayor aumento de la dureza con esfuerzos relativamente pequeños. Para ello se escogió un rodillo de 50 mm de diámetro construido de acero AISI 5140 con una dureza de 65 HRC, un acabado Ra de 0,5 μm y un radio en el perfil de 2 mm, con banda cilíndrica y radio abierto, que se corresponde con el tipo de superficie que se va a tratar y que posee salida libre para la herramienta. Ver (anexo I)

El cuerpo, es una barra de sección rectangular en forma de cuchilla que es la que permite instalarla en el portaherramienta de las máquinas herramienta. Una vez instalada la herramienta, se ajusta el calibrador roscado donde va acoplado un indicador de carátula, con una precisión de 0,005 μm que, mediante el mismo, permite determinar con exactitud

la fuerza que se transmite a la pieza y esta a su vez al rodillo, y que es ejercida sobre la pieza y absorbida por la ranura que presenta el dispositivo.

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

2.3. Selección del material a deformar plásticamente por rodadura

Para la selección del material a deformar plásticamente por rodillo, (acero 45) hay que tener presente las cualidades que este posee como son; alta tenacidad, plasticidad y una elevada resistencia al desgaste, gran capacidad de endurecimiento por deformación. Este es un material con facilidad de conformar, endurece por deformación plástica, su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga.

El análisis químico se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, Moa.

Tabla. 2.2. Composición química del acero AISI 1045.

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

2.4. Máquinas y Equipos empleados en la experimentación

2.4.1. Caracterización del torno 16 D 20

Los trabajos de torneado y experimental se realizaron en el torno 16D20, en el mismo se puede realizar todas las operaciones, 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...1,4mm/rev

Fuerza máxima laborable sobre el mecanismo de avance. 400 kgf.

2.4.2 Equipo para la determinación de la tolerancia dimensional

Para la determinación de la tolerancia se le tomó 7 mediciones del diámetro a cada probeta, buscando mayor representatividad, y posteriormente se procedió a la realización de un muestreo aleatorio simple para seleccionar un valor característica de cada una de las muestras (probetas). Estas operaciones fueron ejecutadas por el personal calificado para introducir el menor margen de error posible y que se realizaran como es debido; se tuvieron en cuenta las condiciones ambientales lo que proporcionó mejores resultado. Para realizar estas mediciones se utilizó el Pie de Rey digital de un margen de error de 0.01 μ m, a continuación aparecen las característica del equipo.

Este instrumento posee una batería de óxido plateado, de serie SR 44 y de 1.55 V. Posee mordaza de unidades interna, cerradura de tornillo, mordaza de unidades externas, ajuste cero y botón de encendido, plancha de medida de profundidad. Para una correcta conservación del mismo cuando no se utilice. Para la utilización del mismo es necesario tener en cuenta algunas instrucciones como son: mantener el calibrador limpio y seco (los líquidos pueden dañar el deslizador), la unidad del calibrador cuando este no se este usando, no aplicar ninguna presión eléctrica en ninguna de las parte del calibrador, para el reemplazo de la batería es necesario esperar unos 30 segundo después de haberla quitado. Para la limpieza del calibrador nunca se debe utilizar gasolina, aceite, y otras soluciones orgánicas.

2.5 Elaboración mecánica de las probetas para la deformación

Según (Fernández T 2003) las operaciones de corte para la toma de las probetas, se realizan 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.

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.

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

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

n = 250 rev/min, S = 0,2 mm/rev.

Donde:

n – número de revoluciones rev/min

s – avance mm/rev

Para el torneado se empleo una cuchilla de 45⁰ con sujeción mecánica Sandvik, código del vástago PSSN R 25 M 12, con una plaquita SNMG 12 04 08-PM de calidad 4 025 (SANDVIK Coromant KoroKey, 1996)

➤ Velocidad de corte:

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

La velocidad de corte se expresa en m/min. La velocidad adecuada de corte depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de las herramientas.

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

Donde:

V_c = Velocidad de corte; m/min .

D = Diámetro de la pieza; mm .

n = Número de revolución; rev/min .

1 000 = Factor de conversión de metro a milímetro.

➤ 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.

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

Donde:

$t \rightarrow$ Profundidad de corte; mm.

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

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

➤ Determinar la potencia consumida para el corte.

$$N_c = \frac{P_z \cdot V_c}{6120} \quad (2.3)$$

Donde:

$P_z \rightarrow$ Fuerza de corte en Kgf.

$$P_z = C_{fz} \cdot t^{x_{fz}} \cdot S^{y_{fz}} K_{fz} \quad (2.4)$$

$C_{fz} = 300$ Kgf; factor que depende de las propiedades mecánicas del metal que se elabora.

$t \rightarrow$ Profundidad de corte; mm.

$S \rightarrow$ Avance. mm/rev

x_{fz} y $y_{fz} = 1$ exponente del grado t y S

$K_{fz} = 1$ Kgf.

➤ Tiempo de maquinado.

Es el tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, también conocido por tiempo básico o tiempo total de maquinado.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i \quad (2.5)$$

Donde:

$T_m =$ Tiempo de maquinado; mm.

L = Longitud a maquinar; mm.

i = Números de pasadas.

n = Números de revoluciones; rev/min.

s = Avance; mm/rev

2.6. Diseño de experimento

Para la confirmación de la hipótesis científica se escogió un diseño de experimento factorial completo (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 el comportamiento de la tolerancia dimensional. Teniendo en cuenta que no se dispone de elementos, que permita fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan el comportamiento de la tolerancia dimensional del acero 45, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar del tema, se considera que son las más importantes:

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

2.6.1. Fuerza ejercida por la herramienta deformante (P)

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(s). Es una influencia a considerar en el comportamiento de la tolerancia dimensional de la pieza. Se aplicara una carga de 500 N. La carga se establece en correspondencia con el régimen de deformación que se desea tener.

Teniendo en cuenta las aplicaciones industriales del acero, pudo haberse seleccionado los niveles, mínimo, medio y máximo pero teniendo en cuenta las condiciones concretas de experimentación se escogió el nivel mínimo. En la bibliografía consultada (El Axir, 2000), realiza su trabajo con un material no ferrosos como el aluminio comercialmente puro del tipo 2219-T8751, propone fuerza superiores a 250 N para lograr un buen acabado superficial y superiores a los 350 N para obtener una alta dureza, utilizar valores de avance entre 0,06 y 0,2 mm/rev y de tres (3) a cinco (5) pasadas de la herramienta, así como un rango de frecuencia de giro de 150 a 230 rev/min. Partiendo de las premisas de

que el aluminio es más dúctil y maleable, con mayor facilidad de conformación que el acero se valoran estas recomendaciones y a partir de las mismas y en previo experimento se comprobó que para cargas de 400 N y avance de 0,25, la dureza y la profundidad de la capa obtenida en aceros al carbono no se correspondía con la dureza exigida en estos tipos de materiales, con valor de 400 N, la dureza estaba en el orden de los 200 HV y la profundidad de la capa endurecida en 0,2 mm, valores no representativos para las exigencias del trabajo a las cuales están sometidos. Con el máximo nivel los valores son representativos y se igualan a los obtenidos en el tratamiento térmico (Guliaev, 1989).

2.6.1.1. Número de revoluciones del husillo (n)

Es una variable cuantitativa, se utilizará en el rango desde 27, 54 y 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 deformación a obtener sea homogénea en toda longitud y diámetro.

2.6.1.2. Avance de la herramienta (S)

Variable que define el comportamiento de la capa deformada, está relacionado con los valores de dureza y la tolerancia a mayor avance, puede que haya 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. Los avances recomendados según Feschenkov, V, 1989, para elaboración de aceros con medio contenido de carbono deben estar entre los valores de 0,07-0,3, ya que en la medida que se aumenta el avance hay que disminuir la velocidad de corte.

2.6.1.3. Tolerancia Dimensional (T_D)

Variable cuantitativa, es la que se medirá en este caso al concluir la Deformación Plástica Superficial.

Actualmente se admite que la Tolerancia es uno de los parámetros que se tiene en cuenta a la hora de fabricación de las piezas. Para medir el comportamiento de esta mediante el proceso de deformación plástica superficial por radillo, se le introducen diferentes valores de número de revoluciones y avance a un mismo valor de fuerza.

La elección de cada uno de los niveles está determinada por el mayor o menor grado de tolerancia que se quiere medir en el material, o lo que es lo mismo, por la mayor o menor homogeneidad en la estructura. (Martínez V.1984).

Se realizará el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar, se consideran que las más importantes son las que aparecen reflejadas en la tabla. 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de entrada del experimento.

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Min.	Medio	Máx.
Fuerza (N)	P	500	500	500
Número de revoluciones.	n	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0,075	0,125	0,25
Tolerancia(mm)	T	mm	mm	mm
Diámetro del rodillo (mm)		50		

El número de experimento cuando intervienen k factores con tres niveles cada uno (-1,0 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. 2.4

Niveles	Respuestas			Salidas		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	D(mm)		
Nivel superior (1)	27	500	0,25	Rep1	Rep2	Rep3
Nivel medio (0)	54	500	0,125			
Nivel inferior (-1)	110	500	0,075			
Número de ensayo						
1	-1	0	-1	D1a	D1b	D1c
2	-1	0	0	D2a	D2b	D2c
3	-1	0	1	D3a	D3b	D3c
4	0	0	-1	D4a	D4b	D4c
5	0	0	0	D5a	D5b	D5c
6	0	0	1	D6a	D6b	D6c
7	1	0	-1	D7a	D7b	D7c
8	1	0	0	D8a	D8b	D8c
9	1	0	1	D9a	D9b	D9c

Tabla 2.4 Matriz de planificación del experimento.

En total, para el desarrollo de los experimentos se utilizarán 27 probetas deformada por Rodadura (probetas marcadas todas del 1 al 9, los diámetros de las misma fueron marcado con la letra D seguido del número de la probeta y la letra **a** para la primera repetición la letra **b** para lasegunda repetición y la letra **c** para la tercera repetición.

2.7. Procesamiento estadístico de los datos

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores, pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Una vez definidas las variables y sus niveles, se procede a la realización de los experimentos de aplicación de rodadura en las probetas. (Miller, R. y coautores 2005)

El diseño propuesto en el epígrafe 2.7. es muy apropiado cuando han de ser investigados varios factores a dos o más niveles y la interacción entre ellos pueden ser importantes. En

este caso se investigan dos factores, cada uno a tres niveles, ensayando todas las combinaciones entre los mismos. Se pretende:

1. Estimar y comparar los efectos de los factores seleccionados.
2. Estimar los posibles efectos de la interacción.
3. Estimar la varianza.

2.7.1. Cálculo de la varianza

Matriz del experimento: $N = a \cdot b = 3 \cdot 3 = 9$ (2.6)

Variable de entrada

Para los diferentes valores de las variables de entradas.

Número de revoluciones $n \rightarrow \text{rev}/\text{min}$	Avance $s \rightarrow \text{mm}/\text{rev}$
$n1 = 27 \text{ rev}/\text{min}$	$s1 = 0.075 \text{ mm}/\text{rev}$
$n2 = 54 \text{ rev}/\text{min}$	$s2 = 0.125 \text{ mm}/\text{rev}$
$n3 = 110 \text{ rev}/\text{min}$	$s3 = 0.25 \text{ mm}/\text{rev}$

Variable de salida

Diámetro $D \rightarrow (\text{mm})$

Base de datos.

Tabla 2.4.1 Matriz de planificación del experimento.

Niveles	Respuestas			Salidas		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	D(mm)		
Nivel superior (1)	27	500	0,25			
Nivel medio (0)	54	500	0,125			
Nivel inferior (-1)	110	500	0,075			
Número de ensayo				Rep1	Rep2	Rep3
1	27	500	0,075	39.36	39.48	39.44
2	27	500	0,125	40.01	40.00	39.92
3	27	500	0,25	39.82	39.73	39.84
4	54	500	0,075	39.40	39.80	39.76
5	54	500	0,125	39.44	39.57	39.58
6	54	500	0,25	40.38	40.47	40.39
7	110	500	0,075	39.65	39.86	39.21
8	110	500	0,125	40.00	39.78	39.95
9	110	500	0,25	39.70	39.80	39.84

Análisis de varianza:

1 – Hipótesis nula (H_0):

- Al variar el número de revoluciones no varía el diámetro.
- Al variar el avance no varía el diámetro.
- Al variar el número de revoluciones y el avance simultáneamente no varía el diámetro.
- Al repetir el experimento no varía el diámetro.

2 – Hipótesis alternativa (H_1):

- Al variar el número de revoluciones varía el diámetro.
- Al variar el avance varía el diámetro.
- Al variar el número de revoluciones y el avance simultáneamente varía el diámetro.
- Al repetir el experimento varía el diámetro.

2 – Nivel de significancia: $\alpha=0.05$

3 – Criterio para rechazar la hipótesis nula.

La hipótesis nula se rechaza si:

Para factor principal

Factor (n)

Se rechaza la hipótesis nula si:

$F > 3.63$, el valor de $F_{0.05}$ para $(a - 1) = 3 - 1 = 2$ y $(ab - 1) (r - 1) = 8 \cdot 2 = 16$

Factor (s)

Se rechaza la hipótesis nula si:

$F > 3.63$, valor de $F_{0.05}$ para $(b - 1) = 3 - 1 = 2$ y $(ab - 1) (r - 1) = 8 \cdot 2 = 16$

Para interacciones.

Se rechaza la hipótesis nula si:

$F > 3.63$, el valor de $F_{0.05}$ para $(a - 1) (b - 1) = (3 - 1) (3 - 1) = 4$ y $(ab - 1) (r - 1) = 8 \cdot 2 = 16$

Para repeticiones

La hipótesis nula se rechaza si:

$F > 3.01$, el valor de $F_{0.05}$ para $(r - 1) = (3 - 1) = 2$ y $(ab - 1) (r - 1) = 16$ grados de libertad.

4 – Cálculo del estadístico

a) Factor de corrección (C)



$$C = \frac{(\sum T_{ij})^2}{a \cdot b \cdot r} \tag{2.6}$$

Donde:

$a \rightarrow$ Niveles del factor 1(revoluciones)

$b \rightarrow$ Niveles del factor 2(avance)

$r \rightarrow$ número de repeticiones.

b) Suma total de cuadrado (SST)

$$(SST) = \sum_{i=1}^n \cdot \sum_{j=1}^n \cdot \sum_L^r \cdot Y_{ij(kl)}^2 - C \tag{2.7}$$

$Y_{ij(kl)} \rightarrow$ Diámetro de cada muestra por repeticiones.

c) Suma de cuadrado para tratamiento [$SS(Tr)$]

$$[SS[Tr]] = \frac{1}{r} \sum_{K=1}^n T_{(K)}^2 - C \tag{2.8}$$

$T_{(K)}^2 \rightarrow$ total de los diámetro de las tres repeticiones en cada probeta.

d) Suma de cuadrados para repeticiones (SSR)

$$SSR = \frac{1}{a \cdot b} \sum T_i^2 - C \tag{2.9}$$

$T_i^2 \rightarrow$ total de repeticiones

e) Suma de cuadrado para el error (SSE)

$$SSE = SST - SS(Tr) - SSR \tag{2.10}$$

f) Suma de cuadrado para factores principales.

Tabla: 2.5 para el cálculo de SSA y SSB

	s=0.075	s=0.125	s=0.25	Total
n=27	118.28	119.93	119.38	357.59
n=54	118.96	118.59	121.24	358.79
n=110	118.72	119.73	119.74	357.79
Total	355.96	358.25	359.96	

Factor (n) en rev/min.

Factor (s) en mm/rev

g) Suma de cuadrado para factor principal A (SSA)

$$SSA = \frac{1}{b \cdot r} \sum_{i=1}^a T_i^2 - C \quad (2.11)$$

$T_i^2 \rightarrow$ Suma de los diámetro correspondiente a tratamientos

h) Suma de cuadrado par factor principal B (SSB)

$$SSB = \frac{1}{a \cdot r} \sum_{j=1}^b T_j - C \quad (2.12)$$

$T_j \rightarrow$ Suma de diaametros correspondiente a bloques

i) Suma de cuadrados para interacción SS (AB).

$$SS(AB) = SS(\text{Tr}) - SSA - SSB \quad (2.13)$$

2.7.2. Determinación de los coeficientes de regresión

El análisis de regresión se utiliza para obtener una curva (superficie de respuesta) que se utiliza para predicción y en muchos casos para fines de optimización, es decir para determinar los valores de la variable independiente (o variables), de tal manera que la variable dependiente sea un máximo o un mínimo.

Ecuaciones normales para la superficie de respuesta.

$$\begin{aligned} \sum y &= n \cdot b_0 + b_1 \cdot \sum x_1 + b_2 \cdot \sum x_2 \\ \sum x_1 y &= b_0 \cdot \sum x_1 + b_1 \cdot \sum x_1^2 + b_2 \cdot \sum x_1 x_2 \\ \sum x_2 y &= b_0 \cdot \sum x_2 + b_1 \cdot \sum x_1 x_2 + b_2 \cdot \sum x_2^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Determinación de la cantidad necesaria.

Para cuando la tolerancia es función de número de revoluciones y el avance

$$\begin{aligned} \sum x_1 &= 0.48 & \sum x_1^2 &= 0.23 & \sum y &= 16.60 \\ \sum x_1 y &= 7.93 \end{aligned}$$

$$x_1 = \sqrt{\frac{1}{s \cdot n}} \quad (2.15)$$



Tabla: 2.7 Valores de los coeficientes de regresión apropiados

Coeficientes	Valor	Probabilidad	Confianza	Ficher	Fcrit.
b ₀	-50.01	0.01	95%	6.25	0.04
b ₁	4.50	0.04			

Para cuando la tolerancia es función del avance

$$\sum x_1 = 0.48$$

$$\sum x_1^2 = 0.23$$

$$\sum y = 16.60$$

$$\sum x_1 y = 7.93$$

y en este último caso se realizó la asignación siguiente:

$$x_1 = \sqrt{\frac{1}{s}} \tag{2.16}$$

Tabla: 2.8 Valores de los coeficientes de regresión apropiados

Coeficientes	Valor	Probabilidad	Confianza	Ficher	Fcrit.
b ₀	0.693	0.002	99%	3.432	0.106

2.8. Conclusiones del capítulo II

1. Las ecuaciones desarrolladas caracterizan 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 tolerancia en el acero 45 cuando es sometido a este proceso de deformación plástica superficial con rodillos, bajo condiciones similares a la de experimentación
2. Los parámetros de deformación (n , 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, 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 de las irregularidades de acero 45.
3. El procedimiento tecnológico descrito en el epígrafe 2.5.1 establece la secuencia tecnológica para el endurecimiento mediante la Deformación Plástica Superficial con Rodillo, de piezas simétricas rotativas, fabricadas de acero 45.

CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSION

3.1. Introducción

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, las expresiones matemática estadísticas que describen las regularidades del comportamiento de la tolerancia del acero 45 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.

El objetivo del capítulo:

Realizar la valoración crítica de los resultados así como una correcta valoración económica y socioambiental del método tratado.

3.2. Análisis de la herramienta para la deformación plástica superficial

La herramienta que se decide utilizar posee características muy parecidas a la de una cuchilla de torneado, caracterizada por su sencillez al emplear, con una ranura capaz de soportar la fuerza a introducir para la realización del experimento. Esta puede calificarse de rodillo simple. La elección de la ranura se realiza teniendo en cuenta las características geométricas y constructivas ofreciendo el valor de fuerza que se requiere para el experimento, por la facilidad de adaptación al diseño de la herramienta y lo sencilla que resulta su calibración. Este diseño facilita el tratamiento del diámetro exterior de piezas cilíndricas.

3.2.1. Análisis de la elaboración mecánica de las probetas

Para la elaboración de la probeta se tuvieron en cuenta las propiedades del material de lo cual depende los regímenes de corte, el tipo de cuchilla a utilizar y el tipo de elaboración, no obstante el acero 45 es un material de buena maquinabilidad lo cual permite un buen acabado superficial.

Las formulas (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5) del capítulo 2 epígrafe (2.5) permite determinar lo regímenes de elaboración de la probeta, de tal manera que la velocidad de corte es de (39.25 m/s), con una profundidad de corte (5 mm), y con una potencia consumida por el

motor eléctrico de (1.924 KW), lo cual permite realizar la operación en un tiempo de (6 min).

3.3. Método estadístico de planificación de experimento

3.3.1. Análisis de tolerancia

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 la tolerancia en la muestras de acero 45. Dicho análisis se realizó atendiendo a los principios enunciados en el epígrafe 2.6 del capítulo II. Las variables independientes fueron avance "S" y número de revoluciones "n" las cuales están relacionadas con los valores tolerancia

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 realizó siete medición a cada probeta. Los resultados de tolerancia obtenidos sobre la base de las mediciones realizada a las 27 probetas y la fórmula 1.10 se muestran a continuación.

Tabla: 3.1 Tolerancia para las probetas de cada experimento

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T(mm)	0,98	0,79	0,91	3,54	1,25	0,79	5,33	1,85	1,16

3.3.1.1. Análisis de varianza

Se realizó el análisis de varianza, según el método de Fisher, para evaluar el nivel de significación de las variaciones provocadas por los diferentes experimentos. Se desarrolló el análisis a partir de la ecuación 2.6 a la 2.13, epígrafe 2.7.1 capítulo II del presente trabajo.

En la tabla 3.2, se refleja el comportamiento del análisis de dicha varianza.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrado	Cuadrado medio	Fisher	F. Critico	
Repeticiones	2	0.033	0.017	0.742	3.63	
Efectos principales	A	2	0.092	0.046	2.059	3.63
	B	2	0.895	0.448	20.064	3.63
Interacción (AB)	4	1.121	0.280	12.569	3.01	
Error	16	0.357	0.022			
Total						

Para repeticiones

Puesto que $F = 0.742$ no es mayor que 3.63 la hipótesis nula no se rechaza al nivel de significancia del 0.01; en otras palabras al repetir el experimento no se ofrece diferencia significativa entre los valores de diámetro; por lo que se puede plantear que el experimento se realizó bajo control estadístico.

Para efectos principales

Puesto que $F = 2.059$ no es mayor que 3.63 la hipótesis nula no se rechaza al nivel de significancia del 0.01: en otras palabras al variar el número de revoluciones no varía el diámetro de la pieza.

Debido que $F = 20.064$ es mayor que 3.63 la hipótesis nula se rechaza, al nivel de significancia del 0.01; esto significa que al variar el avance varía el diámetro de la pieza.

Para interacciones

Puesto que $F = 12.569$ es mayor que 3.01 la hipótesis nula se rechaza al nivel de significancia del 0.01; es decir al variar el número de revoluciones y el avance simultáneamente varía el diámetro de la pieza.

3.3.1.2. Intervalo de confianza para las estimaciones de los coeficientes

Se valoraron todos los parámetros que tienen incidencia en los resultados del experimento. La tabla 1 del anexo II muestra el 95,0% de intervalo de confianza para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran la precisión en que pueden estimarse los coeficientes, dada la cantidad de datos disponibles.

3.3.1.3. Análisis de regresión para las variables involucradas

Los resultados experimentales fueron procesados por el análisis de regresión lineal aplicando el Modelo Lineal Generalizado.

En la tabla 2 anexos II, se analiza el comportamiento de la regresión de todas las variables. La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre T y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$T_D = -50.01 \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot S}} + 4.50 \quad (3.1)$$

Donde:

n = Números de revoluciones; rev/min.

S = Avance; mm/rev

Dado que el p-valor obtenido en el sofía Excel es inferior a 0.05, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%.

Las variables muestran que existe una la relación entre ellas, que hay alto grado de variación de la variable independiente sobre la variable dependiente y que el error típico que se comete al plotear la curva es bajo, con una alta aproximación a la tendencia real que debe tener la curva.

Se puede observar que la tolerancia tiene un comportamiento decreciente con un coeficiente de correlación (R) de 0,70%. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación.

La elevación de la tolerancia con la disminución del factor (ns) se puede explicar por el hecho que al disminuir dicho factor es como que la energía de la deformación se concentra en un menor área específica y en consecuencia se produce una alteración significativa de la superficie externa del material que se somete a la deformación; es decir aumenta la irregularidad geométrica.

3.3.1.4. 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.

Se realizó con el propósito de obtener un pequeño número de factores que expliquen la mayoría de la variabilidad en cada una de las variables. En este caso al efectuar el análisis se extrajeron dos factores dado que los mismos son iguales a 1,0, juntas las variables explican el 96% de la variabilidad en los datos obtenidos, asumiendo que toda la variabilidad en los datos es debida a factores comunes.

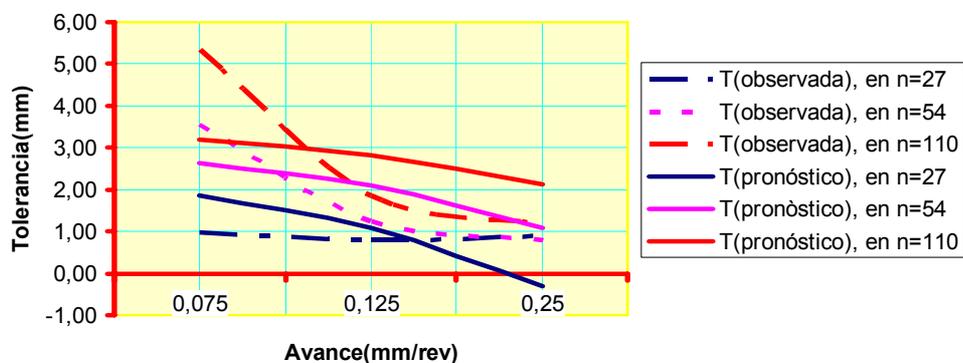
Esto confirma el criterio de que son determinantes en las variaciones de la irregularidades del acero 45, los factores n y S.

3.3.1.5. Comportamiento de la tolerancia

3.3.1.5.1. Análisis del comportamiento de la tolerancia en relación con el número de revoluciones y el avance

A partir de las bases de datos del experimento fue posible obtener el comportamiento de la tolerancia, en la grafica 3.1, se reflejan los valores estimados para las medias de las tolerancias en dependencia del avance.

$$T_D = -50.01 \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot s}} + 4.50$$



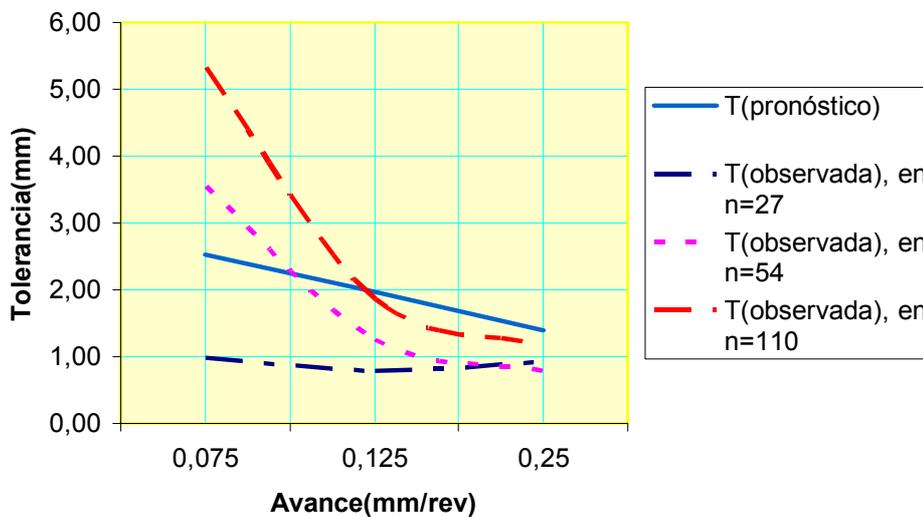
Los resultados expuestos muestran unas series de regularidades conforme aumenta el avance S :

Los resultados expuestos demuestran que a medida que aumenta el número de revoluciones, el valor de tolerancia varia ligeramente teniendo un comportamiento ascendente, mostrando un mayor incremento de la misma en el mayor número de revoluciones. Se puede plantear que la variable n, es significativa para el comportamiento

de la tolerancia en el proceso de Deformación Plástica Superficial empleando rodillo en las piezas cilíndricas construida de acero 45.

3.3.1.5.2. Análisis del comportamiento de la tolerancia en relación con el avance

Se realiza la valoración de la influencia que ejerce el avance sobre la tolerancia, se calculan varios estadísticos y gráficos para cada muestra, y se ejecuta varias pruebas para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre muestras.



El gráfico 3.2 relaciona el comportamiento de la tolerancia con respecto al avance, se obtuvo la ecuación para el modelo de avance y la tolerancia.

$$T_D = 0.693 \sqrt{\frac{1}{S}} \quad (3.2)$$

Se puede establecer que el avance (S), es un parámetro significativo en el comportamiento de la tolerancia, mediante la Deformación Plástica Superficial del acero 45 en el cual se emplea como elemento deformante un rodillo, en la gráfica 3.2 se observa el comportamiento de la tolerancia en dependencia del avance que se le aplica a cada una de las probetas, y el resultado obtenido es el siguiente; a medida que aumenta el avance disminuye el valor de la tolerancia, obteniendo el menor valor en el mayor número de avance.

En resumen:

1. La tolerancia tiende a tomar el valor de uno con cierta periodicidad; manifestandose regularmente en el valor de avance igual a 0.25 mm/min y
2. La curva pronóstico ajustada sigue el comportamiento de la curva observada.

3.3.1.6. Comportamiento de las variables del experimento

Es necesario definir si el efecto de la variable en estudio es significativo, con lo cual se procede a separar los efectos principales de los de interacción de dos o más variables, empleando los niveles de significancia de las variables, que mediante el cálculo del error permite determinar cual será la desviación permisible, siempre y cuando su valor sea el doble del error. El gráfico 3.5 muestra el comportamiento de las curvas al plotear cada una de las variables teniendo en cuenta sus niveles.

Para estudiar el efecto del rodillo, sé graficó por separado las diferentes números de revoluciones y avance a la que fueron sometidas las probetas, de acuerdo con la matriz del diseño del experimento descrito en el epígrafe 2.5.1.3, tabla 2.3.

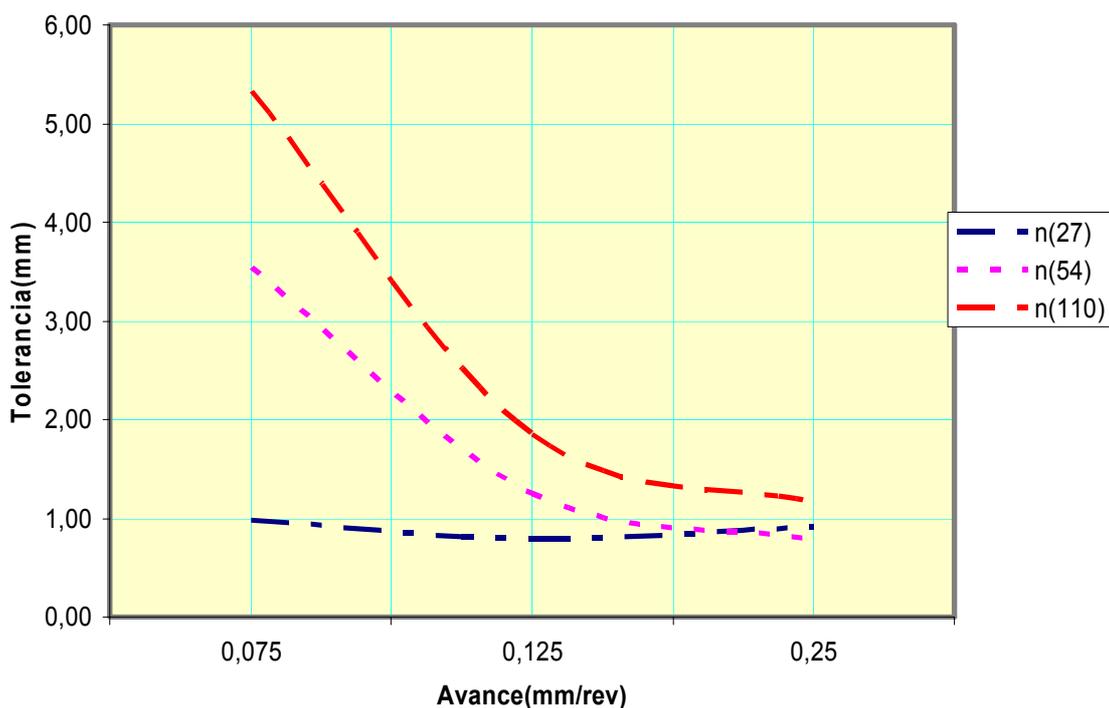


Figura 3.5. Comportamiento de la tolerancia con relación a las variables

Se observa que en el acero 45 hay tendencia a la disminución de la tolerancia en la medida que se incrementa el valor de las variables, haciéndose más acentuada para valores de avance superiores. Existe marcada diferencia entre la curva de 27 rev/min, y las curvas de 54 rev/min y 110 rev/min en el valor de avance de 0.075 mm/rev, pero estas tienden a igualarse.

Se realizó el procedimiento del resumen de análisis entre las variables para encontrar las combinaciones lineales y determinar el error del experimento. Se tomó 3 series de combinaciones lineales.

La primera serie de combinación lineal:

Para la fuerza de 500 N y 27 rev/min.

La ecuación del 1er modelo es:

$$T = 0.16 \cdot S^2 - 0.66 \cdot S + 1.48 \quad (3.3)$$

$$R^2 = 1$$

La segunda serie de combinación lineal:

Para la fuerza de 500 N y 54 rev/min.

La ecuación del 2do modelo es:

$$T = 3.46 \cdot S^{1.38} \quad (3.4)$$

$$R^2 = 0.995$$

La tercera serie de combinación lineal:

Para la fuerza de 500 N y 110 rev/min.

La ecuación del 3er modelo es:

$$T = 5.21 \cdot S^{-1.40} \quad (3.5)$$

$$R^2 = 0.995$$

3.3.1.6.1 Estimación de la rugosidad mínima y el error de forma

La tarea concerniente a la estimación de la rugosidad mínima y el error de forma total, correspondiente a cada valor de tolerancia, se lleva acabo sobre la base de la grafica 1.2 y las recomendaciones dadas en NC 16-30 (Casanova N. 1986).

Tabla 3.3 Estimación de la rugosidad mínima y el error de forma total

	Tolerancia (T)(mm)	Rugosidad mínima (mm) RZ	Error de forma total (mm)		
			A	B	C
1	0.98	0.63	0.245	0.392	0.588
2	0.79	0.51	0.1975	0.316	0.474
3	0.91	0.58	0.2275	0.364	0.546
4	3.54	0.21	0.885	1.416	2.124
5	1.25	0.80	0.3125	0.5	0.75
6	0.79	0.51	0.1925	0.316	0.474
7	5.33	3.41	1.3325	2.132	3.198
8	1.85	1.18	0.4625	0.74	1.11
9	1.16	0.74	0.29	0.464	0.696

3.4. Valoración Económica

Para realizar la valoración económica del proceso de Deformación Plástica Superficial por rodadura, como alternativa tecnológica para la dureza superficial de las piezas, teniendo en cuenta las ventajas del proceso expresada en el Capítulo I. Lo cual repercute económicamente durante el proceso de explotación de las piezas tratadas por el método, al aumentar 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 se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como "Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles" que 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 arreglos según las características particulares de cada tipo de pieza.

La metodología utilizada está destinada para el estimado del cálculo del costo de fabricación para diferentes procesos tecnológicos que se llevan a cabo en dicha industria, posee 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 3, anexo IV), y una obtenida mediante una variante tecnológica de tratamiento térmico (Tabla 4, anexo V). La valoración del estimado se hará con un fondo anual de 286 días laborables.

3.4.1. Costo de la pieza tratada 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 45,29 CUC.

3.4.1.2. Costo de la pieza tratada por tratamiento térmico y rectificado

Después de calculados los tiempos de cada operación, y teniendo en cuenta la incidencia de las diferentes máquinas y operarios, se puede apreciar la ficha del costo de fabricación de la pieza, cuyo valor estimado es de 87,99 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: \$ 12952 CUC**
- **Tratamiento térmico y rectificado: \$ 25165,14 CU**

3.4.1.3. Comparación de los costos por diferentes procedimientos

Como se puede apreciar, 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, demostrando 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 \$ 7261,54 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.

3.5. Valoración del impacto medio ambiental

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

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

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

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



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

3.6. Conclusiones del Capítulo III

- Se establecen las regularidades del comportamiento de la tolerancia del acero 45 al ser sometido a 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 45, 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 \$ 12952,94 CUC, y para el caso del tratamiento térmico la cifra de \$ 25165,14 CUC, en igual período, lo que constituye un ahorro de \$ 12212,2 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.

CONCLUSIONES

1. De la revisión bibliográfica efectuada se puede saber que con vista a elevar la eficiencia y eficacia del proceso tecnológico y caracterizar el método de tratamiento del acero 45 con rodillo, es necesario determinar las irregularidades geométricas; las cuales no habían sido determinadas aún.
2. Del análisis de varianza efectuado se puede determinar que el experimento con los niveles de revoluciones 24, 54 y 110 rev/min ; avance de 0.075, 0.125 y 0.25 mm/rev y fuerza de 500 Kgf la tolerancia de la dimensión muestra el siguiente comportamiento:
 - Al variar el número de revoluciones manteniendo constante todos los demás factores, no varía la tolerancia.
 - Al variar el avance manteniendo constante todos los demás factores si varía la tolerancia.
 - Al variar el número de revoluciones y el avance simultáneamente, varía la tolerancia.
 - Al replicar el experimento se muestra un comportamiento similar; es decir no hay diferencia significativa.

Todo lo anterior se asegura bajo un nivel de significancia del 0.05.

3. Del análisis de regresión efectuado se puede determinar una fórmula que permite determinar la tolerancia de las probetas a partir del número de revoluciones y el avance a un nivel de significancia de 0.05, bajo condiciones similares a la de experimentación; confirmándose la hipótesis formulada.
4. El valor de la tolerancia máxima se observó al nivel superior del número de revolución y al mínimo avance.
5. El costo del experimento desarrollado con vista a la caracterización del método de tratamiento del acero 45 se estimó en un valor de 12952 CUC.

Recomendaciones

1. Verificar por medio de procedimientos analíticos la estimación realizada con respecto al diámetro de las probetas utilizadas durante la experimentación.
2. Determinar los valores de la rugosidad y el error de forma correspondiente a cada valor de tolerancia determinado con vista a la caracterización completa de las irregularidades geométricas del acero 45 deformado con rodillo.
3. Desarrollar el experimento para los mismos niveles de revoluciones y avance e incluir los niveles 1500 y 2500 Kgf para la fuerza aplicada, con vista a cumplir con las sugerencias realizadas por otros autores.
4. Realizar una simulación en el cosmo con vista a comprobar la validez de la fórmula 2.6, expuesta en el cuerpo del informe con el objetivo de utilizarla para aumentar el alcance de los resultados experimentales.
5. Efectuar una simulación en el Math Lab con el propósito de determinar con mayor precisión los coeficientes del modelo de regresión obtenido.
6. Realizar un análisis de optimización entre los parámetros de salida (respuesta) con vista a establecer los límites “óptimos” para los mismos.
7. Utilizar el método de tratamiento del acero 45 mediante rodillo como alternativa tecnológica del método de tratamiento termoquímico una vez que haya sido optimizado ya que se prevé que este es más simple, racional y progresivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición– microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas. 2002.
2. Alvarez, E; A, G. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. 1999.
3. American Heller Corporation. “Skiving & Burnishing”, USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2005, [http:// www.americanheller.com](http://www.americanheller.com).
4. Barret, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1989. 838p
5. Bengton, U. Design requirements materials properties a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
6. Bower, A F; Johnson, K L. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 37, no. 4, pp. 471-493. 1989.
7. Boada, O., Díaz, S., Campos, Y. “Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial”, Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo-Agosto 2003, Pág. 53-58, Cuba. ISSN1029-516X.
8. Bright Burnishing Tools. “What is roller burnishing?”, India, Obtenido de la Red mundial el 3 de Mayo del 2005, <http://www.brightburnishingtools.com>.
9. Casanova. H Metrología Intercambiabilidad. Departamento de Metrología y Maquinado, facultad de construcción de maquinaria ISPJAM. Impreso por la empresa de producción y servicio del ministerio de educación superior. 1986.
10. Caraballo, M. A. Endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield. Tesis en opción al título de Doctor. ISMMMoA. Metalurgia y Electromecánica. 2006.
11. Coromant Korokey. Guía de aplicación de herramientas. Pag 38-43. 1996
12. Díaz, S, “Caracterización del bruñido por rodillo simple en la elaboración del acabado superficial de piezas”. Revista Centro Azúcar, Universidad Central de Las Villas, No. 4, Octubre-Diciembre 2003. ISSN 0253-5757.
13. Díaz, S., Robert, T. “Efecto del bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045”, Revista Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, Sociedad Mexicana de

- Ingeniería Mecánica A.C, Volumen 2, Número 7, Año 4, Septiembre 2005, México. ISSN 1665-7381.
- 14 El-Axir, M.H. "An investigation into roller burnishing", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 11, September 2000, Pages 1603-1617, UK.El-Axir, M.H.
 - 15 El-Axir, M.H. Ibrahim, A.A. "Some surface characteristics due to center rest ball burnishing", Journal of Materials Processing Technology, Volume 167, Issue 1, August 2005, Pages 47-53, The Netherlands.
 - 16 El-Khabeery, M.M. "Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials", Journal of Materials Processing Technology, Volume 132, Issue 1-3, January 2003, Pages 82-89, The Netherlands..
 - 17 Elliot Tool Co. "Carbide roll burnishing tools", USA, Obtenido de la Red mundial el 25 de abril del 2004,<http://www.elliotttool.com>.
 - 18 Feschenkov, V, Majmutov, R. El torneado. Editorial Mir. Moscú. Pág 152-163. 1989.
 19. Fattouh, M. El-Axir, M. H., Serage, S. M. "Investigations into the burnishing of external cylindrical surface of 70/30 Cu-Zn alloy", Wear, Volume 127, Issue 2, 15 October
 - 20 Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 53-89
 - 21 Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 17-22
 - 22 R. De la Vara, "Análisis y Diseño de Experimentos", Mc Garw Hill, 1ª ed, 237-264. Cd. México. México (2003).
 - 23 Rodríguez, H. Manual de trabajo, Práctica de Dibujo Aplicado, Editorial Pueblo y Educación. 1986.
 - 24 Hasegawa, S. "The road to smoother surfaces", Manufacturing Engineering, Volume 126, No. 2, February 2001, Pages 70, 72, 74, 76, 78, USA
 - 25 Hernández, H.G. Estudio del comportamiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica por rodadura. Informe Técnico. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2005
 - 26 Hernández, S. "Metodología de la Investigación." Editorial McGraw-Hil. México. 1997
 - 27 Hu-Nai-Sai y Zhou Hui-Jiu The Effect of Surface Plastic Deformation on Fatigue Strength and its Mechanism. University Xian, China.2002.

28. Key to Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>.
29. Klocke, F., Liermann, J. "Roller Burnishing of Hard Turned Surface", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 38, Issues 5-6, 6 May 1998, Pages 419-423, UK.
30. Lee, S.S.G., Tam, S.C. Loh, N.H. "An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 free-form surface", Journal of Materials Processing Technology, Volume 29, No. 1-3, January 1992, Pages 203-211. The Netherlands.
31. Loh, N.H., Tam, S.C., Miyazawa, S. "A study of effects of ball-burnishing parameters on surface roughness using factorial design", Journal of Mechanical Working Technology, Volume 18, No. 1, January 1989, Pages 53-61, The Netherlands.
32. Makienco N.H, Manual del Ajustador Mecánico. Editorial Pueblo y Educación 1982.
33. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.
34. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996
35. Mech-India. "Process of burnishing", India, Obtenido de la Red mundial el 25 de Marzo del 2005, <http://www.mech.india.com>.
36. Monaghan & Associates Inc. "Roller burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 22 de abril del 2005, <http://www.monaghaninc.com>.
37. Moreno, P. A. "Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas "Dpto. Mecánica de medios continuos. Universidad de Sevilla. Obtenido de la Red mundial el Lunes 28 de Febrero de 2005.
38. Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. Probabilidad y Estadística Para Ingeniero. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005.
39. Martínez, V., Fundamentos de Normalización y Metrología, Facultad de Ingeniería Industrial /ISPJAE, Departamento de estadística y Control de la calida. Ediciones. La Habana, 1984.
40. Ogburn, F. "Roll to the finish", Cutting Tool Engineering, Volume 53, No. 6, June 2001, Pages 54-57, USA.
41. Odintsov, L.G. Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación

- plástica superficial", Editorial CM, 1987. Pág 385-422, URSS.
42. Pacana, A.y Korzynski, M. "Roller burnishing parameters analyses with Taguchi method", Scientific Bulletins of Rzesow University of Technology, No. 193, Mechanics 58, 2002, Poland.
43. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los material. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. Pág 393-502. España.
44. Sardiñas H. Metrologia dimencional Editorial ISPJAE.1986
45. Sugino Corporation, "Superoll-Roller burnishing tool", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2004, <http://www.suginocorp.com>
46. Sugino Corporation, "Superoll-Roller burnishing tool", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2005, <http://www.suginocorp.com>
47. Surfine Tools, "Products". India, Obtenido de la Red mundial el 6 de abril del 2005, <http://www.surfinetools.com>.
48. Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003.Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
49. Westerman, W.J. "Industry rediscovers roller burnishing", Machine Design, Volume 55, No. 19, August 25 1983, Pages 44-48, USA.

Anexo I

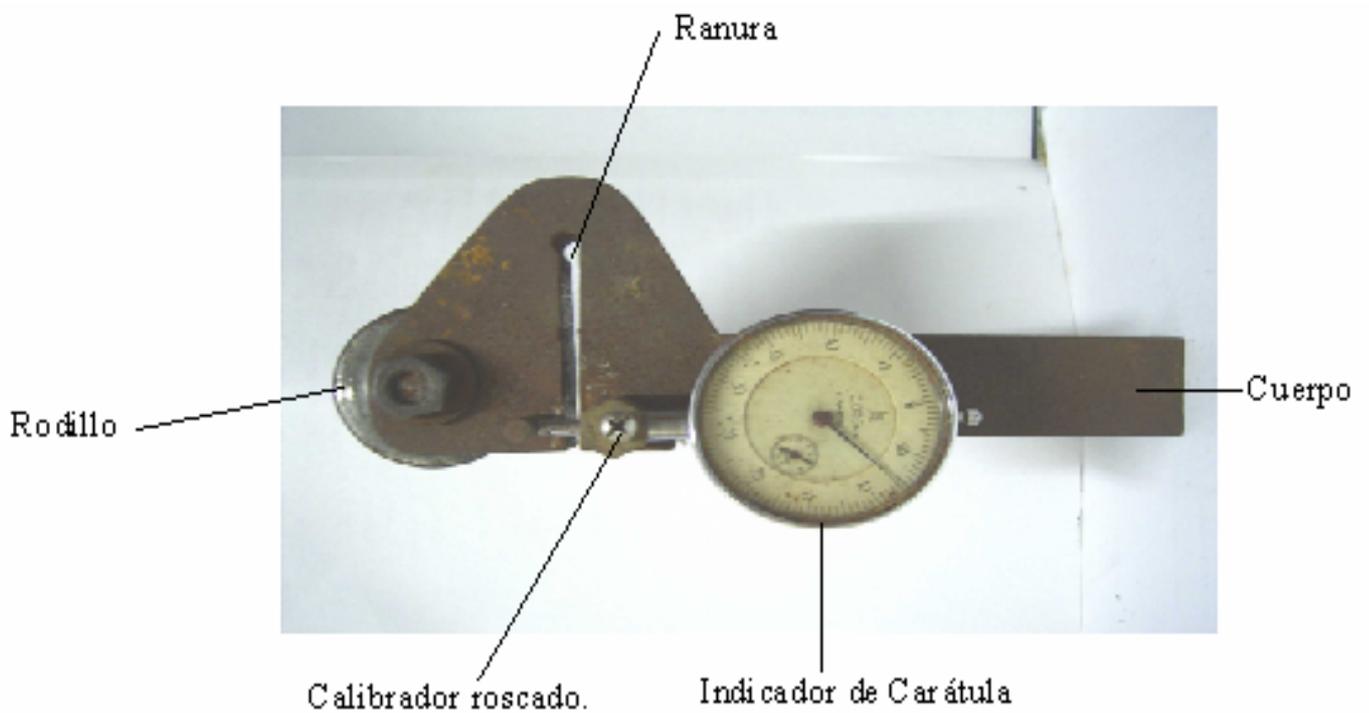


Figura 1. Herramienta empleada en la Deformación Plástica Superficial por rodillo.



Anexo II

Tabla. 1. Intervalo de confianza para todas las variables.

95,0% intervalos de confianza para las estimaciones de los coeficientes				
Error				
Parámetro	Estimación	Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
CONSTANTE	4.50	1.14	1.81	7.19
$(1/n*S)^{0.5}$	-50.01	19.99	-97.29	-2.73

Anexo III

Tabla. 2. Análisis de regresión múltiple para las variables.

Análisis de Regresión Múltiple				
Variable dependiente: T				
Error Estadístico				
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	4.50	1.14	3.96	0.01
$(1/n*S)^{0.5}$	50.01	19.99	-2.50	0.04



Anexo IV

Tabla. 3. Costo de fabricación de la Deformación Plástica Superficial.

Costo de fabricación de la pieza.			
Tipo de material	Costo de material(\$)	Peso del semiproducto(kg)	Precio(\$)
Acero AISI 1045	1,25	0,5	16,87
Operario	Tarifa(\$)	Tiempo efectivo(h/\$)	Costo(\$)
Tornero A	1,78	6,00	10,68
Rectificador A	1,78	1,00	1,78
Cortador	1,54	0,58	0,89
Salario Básico (Sb) = Suma de los costos = \$ 13,35			
Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 1,33			
Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09 = \$ 13,21			
Gasto de Energía			
Máquinas	Tiempo trab(h)	Potenc máquina/kW	Energ consum(kW/h)
Torno	6,00	1,5	9
Sierra Sinfín	0,58	1,5	0,87
Rectificadora	1,30	0,5	0,65
Costo Energía			
Torno	$C_{\text{torno}} = 0,06 \cdot E_c = 0,54$	Costo Energía Eléctrica.	
Sierra Sinfín	$C_{\text{SS}} = 0,06 \cdot E_c = 0,05$	$C_e = C_t + C_{\text{SS}} + C_p = \$ 0.539$	
Rectificadora	$C_R = 0,06 \cdot E_c = 0,039$	Costo Total	
CT= Pp+Sb+Sc+Ss+Ce = \$ 45,29			



Anexo V

Tabla. 4. Costo de fabricación de la pieza por tratamiento térmico

Costo de fabricación de la pieza.			
Tipo de material	Costo de material(\$)	Peso del semiproducto(kg)	Precio(\$)
Ac AISI 1045	1,25	0,5	16,87
Operario	Tarifa(\$)	Tiempo efectivo(h/\$)	Costo(\$)
Tornero A	1,78	5,0	8,9
Rectificador A	1,78	2,0	3,56
Cortador	1,54	0,58	0,89
Termista A	1,78	9,30	16,55
Salario Básico(Sb)= Suma de los costos			= \$ 29,9
Salario complementario Sc = (Sb*0,1)			= \$ 2,99
Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09			= \$ 29,6
Gasto de Energía			
Máquinas	Tiempo trab(h)	Potenc máquina(kW)	Energ consum(kW/h)
Torno	5,0	1,5	7,5
Sierra Sinfín	0,58	1,5	0,87
Rectificadora	2,0	0,5	1,0
Horno (Temple)	6,30	15	94,5
Revenido	3	15	45
Costo Energía			
Torno	$C_{\text{torno}} = 0,06.Ec = 0,45$	Costo Energía Eléctrica.	
Sierra Sinfín	$C_{\text{SS}} = 0,06.Ec = 0,05$	$C_e = C_t + C_{\text{SS}} + C_p + C_T + C_{\text{rev}} = \$ 8,53$	
Rectificadora	$C_R = 0,06.Ec = 0,06$		
Temple C_T	$C_H = 0,06.Ec = 5,67$	Costo Total	
Revenido C_{Rev}	$C_{\text{Rev}} = 0,06.Ec = 2,7$		
		$CT = Pp + Sb + Sc + Ss + Ce = \$ 87,89$	