



**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

Tesis en opción al Título de Master en
Electromecánica

**Tolerancia dimensional en pasadores elaborados de
acero AISI 1045 deformados por rodadura**

Autor: Ing. Benigno Leyva De la cruz

Tutor(es): Dr. C. Tomás Heraldo Fernández Columbié
Dr. C. Isnel Rodríguez González

“Año 54 de la Revolución”

Moa/ 2012

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Benigno Leyva De la cruz

Autor de este trabajo, 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.

.....

Ing. Benigno Leyva De la cruz

.....

Dr. C. Tomás Heraldo Fernández Columbié

.....

Dr. C. Isnel Rodríguez González



PENSAMIENTOS

- La idea es el recurso más importante para salvar a la humanidad.

Fidel Castro Ruz

- Revolución es sentido del momento histórico, es cambiar todo lo que debe ser cambiado, es igualdad y libertad plena, es ser tratado y tratar a los demás como seres humanos, es emanciparnos por nosotros mismos y por nuestros propios esfuerzos, es desafiar poderosas fuerzas dominantes fuera y dentro del ámbito social y nacional, es defender valores en lo que se cree al precio de cualquier sacrificio, es modestia, desinterés, altruismo, solidaridad y heroísmo, es luchar con audacia, inteligencia y realismo, es no mentir jamás ni violar principios éticos, es convicción profunda de que no existe fuerza en el mundo capaz de aplastar la fuerza de la verdad y las ideas. Revolución es unidad, es independencia, es luchar por nuestros sueños de justicia para Cuba y para el mundo que es la base de nuestro patriotismo, nuestro socialismo y nuestro internacionalismo.

Fidel Castro Ruz

- El respeto al derecho ajeno es la paz.

Benito Juárez

- La batalla por la eficiencia es con eficiencia.

Fidel Castro Ruz



AGRADECIMIENTOS

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desarrollo de la maestría.

A mis tutores por confiar en mí para la realización de este trabajo; a el Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié y el Dr. C. Isnel Rodríguez González.

Al Coordinador de la maestría Dr. C. Enrique Torres Tamayo, al Dr. C. Alberto Velásquez del Rosario y al Dr. C. Félix Morales por su tolerancia y comprensión para la realización de este trabajo.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesite.

A mis amigos que siempre creyeron en mí, en especial a Yodelkis Delgado Dubrey, Héctor Luis Laurencio Alfonso Y Yoalvis Retirado Mediaceja por su ayuda en los momentos que lo necesite.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la revolución, por darme la oportunidad de mejorar la condición de profesional de la ciencia técnica.

A todos

Muchas Gracias.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

A mis padres: Benigno Leyva Duran y Ana Lidia De la cruz Caballero.

A mis hermanas: Adelsaimi Leyva De la Cruz y Adilka Leyva De la cruz.

A mi compañera: Yuliet Azaharez Rios, por tolerar mi dedicación a este trabajo.

A mis amigos.

A nuestra revolución, por las posibilidades que me ofrece.

Resumen

En este trabajo se realiza una investigación sobre la influencia que genera la deformación plástica superficial en la tolerancia dimensional de los pasadores que se utilizan en la cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8 de la grúa de jaiba, que se emplea en la planta de secadero de la empresa “Ernesto Che Guevara”. A través de un plan experimental se consideraron las características de los materiales a utilizar en la experimentación y las variables más significativas en este proceso como son avance de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev y número de revoluciones del husillo de 27, 54 y 110 rev/min, para una fuerza constante de 500 N, lo cual permitió caracterizar el acabado superficial de los pasadores después de terminado el proceso. Mediante la aplicación de los métodos utilizado fue posible plantear que el diámetro de las probetas construidas a semejanza de los pasadores de $40 \phi h6$, es de 40 mm con una tolerancia de 0,038 mm para un nivel de confianza del 90 % antes de la deformación plástica, y la tolerancia que es posible obtener por medio del método de deformación plástica superficial según la condiciones descrita es de 0,016 mm para un nivel de confianza del 95 %; lo que indica que es posibles emplear el procedimiento de deformación plástica superficial para mejorar el acabado superficial de los pasadores además de incrementar su dureza en el rango de 202,21...300,03 HV, con una profundidad de endurecimiento de 0,484...0,607 mm. Se realiza una valoración del aporte técnico económico y del efecto social y ambiental.

Summary

In this work is carried out an investigation on the influence that generates the superficial plastic deformation in the dimensional tolerance of the pins that are used in the tablespoon mechanical type CMA - 8.00/1.8 of the jaiba crane that it is used in the plant of dry of the company "Ernesto Che Guevara". Through an experimental plan they were considered the characteristics of the materials to use in the experimentation and the most significant variables in this process like they are advance of 0,075, 0,125 and 0,25 mm/rev and number of revolutions of the screw of 27, 54 and 110 rev/min, for a constant load of 500 N, that which allowed to characterize the superficial finish of the pins after having finished the process. By means of the application of the used methods it was possible to outline that the diameter of the built test tubes to likeness of the pins of 40 h6, is of 40 mm with a tolerance 0,038 mm for a level of trust of 90% before the plastic deformation, and the tolerance that is possible to obtain by means of the method of superficial plastic deformation according to the described conditions it is of 0,016 mm for a level of trust of 95%; those that it indicates that it is possible to use the procedure of superficial plastic deformation to improve the superficial finish of the pins besides increasing its hardness in the range of 205,30...323,00 HV, with a depth of hardening 0,484...0,607 mm. Is carried out a valuation of the economic technical contribution and of the social and environmental effect.



TABLA DE CONTENIDO	Pág.
Introducción	1
1. MARCO TEÓRICO, ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	7
1.2. Características de la cuchara mecánica de la grúa 215–GRL-101	7
1.3. Caracterización del acero AISI 1045	8
1.3.1. Composición química del acero AISI 1045	9
1.4. Generalidades sobre las grúas	10
1.5. Trabajos precedentes	11
1.6. Mecanizado de piezas	18
1.6.1. Precisión en la elaboración de piezas	19
1.6.2. Tolerancia dimensionales	20
1.6.3. Determinación de la tolerancia a partir de mediciones simples	21
1.6.4. Relación entre la tolerancia dimensional y el error de forma y posición	22
1.6.5. Relación entre la tolerancia dimensional y la rugosidad superficial	23
1.6.6. Características del sistema internacional de ajustes y tolerancias	24
1.7. Características de la calidad superficial	25
1.8. Métodos estadísticos	26
1.8.1. Fundamentos de métodos estadísticos	28
1.9. Conclusiones del capítulo 1	33
2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	34
2.2. Características del elemento deformante(Rodillo)	35
2.3. Características del torno 16 D 20	36
2.4. Características del pie de rey y el micrómetro	37
2.5. Características del material a deformar plásticamente por rodadura	39
2.6. Límites de tolerancia para el control de las mediciones	41
2.7. Diseño del experimento.	42
2.7.1. Fuerza ejercida por la herramienta deformante (P)	43
2.7.2. Número de revoluciones del husillo (n)	43
2.7.3. Avance de la herramienta (S)	44



2.7.4. Tolerancia dimensional	44
2.7.5. Planificación del experimento	45
2.8. Análisis de varianza	47
2.9. Regresión	50
2.10. Procedimiento para la determinación del acabado superficial	51
2.10.1. Aseguramiento de la condición de normalidad	52
2.10.2. Prueba de hipótesis	53
2.10.3. Determinación de la rugosidad de las probetas	54
2.10.4. Determinación del error de forma de las probetas	54
2.10.5. Determinación del acabado superficial de los pasadores	55
2.11. Conclusiones del capítulo 2	56
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1. Introducción	57
3.2. Análisis del diagrama para control de mediciones	57
3.3. Análisis de la varianza	59
3.4. Análisis de la regresión	60
3.4.1. Análisis de regresión de la tolerancia en función del avance	62
3.5. Análisis del comportamiento de la tolerancia en relación a la dureza y la profundidad del endurecimiento	64
3.6. Análisis del acabado superficial	68
3.6. 1. Análisis de la condición de normalidad	68
3.6.2. Análisis de la prueba t	69
3.6.3. Análisis de la rugosidad de las probetas	69
3.6.4. Análisis del error de forma de las probetas	69
3.6.5. Análisis del acabado superficial de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8	70
3.7. Aporte en la dimensión técnico económico	71
3.7.1. Costo de la pieza tratada por deformación plástica superficial	74
3.7.2. Costo de la pieza tratada por tratamiento térmico y rectificado	74
3.7.3. Comparación de los costos por diferentes procedimientos	76
3.8. Efectos social y ambiental	76



3.9. Conclusiones del capítulo 3	78
CONCLUSIONES GENERALES	79
RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS	91



INTRODUCCIÓN

Mejorar la eficiencia de los equipos e instalaciones que componen las fábricas productoras de níquel es una prioridad de los dirigentes de dichas entidades y del estado cubano, debido entre otros factores a que en los últimos años la industria del níquel ha tenido un rol importante en la economía del país constituyendo uno de los renglones que más divisas aporta a la economía cubana.

Aunque existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención del concentrado de níquel más cobalto, con tecnología carbonato amoniacal, a este trabajo le ofrece particular interés la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la cual se ha desarrollado fundamentalmente a partir de las décadas anteriores, lo que ha hecho posible elevar los ingresos al país por concepto de exportación del producto que en ella se obtiene.

La fábrica “Comandante Ernesto Che Guevara” se encuentra ubicada al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, provincia de Holguín entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la Ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda. En esta región se ubica una de las mayores reservas minerales de Níquel del mundo, aspecto que ha funcionado como inductor de un gran desarrollo socioeconómico local y regional.

El esquema tecnológico de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara está basado en el proceso de lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido, donde se evidencian las siguientes plantas de proceso: Mina, *Preparación de Mineral*, Hornos de reducción, Lixiviación y Lavado, Recuperación de Amoniacal, Calcinación y Sínter, y auxiliares: Central Termoeléctrica, Potabilizadora de agua y planta de Cobalto, entre otras. En la planta de preparación de mineral es donde se inicia el proceso de preparación del material de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniacal.

En la planta de preparación de mineral existe un depósito de reserva donde se almacena material, dicho depósito interior se usará cuando, por cualquier tipo de avería surgida en el proceso antes de los secaderos, se interrumpa el suministro de la materia prima a ésta sección. La capacidad de este almacén posibilita a la planta trabajar durante cuatro días. Este depósito posee para la manipulación del material, dos grúas de puente 215 – GRL – 101 A y B con una capacidad de 350 t/h cada una.



Las grúas 215 – GRL – 101 A y B poseen una cuchara mecánica del tipo CMA – 8.00/1.8 cada una, la cual posibilita el agarre del mineral que se encuentra en el depósito de reserva y el traslado de este, para ser llevado posteriormente a los secaderos 215 – SC – 101 – 107, donde posteriormente es transportado a través de alimentadores de esteras 215 – AL – 101 – 107 de capacidad variable y los transportadores de bandas 215 – TR – 9 – 1... 9-7 de capacidades 125 t/h cada uno.

Mantener la disponibilidad de los accesorios y partes de estos conjuntos reviste importancia tecnológica para asegurar el funcionamiento eficiente de la planta y la empresa en general. Por lo que la empresa posee un sistema de mantenimiento actualizado y dinámico.

Las cucharas mecánicas tipo CMA – 8.00/1.8 tienen como particular importancia 25 pasadores cilíndricos, elaborados de acero AISI 1045. Estos pueden tener una mejora en sus propiedades mediante la aplicación de tecnología de tratamiento térmico, termoquímico o mecánico, puesto que se han realizado trabajos que lo indican (Guliaev, 1983, y Fernández, 2011).

En Cuba constituye una prioridad el desarrollo de tecnologías que permita más ahorro de recursos, menos gastos de energía y menos contaminación ambiental. La problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas está relacionada con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante su período de explotación (Álvarez, 1999), 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 el método las 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 estos las propiedades mecánicas del material y el acabado superficial que puedan tener dichos elementos (Leyva, 2011).

En la bibliografía consultada, se observa una gran variedad de enfoques con relación al método de endurecimiento del acero AISI 1045 y las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional; sin embargo no queda establecida explícitamente las regularidades que se manifiestan entre la tolerancia dimensional y parámetro del proceso tecnológico como el número de



revoluciones y el avance al que se sometería el elemento mecánico para su tratamiento. Además no se reportan trabajos destinados al mejoramiento de la durabilidad de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8 – de la grúa de jaiba 215 – GRL – 101.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, se plantea que:

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

Las grúas viajeras que se emplean en el movimiento de mineral de la industria cubana del níquel, como por ejemplo las del depósito de reserva de la planta de preparación de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, realizan el acopio del mineral a través de una cuchara mecánica, la cual en su sistema de accionamiento está compuesta por pasadores cilíndricos fabricados de acero AISI 1045, los mismos están expuestos a severas condiciones de trabajo como: la fricción, la corrosión, la fatiga y la capacidad de carga, además el par tribológico presente es del tipo directo, a todo lo anterior planteado se agrega que el material de los pasadores no es tratado en su estructura para mejorar sus propiedades mecánicas; todo lo anterior provoca la deformación de su capa superficial variando las irregularidades geométricas.

El **problema** a investigar lo constituye:

Aún son insuficientes los estudios relacionados sobre las regularidades que se establecen entre la tolerancia dimensional y los parámetros como el número de revoluciones y el avance del proceso tecnológico, para el tratamiento de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8, los cuales permitan el establecimiento de los modelos matemáticos, así como la elaboración de tecnologías para el tratamiento de los mismos.

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

La macro y microgeometría de los pasadores empleados en la cuchara de la grúa 215 – GRL – 101.

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

Determinación de la tolerancia dimensional en piezas cilíndricas fabricada de acero AISI 1045, indicativo de la variación del diámetro cuando es sometido a un proceso de mecanizado.



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

La determinación de las regularidades que se establecen en los pasadores de acero AISI 1045 de la cuchara de la grúa 215 – GRL – 101 como son: el diámetro inicial, el diámetro final, los regímenes de elaboración superficial, permitirán establecer la tolerancia dimensional de los mismos y por lo tanto controlar su macro y microgeometría final.

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

Determinar los parámetros que rigen la macro y microgeometría de los pasadores de la grúa 215 – GRL – 101, fabricados de acero AISI 1045 a partir de su diámetro inicial y final y que permiten establecer su tolerancia dimensional.

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

1. Definir los parámetros que se establecen para determinar la tolerancia dimensional en piezas fabricadas de acero AISI 1045 a partir del diámetro inicial y final según sus regímenes de elaboración.
2. Establecer el procedimiento metodológico para determinar la tolerancia dimensional de los pasadores de la grúa, fabricados de acero AISI 1045.
3. Establecer a partir de las regularidades obtenidas como: el diámetro inicial, el diámetro final y los regímenes de elaboración, la tolerancia dimensional de los pasadores de la cuchara de la grúa 215 – GRL – 101, fabricados del acero AISI 1045.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el ajuste y la tolerancia.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Obtención de las regularidades del estado macro y microgeométrico del acero AISI 1045 empleados en los pasadores de la grúa.
4. Planteamiento de los efectos técnicos, económicos, sociales y ambientales del proceso de mecanizado de piezas por deformación plástica superficial.

**Aporte científico tecnológico del trabajo:**

Se obtienen las ecuaciones que describen el comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas simétricas rotativas fabricadas de acero AISI 1045, sometidas a la deformación plástica superficial cuando se aplica esfuerzo de compresión.

Aportes metodológicos del trabajo:

- ✓ Las conclusiones teóricas acerca de las regularidades del comportamiento macro y microgeométrico del acero AISI 1045 empleados en pasadores y fabricados de acero AISI 1045, así como la variación de su diámetro a partir de diferentes variables empleadas en los regímenes de elaboración por deformación plástica para ser empleados en la Minería.
- ✓ La caracterización de los parámetros del proceso de mecanizado para determinar las variaciones superficiales de piezas cilíndricas, en base al proceso de elaboración mecánica para responder a las exigencias de explotación de las piezas, como referencia metodológica para futuros trabajos investigativos.

En el desarrollo de la investigación se utilizaron métodos, los cuales se dividen en dos grandes grupos: teóricos y empíricos.

Los métodos teóricos permitieron estudiar las tendencias actuales relacionadas con el sistema de ajuste y tolerancia, facilitaron la construcción de los modelos e hipótesis de la investigación, crearon las condiciones para, además de tener en cuenta las características fenomenológicas y superficiales, contribuir al desarrollo de las teorías científicas.

Dentro de los métodos teóricos los más empleados fueron:

- **Análisis y síntesis:** división y unión abstracta de las variables empleadas en el trabajo, el comportamiento de la macro y microgeometría del acero AISI 1045 empleados en los pasadores de equipos de la minería en sus relaciones y componentes para facilitar su estudio.
- **Inducción y deducción:** la inducción permitió arribar a proposiciones generales a partir de hechos aislados y la deducción posibilitó, a partir del estudio de conocimientos generales de los métodos de cálculo de Mediciones Técnicas, inferir particularidades para un razonamiento lógico.



- **Los métodos históricos:** posibilitaron el estudio detallado de los antecedentes, causas y condiciones históricas en que surgió el problema.
- **Los métodos lógicos:** se basaron en el estudio histórico del fenómeno de la tolerancia dimensional, en objetos de la ingeniería mecánica y metalúrgica.
- **La modelación:** se crearon abstracciones para representar la realidad compleja del fenómeno de la tolerancia dimensional.

Los métodos empíricos: explican las características observables y presuponen determinadas operaciones prácticas, tanto con los objetivos, como con los medios materiales del conocimiento utilizado. Estos métodos se expresan a través de las técnicas de la observación, documentación, la comunicación personal e impersonal y la experimentación.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

En las industrias cubanas los equipos y maquinarias empleado, utilizan el acero AISI 1045 para la construcción de los agregados y accesorios de las mismas, tal es el caso de la construcción de los pasadores de la cuchara de la grúa 215 – GRL – 101. Teniendo en cuenta las propiedades que este posee de incrementar su dureza al ser sometido a tratamiento térmico o termoquímico 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 entre los materiales más capaces de combinar elevada tenacidad y ductilidad.

El acero AISI 1045 puede lograr unificar las propiedades de resistencia al desgaste, es un material con facilidad de conformar, su costo de producción es relativamente bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga (Diaz, 2005), este endurece por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado los pasadores fabricados de este material, no se aprovecha eficientemente sus propiedades para garantizar la durabilidad requerida. En consecuencia constituye el material adecuado para garantizar la asignación de servicio de los pasadores.

En el presente capítulo se establece como objetivo: **analizar las bibliografías existentes, que permitan la definición del estado del arte relacionado con el comportamiento de la tolerancia dimensional de piezas sometidas a esfuerzos generados por cargas de contacto.**

1.2. Característica de la cuchara mecánica de la grúa 215 – GRL – 101

Para la transportación del material de los depósitos de reserva del patio interior de la planta de preparación de mineral de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, existen dos grúas de puente; la número 215 – GRL – 101 A y B de capacidad igual a 350 t/h cada una. A estas grúas se le acopla un dispositivo llamado cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8 (Figura 1.1); que posibilita el agarre del mineral que se encuentra en el depósito de reserva y el traslado de este, para ser llevado posteriormente a los secaderos 215 – SC – 101 – 107, a través de alimentadores de esteras 215 – AL – 101 – 107, de capacidad variable y los transportadores de bandas 215 – TR – 9 – 1... 9-7 de capacidades igual a 125 t/h cada uno.

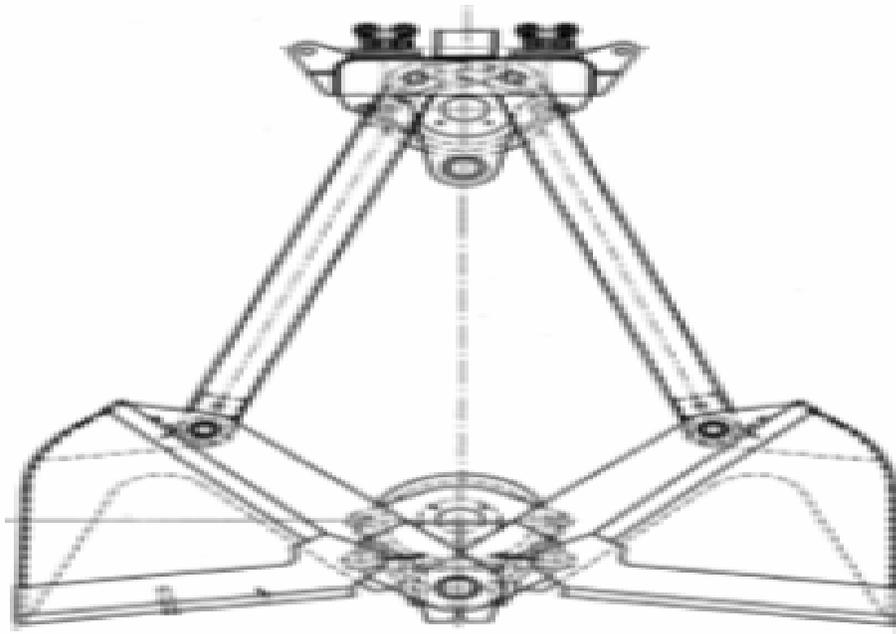


Figura 1.1. Cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8

La cuchara posee como características fundamentales que tiene una capacidad de 8 m^3 , está constituida por 25 pasadores, una carga útil de 14,400 kg, un peso muerto de 7,530 kg, la capacidad de elevación es de 21,930 kg; para la densidad del material a manipular de $1,8 \text{ t/m}^3$, la denominación del cable de cierre según la DIN es 3 964 – SE – bK 1 570 con una carrera del mismo de 8, 920 mm, la polea motriz es de 630 mm de diámetro y la del deslizamiento del cable es de 32 mm.

La cuchara mecánica está provista de pasadores cilíndricos (Anexo 1) elaborados de acero AISI 1045, los mismos son retirados de servicio prematuramente, las causas que invalidan los mismos son:

1. Las tensiones de contacto y la fricción metal – metal.
2. La incorrecta fabricación de los mismos, según las propiedades requeridas.

1.3. Caracterización del acero AISI 1045

La característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. La aleación AISI 1045 contiene entre el 0,42 % y 0,46 % de carbono, lo que posibilita que al someterlo a proceso de compresión, conduce a un nuevo estado estructural y brinda nuevas propiedades (Guliaev, 1983; y DeLitizia, 1984), posee alta resistencia, plasticidad y viscosidad, en combinación con excelentes propiedades de ingeniería, presenta una fácil maquinabilidad, se elabora fácilmente por presión

(laminado, forjado, estampado) o por corte y baja tendencia a las deformaciones y a la formación de grietas durante el temple, alcanzando magnitudes de dureza de 56 a 58 HRC (Lajtin, 1973 y Prevey, 2001), es un material adecuado para ejes, árboles, pasadores, tornillos (Bengton, 1991 y Várela, 2003).

Los autores Caubet (1971); Guliaev (1983); Ermini (2000) y Wang (2002), afirman que esta aleación, en las condiciones de rozamiento, acompañado de grandes presiones, tiene una adecuada resistencia al desgaste abrasivo, permite deformación en frío y posee alta tenacidad y plasticidad, durante el proceso de deformación plástica va acompañada del endurecimiento del material, trayendo consigo un incremento en la fatiga residual compresiva interna y un considerable aumento en la dureza de la superficie.

1.3.1. Composición química del acero AISI 1045

La composición química promedio de la aleación AISI 1045 editada por Key to steel (2002), así como la designación establecida por la AISI – SAE; UNS; ASTM y la SAE, se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Composición química estándar del acero AISI 1045

C	Mn	P	S	Si
0,45 %	0,65 %	≤ 0,040 %	≤ 0,050 %	0,35 %

Fuente: Key to steel (2002)

Dentro de los elementos que constituyen el acero se encuentra el carbono, según Skalki y Ronda (1988), ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad. Por otra parte, el manganeso le aporta elevada resistencia en el proceso de fricción, incremento de la resistencia mecánica, resistencia a la tracción y resistencia a la elongación relativa y a la capacidad de endurecimiento en frío según criterios de Caraballo (2004).

Según Iuffe (1994) el molibdeno, disuelto en la ferrita intensifica la dureza y la tenacidad. Exceptuando al carbono, tiene el mayor efecto endurecedor y un alto grado de tenacidad, así como influye en el tamaño del grano durante la deformación en frío.

Belozarov *et al.* (2006), han demostrado la influencia de las propiedades del material en el proceso de deformación, la dureza, el endurecimiento por deformación, la ductilidad y la inestabilidad metalúrgica, al considerar que la resistencia a la deformación plástica determina el nivel de tensión del material deformado plásticamente.

1.4. Generalidades sobre las grúas

Las grúas automáticas son comparativamente raras en la práctica industrial (Sawodny *et al.*, 2003), debido a la relación entre los costos de la inversión y la economía para reducir costos.

Las grúas tienen un mecanismo para subir (comúnmente tienen el cable de subida en línea y enganchado) y soportan mecanismos (tren vía). El cable que sostiene la carga está suspendido de un punto al mecanismo que lo soporta. El movimiento del mecanismo sostiene un punto alrededor del espacio de trabajo de la grúa, mientras el mecanismo de la grúa alza y baja la carga para evitar obstáculos en su trayectoria y deposita la carga en un punto. Las grúas se pueden clasificar por los grados de libertad que soporta en el mecanismo (Yu y Li, 2001).

Las grúas viajeras son usadas en numerosas aplicaciones industriales, tal como la carga y descarga de contenedores, el manejo de desechos nucleares, la automatización industrial y básicamente en algunas industrias que requieren tareas pesadas para mover de un lado a otro.

En la revisión de la literatura de diferentes aproximaciones de control en sistemas de grúas. Estos controladores se han extendido de un simple estado de control de retroalimentación (Ridout, 1989), a controladores no lineales más complejos (Woods y Clements, 1992; Burg *et al.*, 1996).

Ridout (1989), resolvió el problema de oscilación de control y el posicionamiento de la cuchara con el uso de variables de estado en el diseño de retroalimentación. El no consideró el control con la longitud del cable, donde se tiene un componente crítico en la aplicación práctica para la grúa. Ridout encontró que la implementación práctica del controlador tenía que ser conectado en línea, esto significa que cualquiera de su modelado de la grúa necesita ser más preciso, o el controlador lineal es sensible a cambios en parámetros de sistemas, el cual es caracterizado por controladores lineales.

Nicosia y Tornambe (1989), extendió el trabajo de Ridout e incluyó la longitud del cable en el control. El mejoró una simple ganancia en la programación de variables de estado del controlador de retroalimentación. El también especificó un modelo para la grúa en el cual la dinámica del carro son también influenciados por un cambio de la longitud del cable. Esto implica claramente que el logró mejor desempeño en la velocidad angular de oscilación.

Yu *et al.* (1995), usan una aproximación singular para separar la dinámica de la grúa en dos subsistemas. Hay un sistema lento que describe el movimiento promedio de la cuchara y el sistema

rápido que describe el movimiento de oscilación de la carga mientras la cuchara está en movimiento. Estos dos controladores son entonces combinados en una forma única para el controlador de la grúa. El control del sistema lento habilita la cuchara para posicionarse y seguir el diseño de la trayectoria y el control del sistema rápido habilita la oscilación para minimizar. Los autores solo consideran el caso donde la carga de elevación se fija. Entonces, no hay garantía en el desempeño del controlador mientras la altura de la carga comienza a controlarse.

1.5. Trabajos precedentes

La deformación plástica superficial (DPS) es un método de tratamiento superficial de piezas para incrementar sus cualidades físico – mecánicas aprovechando las características de plasticidad de los metales, lo cual puede evitar en muchos casos el empleo de esquemas tecnológicos tradicionales como el tratamiento térmico, que es altamente consumidor de energía y potencialmente contaminante del medio ambiente (Odintsov, 1987).

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 (2 000), 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 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.

La tendencia del proceso de deformación plástica superficial por rodadura, aunque sus reportes son desde hace aproximadamente 35 años en Cuba, los trabajos de los que se tiene evidencia son reportados en la última década. Díaz (2006), implementa un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple en acero AISI 1045, donde se emplearon indistintamente parámetros como fuerzas de 1 000; 1 500 y 2 000 N, número de pasadas de tres a

cinco, avance de la herramienta de 0,066; 0,147 y 0,228 mm/rev y diámetro del rodillo de 41 mm, para evaluar la dureza, la rugosidad superficial y la profundidad de la capa endurecida.

Hernández (2005) realiza el proceso de deformación plástica en acero AISI 1045 con el empleo de un torno 16 D 20, utiliza parámetros como fuerza de 500; 1 500 y 2 500 N, avance de la herramienta de 0,075; 0,125 y 0,25 mm/rev, así como número de revoluciones del husillo de 27; 54 y 110 rev/min, en este trabajo se analiza la influencia de los parámetros sobre la dureza de la capa superficial.

Alcántara (2007) a partir de los parámetros establecidos por Hernández (2007) establece el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 deformado por rodadura, caracteriza metalográficamente las muestras deformadas, las cuales fueron obtenidas variando los parámetros del proceso, además precisa que el endurecimiento del acero después de deformado ocurre por efecto de la acritud.

Jiménez (2007) realiza la simulación con el empleo del Método de Elementos Finitos, establece parámetros sobre el comportamiento del proceso, emplea diámetro de 30 y 40 mm respectivamente, establece el mallado del elemento, así como las condiciones de frontera, apunta que la simulación es la presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico que permite la resolución del problema, los coeficientes se calculan automáticamente por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.

Camejo (2008) realiza los cálculos de costos por lo que incurre la deformación, incluye en los mismos las operaciones por las que transita el proceso, así como máquinas, equipos y mano de obra, precisa en su trabajo que los costos principales en los sistemas productivos de bienes materiales son por lo regular la maquinaria y la materia prima. Los costos de planeación, la administración ventas y el cumplimiento de estándares son para lograr aumentar la eficiencia, estos no son muy altos en comparación con el costo final del producto terminado. En este conjunto de gastos se ubica a la planeación del producto o el análisis o diseño de los sistemas productivos.

Piñeiro (2008) obtiene el diagrama $\sigma - \epsilon$ en muestras deformadas por rodadura y luego traccionadas, definió las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero AISI 1045 endurecido mediante la deformación plástica superficial con rodillo cuando es sometido a ensayos de tracción, se produce un aumento considerable de la tensión máxima de resistencia a la tracción incrementando las

propiedades mecánicas del material al comparar el valor de esfuerzo máximo ($\sigma_B = 674 \text{MPa}$) de la probeta patrón, con los mínimos y máximos obtenidos del cálculo de las nueve probetas ensayadas, los cuales oscilan entre 814 MPa y 926 MPa.

Fernández *et al.* (2008a) muestran las técnicas empleadas en un diseño de experimento que permite evaluar el comportamiento de las variables independientes fuerza (P), desde 500 hasta 2500 N, número de revolución (n) mínimo 27, medio 54 y máximo 110 rev/min y avance (s), 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev, para determinar el comportamiento de la variable dependiente dureza (H), cuando una probeta de acero AISI 1045 es sometida a tratamiento superficial por rodadura para crear un estado compresivo que lo deforme e incremente su resistencia al desgaste y la fatiga. Se realiza el procesamiento estadístico de las variables involucradas en el proceso donde se demuestra el incremento de la dureza desde 220 hasta 262 HV. Se empleó el método de microscopía óptica para analizar el efecto del endurecimiento por deformación, estableciendo el mecanismo de endurecimiento del acero por el deslizamiento de los granos en la red cristalina por el fenómeno de la acritud.

Fernández *et al.* (2008b), abordan el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido mediante la deformación plástica superficial por rodillo, establece que el endurecimiento del acero AISI 1045 ocurre por el deslizamiento de los granos en la red cristalina y por efecto de la acritud, la cual es producto de la reducción de los granos cuando el material es sometido al tensionamiento de su estructura cristalina.

Fernández *et al.* (2008c) realizan el procedimiento tecnológico denominado deformación plástica superficial del acero AISI 1045, empleado en elementos como árboles y ejes de las diferentes máquinas y equipos que son sometidos a proceso de tratamiento térmico para elevar su dureza. El objetivo fundamental es establecer el proceso de endurecimiento de piezas con empleo de rodillo, para sustituir las operaciones de temple-revenido como altos consumidores de electricidad. Se realiza el procesamiento estadístico de las variables involucradas, para demostrar la influencia del comportamiento de la dureza (H), en relación con las variables número de revoluciones (n), fuerza compresiva (P) y el avance (S). Se realiza el procesamiento estadísticos de las variables y se demuestra gráficamente el comportamiento de la dureza con relación a la fuerza y al avance demostrando que existe un estado tensional que deforma el material en la medida que se incrementan los valores de las variables n, s, P.

Fernández *et al.* (2009) muestran la forma de sujeción de la pieza entre plato y punto, método empleado para evitar la flexión de la pieza durante el proceso de elaboración, se muestran las variables del diseño de experimento número de revoluciones, avance y fuerza las cuales permiten realizar el procesamiento estadísticos de los datos, lo que luego son graficados para obtener el comportamiento de las curvas de fuerza contra dureza y avance, así como contra dureza para demostrar el incremento de la dureza superficial en la medida que se incrementa el valor de las variables. Se describen los pasos para la preparación metalográfica de la probeta desde el corte de la misma con el empleo de cuchilla del tipo SANVIDK hasta el pulido para la observación metalográfica. Se determina el comportamiento de la red cristalina por el tensionamiento de los granos y el endurecimiento por acritud

Fernández *et al.* (2010) analizan el comportamiento microestructural del acero AISI 1045, endurecido mediante deformación plástica superficial por rodillo, empleando como variables en el proceso de endurecimiento el número de revoluciones, avance y fuerza del torno 16D20. Se empleó el análisis espectral para determinar la composición química del acero y el Nital como reactivo químico para resaltar la estructura metalográfica después de pulida. Se establecen los parámetros de los regímenes de la deformación plástica superficial por rodillo para evaluar la dureza de los pasadores utilizados en las esteras de los equipos de laboreo minero y se expone una metodología para determinar el tiempo de ejecución del corte de las muestras.

Ramos (2010) realiza el análisis estadístico a muestras deformadas y luego traccionadas. En el análisis se tiene en cuenta análisis estadísticos para evaluar el comportamiento de la curva tenso – deformacional del acero AISI 1045, los análisis efectuados fueron: el análisis de varianza, análisis de regresión y el análisis factorial. Las nueve probetas son graficadas teniendo en cuenta el software Excel y los datos son procesados con el empleo del software Statgraphics Plus V 5.1 Español. Para poder evaluar los cambios significativos del proceso se realiza un gráfico donde se puede observar el comportamiento del acero en estado normal de suministro y después de deformado con el empleo de rodillo.

Linares (2010) determina las tensiones superficiales en piezas tratadas por el proceso de deformación plástica en frío con el empleo de la difracción por rayos X, se determinaron la distancia interplanar tensionada y libre de tensiones, la altura media del pico, dominio cristalito, lo que luego fueron graficadas empleando el método $\text{sen}^2 \psi$.

Negret (2010) realiza la determinación del modelo estadístico–probabilístico para el establecimiento del proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple, obtiene modelos lineales de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (n , P), no así en el caso de S que no es significativo en el comportamiento de la dureza, las cuales están relacionadas con los valores de número de revolución, fuerza y avance.

Hernández (2010) realiza: la determinación de el exponente de endurecimiento n en probetas deformadas por rodillos y traccionadas, a través de la ecuación de Hollomon expone el coeficiente de resistencia del material (K), la determinación del esfuerzo real, la determinación del esfuerzo ingenieril, análisis del esfuerzo real último junto al coeficiente de resistencia del material deformado, el análisis del esfuerzo ingenieril para el límite de fluencia, la deformación logarítmica ϵ frente a las fuerzas aplicadas, el coeficiente de endurecimiento respecto a la fuerza aplicada, y el comportamiento de la deformación verdadera frente al esfuerzo verdadero.

Revé (2010) establece una metodología para determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide, considera un diseño de experimento factorial completo que describe la metodología del estado de tensión en la zona de contacto, a fin de evaluar la influencia en probetas simétricas de parámetros como el diámetro del rodillo (d_p), la profundidad de penetración (h_p); y el ángulo de contacto (θ_k); en el trabajo, se utilizan el software Excell 2010 y el Mathcad para realizar los cálculos y graficar los resultados obtenidos por la metodología propuesta.

Raimón (2011) establece el comportamiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura ante cargas cíclicas de torsión en nueve muestras deformadas por rodadura empleando las variables fuerza (P); número de revoluciones (n) y avance (s), cada uno de ellos evaluados en tres niveles se analiza la dureza del material al someterlo a ensayo de torque, en el ensayo se empleó una máquina CRITM NWS 500, con desplazamiento en el cabezal, el que a su vez tabula los resultados obtenidos.

Imbert (2011) determinó modelo estadístico–probabilístico para el establecimiento del proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple, obtiene modelos por el método de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran la tendencia de los errores de forma en piezas cilíndricas de Acero AISI 1045 deformadas por rodillos simples y precisa que estos modelos

son válidos para las condiciones de frontera empleadas; emplea para ellos como variables independiente n y S , cada una de ellas evaluadas a tres niveles. Utiliza en su trabajo números de revoluciones de 27- 54 y 11 rev/min con avances de 0.075 - 0.125 y 0.25 mm/rev y diámetro de las probetas 11 mm, también se emplea un torno 16 D 20. El error de forma se determinó con un comparador de precisión 0,01mm.

Fernández (2011) elabora una ficha de costos para el proceso de deformación plástica en frío por rodadura, para determinar los componentes del procedimiento se tuvo en cuenta las operaciones por la que transita el mismo como son: corte , torneado exterior, deformación propiamente dicha de las probetas, corte de las muestras, pulido y observación microscópica, considerando además consumo energético, mano de obra directa e indirecta, costos indirectos de fabricación, a partir de los elementos de costos empleados en la Empresa “Comandante Gustavo Machin Hoed de Beche”. Los resultados obtenidos permiten elaborar la ficha de costo del endurecimiento en frío en relación con el tratamiento térmico de alta frecuencia.

Fernández (2011) determinó la relación tensión – deformación del acero AISI 1045 sometida a deformación plástica superficial por rodadura en frío y su comparación con el mismo acero, las variaciones metalográficas en el comportamiento microestructura del acero AISI 1045, como consecuencia de las tensiones de primer y segundo género en la estructura e indicó el mecanismo que provoca el endurecimiento en frío del acero AISI 1045, sometido a deformación plástica por rodadura. En este trabajo se realiza el procesamiento estadístico de las variables involucradas, para determinar el comportamiento de la dureza (H), en relación con las variables número de revolución (n), fuerza compresiva (P) y el avance (S), se emplea en este trabajo diámetros de la probeta de 31 mm.

Borges (2012) realiza la valoración económica de los gastos de fabricación y del tratamiento térmico del pasador perteneciente al bulldózer D 85, E – 12. Del procedimiento se tuvo en cuenta las operaciones por las que transita el mismo: corte, torneado exterior; considerando además consumo energético, mano de obra directa e indirecta, costos indirectos de fabricación, a partir de los elementos de costos empleados en la Empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”. Los resultados obtenidos permiten elaborar la ficha de costo del maquinado, el tratamiento térmico de alta frecuencia y los costos iniciales de dicha pieza. Se puede determinar el comportamiento entre

ambas fichas la cual demuestra que la tecnología de fabricación es más económica que la del valor de la pieza.

Fernández (2012) analiza la variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo y la profundidad de la capa endurecida para analizar el comportamiento que tienen las tensiones sobre la dureza de la capa superficial del acero AISI 1045 después de haber sido sometido a un proceso de deformación plástica por rodillo simple. A partir de la metodología de cálculo propuesta para determinar los regímenes de elaboración, se realizan los cálculos y se establece a través de análisis estadísticos el comportamiento de las tensiones, empleando para ello el tabulador Microsoft Excel 2007, el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1 y el ANSYS. Los resultados obtenidos demuestran el incremento de las tensiones bajo la capa deformada según se varían los parámetros analizados. Se establece el análisis económico, así como el impacto ambiental.

Alcántara (2012) realiza una investigación sobre la influencia que genera el desgaste abrasivo y la fricción de un par tribológico metal – metal sobre los pasadores que componen las esteras de los equipos de laboreo minero, los cuales son fabricados de acero AISI 1045 tratado térmicamente. A partir del análisis de muestras cortadas se determinan las capas que se forman por la deformación plástica en frío (acritud); la primera en la superficie del pasador con dureza de 590 HV; la segunda por efecto del borde del casquillo sobre el pasador con dureza de 560 HV y la tercera por el tratamiento térmico inducido a la pieza con dureza de 480 HV. Se establece una metodología de cálculo considerando diferentes cargas que se generan en la superficie del pasador, así como el análisis microestructural a través de técnicas de microscopía óptica que permiten establecer el tamaño del grano con estructura martensítica y sometido a compresión dinámica, al mismo tiempo se realizó ensayos de dureza. Por último se establece un diseño de experimento obteniéndose modelos lineales de mínimos cuadrados, estadísticamente significativos, que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales, en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (F y D), las cuales están relacionadas con la fuerza y el desgaste. Se realiza una valoración económica, así como el efecto social ambiental.

Naranjo (2012) propone una metodología, con el objetivo de determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío, por el método circunferencial por rodadura pura. Para esto se propone un diseño de experimento factorial completo que describe la metodología del estado de tensión en la zona de contacto, a fin de evaluar la influencia en probetas simétricas de parámetros como el

diámetro del rodillo (d_p), la profundidad de penetración (h_p); y el ángulo de contacto (ϕ_k), que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento por deformación plástica superficial generado por rodillo simple. Se utilizan software como el Excel 2010 y el MathCAD para realizar los cálculos y graficar los resultados obtenidos por la metodología propuesta. Finalmente se analiza la influencia del proceso en el medio ambiente, así como la valoración económica para obtener un significativo efecto social y ambiental.

En los trabajos citados anteriormente se aprecia que el proceso conocido como deformación plástica superficial con rodillo simple es considerado como un proceso de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial y tiene plena actualidad, resultando ser una variante tecnológica apropiada para proporcionar mejores propiedades a los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8. Además, estos aportan información sobre las características del acero AISI 1045 y los métodos de tratamiento, pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales que muestren las regularidades del comportamiento de la tolerancia dimensional generada por un rodillo y en ninguno de ellos se muestra la relación entre esta, el número de revoluciones y el avance.

1.6. Mecanizado de piezas

Mecanizado es el término usado para designar los procesos de manufactura con arranque de viruta (Feschenkov ,1989). Consiste en la fabricación de un producto por medio de la eliminación de material sobrante sobre una forma preconcebida hasta alcanzar las especificaciones requeridas por el diseño.

El mecanizado es uno de los procesos de fabricación más utilizado en la actualidad, especialmente en campos como el automovilístico o el aeronáutico. Por este motivo el estudio sobre estos procesos de eliminación de materiales está en auge en la industria actual (Feschenkov ,1989).

Dada la naturaleza amplia de la ciencia del corte de los metales, un estudio sobre este tema puede ser abordado desde muchas perspectivas, como el material de la pieza a fabricar, las características de la herramienta, la temperatura y la fuerza en la zona de corte, la velocidad de corte, la cantidad y el tipo de viruta generada, la rugosidad obtenida o bien la combinación de todos ellos (Baker, 2002).

Entre las abundantes ventajas de los procesos de mecanizado con arranque de viruta cabe destacar la precisión dimensional así como la complicada geometría que se puede conseguir. Además, las piezas

mecanizadas obtienen un acabado superficial muy superior al conseguido mediante otros métodos de fabricación como la fundición.

Por otro lado, el tiempo empleado generalmente en el mecanizado de una pieza es mayor que el que se necesitaría para otro proceso de fabricación, por lo que para una gran producción puede resultar un proceso demasiado largo.

En el aspecto económico, el mecanizado resulta ventajoso cuando se requieren características especiales de superficie, especialmente si se trata de una pequeña producción (Feschenkov, 1989). No obstante, el desperdicio de material que se produce durante el mecanizado hace que las ventajas económicas disminuyan.

La maquinabilidad describe la facilidad con que un material puede ser maquinado y está relacionada con las propiedades mecánicas de los mismos. Además de esto, esa maquinabilidad está igualmente relacionada con la composición química del material, su microestructura, resistencia y los parámetros de corte utilizados como: el avance, la velocidad de corte, la profundidad de corte y el fluido de corte según Oxley (1989).

Los procesos de mecanizado constituyen en la actualidad el conjunto de procesos de fabricación más ampliamente difundidos en la industria. Esto se debe, entre otras razones, a su gran versatilidad en la obtención de geometrías y al nivel de precisión dimensional obtenido en comparación con otros procesos (Coromant Sandvik, 2003).

1.6.1. Precisión en la elaboración de piezas maquinadas

De acuerdo con los criterios de Makienco (1982), el fin de cualquier tipo de elaboración de piezas consiste en fabricarlo con una precisión dada, lo que comprende la correspondencia de las dimensiones y de la forma de superficie que se trabaja con una precisión dada, donde la superficie que se trabaja presenta altas exigencias de precisión y calidad.

Según Montes de Oca y Pérez (2002) 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 (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 (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 Blais (2004) establece la relación de la tolerancia fundamental.

Según se observa en la tabla de tolerancias fundamentales, para una determinada medida nominal la magnitud de la tolerancia fundamental aumenta al hacerlo también el grado de tolerancia, es decir disminuye la precisión a su vez para un determinado grado de tolerancia la magnitud de la tolerancia fundamental aumenta al hacerlo también la “medida nominal”.

1.6.2. Tolerancias dimensionales

Según Casanova (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.

Plantea Pérez *et al.* (2004) que 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.

Precisa además este autor que las tolerancias geométricas deberán ser especificadas solamente en aquellos requisitos que afecten la funcionalidad, la intercambiabilidad y posibles cuestiones relativas a la fabricación, de otra manera, los costos de fabricación y verificación, sufrirá un aumento innecesario. En cualquier caso estas tolerancias habrán de ser tan grandes como lo permitan las condiciones establecidas para satisfacer los requisitos del diseño.

I.6.3. Determinación de la tolerancia a partir de mediciones simples

Las operaciones de acabado tienen una gran importancia porque se emplean para la terminación final de las piezas y de ellas dependen mucho el funcionamiento posterior de las mismas. Se pueden clasificar en primarias, como el rectificado, donde se logra un acabado superficial Ra promedio entre 0,1 y 1,6 μm , y secundarias, con las que se logra obtener un acabado Ra promedio superior pero son menos empleadas según Lucas *et al.* (2005).

Para el caso que se quiera establecer la tolerancia de una pieza a partir de mediciones simples realizada sobre piezas individuales se puede emplear las relaciones expuestas en Hernández, (1986). Estas fórmulas son apropiadas para el cálculo de la tolerancia dimensional si el número de observaciones que se realiza sobre la pieza es grande (mayor que 30), ya que esto permite asegurar la normalidad de las observaciones. En Miller (2005) se plantean las expresiones para la determinación de la tolerancia de la dimensión, independiente de cómo esté distribuida la variable.

Una de las formas más utilizadas para asignar las tolerancias es a partir de los datos que proporcionan los procesos de fabricación y sus costos (Parsons y Wilson, 1970). Este enfoque se basa en la asignación de las tolerancias a una determinada cota en función de la operación tecnológica en concreto. Otros estudios más extensos además de considerar la operación tecnológica tienen en cuenta las máquinas herramientas disponibles, las herramientas de corte, la colocación de

las piezas (Molinari, A.; Moufki, 2008), los pasos tecnológicos y los costes de fabricación (Lee *et al.*, 2006).

Otra de las formas de asignar las tolerancias es mediante las distribuciones estadísticas, el desarrollo de modelos estadísticos se emplea para la resolución del problema del análisis de tolerancias. Área muy estudiada por diversos autores (Prasad, 1994; Zhang *et al.*, 2000).

I.6.4. Relación entre la tolerancia dimensional y el error de forma y de 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, 1986).

En su trabajo sobre la influencia de la geometría sobre el estado tensional en ajustes por interferencia con muesca, Pérez *et al.* (2009) plantea que la tolerancia de cilindridad, de circularidad, de perfil de sección longitudinal, de planicidad, de rectitud y de paralelismo, se establecen en aquellos casos en que deben ser menores que la tolerancia para la dimensión.

En correspondencia con lo planteado anteriormente, se excluye el caso cuando las dimensiones límite difieren en las comprendida en la NC 16 – 30. En este caso la 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.

Casanova (1986) recomienda 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 (Hyun y Robbins, 2007). Özel *et al.* (2005) establece las fórmulas que relacionan la tolerancia con el error de forma

Las concentraciones de tensiones pueden limitar la duración en buenas condiciones del ajuste. Por ello, algunos autores han propuesto varios métodos de diseño para reducir o eliminar las concentraciones de tensiones y alargar la vida de los componentes de un ajuste forzado a presión. Entre dichos métodos se encuentra realizar una ranura o muesca circunferencial en el agujero (Pérez *et al.*, 2009).

I.6.5. Relación entre la tolerancia dimensional y la rugosidad superficial

Existen numerosos artículos relacionados con el estudio del efecto del mecanizado sobre la rugosidad superficial. Thomas *et al.* (1997) y Feng (2001) presentaron estudios acerca del impacto de una serie de factores del torneado sobre dicha variable superficial, Correa *et al.* (2004) han estudiado factores que afectan el acabado en procesos de torneado y fresado, Sahin y Motorcu (2004) y más recientemente Onwubolu (2005), han propuesto modelos con los cuales la rugosidad es relacionada con algunos de esos factores; sin embargo, ninguno de esos trabajos trata o, hasta donde los autores del presente trabajo han investigado, ha sido aprovechado para tratar la dependencia del ángulo máximo de giro, como característica de la plasticidad de un material, respecto a la rugosidad superficial de la probeta.

García *et al.* (2003) propusieron para la síntesis de tolerancias una formulación de vectores espaciales. En esta formulación, se define un vector espacial con las coordenadas correspondientes a las dimensiones independientes. Este enfoque fue más elaborado e incorporado por Turner en un prototipo de sistema CAD denominado GEOTOL. Este sistema utiliza tres métodos para el análisis y síntesis de tolerancias: (a) programación lineal, (b) método de Monte Carlo, y (c) el método de los mínimos cuadrados. Estos métodos soportan los problemas de las tolerancias estadísticas y las tolerancias de los casos límite.

Entre la tolerancia de la dimensión y la rugosidad superficial se han establecidos relaciones, Rodríguez, (1986). Estas indican que conocido el valor de la tolerancia característico para una correspondiente superficie, se puede determinar por medio del auxilio de un gráfico, el correspondiente valor de rugosidad mínimo

El dimensionamiento de piezas, en vinculaciones móviles, como es el caso del pasador de la grúa 215 – GRL – 101, depende del desgaste admitido en el transcurso del funcionamiento del

mecanismo. Ese desgaste será tanto menor cuanto menor sea la rugosidad. Con el desgaste varía la rugosidad y en consecuencia, un ajuste existente se convierte en otro más flojo, por aumento del juego, de ahí que la norma ISA recomienda tener en cuenta la nomenclatura de las diferentes rugosidades.

1.6.6. 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, (Martínez, 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 expresión para las unidades de tolerancia (Martínez, 1984). Unidad de tolerancia es el factor expresado únicamente en función de la dimensión nominal y que sirve de base para determinar la tolerancia.

Según Martínez (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 Martínez (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, los 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.

1.7. Características de la calidad superficial

El término calidad superficial es muy amplio. Dentro de este concepto aparece la macro y microgeometría superficial, errores de forma y posición, rugosidad y ondulaciones, dureza de la capa superficial de los materiales, porosidad, la existencia en la superficie de películas de diferentes características y procedencia, la capacidad de mantener la capa lubricante ó de favorecer la formación del régimen hidrodinámico, la adecuada resistencia a la corrosión.

En la solución de los problemas tribotécnicos las mencionadas propiedades son consideradas desde el punto de vista ingenieril (Chacón *et al.*, 2006).

La influencia de la rugosidad sobre la fricción y el desgaste ha sido estudiada con profundidad, no sucediendo lo mismo con las ondulaciones. En la actualidad se trabaja con vista a la racionalización y normalización de las características de las ondulaciones, a pesar de que en este sentido se han realizado varios trabajos.

En la solución de problemas relacionados con la fricción y el desgaste son de gran interés los aspectos relacionados con la interacción de superficies asentadas. Generalmente los diseñadores y los tecnólogos basados en la experiencia acumulada, designan la rugosidad inicial de las superficies de manera tal que se garantice las mínimas pérdidas energéticas por fricción y que el desgaste en el período de asentamiento sea el mínimo posible, tanto en magnitud como en el tiempo de trabajo del par tribológico. Es por ello que el estudio de las propiedades friccionantes y antidesgaste durante el período normal de explotación del par, fortalece cuantitativa y cualitativamente los conocimientos sobre la calidad de las superficies durante el período de asentamiento.

En el contacto de las superficies reales influye de manera decisiva las irregularidades superficiales obtenidas durante la elaboración mecánica, de los cuerpos (Greenwood y Williamson ,1966).

Las irregularidades superficiales se clasifican en tres categorías (Hernández, 1986): macrodesviaciones de forma; ondulaciones y rugosidades (Figura 1.2).

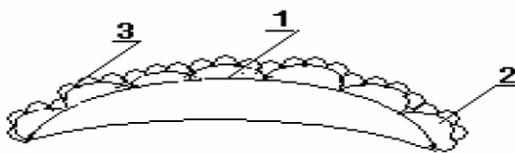


Figura 1.2. Irregularidades superficiales

1 - Macrodesviaciones de forma; 2 - Ondulaciones; 3 - Rugosidad superficial



➤ **Macrodesviaciones de forma.** No presentan regularidad a lo largo de la pieza, se deben a insuficiente precisión o rigidez de la máquina herramienta y la herramienta de corte. La relación entre el paso(S) y la altura (H) es $S/H > 1000$. Como desviaciones de forma se tienen la conicidad, convexidad, concavidad, etc.

➤ **Ondulaciones.** Son irregularidades que se repiten periódicamente de forma regular; el paso entre ellas es considerablemente mayor que su altura $50 < S/H < 1000$. Se originan por vibraciones de baja frecuencia durante el maquinado.

➤ **Rugosidad superficial.** Son las irregularidades con $S/H < 50$. La rugosidad superficial depende de:

- El filo y desgaste de las herramientas de corte.
- Régimen de maquinado.
- Materiales de la herramienta y el semiproducto.
- Tipo de elaboración mecánica y
- Vibraciones

1.8. Métodos estadísticos

Estos están formados por un conjunto de principios empleados para analizar los datos influenciados por ciertos números de causas que actúan conjuntamente, y que son susceptibles de expresarse numéricamente. Los métodos estadísticos se han adoptados sobre la marcha como los mejores y más económicos entre los de control de la calidad.

Los objetivos principales de los métodos de control de la calidad; de acuerdo con Hernández, (1986), son:

- 1.- Observar y evaluar la calidad del producto terminado y descubrir la amplitud de los fallos en concordancia con las especificaciones.
- 2.- Seguir el rastro de los fallos desde el producto terminado, a la materia prima o proceso mediante el cual se elabora el producto.
- 3.- Proveer los medios de mantener los procesos de producción bajo control, poner al descubierto los cambios y ayudar a identificar las causas de tales cambios.
- 4.- Evaluar los procesos o medios disponibles para la reducción de las variaciones de la calidad.
- 5.- Comparar métodos disponibles para medir las características de la calidad, de modo que puedan emplearse los más exactos y que estos sean económicamente posibles.

Para aplicar los métodos estadísticos al proceso de tratamiento superficial por deformación plástica (DPS) se deben tener en cuenta los factores que influyen en el proceso de tratamiento. Según los datos de la literatura consultada, El-Axir (1988); Hasegawa et al., (2009); Klocke, (1998) y Pacana, (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 (2002) y El-Axir (2005), 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 (2000), 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.

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 (1989); y El-Axir (2000). También se ha usado el diseño factorial parcial, en El-Axir (2005) y en otros casos se ha utilizado el Método de Taguchi Lee (1992) y Pacana (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.

1.8.1. Fundamentos de métodos estadísticos

Técnicas de muestreo

Las técnicas de muestreo que pueden ser utilizada según las condiciones de los procesos se mencionan a continuación, de acuerdo con la terminología empleada en Calero, (1976) y Miller, (2005): muestreo aleatorio simple, irrestricto aleatorio, aleatorio estratificado, sistemático, de conglomerado monoetápico, de conglomerado bietápico, de conglomerado bietápico sistemático, replicado y secuencial.

Calero, (1976) plantea que el uso de la técnica de muestreo se sustenta en las siguientes ventajas: Mayor rapidez, Mayores posibilidades, mayor exactitud y menor costo.

El problema principal del Muestreo es definir una muestra lo más pequeña posible con la mayor representatividad posible Calero, (1976). En la práctica esto se asume de dos formas:

- ✓ Fijar el nivel de representatividad y luego buscar el tamaño y la posición espacio-temporal (o de otro tipo) de la muestra, asumiendo que debe minimizarse cierto criterio (por ejemplo el tamaño, el valor económico del muestreo, etc.)
- ✓ Se fija el tamaño de la muestra y se determina la posición espacio-temporal (o de otro tipo) que maximice la representatividad.

Técnicas de análisis exploratorio

Las técnicas de análisis exploratorio que pueden ser considerada según las posibilidades que ofrezcan los procesos se citan a continuación, con arreglo a la terminología utilizada en y Miller, (2005) y Freund, (2006), diagrama de Pareto, de puntos, frecuencia (histograma), de tallos y hojas, de caja, de causa efecto, para control de mediciones, para control de atributos, de tiempo total, de Weibull y de dispersión.

Miller, (2005), plantea que se necesita un método para lograr el mejoramiento de la calidad, no solamente bueno deseo. El problema central de la administración es comprender el significado de la variación y extraer de ella la información pertinente. Es allí donde entra en juego la estadística. Los ingenieros necesitan comprender los principios básicos del diseño experimental.

Tradicionalmente se puede pensar que son incompatibles una alta capacidad de producción y una alta calidad. Pero en realidad es el costo de reprocesamiento del producto defectuoso el que constituye una gran proporción del costo total de producción. En realidad, la baja calidad es lo que ocasiona alto costo. Además de los altos costos de reprocesamiento de la pieza para tornarla útil, también se tiene los altos costos asociados con clientes perdidos a los que se vendieron productos de inferior calidad.

Miller (2005), plantea que el diagrama de Pareto describe gráficamente la ley empírica que dice que cualquier conjunto de eventos consiste de uno pocos elementos principales y muchos secundarios, esta presentación, que ordena cada tipo de falla o defecto de acuerdo con su frecuencia, pueden identificar defectos importantes y sus causas.

Guerra (2003), dice que el diagrama de dispersión advierte como los puntos están dispersos y en consecuencia sirve para orientar el trabajo que se desarrolla para encontrar la fórmula que relacionan variable dependiente con una o más variables independientes.

Según Freund, (2006), existe una estrecha relación entre el uso de diagrama de control y la prueba de hipótesis. Un punto sobre un diagrama para la media que este fuera de control corresponde a una muestra para la cual se rechaza la hipótesis nula de que la media $\mu = \mu_0$. Para ser más preciso, diríamos que la técnica de diagrama de control dan conjunto de pruebas secuenciales, temporalmente ordenadas.

Pruebas de hipótesis

Las pruebas de hipótesis estadísticas que pueden ser empleadas según las necesidades que se planteen en los procesos se refieren a continuación, valiéndose de la terminología empleada en Miller, (2005), Freund, (2006) y Guerra, (2003), prueba de hipótesis relativo a la media, relativo a la varianza, relativo a proposiciones y no paramétricas.

Freund (2006), plantea que partiendo del análisis de prueba de hipótesis se puede decir que existen múltiples problemas, que en vez de estimar el valor de un parámetro, se debe decidir si una afirmación relativa a un parámetro es verdadera o falsa; esto es; probar una hipótesis relativa a un parámetro. Esta verosimilitud es modelada a partir de la probabilidad de que el resultado obtenido sea observado, si la hipótesis se cumple. Se puede usar como hipótesis el hecho de que un parámetro θ sea igual a un valor hipotético θ_0 .

Existen dos posibles situaciones:

- la hipótesis nula, que es cuando formulamos que no existen diferencias entre algo que se está analizando ($\theta = \theta_0$).
- la hipótesis alternativa, casi siempre específica que el parámetro (o cualquier otro parámetro que pueda ser de interés) no es igual ni mayor o ni menor que el valor supuesto en la hipótesis ($\theta \neq \theta_0$).

Intervalos de confianza

Dado que no puede esperarse que las estimaciones puntuales realmente coincidan con las cantidades que intentan estimar, algunas veces es preferible reemplazar con estimaciones por intervalo, esto es con intervalos en los cuales podemos esperar con un grado razonable de certeza que contenga al parámetro en cuestión.

Los intervalos de confianza que pueden ser establecidos según las realidades que se planteen en los procesos se refieren a continuación, utilizando los términos empleados en Miller, (2005), Freund, (2006) y Guerra, (2003), intervalos de confianza relativo a la media, intervalo de confianza relativo a la variancia e intervalo de confianza relativo a proporciones.

El resultado final o elaborado de una medición debe estar libre de errores sistemáticos, los que se pueden eliminar mediante correcciones necesarias y poseer solamente la incertidumbre debido a los

errores de tipo aleatorio siempre que esto sea posible. En general, y aplicando las propiedades de la curva de distribución normal, pueden detectarse y eliminarse los valores anormales.

Cuando el histograma y la gráfica de calificaciones normales indican que la hipótesis de un distribución normal no es valida, a menudo se puede mejorar la concordancia con la normalidad mediante transformaciones Miller, (2005). Si la distribución tiene una cola larga o un poco desviaciones a la derecha, la transformación $\ln X$ o $(X)^{1/2}$ jalaran más hacia abajo los valores grandes que a los valores centrales o a los pequeños.

Estimación bayesiana

En la estimación bayesiana, las creencia previa sobre posibles valores de μ son combinadas con evidencias muestrales directas. Esto conduce a una distribución a posteriori de μ , que en condiciones bastantes generales puede aproximarse por una distribución normal Miller, (2005).

Las estimación bayesiana que pueden plantearse según las condiciones que se den en los procesos se refieren a continuación, con arreglo a los términos empleados en Miller, (2005), estimación bayesiana relativa a la media y a la desviación típica, y estimación bayesiana relativo a proporciones.

Diseño de experimentos

El diseño de un experimento es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido. Diseñar un experimento significa planear un experimento de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación.

Box y Hunter (1978) y De la Vara (2003) indican que las técnicas estadísticas del diseño experimental tienen su razón de ser en la investigación empírica que trata de indagar cómo ciertas variables, conocidas como factores, actúan sobre una variable respuesta registrada tras la realización del experimento. Es importante hacer destacar que los factores que influyen sobre el valor de la variable respuesta sólo pueden tomar un número finito de estados o niveles.

Las pruebas en estos modelos se centran en contrastar si los factores realmente alteran los resultados de los experimentos al fijarlos en sus diferentes niveles. La técnica, que consiste en descomponer la variabilidad total en las variabilidades aportadas por los diferentes factores y sus interacciones mutuas, recibe el nombre de análisis de la varianza.

Análisis de varianza

El ANOVA fue introducido en la tercera década del siglo XX por el estadístico inglés Ronald A. Fisher y en sus inicios estuvo vinculada a las investigaciones agrícolas, pero con el transcurso del tiempo su utilización se ha hecho extensiva a todas las ramas de las ciencias.

Sarache (2004) y Ostle (1975) plantean que en la práctica nos enfrentamos a muchos fenómenos donde se necesita comparar más de dos poblaciones, es decir, donde es necesario comparar simultáneamente más de dos valores medios. El análisis de varianza (ANOVA) nos permite realizar dicha comparación.

El ANOVA como técnica estadística, permite el estudio de las características medidas u observadas, cuyos valores dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente y mediante este análisis poder decidir si tales efectos son o no diferentes, es decir, esta técnica consiste en la división de la variabilidad total de una característica medible en la variabilidad causada por diferentes factores que intervienen en el problema.

El análisis de las características observadas está basado en la modelación matemática de ellas mediante el modelo lineal. En el ANOVA, la repetición de la observación se debe entender como la repetición del experimento, entendiéndose por repetición (réplica) la realización repetida del hecho que se estudia bajo las condiciones que los caracterizan, no es recomendable la utilización de esta técnica para una sola observación (Ferré, 2002 y Miller, 2005).

El conjunto particular de condiciones experimentales cuyos efectos van a ser medidos y comparados en el desarrollo del experimento diseñado se conoce como Nivel o Tratamiento.

Análisis de regresión

El análisis de regresión, por su parte, nos ayudara a determinar el modelo o ecuación matemática que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas.

En los modelos de regresión la variable dependiente Y es siempre una variable aleatoria, mientras que los factores o variables independientes son considerados como variables no aleatorias. Esto se argumenta en el hecho de que en las aplicaciones prácticas los valores de las X_i suelen ser controladas o elegidas de antemano por el investigador, estos factores también se les denomina variables explicativas, ya que ellos en definitiva son los que explican el comportamiento de la variable dependiente (Box y Hunter, 1989).

1.9. Conclusiones del capítulo 1

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

- Las cucharas mecánicas tipo CMA – 8.00/1.8 que se emplean en los depósitos de reserva de la planta de secadero de la empresa Ernesto Che Guevara, pueden contribuir al mejoramiento del proceso en el que se insertan; puesto que a los 25 pasadores de cada una de estas se le puede mejorar su durabilidad si son tratados adecuadamente.
- Las grúas automáticas pueden tener mejoras en su funcionamiento si se proveen de controles automáticos eficientes; considerando la posibilidad de emplear un sistema lento para posicionar la cuchara y un sistema rápido para minimizar las oscilaciones.
- En las bibliografías consultadas se aprecia que el proceso conocido como deformación plástica superficial con rodillo simple es considerado como un proceso de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial y tiene plena actualidad, resultando ser una variante tecnológica apropiada para proporcionar mayor durabilidad a los pasadores objetos de estudio.
- Las bibliografías consultadas aporta información sobre las características de la cuchara mecánica, las grúas automáticas, las características del acero AISI 1045 y los métodos de tratamiento, pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales que muestren las regularidades del comportamiento de la tolerancia dimensional generada por un rodillo y en ninguno de ellas se muestra la relación entre esta, el número de revoluciones y el avance.

CAPÍTULO 2



CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

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.

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de un procedimiento general, para el tratamiento de piezas por deformación plástica, se requiere tener en cuenta la teoría de la toma de decisiones; en lo que respecta al flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles. No solo basta con la elección del material u objeto a tratar y su valoración físico, química y estructural; es razonable tener en cuenta los tres tipos de máquinas que pueden emplearse en esta operación (tornos, fresadoras y acepilladoras), características metrológicas de los instrumentos de medición y características del herramental ya que todo esto tiene características específicas; eligiendo la misma según el tipo de pieza a tratar, la prestación que ofrece y considerando su disponibilidad en los procesos.

Para el estudio de la influencia que puede generar la deformación plástica provocada por un rodillo sobre piezas cilíndricas construidas de acero AISI 1045 se procedió a la selección de un objeto electromecánico. La cuchara mecánica tipo CMA 1.8/8.0 (Figura 1, Anexo 2) que se emplea en los depósitos de reserva de la planta de secadero de la empresa Ernesto Che Guevara posee 25 pasadores cilíndricos elaborados de acero AISI 1045, cuyos diámetros oscilan en el rango de 40 a 190 mm.

Los pasadores que posee la cuchara mecánica están expuestos a regímenes de explotación que provocan desgaste prematuro caracterizado por abrasivo – adhesivo; corrosivo – erosivo, en la superficie de contacto de los mismos. Estas condiciones son imposibles de reproducir a escala de laboratorio, por lo que se requiere del empleo de métodos de trabajo que permitan por una parte tener en cuenta los elementos más significativos del funcionamiento real de la pieza en el proceso y por otra la reproducción de los resultados derivados de la experimentación bajo condiciones muy similares.



La experimentación se realizó construyendo probetas de acero ASI 1045 de diámetro 40 mm a semejanza de los pasadores que se encuentran en la cuchara mecánica. Luego estas probetas se sometieron a regímenes de deformación plástica según el diseño de experimento definido, para evaluar la influencia de la deformación plástica superficial con rodillo simple: tal como se muestra en la Figura 2, Anexo3.

En este capítulo se plantea como objetivo: **Fundamentar los procedimientos que permitan la determinación de los modelos matemáticos, para la predicción del acabado superficial de los pasadores objetos de estudio al ser sometido a la deformación plástica con rodillos simple.**

2.2. Características del elemento deformante (rodillo)

Para la selección del elemento deformante hay que tener en cuenta las características del mismo a saber, el perfil del rodillo empleado (figura 2.1), el mismo influye marcadamente en los resultados obtenidos en el proceso de elaboración de la superficie (Odintov, 1987).

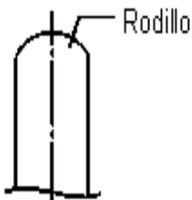


Figura 2.1. Forma del perfil de trabajo del rodillo

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.

Para la realización del trabajo de deformación plástica sobre las probetas se empleó el rodillo que posee las características que se muestran en la tabla 2.1.



Tabla 2.1. Características del rodillo

Característica del rodillo	Descripción
Diámetro	50 mm
Material	Acero AISI 5140
Dureza	65 HRC
Acabado superficial	Ra 0,5 μ m
Radio en el perfil	2 mm

Fuente: Fernández, (2011)

La justificación del empleo de este tipo de rodillo radica en que para el endurecimiento de piezas de poca rigidez es necesario utilizar un radio de perfil pequeño, lo que permite obtener el mayor aumento de la dureza con esfuerzos relativamente pequeños. Se empleó 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 (Figura 3, Anexo 4).

El cuerpo, es una barra de sección rectangular en forma de cuchilla que es la que permite instalarla en el portaherramientas de las máquinas herramienta. Una vez instalada la herramienta, se ajusta el calibrador roscado donde va acoplado un indicador de carátula, con una precisión de 0,001 mm 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 debidamente los parámetros, 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.

Esta herramienta 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 (Cogsdill, 2005). La elección de la ranura se realiza teniendo en cuenta las características geométricas y constructivas, 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.

2.3. Características del torno 16 D 20

Los trabajos de torneado y experimental se realizaron en el torno 16 D 20 (Figura 4, Anexo 5), en el mismo se puede realizar la operación tecnológica de elaboración de las probetas y tratamiento



mecánico superficial por deformación plástica. Este presenta buenas cualidades del sistema de mando, en el cual están centralizados todas las operaciones de trabajo y auxiliares.

Para la realización de la experimentación el torno fue objeto de un chequeo de los parámetros más influyentes en el proceso de deformación plástica, con vista a asegurar el cumplimiento de las especificaciones. En la tabla 2.2 se indican las características técnicas de interés para este trabajo.

Tabla 2.2. Características del torno 16 D 2

Característica del torno	Descripción
Potencia del motor eléctrico	10 kW
Frecuencia de rotación del husillo	16-2 400 rev/min
Avance longitudinal.	0, 05...2, 8 mm/rev
Avance Transversal.	0,025...1,4 mm/rev
Fuerza máxima laborable sobre el mecanismo de avance	400 kgf.

Fuente: Fernández, (2011)

El conocimiento de estas características permite establecer especificidad del trabajo experimental que se desarrolla, al precisar datos para las variables del proceso como son número de revoluciones y avance. Además indica el diapasón de posibilidades que se pueden explorar al poder variar los niveles de dichos parámetros.

2.4. Características del pie de rey y el micrómetro

Para la realización del proceso experimental se empleó en la determinación de los parámetros geométricos de las probetas un pie de rey digital (Figura 5, Anexo 6) y un micrómetro indicador (Figura 6, Anexo 7). El pie de rey permitió determinar los valores del diámetro de las probetas antes de la deformación plástica y el micrómetro indicador posibilitó la medición del diámetro de las probetas después de la deformación.

El Pie de Rey digital es de un margen de error de 0.05 mm (50 μ m) y el micrómetro indicador posee una precisión de 0,001mm (1 μ m). Estos medios fueron objeto de inspección antes de su utilización, para asegurar la precisión adecuada del trabajo.



En el caso del pie de rey se hizo observancia de:

- 1.- Realizar la colocación adecuadamente poniéndolo en la dirección correcta de la medición a realizar.
- 2.- Chequeo del desgaste y flexión en las patas de medición así como en el cuerpo, cuando las patas del pie de rey están en contacto. Este debe estar en la indicación cero y no debe percibirse un claro entre las superficies de contacto.
- 3.- Aplicación de una presión moderada al medir, para evitar deformaciones plásticas en las superficies en contacto, que puedan alterar la medición.

En el caso del micrómetro indicador se observó que:

- 1.- Cuando los topes del micrómetro están en contacto, el micrómetro este en la indicación cero.
- 2.- Los errores del paso del tronillo micrométrico y los errores de división del tambor, puesto que esto puede hacer que el desplazamiento del tope móvil no corresponda al valor leído.
- 3.- El paralelismo de los topes de medición cuyo plano, además debe ser perpendicular al eje de medición.
- 4.- La planicidad de los topes de medición.

El pie de rey digital presenta la indicación en una pantalla de cristal líquido. Además de la comodidad de la lectura, su principal ventaja es la posibilidad de tratamiento informático de las lecturas. 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 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), no aplicar ninguna presión eléctrica en ninguna de las partes del calibrador, para el reemplazo de la batería es necesario esperar unos 30 segundos después de haberla quitado. En la limpieza del calibrador nunca se debe utilizar gasolina, aceite, y otras soluciones orgánicas.

El micrómetro indicador para realizar las mediciones del diámetro de las probetas después de la deformación es de una precisión de 0.001 mm; esto hará que la exactitud de la medición no se vea afectada por los errores sistemáticos instrumentales (Hernández, 1986). Este instrumento combina la lectura corriente de las escalas con un mecanismo a base de palancas y engranajes, lo cual aumenta la amplificación del instrumento.



La lectura en este instrumento se llevó a cabo de la forma siguiente:

Primero: Se anota la lectura de la escala grabada longitudinalmente en el cuerpo del mismo, esta escala esta dividida en milímetros.

Segundo: Se observa cual es la raya del tambor que coincida con la raya longitudinal grabada en el cuerpo del instrumento. Esta lectura habrá que agregársela a la primera. Esa lectura esta dada en 0.01 milímetros.

Tercero: Entonces se toma la lectura en el indicador y esta será las milésimas de milímetros que se deben agregar para obtener la lectura final.

2.5. Características del material a deformar plásticamente por rodadura

Para la selección del material a deformar plásticamente (acero AISI 1045) hay que tener presente las cualidades que este debe poseer como son; alta tenacidad, plasticidad y una elevada resistencia al desgaste, gran capacidad de endurecimiento por deformación. Debe ser un material con facilidad de conformar, endurecer por deformación plástica, su costo de producción ha de ser bajo y ofrecer buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga.

El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro cuántico 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” de Moa, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química del acero AISI 1045

C	Mn	P	S	SI	Cr
0,46 %	0,65 %	0,01 %	0,019 %	0,25 %	0,40 %
NI	Mo	Cu	Co	AL	Fe
0,40 %	0,10 %	0,16 %	0,01 %	0,005 %	97,75 %

Fuente: Fernández, (2011)

Los parámetros determinados se encuentran dentro de los establecidos para cada elemento, según la composición mostrada en la tabla 2.4.

Tabla. 2.4. Composición química del acero AISI 1045 (Según norma ASTM)

C	Mn	P	S	Si
0,45 %	0,65 %	≤ 0,040 %	≤ 0,050 %	0,35 %

Fuente: Key to steel (2002)



Se previó que el material, según estado de entrega, fuera laminado en caliente, no obstante a esta condición, le fue aplicado un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 650 °C, durante dos horas, con el objetivo de homogeneizar la estructura y eliminar la mayor cantidad de tensiones, propias del proceso de fabricación. Las operaciones de corte se realizaron según norma ASTM E 3 – 95, con el empleo de una segueta mecánica y constante régimen de enfriamiento para evitar que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso, pudiera provocar transformaciones en la estructura por cambios de fase. Las probetas fueron normalizadas según norma ASTM E 646 – 00. Las dimensiones de las mismas aparecen en la figura 2.2.

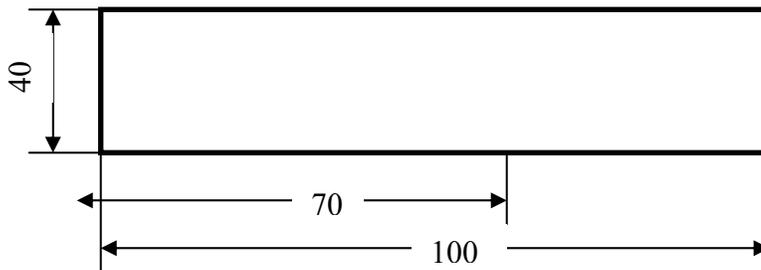


Figura 2.2. Muestra empleada en el proceso de deformación plástica

Las muestras se sometieron a proceso de torneado, en condiciones de intensa evacuación del calor. Se empleó un torno 16 D 20 y una cuchilla de torner con ángulo de posición principal 45°, ángulo de incidencia principal 18° y ángulo de ataque 0,15°, con sujeción mecánica Sandvik, código del vástago PSSN R 25 25 M 12, una plaquita SNMG 12 04 08 PM de calidad 4025 (Coromant coroke, 1996). Se cilindraron entre plato y punto, se tuvo en cuenta los siguientes regímenes de elaboración: número de revoluciones por minuto, avance de la herramienta y la profundidad de corte (Casillas, 1982).

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 AISI 1045 es un material de buena maquinabilidad lo cual permite un buen acabado superficial.

Lo regímenes de elaboración de la probeta, son: velocidad de corte 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).



Bajo las condiciones descritas anteriormente se obtuvieron las 27 probetas que serán sometidas al proceso de deformación plástica superficial con rodillo simple. Dichas probetas poseen los valores de diámetros que se muestran en la tabla 2.5.

Tabla.2.5. Del diámetro de las probetas antes de la deformación

D(mm)								
39,99	40,01	39,97	39,98	39,97	39,97	39,99	39,99	39,99
39,98	40,00	39,99	39,99	39,98	39,99	39,99	40,01	39,99
40,00	40,01	40,00	39,98	39,99	39,99	39,99	39,99	40,01

Estos datos deben describirse y analizarse, en tal sentido las técnicas de análisis exploratorio son muy útiles.

2.6. Límites de tolerancia para el control de las mediciones

Para dar información vital necesaria para resolver problemas de ingeniería, se necesita reunir datos, esos datos se deben describir y analizar para producir información resumida. Con frecuencia, las representaciones gráficas pueden ser el medio más eficaz de comunicar esa información. Para analizar los datos obtenidos durante las mediciones del diámetro de la pieza se aplicará una de estas técnicas gráficas, se presentará en este apartado los aspectos analíticos de la técnica del diagrama para control de mediciones.

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectuó aplicando las expresiones matemáticas que se referencian a continuación, (Hernández, 1986).

$$X_{,máx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \tag{2.1}$$

$$X_{,mín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \tag{2.2}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \tag{2.3}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \tag{2.4}$$

Donde:

\bar{X} - Es la media aritmética del diámetro ($D_{,med}$), en mm.

$X_{,máx}$ - Es el límite superior de tolerancia para el diámetro ($D_{,máx}$), en mm.



$X_{,mín}$ – Es el límite inferior de tolerancia para el diámetro ($D_{,mín}$), en mm.

t- Es el estadístico de la distribución probabilística de Student.

S- Es la desviación típica.

n – Es el total de observaciones.

α - Es el nivel de significancia.

Por tanto aplicando la definición de tolerancia dada por Casanova (1986); la tolerancia de las probetas antes de la deformación se determina en este caso como:

$$T = [X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}] \quad (2.5)$$

2.7. Diseño del experimento

Es importante que el diseño sea lo más simple, pero además, existe el problema de que la investigación se debe conducir de forma tal que sea económica y eficiente, se debe hacer todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental (Hendry ,1973; Hlavacek, 1978; Westerberg, 1980; Chacín, 2000 y Hernández ,1997).

Para la confirmación de la hipótesis científica se escogió un diseño de experimento factorial completo (Leyva, 2011), 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. 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 AISI 1045, 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.

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



2.7.1. Fuerza ejercida por la herramienta deformante (P)

La fuerza 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, Es una influencia a considerar en el comportamiento de la tolerancia dimensional de la pieza. Se aplicará una carga de 500 N. La carga se establece en correspondencia con el régimen de deformación y acabado que se desea tener.

Teniendo en cuenta las aplicaciones industriales del acero, pudo haberse seleccionado un nivel superior pero teniendo en cuenta las condiciones concretas de experimentación se escogió el nivel de 500N. El Axir (2000), investiga con un material no ferroso como el aluminio comercialmente puro del tipo 2219-T8751, propone 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 a cinco 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 de una experimentación previa se comprobó que para cargas de 400 N y avance de 0,25 mm/rev, la dureza y la profundidad de la capa obtenida en aceros al carbono estuvo en el orden de los HV 200 y la profundidad de la capa endurecida en 0,2 mm, valores indicativos de presencia de endurecimiento por deformación plástica.

También se consideraron los trabajos realizados por Díaz (2006), se estiman las recomendaciones y se adecua el diseño de experimento, se pretende en nuestro trabajo determinar el comportamiento de la tolerancia de piezas cilíndricas construidas de acero AISI 1045 en las referidas condiciones.

2.7.2. Número de revoluciones del husillo (n)

El número de revoluciones es una variable cuantitativa que se utilizará en los niveles de 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 permite evaluar el comportamiento de la pieza en todos sus puntos, pues cualquier punto tiene la misma velocidad de rotación, con este parámetro se logra que la deformación a obtener sea homogénea en toda la longitud y diámetro.



2.7.3. Avance de la herramienta (S)

El avance es una variable que define el comportamiento de la capa deformada, está relacionado con los valores de dureza y tolerancia a mayor avance puede que haya mayor dureza en la capa deformada y menos profundidad en la misma. Este se utilizará en los niveles de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev.

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 y Majmutov (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.

2.7.4. Tolerancia dimensional

La tolerancia dimensional es la variable cuantitativa que se medirá en este caso al concluir la deformación plástica superficial. 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 tres valores característicos de cada una de las muestras (probetas).

La expresión empleada para el cálculo de la tolerancia es la 2.5. Esto implica tener que utilizar la ecuación 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4; puesto que esta depende directamente de estas últimas.

Actualmente se admite que la tolerancia es uno de los parámetros que se tiene en cuenta a la hora de fabricación de las piezas (Hernández, 1986). Para valorar el comportamiento de esta, mediante el proceso de deformación plástica superficial por rodillo, se le introducen diferentes valores de número de revoluciones y avance a un mismo valor de fuerza a las probetas objetos de estudios.

La elección de cada uno de los niveles de las variables números de revoluciones y avance estará determinado por el mayor o menor grado de tolerancia que se quiere obtener en el material, o lo que es similar, por la mayor o menor homogeneidad en la estructura (Martínez, 1984).



2.7.5. Planificación del experimento

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.

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. 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros de entrada del experimento

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Min.	Medio	Máx.
Fuerza (N)	P	500	500	500
Número de revoluciones (rev/min)	n	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0,075	0,125	0,25
Diámetro de la probeta (mm)	40			
Diámetro del rodillo (mm)	50			

El número de experimentos diferentes cuando intervienen “k” factores con tres niveles cada uno (-1; 0 y +1), se determina con un arreglo de la función exponencial (Miller, 2005).

$$N = 3^k$$

Donde:

N = Número de experimentos diferentes

K = Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que $k = 2$ luego, el número de experimento diferente es:

$$N = 3^2 = 9$$

Por otra parte la cantidad de réplica necesaria a realizar para que los resultados sean representativos del proceso objeto de estudio, puede determinarse bajo la concepción de un muestreo aleatorio simple. En este caso se considera que cada elemento de la población tiene la



misma probabilidad de ser seleccionado, además este trabajo se realiza sin el conocimiento del tamaño de la población de referencia, independiente del tiempo y no se considera la variable costo; esto hace más fluido el trabajo de obtención de datos.

La expresión matemática para la determinación del tamaño de la muestra en un muestreo aleatorio simple es según Miller (2005) la que se muestra a continuación:

$$n = \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right)^2 \quad (2.6)$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ – Es el estadístico de la distribución normal,

α – Es el nivel de significancia,

σ – Es la desviación típica poblacional y

E- Es el error máximo de estimación.

Para el cálculo del tamaño de la muestra o número de réplicas, se considerará las siguientes aproximaciones,

$$\sigma = E \quad \alpha = 0,1 \quad \text{Entonces} \quad Z_{\alpha/2} = 1,645$$

Es decir un error máximo de estimación (E) igual a la desviación típica (σ) y un nivel de confianza del 90% Miller (2005), se decide:

$$n = \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right)^2 = (1,645)^2 = 3$$

Entonces el número total de experimento puede determinarse como el producto de la cantidad de experimentos diferentes a realizar por el número de réplicas. Dicha relación puede expresarse matemáticamente como sigue:

$$TE = N \cdot n$$

Donde:

TE- Es la cantidad de experimento a realizar.

En total, para el desarrollo de los experimentos se utilizarán 27 probetas deformada por rodadura (probetas marcadas todas del 1 al 9), las caras de las misma fueron marcado con la letra T seguido del número de la probeta y la letra a para la primera repetición la letra b para la segunda repetición



y la letra c para la tercera repetición. La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla. 2.7

Tabla 2.7 Matriz de planificación del experimento

Niveles	Entradas			Salida		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	T(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	-1	0	-1	T1a	T1b	T1c
2	-1	0	0	T2a	T2b	T2c
3	-1	0	1	T3a	T3b	T3c
4	0	0	-1	T4a	T4b	T4c
5	0	0	0	T5a	T5b	T5c
6	0	0	1	T6a	T6b	T6c
7	1	0	-1	T7a	T7b	T7c
8	1	0	0	T8a	T8b	T8c
9	1	0	1	T9a	T9b	T9c

Una vez definidas las variables y sus niveles, se procede a la realización de los experimentos de aplicación de rodadura en las probetas.

2.8. Análisis de varianza

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.

El análisis de variancia se realiza a partir de los datos contenidos en la matriz de la siguiente base de datos. Este se efectúa con el objetivo de determinar la influencia en la variable de salida que puede tener la variación de las variables de entrada, con arreglo al procedimiento.



Tabla 2.8. Matriz de planificación del experimento

Niveles	Respuestas			Salidas		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	T(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	0,016	0,015	0,016
2	27	500	0,125	0,018	0,013	0,011
3	27	500	0,25	0,017	0,016	0,017
4	54	500	0,075	0,065	0,063	0,062
5	54	500	0,125	0,023	0,023	0,021
6	54	500	0,25	0,013	0,015	0,013
7	110	500	0,075	0,095	0,094	0,096
8	110	500	0,125	0,033	0,033	0,033
9	110	500	0,25	0,021	0,020	0,022

Pasos del análisis de varianza

1. Hipótesis

- Hipótesis nula (H_0):
 - Al repetir el experimento no varía la tolerancia de la pieza
 - Al variar el número de revoluciones no varía la tolerancia de la pieza
 - Al variar el avance no varía la tolerancia de la pieza
 - Al variar el número de revoluciones y el avance simultáneamente no varía la tolerancia de la pieza
- Hipótesis alternativa (H_1):

Lo contrario de la hipotes nula.

2. Nivel de significancia: $\alpha=0,1$

Esto es una medida del error que se admite en la estimación de las cantidades que se valoran. Estable límite a la probabilidad del fallo. Es llamado también error de tipo I.

Se escogió el nivel de significancia de 0,1 para la realización de este cálculo puesto que no se tiene una amplia certeza de que los valores de la variable objeto de medición estén dentro de la estimación relizada; condicionado esto por el tamaño de la muestra seleccionada y el grado de desgaste del parque tecnológico. Esto permite estrechar el ancho de la banda de tolerancia.



3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula:

La hipótesis nula se rechaza si F excede a F_{α} , donde F_{α} se puede obtener en la tabla de la distribución de Fisher (Miller, 2005) con $K - 1$ y $K(n - 1)$ grados de libertad. En este caso K es la cantidad de tratamiento y n es el tamaño de la muestra por tratamiento.

4. Cálculo del estadístico de la prueba (F)

a) Factor de corrección (C)

$$C = \frac{(\sum T_i^2)^2}{k \cdot n} \quad (2.7)$$

Donde:

T_i – Es el gran total de las kn observaciones

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

$$SS(Tr) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k T_i^2 - C \quad (2.8)$$

T_i – Es el número total de n observaciones en i -ésima muestra

e) Suma de cuadrado para el error (SSE)

$$SSE = SST - SS(Tr) \quad (2.9)$$

SST – Es la suma de cuadrado total

b) Suma total de cuadrado (SST)

$$SST = \sum_{i=1}^k \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - C \quad (2.10)$$

Y_{ij} – Es la variable que adopta el valor de cada observación.

En la tabla 2.9 se aprecia el planteamiento de la tabla del resumen de análisis de varianza completo, del experimento de la deformación plástica superficial por rodillo simple.



Tabla 2.9. Análisis de la varianza para T

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado promedio	Fisher
Tratamientos	K-1	SS(Tr)	$MS(Tr) = \frac{SS(Tr)}{(K-1)}$	$\frac{MS(Tr)}{MSE}$
Error	K(n-1)	SSE	$MSE = \frac{SSE}{K \cdot (n-1)}$	
Total	N(K-1)			

El cálculo del estadístico de la prueba se realiza con el empleo del programa Microsoft Excel 2003. Esto permite aumentar la eficiencia del trabajo pues puede mejorar la productividad y la precisión de los resultados.

5. Decisión:

La decisión se toma sobre la base del resultado obtenido en el cálculo y la condición de rechazo definida como criterio, cabe advertir que la decisión tomada está sustentada en el nivel de significancia que precede al criterio.

2.9. 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. El método de mínimo cuadrado es el fundamento matemático del ajuste de curva por medio de la regresión.

El método de mínimo cuadrado se expresa por el siguiente sistema de ecuaciones normales, que tienen muchas propiedades convenientes (Miller, 2005).

Ecuaciones normales del método.

$$\sum_{i=1}^n Y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i \tag{2.11}$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2$$

Donde:

X_i – Es la variable que adquiere los valores de la relación entre el número de revoluciones y el avance (n/S).



Y_i – Es la variable que adquiere los valores de la tolerancia dimensional (T), en mm.

En este conjunto de ecuaciones lineales son las incógnitas a y b, y da los valores de la a y b para la línea con el mejor ajuste a un conjunto de datos apareados de acuerdo con el criterio de mínimos cuadrados.

Este sistema de ecuaciones tiene como solución las siguientes expresiones para el cálculo de a y b.

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X} \quad (2.12)$$

Donde:

\bar{Y} – Es el promedio aritmético de las observaciones referidas a la ordenada.

y

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.13)$$

Notaciones especiales:

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n} \quad (2.14)$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (2.15)$$

Para obtener los modelos matemáticos se desarrolló el tratamiento estadístico de los datos, estos se realizaron con la utilización del tabulador Microsoft Excel 2003.

2.10. Procedimiento para la determinación del acabado superficial

Existen múltiples problemas en los cuales, en vez de estimar el valor de un parámetro, debemos decidir si una afirmación relativa a un parámetro es verdadera o falsa; esto es debemos probar hipótesis relativa a un parámetro. Por ejemplo, en un trabajo de control de calidad una muestra aleatoria puede servir para determinar el hecho de que la media del proceso (con base en una clase determinada de medición) ha permanecido inalterable o bien si ha cambiado a tal grado que el proceso esté fuera de control y tenga que hacerse ajuste.

En este trabajo se trata de determinar los valores que caracterizan el acabado superficial de piezas cilíndricas elaboradas de acero AISI 1045, cuando estas son sometidas al proceso de deformación plástica superficial con rodillo simple. Para la estimación de dicho valores se toma como



fundamento el conocimiento a priori que se tiene del proceso y se emplea el concepto de nivel de significancia.

Se conoce que durante el proceso de obtención de un producto siempre van a estar presentes errores tanto del tipo sistemático como del tipo aleatorio. Los errores deben ser analizados y debe procurarse que los resultados estén libres de estos o al menos debe indicarse el grado de error que se precisa. Los errores del tipo aleatorio son difíciles de determinar y por ende de controlar, lo que ha dado origen a un área del conocimiento que se identifica con el nombre de la estimación bayesiana.

Toda predicción que se haga de algún suceso o fenómeno debe partir del conocimiento a priori que se tenga de este. En este trabajo se considera los resultados indicados relativos a las condiciones en que se realizó el experimento; se determina el comportamiento de la tolerancia según el diseño estadístico experimental, aplicando la técnica de análisis de variancia y la regresión para un nivel de confianza del 90 %. Luego se pasa a considerar un nivel de confianza superior (95 %) para tratar de reducir convenientemente las variaciones de la tolerancia a un valor puntual; esto se fundamenta en el propio conocimiento que se ha adquirido del proceso.

El procedimiento estadístico a desarrollar en este caso incluye básicamente los siguientes aspectos: aseguramiento de la condición de normalidad de las observaciones del parámetro de interés, prueba de hipótesis para el valor esperado, determinación de la rugosidad de las probetas, determinación del error de forma de las probetas y determinación del acabado superficial de los pasadores.

2.10.1. Aseguramiento de la condición de normalidad

El procedimiento estadístico usado necesita que la distribución de la probabilidad sea casi normal. En este caso, se necesita comprobar si el conjunto de datos está generado por una variable aleatoria distribuida normalmente. Cabe destacar que la distribución normal puede servir para modelar la variación de algunas cantidades.

En el control estadístico de la calidad se emplean generalmente normas técnicas que establecen el procedimiento a seguir para la valoración de los valores sospechosos y su eliminación en el caso de que estos resulten anormales.



En general y aplicando las propiedades de la curva de distribuciones simétricas, pueden detectarse y eliminarse los valores anormales procediendo de la forma siguiente (Hernández, 1886):

- 1.- Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan \bar{X} y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).
- 2.- Se establece el intervalo dado por la ecuación $\bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$ y se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido.
- 3.- Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar como es lógico, los valores anormales.

El nivel de confianza para al aseguramiento de la condición de normalidad se escogió para este trabajo de un 95 % y el tamaño de la muestra a considerar es 9.

2.10.2. Prueba de hipótesis

Los pasos metodológicos para efectuar la prueba de hipótesis relativa a la comparación entre el valor de la tolerancia de proyecto y la obtenida experimentalmente, se basa en el criterio de student, puesto que se trata de una muestra pequeña. Este procedimiento se muestra a continuación.

1. Hipótesis

- Hipótesis nula (H_0):

La tolerancia dimensional obtenida en la experimentación es igual a la proyectada, ($\mu = 0,016$)

- Hipótesis alternativa (H_1):

La tolerancia dimensional obtenida en la experimentación no es igual a la proyectada, ($\mu \neq 0,016$)

2. Nivel de significancia: $\alpha=0,05$

Esto es indicativo del error que se admite en la estimación de las cantidades que se valoran. Se escogió el nivel de significancia de 0,05 para la realización de este cálculo puesto que se tiene mayor certeza de que los valores de la variable objeto de medición estén dentro de la estimación realizada; el tamaño de la muestra seleccionada es mayor.

3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula:

La hipótesis nula se rechaza si $t < - 2,306$ ó $t > 2,306$ esto es el valor de $t_{0,025}$ con $v = n - 1 = 8$ grados de libertad y t se determina en este caso a través de la siguiente fórmula:



$$t = \frac{\mu - \bar{X}}{S / \sqrt{n}} \quad (2.16)$$

Donde:

μ - Es la tolerancia de proyecto, en μ_m

\bar{X} - Es la tolerancia media de la experimentación, en μ_m

n – Es el tamaño de la muestra

4. Cálculo:

El cálculo del estadístico de student se efectúa con el empleo del programa Microsoft Excel 2003. Esto propicia el aumento de la eficiencia del trabajo pues puede mejorar la productividad y la precisión de los resultados.

5. Decisión:

El planteamiento de la decisión se realiza sobre la base del resultado obtenido en el cálculo y la condición de rechazo definida como criterio, cabe recalcar que la decisión tomada está fundamentada en el nivel de significancia que precede al criterio.

2.10.3. Determinación de la rugosidad de las probetas

Entre la tolerancia de la dimensión y la rugosidad superficial se han establecidos relaciones (Rodríguez, 1986). Las relaciones establecidas se muestran en la gráfica de la Figura 7, Anexo 8

Se puede apreciar en dicha representación que conocido el valor de la tolerancia característico para una correspondiente superficie, se puede determinar por medio del auxilio de la gráfica el correspondiente valor de rugosidad mínimo.

2.10.4. Determinación del error de forma de las probetas

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, 1986 y Özel *et al.* 2005).

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.

$$T_f = 0,6 \cdot T_D \text{ Para calidad normal (A)} \quad (2.17)$$

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

$$T_f = 0,4 \cdot T_D \text{ Para calidad elevada (B)} \quad (2.18)$$

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

$$T_f = 0,25 \cdot T_D \text{ Para calidad alta (C)} \quad (2.19)$$

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.

2.10.5. Determinación del acabado superficial de los pasadores

Para la determinación del acabado superficial de los pasadores se hace uso de experiencia generalizada de los procesos productivos y análisis estadístico de datos experimentales, que permitieron obtener expresiones que relacionan a la unidad de tolerancia, al diámetro de la piezas y define lo que se conoce con el IT (tolerancia fundamental) y que sirve de base para determinar la tolerancia.

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.

Los valores de la tolerancia para cierta superficie ha sido normalizado por el sistema ISA y contemplado en la norma cubana NC 16 – 30: 80. Estos valores pueden verse en la tabla 1 del **Anexo 9**.

Para determinar la tolerancia que se corresponde con un cierto grado de exactitud y un determinado diámetro se debe emplear la siguiente expresión (Casanova, 1986).

$$T = [\Delta_s - \Delta_i] \quad (2.20)$$

Donde: Δ_s – Es la desviación superior, en μm y Δ_i – Es la desviación inferior para el eje, en μm



2.11. Conclusiones del capítulo 2

- El desarrollo de las ecuaciones citadas permite caracterizar el comportamiento del método de deformación plástica superficial por rodadura, en función del carácter de deformación de los dos cuerpos en contacto, mediante la estimación de la tolerancia en el acero AISI 1045 cuando es sometido a este proceso de deformación plástica superficial con rodillos.
- Se describieron los métodos, procedimientos y condiciones experimentales, que fundamentan las propiedades a investigar para argumentar la variación de la tolerancia de los pasadores de la cuchara mecánica de la grúa de jaiba 215 – GRL – 101 A y B de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

CAPÍTULO 3



CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, los modelos estadísticos que describen las regularidades del comportamiento de la tolerancia del acero AISI 1045 sometido a la acción de las cargas por rodadura, que genera un rodillo al trasladarse sobre una pieza simétrica rotativa, en las condiciones descritas en los experimentos. Finalmente, se realiza una evaluación del procedimiento tecnológico para la determinación de la tolerancia en relación con los parámetros fundamentales del proceso tecnológico.

El objetivo del capítulo:

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

3.2. Análisis del diagrama para control de mediciones

Cuando la variabilidad de un proceso de producción se reduce a la variación aleatoria, se dice que el proceso se encuentra en un estado de control estadístico. Tal estado casi siempre se logra encontrando y eliminando los problemas que causan otra clase de variación, denominada variación asignable, que puede deberse a operadores muy mal entrenado, a materia prima de pésimo calidad, maquinaria con instalaciones defectuosas, a pieza mecánica desgatadas y a otras causas semejante. Como es muy raro que los procesos de fabricación estén exentos de estas clase de problema, es importante contar con algún métodos sistemático para detectar desviaciones seria de un estado de control estadístico cuando ocurre o si es posible ante de que ocurra. Esto es la principal razón por lo cual se utilizan los diagrama de control o carta de control. La habilidad para leer el diagrama de control y determinar a partir de ellos exactamente que acción correctiva deberían emprenderse requiere experiencia y juicio muy desarrollado. Un ingeniero de control de la calidad no solo debe entender el fundamento estadístico de su materia sino también tener mucha familiaridad con el proceso mismo.

En la industria se acostumbra valerse de límites tres sigma obtenido al sustituir 3 por $Z_{\alpha/2}$. Con los límites tres sigmas se tiene una gran confianza de que el proceso no será declarado fuera de control cuando en realidad esta bajo control. Esta sustitución es válida cuando la muestra se considera

grande; esto es mayor o igual que 30. Cuando la muestra es pequeña se sustituye el estadístico $Z_{\alpha/2}$ por el estadístico $t_{\alpha/2}$. La asignación del valor 3 para el estadístico $Z_{\alpha/2}$ significa asumir un nivel de confianza del 99,74 % para la estimación del parámetro que se valora.

A continuación se muestra en la figura 3.1 el diagrama de control para mediciones del diámetro de las probetas antes de la deformación. Cabe indicar que para este diagrama se utilizó la ecuación 2.5. del capítulo 2.

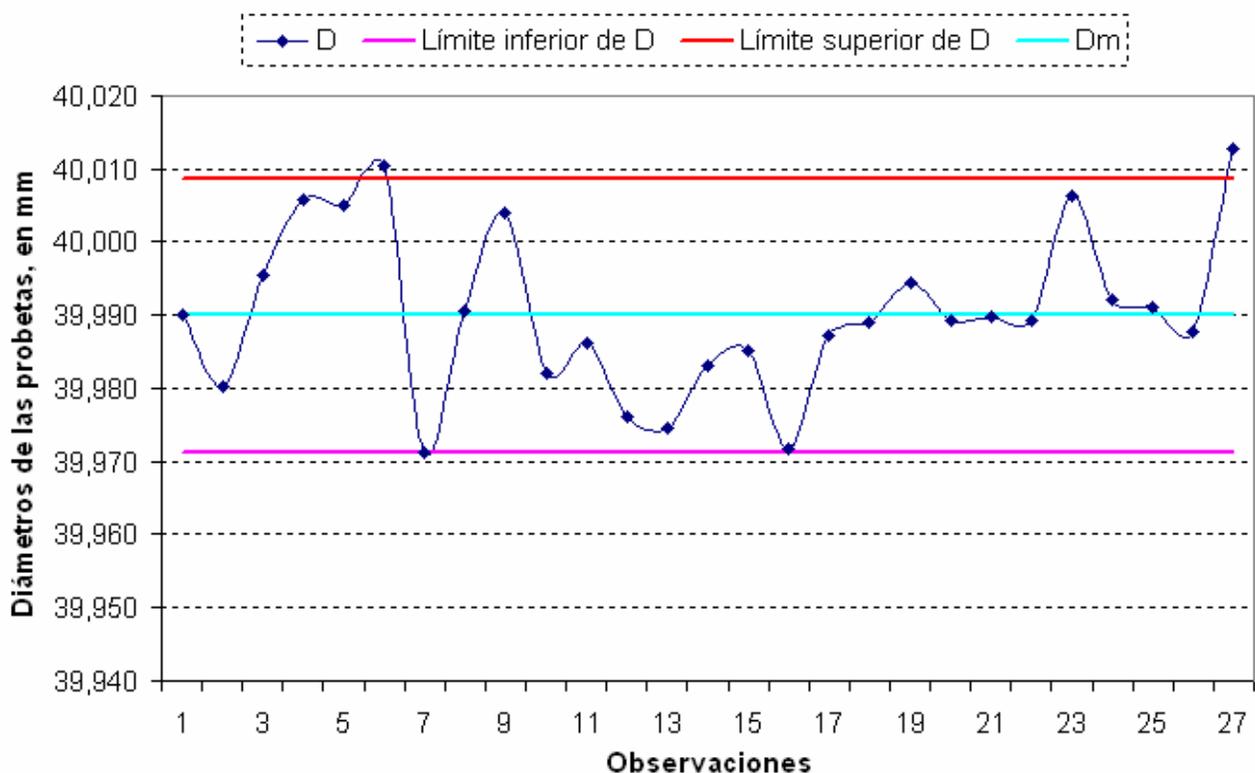


Figura 3.1. Diagrama para control de mediciones relativas al diámetro de la probeta

La inspección de la figura anterior revela que el proceso está bajo control estadístico, ya que solo hay dos puntos fuera de los límites de control; estos valores están condicionados por el nivel de confianza especificada; el cual fue bajo (90 %). Por lo que no se requiere de un análisis minucioso de las causas que están provocando las variaciones del diámetro de la pieza. Además que la tolerancia de las 27 probetas es de $38 \mu m$.

Los límites de tolerancia para el diámetro de las probetas son: Límite inferior 39,970 mm y el Límite superior es de 40,010 mm; para un nivel de confianza del 90 % ($t_{0,05} = 1,706$ con $\nu = n - 1 = 27 - 1 = 26$ grados de libertad) y un valor promedio para el diámetro igual a 39,990 mm.

Esto significa que cada observación que se realice del diámetro de la pieza, bajo condiciones similares a las de el muestreo realizado, tiene una probabilidad del 90 % de que su valor este en este rango. En este caso se puede plantear que las probetas objetos de inspección poseen un buen acabado superficial y que se puede asumir con un nivel de confianza del 90% que el diámetro de estas es de 40 mm, puesto que este valor está comprendido dentro de la banda de tolerancia.

El ancho de la banda de tolerancia definido esta influenciado por el tamaño de la muestra seleccionado y el nivel de confianza especificado. Estos niveles se definen por tablas sobre la base de las posibilidades reales de la experimentación y el propósito del estudio, dada por la cantidad de piezas y las características del equipamiento tecnológico.

3.3. Análisis de la varianza

Se realizó el cálculo de la 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 del procedimiento que comprende desde la ecuación 2.6 a la 2.9 epígrafe 2.8 del capítulo 2. A continuación se refleja el análisis de comportamiento de la tolerancia en función del plan experimental.

Tabla 3.1. Resultado del cálculo de la variancia

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado promedio	Ficher calculado	Fisher
Repeticiones	5,35E-06	2	2,67E-06	0,003	2,538
Error	1,89E-02	24	7,88E-04		
Factor n	0,005	8	6,57E-04	0,865	2,038
Error	0,014	18	7,59E-04		
Factor S	0,009	2	4,354E-03	10,240	2,538
Error	0,010	24	4,252E-04		
Interacción nS	1,89E-02	8	2,36E-03	1157,320	2,038
Error	3,67E-05	18	2,04E-06		

Para repeticiones:

Puesto que $F = 0,003$ no es mayor que 2,538 la hipótesis nula no se rechaza al nivel de significancia del 0,1; en otras palabras al repetir el experimento no se ofrece diferencia significativa entre los



valores de la tolerancia; por lo que se puede plantear que el experimento se realizó bajo control estadístico.

Para efectos principales:

Puesto que $F = 0,865$ es menor que $2,038$ la hipótesis nula no se rechaza al nivel de significancia del $0,1$; en otras palabras al variar el número de revoluciones no varía la tolerancia de la pieza.

Por otra parte, debido a que $F = 10,240$ es mayor que $2,538$ la hipótesis nula se rechaza, al nivel de significancia del $0,1$; esto significa que al variar el avance varía la tolerancia dimensional de la pieza.

Para interacciones:

Puesto que $F = 1157,320$ es mayor que $2,038$ la hipótesis nula se rechaza al nivel de significancia del $0,1$; es decir al variar el número de revoluciones y el avance simultáneamente varía la tolerancia dimensional de la pieza.

La determinación referida al hecho de que al repetir el experimento no se indica diferencia significativa permite plantear la media de las respectivas réplicas como valor representativo del conjunto. Esta realidad se muestra en la tabla 3.2; que se expone a continuación.

Tabla: 3.2 Tolerancia para las probetas de cada experimento

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T(mm)	0,016	0,014	0,01	0,063	0,022	0,014	0,095	0,033	0,021

Además los resultados del análisis de variancia indican que es razonable tratar de determinar modelos matemáticos que establezcan regularidades entre avance y la tolerancia y entre la tolerancia en relación con el número de revoluciones y el avance de conjunto, no así entre la tolerancia y el número de revoluciones simplemente. Esto permite orientar el trabajo de ajuste de curva.

3.4. Análisis de la regresión

A partir de la base de datos del experimento fue posible obtener el comportamiento de la 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 las muestras de acero AISI 1045. Dicho análisis se realizó atendiendo a los

principios enunciados en el epígrafe 2.9 del capítulo 2. Las variables independientes fueron avance “s” y número de revoluciones “n” las cuales están relacionadas con los valores de la tolerancia.

La salida del tratamiento estadístico de los datos 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:

$$T = 6,064 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{n}{S}\right) \tag{3.1}$$

Donde:

n - números de revoluciones; rev/min y

S - avance; mm/rev

Los resultados experimentales fueron procesados por el análisis de regresión lineal aplicando el modelo lineal generalizado. En la figura 3.2, se indica el análisis realizado de la regresión para todas las variables.

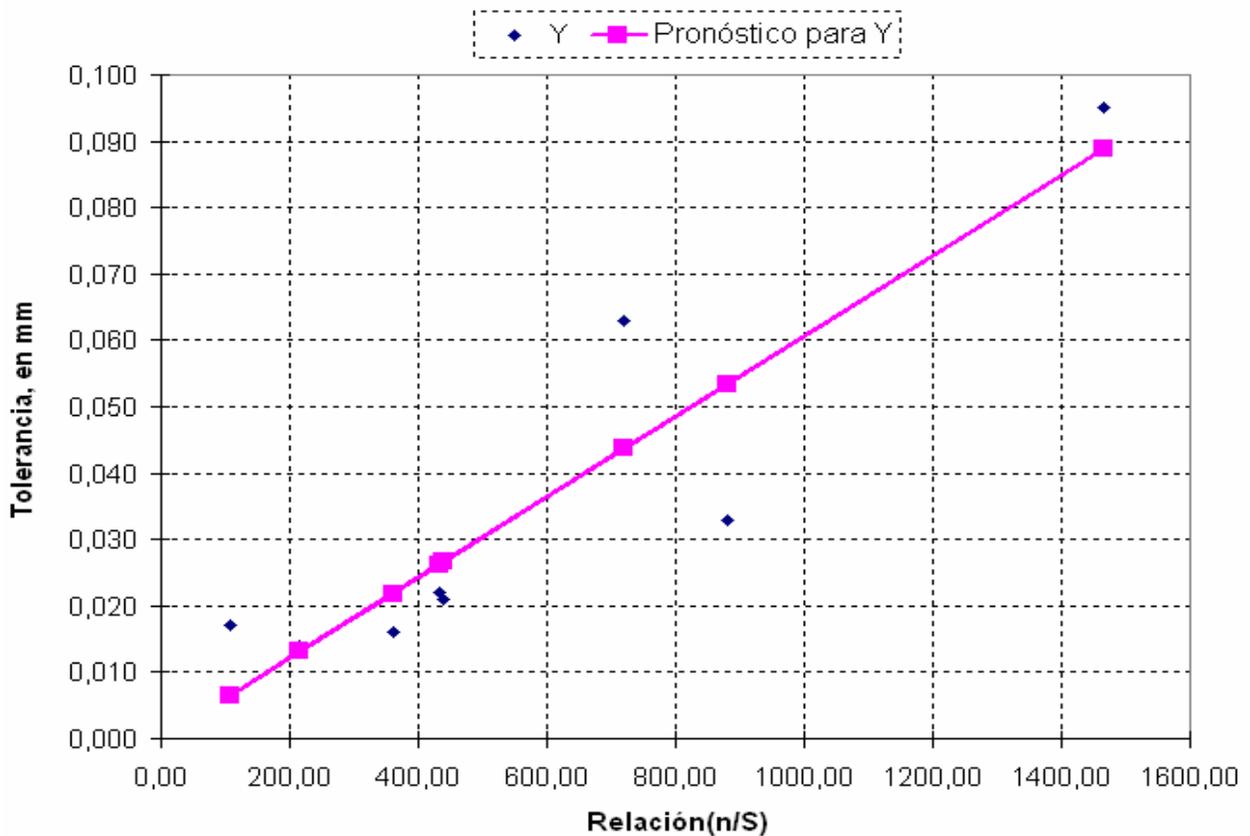


Figura 3.2. Gráfico de la línea ajustada



La ecuación 3.1 cumple todas las pruebas realizada para su validación; esto se evidencia en el hecho que el Ficher de cálculo adquiere el valor de 41,213 y el critico 3,604E-04, además la probabilidad para el coeficiente ajustado es de 4,703E-06 (menor que el nivel de significancia, 0,1)

Las variables muestran que existe una alta relación entre ellas pues el coeficiente de correlación es de 0,92; 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 (0,01), con una alta aproximación a la tendencia real que debe tener la curva.

Los resultados expuestos muestran unas series de regularidades conforme aumenta el avance S , indica 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 las variables n y S , son significativas en el comportamiento de la tolerancia durante el proceso de deformación plástica superficial empleando rodillo en las piezas cilíndricas construida de acero AISI 1045.

La elevación de la tolerancia con la disminución del avance se puede explicar por el hecho que al disminuir dicho parámetro es como que la energía de la deformación se concentra en un menor área especifica 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.

3.4.1. Análisis de regresión de la tolerancia en función del avance

Es adecuado mejorar la explicación del efecto significativo de las variables n y S sobre la tolerancia, por lo cual se procede a separar los efectos principales de la interacción. El gráfico 3.3 muestra el comportamiento de las curvas al plotear cada una de las variables teniendo en cuenta sus niveles, de acuerdo con la matriz del diseño del experimento descrito en el epígrafe 2.8, tabla 2.7.

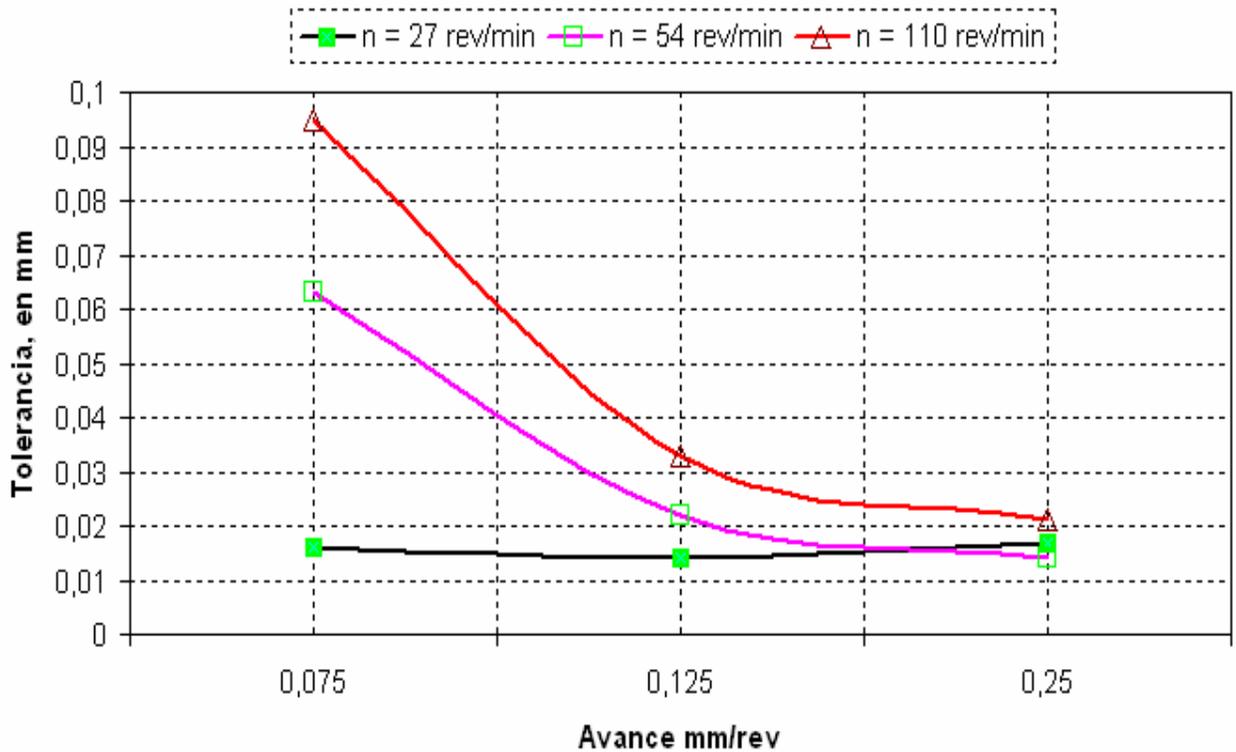


Figura 3.3. Comportamiento de la tolerancia con relación a las variables

Se observa que en el acero AISI 1045 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. Se tomó 3 series de combinaciones.

La primera serie de combinación:

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

La ecuación del 1er modelo es:

$$T = 0,0025 \cdot S^2 - 0,0095 \cdot S + 0,023 \tag{3.2}$$

$$R = 0,999$$



La segunda serie de combinación:

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

La ecuación del 2do modelo es:

$$T = 0,0165 \cdot S^{-1,385} \quad (3.3)$$

$$R = 0,997$$

La tercera serie de combinación:

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

La ecuación del 3er modelo es:

$$T = 0,093 \cdot S^{-1,390} \quad (3.4)$$

$$R = 0,997$$

Se puede apreciar que los modelos matemáticos (ecuación 3.2, 3.3 y 3.4) obtenidos presentan un coeficiente de correlación alto; indicando que con este ajuste se puede explicar más del 99 % de las variaciones observadas de la tolerancia en relación a las variables independientes n y S.

3.5. Análisis del comportamiento de la tolerancia en relación a la dureza y a la profundidad de endurecimiento

En el capítulo 1 se planteó que Negret (2010) realiza la determinación de modelos estadísticos – probabilísticos para el establecimiento del proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple, obtiene modelos lineales de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (n, P), no así en el caso de S que no es significativo en el comportamiento de la dureza. Por lo que este trabajo tiene varios puntos en común con el que se desarrolla. En esta sección se hace uso de resultados obtenidos en la medición de la dureza para relacionarlo con la tolerancia y la profundidad del endurecimiento, tal como se muestra en la figura 3.4.

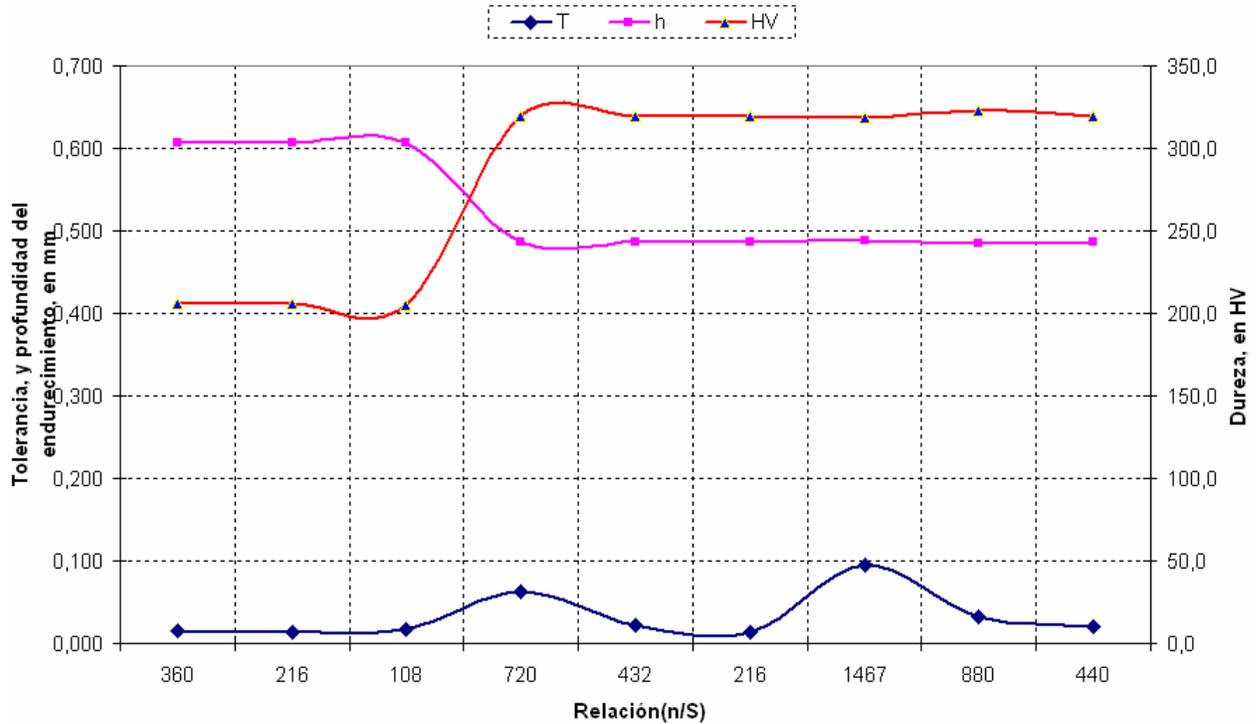


Figura 3.4. Comportamiento de la tolerancia en relación a la dureza, la profundidad el endurecimiento y la relación n/S

La figura 3.4 muestra el comportamiento de la tolerancia, la dureza y la profundidad del endurecimiento en relación con el número de revoluciones y el avance. La construcción de este gráfico refleja las medias obtenidas de las mediciones realizadas de la tolerancia y la dureza, y las recomendaciones dada por Korotcishe (1989) y Askeland (2011), respecto a la profundidad del endurecimiento y la relación entre la dureza Vicker y la tensión límite de elasticidad respectivamente.

Estos resultados son significativos puesto que se realizó la prueba de ficher para las réplicas de la dureza y la tolerancia indicándose que no existe diferencias significativas entre los resultados obtenidos o lo que es lo mismo decir: los experimentos se realizaron bajo control estadísticos. Esto permite tener un impacto visual del patrón global que muestran los datos y en consecuencia se percibe mejor las relaciones entre las variables involucradas.

El resultado expuesto indica que a medida que aumenta la tolerancia dimensional, el valor de dureza superficial y la profundidad del endurecimiento varían. Se puede plantear que la tolerancia en relación a la dureza es proporcional, no así en relación a la profundidad del endurecimiento en el

proceso de deformación plástica superficial empleando rodillo en las piezas cilíndricas construida de acero AISI 1045.

La relación entre la tolerancia y la dureza superficial puede entenderse mejor si se observa el comportamiento de la tolerancia indicado en el gráfico de las figuras 3.2 y 3.3 y se razona con el de la figura 3.5; que se muestra a continuación.

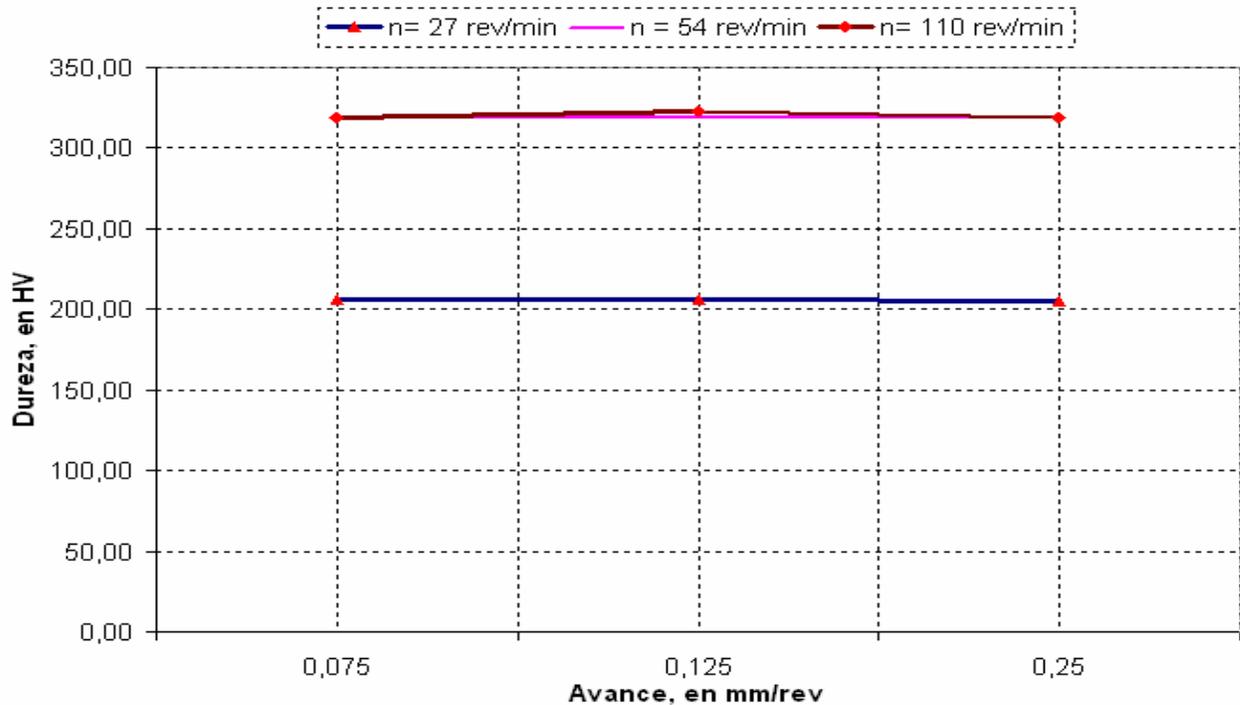


Figura 3.5. Comportamiento de la dureza en relación con el avance y el número de revoluciones

Los resultados analizados muestran que incrementa la dureza en la medida que aumenta el número de revoluciones. Además está condicionado por la aptitud del material para adquirir dureza por trabajo de deformación en frío. Se puede plantear que la variable n, es influyente para lograr el endurecimiento de acero AISI 1045 mediante la deformación plástica superficial empleando rodillo.

Además del análisis efectuado se infiere que para obtener menor tolerancia se puede emplear avances superiores a 0,25 mm/rev y esto no implicaría una afectación apreciable en los valores de dureza, puesto que se evidencia que al variar el avance hay tendencia a permanecer constante la dureza. También se percibe que el incremento del número de revoluciones por encima de 54 rev/min no provoca incremento de dureza.

Por otra parte cabe indicar la relación entre la tolerancia y la profundidad del endurecimiento puesto que esto está muy ligado a la durabilidad del elemento mecánico. Se debe plantear que no solo basta con lograr un nivel de tolerancia especificada ni un cierto nivel de dureza superficial en el material de la pieza tratada, sino es necesario conocer el grado de profundidad logrado en el endurecimiento de la pieza y más que eso la manera de controlarlo y mejorarlo, aunque sea dentro de un cierto rango.

La relación entre la tolerancia y la profundidad del endurecimiento puede entenderse procediendo similar a como se hizo para mostrar la dependencia entre la tolerancia y la dureza superficial. Se debe observar el comportamiento de la tolerancia indicado en el gráfico de las figuras 3.2 y 3.3 y razonar con el de la figura 3.6; que se muestra a continuación.

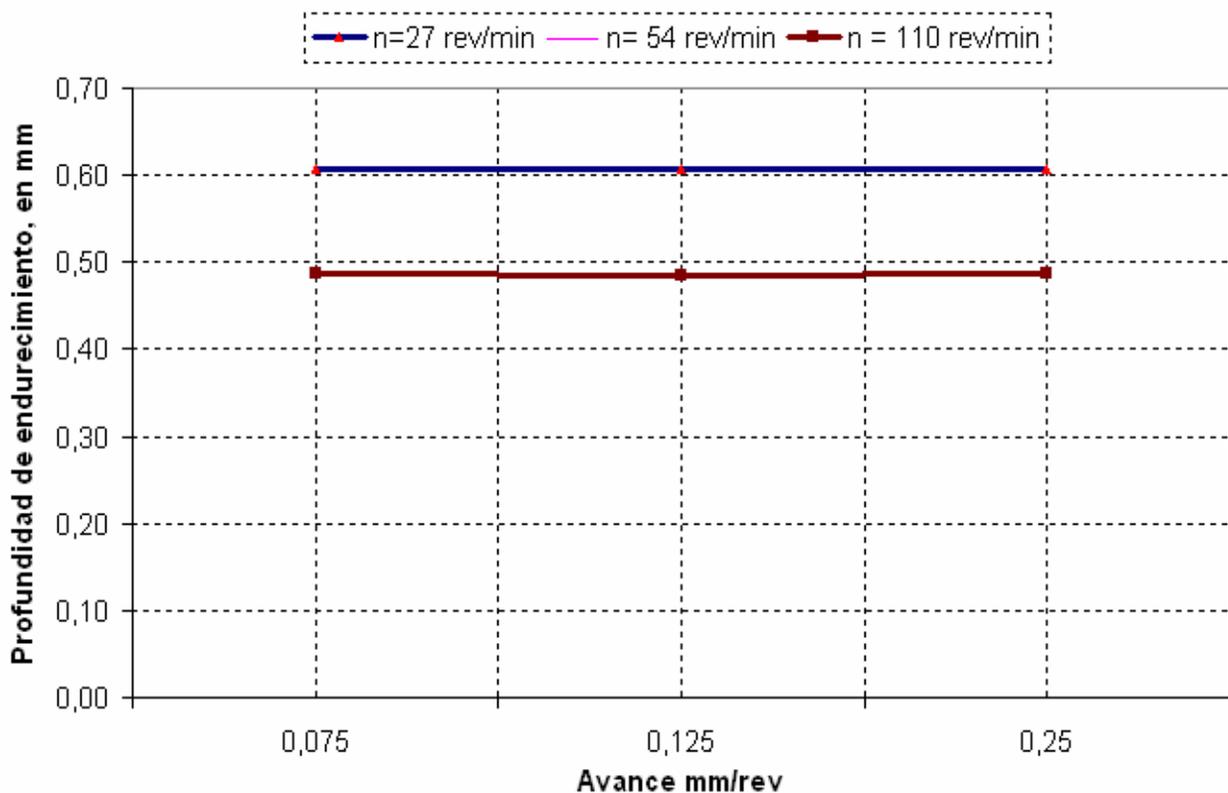


Figura 3.6. Comportamiento de la profundidad del endurecimiento en relación con el avance y el número de revoluciones

El resultado mostrado indica que a medida que aumenta la tolerancia dimensional, el valor de de la profundidad del endurecimiento disminuye. Se puede plantear que la tolerancia en relación a la profundidad del endurecimiento es inversamente proporcional, en el proceso de deformación plástica



superficial empleando rodillo en las piezas cilíndricas construida de acero AISI 1045; es decir a medida que aumenta la tolerancia la profundidad del endurecimiento tiende a disminuir.

El análisis efectuado permite referir que para obtener una mayor durabilidad del elemento mecánico; esto es expresado en una tolerancia que asegure el ajuste adecuado y una adecuada profundidad de endurecimiento superficial, se debe emplear avances superiores a 0,25 mm/rev y número de revoluciones por debajo de 54 rev/min. Además para incrementar la profundidad del endurecimiento se requiere de aplicar fuerza superiores a 500 N, en correspondencia con los modelos propuestos por Korotciske (1989) y Askeland (2011). Estos aspectos se deben considerar en el diseño de experimento para futuras investigaciones.

3.6. Análisis del acabado superficial

En este apartado se efectúa el análisis de la respuesta obtenido en la determinación del comportamiento de la tolerancia dimensional según el diseño experimental aplicado, a un nivel de significancia del 0,1. Se pasa a considerar un nivel de significancia inferior (0,05) con el propósito de reducir convenientemente las variaciones de las tolerancia al valor de proyecto. Este trabajo ofrece la posibilidad de emplear los resultados experimentales que han sido obtenidos por otros autores y que algunos de ellos están contenidos en normas con alcance internacional.

Se plantea como propósito a cumplir en el desarrollo de este procedimiento la determinación de la tolerancia de los 25 pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA 1.8/0.8.

3.6.1. Análisis de la condición de normalidad

El análisis de la condición de normalidad referido a los valores de la tolerancia obtenida en cada experimento indica que la variable muestra un comportamiento normal para un nivel de significancia del 0,05, según el criterio de student. Esto se aprecia en el hecho de que el rango de normalidad es de -0,032 mm a 0,098 mm, y todos los valores contenidos en la base de datos están incluidos en este intervalo.



3.6.2. Análisis de la prueba t

La prueba t realizada a los valores contenidos en la base de datos indica que se puede asumir con un nivel de confianza del 95 % de que la tolerancia obtenida en la experimentación coincide con la tolerancia proyectada. El planteamiento se sustenta en el hecho de que el estadístico de la prueba es de -1,821 y no es menor que - 2,306($t_{\alpha/2} = t_{0,025}$ con $\nu = n - 1 = 9 - 1 = 8$ grados de libertad).

Se infiere entonces que la tolerancia obtenida en cada experimento es de 0,016 mm, al nivel de confianza del 95 %.

3.6.3. Análisis de la rugosidad de las probetas

La rugosidad mínima de las probetas se determina por medio de la gráfica de la figura 7 del Anexo 8, que indica la relación entre la rugosidad mínima y la tolerancia de la dimensión. Es posible hallar un valor de rugosidad mínimo característico para cada experimento realizado pero ya se conoce del apartado anterior que se puede asumir un valor de tolerancia representativo para todos los experimento; según la precisión especificada, por lo que se escogerá este valor para operar en la referida gráfica.

La rugosidad mínima que se corresponde a una tolerancia de 0,016 mm es de aproximadamente 2,5 μm . Esto es sin entrar en análisis más complejo que implique una interpolación entre los resultados posibles.

3.6.4. Análisis del error de forma de las probetas

El error de forma total para las superficies de las probetas se determinan por medio de las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8, que expresan las relaciones recomendadas entre la tolerancia dimensional y el error de forma en función del grado de precisión geométrica de la pieza.

Los errores de forma totales para la experimentación, relativo al valor proyecto, son 4 μm para la calidad alta (A), 4 μm para calidad elevada(B) y 10 μm para calidad normal(C).



3.6.5. Análisis del acabado superficial de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA CMA – 8.00/1.8

El acabado superficial de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA-8.00/1.8 se determina en este trabajo siguiendo la siguiente idea, primero se determina la tolerancia dimensional que puede obtenerse por medio del método de deformación plástica superficial con rodillo simple y posteriormente se utilizan las recomendaciones dadas por otros autores. Para la determinación de la tolerancia dimensional que es posible obtener con el método, se trabajó con probetas construidas a semejanza de los pasadores de menor diámetro de la cuchara, una vez caracterizada dicha tolerancia se aplicó lo expuesto en los epígrafes 2.10.3, 2.10.4 y 2.10.5. Los resultados obtenidos relativos al acabado superficial de los pasadores objetos de estudio se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Especificaciones del acabado superficial de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA–8.00/1.8

Diámetros de los pasadores	Cantidad	Tolerancias (μm)	Rugosidad (μm)	Errores de forma total(μm)		
				A	B	C
Ø 40 h6	8	16	2,5	4	6	10
Ø 45 h6	6	16	2,5	4	6	10
Ø 80 h6	8	19	2,5	5	8	11
Ø 140 h6	2	25	2,5	6	10	15
Ø 190 h6	1	29	5	7	12	17

Las especificaciones expuestas en la tabla anterior permiten establecer valores de referencia para el acabado superficial admisible de los pasadores. Estas definen el modo de acoplamiento entre el pasador correspondiente y el buje conjugado; tales especificaciones deben asegurar el ajuste deslizando de dichos pasadores con agujeros de especificación H7.

3.7. Aporte en la dimensión técnico económico

Los resultados obtenidos a partir del análisis del comportamiento de la variable tolerancia en relación con la dureza, la profundidad del endurecimiento, la rugosidad y el error de forma indica que es razonable desde el punto de vista técnico utilizar el método de deformación plástica superficial para el tratamiento de los pasadores de la cuchara mecánica tipo CMA 8.0/1.8 puesto que se obtiene los valores adecuados para los parámetros geométricos, según diseño (Plano de los pasadores) y la propiedad del material (dureza) es comparable con la posible de obtener por otros procedimientos alternativo, aunque la profundidad del endurecimiento se debe incrementar con vista a mejorar la durabilidad del elemento mecánico.

En la tabla 3.4 se muestra el resumen de información necesaria para la elaboración de tecnología para el tratamiento mecánico superficial de piezas cilíndricas elaboradas de acero AISI 1045.

Tabla 3.4. Información para la elaboración de tecnología por deformación plástica con rodillo simple

Material	Tratamiento	Propiedad
ACERO AISI 1045	Deformación plástica superficial por rodillo P = 500 N, n = 27 , 54 y 110 rev/min S = 0,0175 , 0,175 y 0,25 mm/rev Diámetro del rodillo 50 mm Diámetro de la pieza 40 mm	Tolerancia 0,016 mm Dureza superficial 205,30 ...323,00 HV Profundidad del endurecimiento 0,484 ...0,607 mm
Modelos		
P = 500 N	$T = 6,064 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{n}{S}\right)$	
	$T = 0,0025 \cdot S^2 - 0,0095 \cdot S + 0,023$	27 rev/min.
	$T = 0,0165 \cdot S^{-1,385}$	54 rev/min
	$T = 0,093 \cdot S^{-1,390}$	110 rev/min

Se puede apreciar que los valores de dureza que se obtienen mediante la aplicación del método de deformación plástica superficial con rodillo simple son comparables con los posibles de obtener mediante otros procedimientos, en especial con el temple y revenido (revenido a alta temperatura). Esto se puede complementar mediante la observación de la información contenida en la tabla 3.5.



Tabla 3.5. Información para la elaboración de tecnología por tratamiento térmico

Material	Tratamiento	Dureza
Acero AISI 1045	Temple y revenido(temple con revenido a alta temperatura)	202,21 ...300,03 HV
	Temple con calentamiento por corriente de alta frecuencia con una profundidad de la capa templada de 1,8 – 2,2 mm, revenido	421,20...652,86 HV
	Temple en aceite, revenido	315,90 ...421,20 HV
	Temple en agua o en solución alcalina	421,20... 526,50 HV

Fuente: Askeland (2011)

La valoración económica del proceso de deformación plástica superficial por rodadura se basa en el hecho de que este puede condicionar un funcionamiento más eficiente de la maquinaria en general, puesto que este puede presentarse como alternativa tecnológica para mejorar propiedades como dureza superficial y acabado superficial de las piezas, 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; aumentando su fiabilidad por tener mayor resistencia de las piezas.

El método de deformación plástica superficial con rodillo simple ofrece unas series de ventajas en el orden económico con relación a otros métodos de tratamiento de materiales, algunas de estas se refieren a continuación:

1. El empleo de este proceso conlleva bajos costos de operación y no se requiere para efectuar esta operación de operarios especializados. 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 (Bright Burnishing, 2005, Sugino Corporation ,2004 y 2005, Westerman, 1983).
2. Las diferentes piezas de estas herramientas 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 (Bright Burnishing, 2005).
3. Es un proceso ecológicamente más limpio, pues no se generan desperdicios, al no haber arranque de virutas, y se ahorra materia prima. Existe la posibilidad de evitar los tratamientos térmicos y termo-químicos disminuyendo así la contaminación del medio ambiente por la no-emisión de



gases. Se ahorra además energía eléctrica y otros recursos. Se disminuye también el nivel de ruido (Sugino Corporation, (2005), Westerman, (1983)).

4. Puede realizarse en máquinas herramienta convencional y en máquinas herramienta con control numérico (Bright Burnishing, (2005), Sugino Corporation, 2004, Surfing Tool, 2005, Westerman, 1983).

5. Según (Westerman, 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.

Además, están siendo reportados otros beneficios como:

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

La estimación de los costos de fabricación parte de la metodología del cálculo de 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, amparado por resolución conjunta No. 1/2005. 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 permite 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. En 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.

Con el propósito de revelar las ventajas en el orden técnico-económico que ofrece el tratar a los pasadores con el método de deformación plástica superficial con rodillo, se procedió a la comparación entre los costos de una pieza obtenida por deformación plástica superficial con rodillo y los de una obtenida mediante una variante tecnológica de tratamiento térmico. La valoración del estimado se realizó con un fondo anual de 286 días laborables. La metodología empleada y

consideraciones realizadas para la referencia de este resultado puede verse en Camejo (2008) y Fernández (2011).

3.7.1. Costo de la pieza tratada por deformación plástica superficial

Después de 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, es **\$ 45,47** (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. 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	7,30	1,5	10,95
Sierra Sinfín	0,58	1,5	0,87
Costo Energía			
Torno	$C_{\text{torno}} = 0,06.Ec = 0,657$	Costo Energía Eléctrica.	
Sierra Sinfín	$C_{\text{SS}} = 0,06.Ec = 0,05$	$Ce = C_t + C_{\text{SS}} = \$ 0,707$	
Costo Total			
$CT = Pp + Sb + Sc + Ss + Ce = \$ 45,47$			

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

Calculados los tiempos de cada operación, y teniendo en cuenta las incidencia de las diferentes máquinas y operarios, en la tabla 3.7 se puede apreciar la ficha del costo de fabricación de la pieza, cuyo valor estimado es de **\$ 87,89**.

Tabla 3.7. 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	$C_{\text{SS}} = 0,06.Ec = 0,05$	$Ce = C_t + C_{\text{SS}} + C_p + C_T + C_{\text{rev}} = \$ 8,53$	
Rectificadora	$C_R = 0,06.Ec = 0,06$		
Temple C_T	$C_H = 0,06.Ec = 5,67$	Costo Total	
Revenido C_{Rev}	$C_{\text{Rev}} = 0,06.Ec = 2,7$		
$CT = Pp + Sb + Sc + Ss + Ce = \$ 87,89$			

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
- Tratamiento térmico y rectificado: \$ 25165,14



3.7.3. Comparación de los costos por diferentes procedimientos

Se puede apreciar, que 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, indicándose 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 \$ 12212,2. Además hay que considerar que en los tratamientos térmicos, a medida que las piezas aumentan su masa y se incluyan tratamientos intermedios, aumenta el costo de fabricación.

3.8. Efectos en el orden social y ambiental

El proceso de maquinado 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 tratamientos térmicos empleado 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.

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.



3.9. Conclusiones del capítulo 3

- Se establecen las regularidades del comportamiento de la tolerancia del acero AISI 1045 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.
- Se determinó el acabado superficial de los pasadores de la cuchara mecánica CMA 8.0/1.8. Indicándose que es posible emplear el método propuesto para el tratamiento de las superficies de los pasadores de la cuchara mecánica CMA 8.0. /1.8, puesto que los valores obtenidos de acabados en la experimentación están en el orden de los 16 μm , que se corresponden con el nivel de acabado precisado en el plano del elemento mecánico y además se especifican valores del acabado superficial de referencia para los 5 grupos de diámetros diferentes.
- El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante la deformación plástica superficial por rodillo de piezas fabricadas de acero AISI 1045, es técnicamente factible y económicamente racional; puesto que la dureza superficial obtenida está en el rango de 205,30 ...323,00 HV, similar a la del tratamiento térmico que es de 202,21 ...300,03 HV, y la profundidad del endurecimiento es de 0,484 ...0,607 mm; además en un año de trabajo, el efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento por este método es de \$ 12952,94, y para el caso del tratamiento térmico la cifra es de \$ 25165,14, en igual período, lo que constituye un ahorro de \$ 12212,2.
- Sobre el método propuesto para el tratamiento de los pasadores mecánica CMA 8.0./1.8, se puede plantear que 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 GENERALES

- De la revisión bibliográfica efectuada se pudo determinar que con vista a elevar la eficiencia del proceso tecnológico de tratamiento mecánico superficial con rodillo simple y caracterizar el método, es necesario determinar la magnitud del acabado superficial del elemento mecánico.
- Los 4 modelos matemáticos propuestos son significativos para tenerlo en cuenta durante la proyección de tecnología de tratamiento mecánico superficial, puesto que estos describen la interacción entre las variables analizadas (T, n y S) y cumplen satisfactoriamente todas pruebas estadísticas para su validación.
- La determinación del acabado superficial de los pasadores de la cuchara mecánica CMA 8.0/1.8. indica que es posible emplear el método propuesto para el tratamiento de las superficies de los pasadores de la cuchara mecánica CMA 8.0. /1.8, puesto que los valores obtenidos de acabado en la experimentación están en el orden de los 16 μm , que se corresponden con el nivel de acabado precisado en el plano del elemento mecánico y además, se especifican valores del acabado superficial de referencia para los 5 grupos de diámetros diferentes.
- Se puede apreciar que los valores de dureza que se obtienen mediante la aplicación del método de deformación plástica superficial con rodillo simple son comparables con los posibles de obtener mediante otros procedimientos, en especial con el temple y revenido (revenido a alta temperatura). La dureza superficial obtenida por DPS está en el rango de 205,30...323,00 HV y la del tratamiento térmico referido es de 202,21...300,03 HV, aunque cabe señalar que la profundidad del endurecimiento es baja, de 0,484...0,607 mm.
- Se plantea que el procedimiento de deformación plástica superficial con rodillo es más económico y más limpio para mejorar las cualidades y las propiedades físico-mecánicas de las superficiales de las piezas, que el tratamiento térmico. Cabe señalar que bajo ciertas consideraciones se ofrece una ganancia relativa de \$ 12212,2.



RECOMENDACIONES

1. Emplear altos valores de avance en el proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple, para obtener menor tolerancia (mayor que 0,25 mm/rev).
2. Realizar el proceso de tratamiento mecánico superficial con rodillo simple en piezas cilíndrica con altos valores de números de revoluciones, para incrementar los valores de dureza (no mayor de 54 rev/min).
3. Considerar la posibilidad de aplicar fuerzas superiores a 500 N en el proceso de deformación plástica superficial con rodillo simple, para incrementar la profundidad del endurecimiento.
4. Realizar un análisis de las regularidades que se establecen entre los parámetros del proceso tecnológico de tratamiento por deformación plástica superficial con rodillo, para determinar modelos de corte teóricos con vista a incrementar el alcance de los resultados experimentales.
5. Considerar la posibilidad de cambiar el ajuste de los pasadores de la cuchara mecánica, del tipo deslizante H7/h6 por uno del tipo H11/h11, para facilitar el proceso de fabricación y medición de los parámetros geométricos de estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara, D., Comportamiento microestructural del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica superficial por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.
- Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición– microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas. 2002.
- Alvarez, E; A, G. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. 1999.
- Alcántara, D., Comportamiento del desgaste en pasadores de equipos de laboreo minero fabricado de acero AISI 1045. Trabajo de Diploma en opción al título de Master en electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.
- Askeland, R. Ciencia e ingeniería de materiales (6° edición). México, D.F: Cengage Learning. pp. 223-226. 2011
- Blais, H., Review of 20 years of range sensor development. Journal of Electronic Imaging, 13 (1) 231 – 243, 2004.
- Baker, M. Does chip formation minimize the energy Computational materials Science 33 (4) (2005), pp. 301 – 345.
- Bengton, U. Design requirements materials properties a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
- Box, G.; Hunter, W.; Hunter, J., Estadística para experimentadores. Editorial Reverté. Barcelona, 1989.
- Bright Burnishing Tools. “What is roller burnishing?”, India, Obtenido de la Red mundial el 3 de Mayo del 2005, <http://www.brightburnishingtools.com>.



- Belozarov, V.; Makhatilova, A.; Subbotina, V. Cyclic strength of parts with overlapping zones formed by roller burnishing. *Strength of Materials*. Translated from *Problem Prochnosti*, 38 (3) 144 – 148, 2006.
- Borges, W.; Valoración económica de los pasadores pertenecientes al tren de rodaje del buldózer KOMATSU D 85, E-12. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.
- Correa, M.; Ramírez, M.; Alique, J.; Rodríguez, C., Factores que Afectan el Acabado Superficial en los Procesos de Mecanizado: Técnicas de Análisis y Modelos, XXV Jornadas de Automática del Comité Español de Automática (CEA), Ciudad Real, España, Septiembre 8 – 10, 2004.
- Camejo, D., Cálculo de costo del proceso de deformación plástica superficial por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.
- Calero, A. Técnicas de muestreo. Editorial pueblo y educación. Ciudad Habana. 1976. 506 p.
- Caraballo, M., Endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMMM, 2004a.
- Caraballo, M., Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. *Revista Minería y Geología*. XX (2) 35 – 40, 2004b.
- 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.
- Casillas, A., Cálculo de taller. 5ª ed., Madrid, España 1982. pp 316 – 321.
- Callister, W., *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp.
- Coromant sandvick. *Modern metal Cutting*. Departamento de publicaciones técnicas. Coromant sandvick, 2003.
- Cogsdill Tool Products, Inc., Roller burnishing, USA, Obtenido de la Red mundial el 8 de mayo del 2005, <http://www.cogsdill.com>.



- Caubet, J., Teoría y Práctica Industrial del rozamiento. 3ª ed., Madrid, España, 1971.
- Chacón, R.; Suárez, R.; Anduela, L.; López, O., Variables Significativas del Torneado de Probetas para Ensayo de Torsión. Información Tecnológica, 17 (5) 43 – 50, 2006.
- Chacín, F., Diseño y análisis de experimentos I. Ed. FEPUVA – UCV. Caracas, Venezuela. 2000. p 388.
- DeLitizia, A., Influence of Shot Peening on the Residual Stresses in Spring Steel Plate, Second International Conference on Shot Peening. 1984.
- De la Vara, “Análisis y Diseño de Experimentos”, Mc Garw Hill, 1ª ed, 237-264. Cd. México. México (2003).
- 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 2002. ISSN 0253-5757.
- 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.
- Díaz, S., Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple. Tesis presentada en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central Martha Abreu Las Villas, 2006.
- El Axir, M.; Searge, S., Investigations into the burnishing of external cylindrical surface of 70/30 Cu-Zn alloy, Wear. 127 (2) 123 – 137, 1988.
- 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.
- 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.
- Ermini, M., Plasticity effects in residual stress measurement by the hole drilling method, Strain. 36 (2) 55 – 59, 2000.



- Feng, C., "An Experimental Study of the Impact of Turning Parameters on Surface Roughness", Industrial Engineering Research Conference 2001, paper No. 2036 2001.
- Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D.; Fernández, E., "Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple". *Revista Ingeniería e Investigación*. 28 (1) 15 – 21, 2008(a).
- Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., "La Deformación Plástica Superficial por rodadura como método de endurecimiento". *Nexo*. 21 (01) 76 – 82, 2008(b). www.uni.edu.ni/Nexo. Consultado el 4 de julio 2008b.
- Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., "Estructura cristalina del acero AISI 1045 deformado plásticamente". *Revista Ciencias Holguín*. 14 (4) 27 – 34, 2008(c).
- Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., "Variaciones mecánicas superficiales del acero AISI 1045 endurecido superficialmente por rodadura". V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales. CINAREM´2009. Noviembre 2009.
- Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., "Variaciones mecánicas superficiales del acero AISI 1045 endurecido superficialmente por rodadura." *Revista Geología Minería*. 26 (3) 65 – 74, 2010.
- Fernández, A., "Elaboración de una ficha de costos para el proceso de deformación plástica en frío por rodadura". Trabajo de Diploma en opción al título de Licenciado en Contabilidad. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Humanidades. 2011.
- Fernández, T., "Mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM. 2011.
- Ferré, J. Rius, F. X. *Técnicas de Laboratorio* 274 648 - 652. 2002.
- Feschenkov, V, Majmutov, R. *El torneado*. Editorial Mir. Moscú. Pág 152-163. 1989. 31.
- Freund, J. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Editorial Félix Varela. Ciudad de la Habana. 2006. 619 p.



- Fernández, E.; Determinación de tensiones residuales en piezas simétricas rotativas deformadas por rodillo simple. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.
- García, D.; López, C.; González, D.; Usamentiaga, R., Visualization of the flatness of steel strips during and after their manufacturing, En Proc. of 3rd IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing, págs. 843 – 848, 2003. Benalmádena, España.
- Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 53-89 32. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 17-22.
- Guerra, C., Menéndez, A., Barrera, R. y Egaña. E. Estadística. Editorial Félix Varela. 338 pág.
- Greenwood, J.; Williamson, J., Contact of Nominally Flat surfaces, Proc. Roy. Soc., London, Series A, 295 (25) 300 – 319, 1966.
- Hendry, J.; Rudd, D.; Seader, J., Synthesis in the design of chemical processes, AIChE J. 19 (1) 13 – 17, 1973.
- Hasegawa, S. “The road to smoother surfaces”, Manufacturing Engineering, Volume 126, No. 2, February 2009, Pages 70, 72, 74, 76, 78, USA.
- Hlavacek, V., Journal Review: Synthesis in the design of chemical processes, computational. Chem. Eng. 2 (67) 12 – 19, 1978.
- 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.
- Hernández, L., Exponente de endurecimiento en probetas deformadas por rodillos y traccionadas. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010.
- Hernández, F. “Metrología dimensional.” Editorial ISPJAE. Cuba. 1986.
- Hernández, S. “Metodología de la Investigación.” Editorial McGraw-Hil. México. 1997.
- Hyun, S.; Robbins, M., Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths. Tribology International, 40 (6) 1413 – 1422, 2007.



- Imbert, L., Determinación del error de forma en piezas deformadas por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2011.
- Iuffe, A., Modificación del hierro con grafito esférico en el molde. Liteinoe proistbostba. 6 (12) 5 – 6, 1994.
- Jiménez, M., Simulación del proceso de Deformación Plástica por Rodadura por el Método de Elementos Finitos. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.
- 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/>.
- 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.
- Korotcishe, L., Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Editorial Mir. Moscú. 1989. pp 53 – 64.
- 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.
- Loh, N.; Tam, S.; Miyazawa, S., A study of effects of ball burnishing parameters on surface roughness using factorial design, Journal of Mechanical Working Technology. 18 (1) 53 – 61, 1989.
- Linares, H., Tensiones superficiales en piezas tratadas por el proceso de deformación plástica en frío. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010.
- Leyva., B; Fernández., T; Rodríguez., I; Alcántara., D y Oliveros, Y. comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas cilíndricas de acero AISI 1045 durante la deformación plástica superficial con rodillo simple. VI conferencia internacional de aprovechamiento de recursos minerales. CINAREM 2011. Noviembre 2011.



- Luca, L., Neagu –Ventzel., S., Marinescu, I., Effects of working parameters of surface finish in ball burnishing of hardened steels, Precision Engineering, Volume 29, Issue 2, April 2005, Pages 253-256, USA.
- 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.
- Lee, K.; Lee, S.; Lee, M., Worst case communication delay of real-time industrial switched Ethernet with multiple levels, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53 (21) 1669 – 1676, 2006.
- Lajtin, Y., Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Editorial MIR, 1985.
- Molinari, A.; Moufki, A., The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation, Inter. J. of Mechanical Science 50 (2) 124 – 131, 2008.
- Montes de Oca, R.; Pérez, R., Manual de Prácticas para la asignatura MANUFACTURA INDUSTRIAL II Ingeniería Industrial, Editorial: UPIICSA – IPN, Enero del 2002.
- Montgomery, D, Diseño y análisis de experimentos. Editorial Félix Varela. La Habana.2004.585 p.
- Makienco N.H, Manual del Ajustador Mecánico. Editorial Pueblo y Educación 1982.
- Martínez, V., Fundamentos de Normalización y Metrología, Facultad de Ingeniería Industrial /ISPJAE, Departamento de estadística y Control de la calida. Ediciones. La Habana, 1984.
- Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. Probabilidad y Estadística Para Ingeniero. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005.
- Negret, Y., Determinación del modelo estadístico – probabilístico para el establecimiento del proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010.



- Naranjo, R.; Metodología de cálculo para determinar el comportamiento de la pieza deformada teniendo. Trabajo de diploma en opción al título de ingeniero mecánico. Instituto superior minero metalúrgico de Moa. 2012.
- Nicosia, S.; Tornambe, A., High-Gain Observers in the State and Parameter Estimation for overhead cranes Having Elastic Joints, System & Control Letter, Vol. 13, 331 – 337, 1989
- Sugino Corporation, “Superroll-Roller burnishing tool”, USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2004, <http://www.suginocorp.com>
- Sugino Corporation, “Superroll-Roller burnishing tool”, USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2005, <http://www.suginocorp.com>.
- Stachowiak, G.; Batchelor, A., Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, U.S.A, 2001.
- Sarache, L., Diseño de experimentos y análisis multifactorial aplicado a la industria. Facultad de Ingeniería, Revista Ingeniería Industrial. 4 (5) 585 – 590. 2004.
- Surfine Tools, “Products”. India, Obtenido de la Red mundial el 6 de abril del 2005, <http://www.surfinetools.com>.
- Shachelfort, J. f., Introduction to materials Science for Engineers, 4 th edition, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle Rives, NJ, 1996.
- Skalki, K.; Ronda, J., Application of contact mechanics to modelling of burnishing process. International Journal of Mechanical Sciences. 37 (5) 461 – 472, 1988.
- Sahin, Y.; Motorcu, A., Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coated Cutting Tools, Am. J. Applied Sci.: 1 (1) 12 – 17, 2004.
- Odintsov, L.G. Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial", Editorial CM, 1987. Pág 385-422, URSS.
- Oxley, P. L. B. Mechanics of machining. Ellis Horwood. Chichester, UK, 1989.
- Onwubolu, G., A Note on Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coated Cutting Tools, Am. J. Applied Sci.: 2 (6) 1 109 – 1112, 2005.



- Özel A.; Temiz, E.; Murat, D.; Aydin, S., Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method, *Materials and Design*, 26 (11) 281 – 289, 2005
- 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.
- Piñeiro, A., Obtención de la curva tenso – deformacional del Acero AISI 1045 endurecido por deformación plástica superficial con rodillo. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.
- Pérez, J.; Cerdán, L. Rozas, I.; Arevalillo, M., Análisis de tensiones en ajustes por interferencia vía elementos finitos, *Anales de Ingeniería Mecánica*, 15 (3) 683 – 688, 2004.
- Pérez, J.; Fernández, F.; Herrera, B., Influencia de la geometría sobre el estado tensional en ajustes por interferencia con muesca, *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Las Palmas, España, 20 (12) 50 – 57, 2009.
- Parsons, B.; Wilson, E., A Method for Determining the Surface Contact Stresses Resulting from Interference Fits, *Trans. ASME, J. of Engineering for Industry*, February 1970, p 208 – 218.
- Prasad, S.; Sashikanth, P.; Ramamurti, V., Stress distribution in interference joints, *Computers and Structures*, 51 (13) 535 – 540, 1994.
- Prevéy. P.; Perry, W.; Mason, R., The use of x – ray diffraction to determine the triaxial stress state in cylindrical specimens. *Practical Applications of Residual Stress techn*, ed. C. Ruud, Materials Park, OH. 20 (8) 77 – 81, 1986.
- Raimón, O., Comportamiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura ante cargas cíclicas de torsión. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2011.
- Ridout, A., Anti-swing control of the over head crane using linear feedback. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Australia, 9 (1) 17 – 26, 1989
- Ramos, N., Análisis estadístico para determinar el comportamiento de la curva característico del acero endurecido en frío. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico.



- Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010.
- Revé, F., Metodología para determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010.
 - Rodríguez, H. Manual de trabajo, Práctica de Dibujo Aplicado, Editorial Pueblo y Educación. 1986.
 - Thomas, M.; Beauchamp, A.; Youssef, Y.; Masounave, J., An experimental Design for Surface Roughness and Built-up-edge Formation in Lathe Dry Turning, International Journal of Quality Science, 2, (3) 167 – 180, 1997.
 - Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>.
 - Woods, D.; Clements, D., Non linear Control of Overhead Crane. I. E. Aust. Control '92 pages 29 - 40, 1992.
 - Westerman, W.J. "Industry rediscovers roller burnishing", Machine Design, Volume 55, No. 19, August 25 1983, Pages 44-48, USA.
 - Wang, Z., Residual stress in the forming of materials, In: ASM Handbook of residual stress and deformation of steel. American Society for Metals International. 15 (11) 141 – 147, 2002.
 - Westerberg, A., A Review of Process Synthesis, en Computer Applications to Chemical Engineering, R.G. Squires and G.V. Reklaitis (eds), ACS Symposium Series, 1980.
 - Yu, J.; Lewis, F.; Huang, T., Nonlinear feedback control of a gantry crane, Proc. American Control Conference, pp 4 310 – 4 315, 1995
 - Yu, W.; Li, X., Some new results on system identification with dynamic neural networks, IEEE Trans. Neural Networks, 12 (2) 412 – 417, 2001
 - Zhang, Y.; McClain, B.; Fang, X., Design of interference fits via finite element method, International Journal of Mechanical Sciences, 42 (14) 1835 – 1850, 2000.

ANEXOS



ANEXO 2



Figura 1. Ilustración de la cuchara mecánica tipo CMA 1.8/0.8, en la planta de secadero de la empresa ECG



ANEXO 3



Figura 2 Ilustración de la operación de deformación plástica, en un torno 16 D 20 del ISMM (Fernández *et al.*, 2009).

ANEXO 4

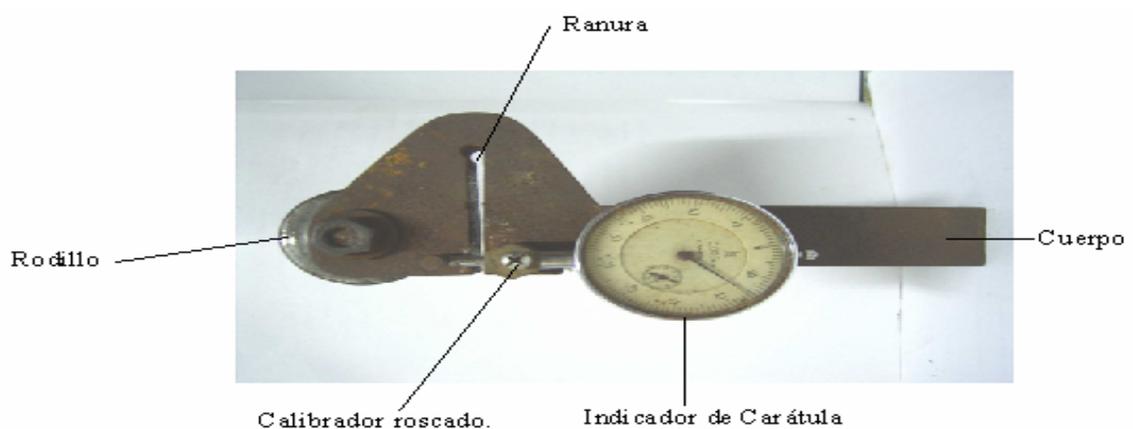


Figura 3. Ilustración de la herramienta empleada en la deformación plástica superficial por rodillo (Hernández, 2005).



ANEXO 5



Figura 4. Ilustración del torno 16 D 20 empleado en la deformación plástica superficial por rodillo

ANEXO 6

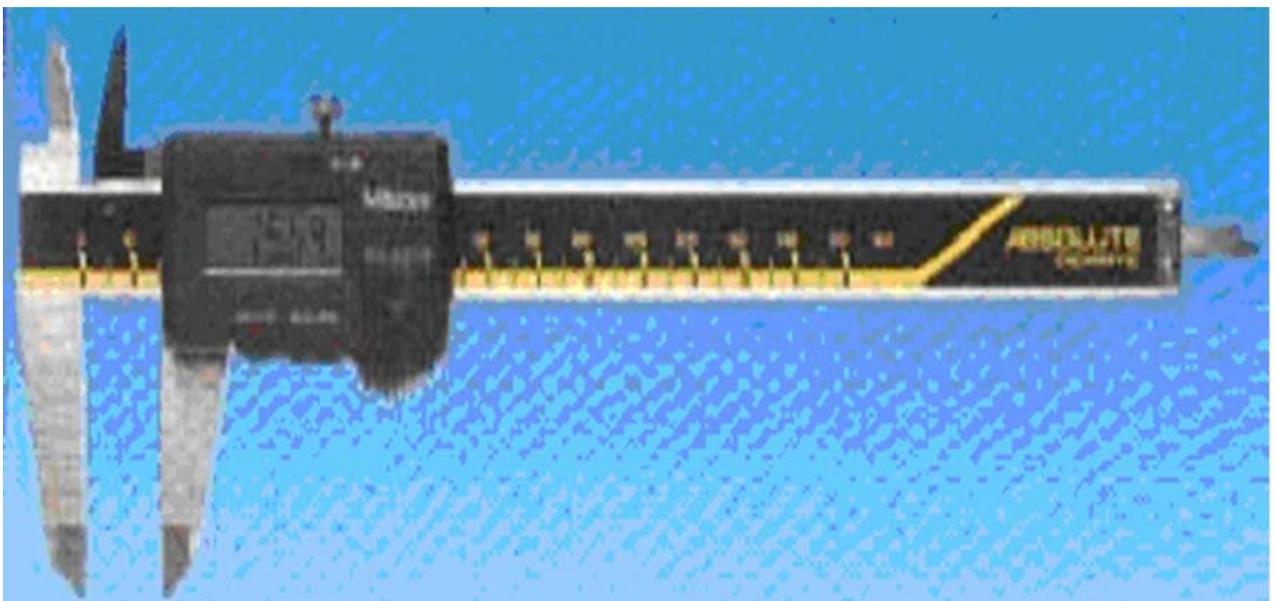


Figura 5. Ilustración del pie de rey digital



ANEXO 7



Figura 6. Ilustración del micrómetro indicador



ANEXO 8

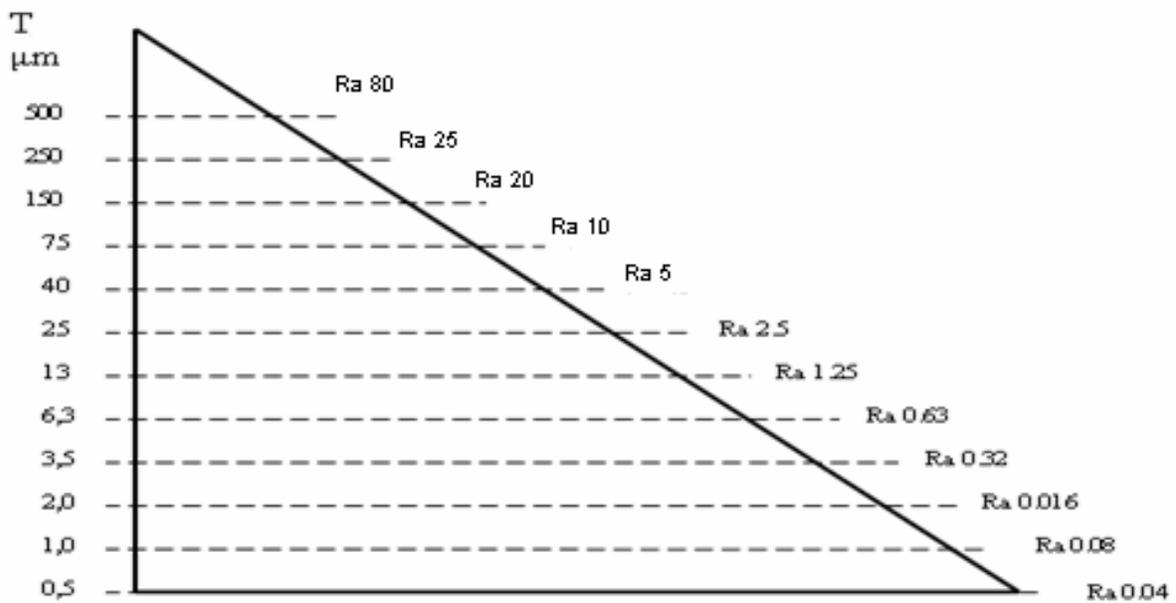


Figura 7. Relación entre la tolerancia y la rugosidad superficial mínima (Rodríguez, 1986)

ANEXO 9

Tabla 1. Relación entre la desviación superior e inferior y los grupos de diámetros

Grupo de dimensiones en mm		Selección de las desviaciones								
		Ejes								
Más de	a	f6	g6	h6	j6	k6	m6	n6	p6	r6
		Desviación superior e inferior en μm								
1	3	-7 -14	-3 -10	0 -7	+6 -1	- -	9 2	13 6	16 9	19 12
3	6	-10 -18	-4 -12	0 -8	+7 -1	- -	12 4	16 8	20 12	23 15
6	10	-13 -22	-5 -14	0 -9	+7 -2	10 1	15 6	19 10	24 15	28 19
10	14	-16 -27	-6 -17	0 -11	+8 -3	12 1	18 7	23 12	29 18	34 23
14	18	-16 -27	-6 -17	0 -11	+8 -3	12 1	18 7	23 12	29 18	34 23
18	24	-20 -33	-7 -20	0 -13	+9 -4	15 2	21 8	28 15	35 22	41 28
24	30	-20 -33	-7 -20	0 -13	+9 -4	15 2	21 8	28 15	35 22	41 28
30	40	-25 -41	-9 -25	0 -16	+11 -5	18 2	25 9	33 17	42 26	50 34



Tabla 1. Relación entre la desviación superior e inferior y los grupos de diámetros (continuación)

		Selección de las desviaciones								
Grupo de dimensiones en mm		Ejes								
		f6	g6	h6	j6	k6	m6	n6	p6	r6
Más de	a	Desviación superior e inferior en μm								
40	50	-29	-9	0	+11	18	25	33	42	50
		-41	-25	-16	-5	2	9	17	26	34
50	65	-30	-10	0	+12	21	30	39	51	60
		-49	-29	-19	-7	2	11	20	32	41
65	80	-30	-10	0	+12	21	30	39	51	62
		-49	-29	-19	-7	2	11	20	32	43
80	100	-36	-12	0	+13	25	35	45	59	73
		-58	-34	-22	-9	3	13	23	37	51
80	120	36	12	0	13	25	35	50	59	73
		14	-10	-22	-9	3	13	23	37	51
120	180	43	14	0	14	28	40	52	68	88
		18	-11	-25	-11	3	15	27	43	63
180	250	50	15	0	16	33	46	60	79	106
		21	-14	-29	-13	4	17	31	50	77
250	315	56	17	0	16	36	52	66	88	126
		24	-15	-32	-16	4	20	34	56	94
315	400	62	18	0	18	40	57	73	98	144
		36	-18	-36	-18	4	21	37	62	108
400	500	68	20	0	20	45	63	80	108	172
		28	-20	-40	-20	5	23	40	68	132

Fuente: Casanova (1986)