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

TRABAJO DE DIPLOMA

TESIS EN OPCIÓN AL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Simulación del proceso de Deformación Plástica por Rodadura por el Método de Elementos Finitos.

AUTOR: Mabel Jiménez Durán

TUTORES: Ing. Dayanis Alcántara Borges
MsC. Isnel Rodríguez González
MsC. Tomás Fernández Columbié

CURSO 2007-2008

"Año 50 de La revolución"

Moa 2008

Declaración de Autoridad:

Yo: Mabel Jiménez Durán

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

---	---
Mabel Jiménez Durán	MsC. Isnel Rodriguez González
---	---
MsC. Tomás Ferndez Columbié.	Ing. Dayanis Alcántara Borges

Pensamiento:

". . . Debemos trabajar por nuestro perfeccionamiento interno como una obsesión casi, como una impulsión constante, cada día analizar honestamente lo que hemos hecho, corregir nuestros errores y volver a empezar al día siguiente, pero debe ser una tarea constante. . . "

Ché

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a la obra de la Revolución Cubana que ha hecho posible que miles de jóvenes como yo haya tenido la oportunidad de formarse como profesionales en el más esencial sentido del humanismo.

A mis padres Sonia y Ricardo, que han sido valuartes inspiradores en mi formación como profesional y han luchado a mi lado todo este tiempo ayudándome para alcanzar el éxito

A mis amistades y familiares en especial a mi tía Digna que con su ayuda me alentaron a continuar mis estudios.

Agradecimientos:

Cuando se llega a una meta se debe reconocer el valor de todos aquellos que nos han brindado sus experiencias, conocimientos y apoyo en todos los sentidos.

A mis padres, y tía Digna que han puesto todo su amor y empeño para ayudarme a lograr lo que deseo.

A mis tutores, MsC. Isnel Rodríguez González, MsC. Tomás Fernández Columbié y Ing. Dayanis Alcántaras Borges que han depositado su plena confianza en mí para la realización de este trabajo.

A todos mis profesores del departamento de mecánica, que me ayudaron y me enseñaron los conocimientos para desempeñarme como profesional.

A mis compañeros de aula, amigos y vecino del barrio, a la Revolución Cubana y nuestro invicto Comandante Fidel Castro, que nos ha dado la oportunidad de formarnos como profesionales.

A todos

Muchas gracias.

Resumen:

El trabajo realiza una investigación, sobre la influencia en la Deformación Plástica

Superficial del acero 45 generada por un rodillo de radio R para establecer el comportamiento de la distribución de las tensiones por el Método de Elementos Finitos, luego se realizó una calibración del modelo, sometiendo a la acción de rodadura en diferentes condiciones, Obteniéndose valores 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 las cuales están relacionadas con los valores de fuerza, profundidad y diámetro.

Los resultados de la solución garantizan el pronóstico del comportamiento tenso-deformacional para procesos de deformación plástica superficial. Se analiza la influencia del proceso en el medio ambiente, la valoración económica refleja un ahorro 5023 CUC.

Abstract

In this work was realized an investigation about the influence of the Superficial Plastic Deformation of the steel 45 generated by roller of radius R, to establish the behavior of the distribution of the stress by the Method of Finite Elements. then was realized a calibration of the model, subjecting it to the rolling action for different conditions, obtaining significant values that show a growing tendency of its mechanical and functional properties, in thesame measures that increase the independent variables of the process of experimentation, which are related with the values of force, depth and diameter.

The results of the solution guarantee the prognostic of the behavior of the stress deformational for processes of superficial plastic deformation. The influence of the process is analyzed in the environment, the economic valuation reveal a saving of 3595, 76 CUC.

ÍNDICE

Contenido		Págs.
	Introducción	1
Capítulo I	**Marco teórico de la investigación**	4
1.1-	Introducción	4
1.2-	Método de deformación plástica por rodadura.	5
1.2.1-	Clasificación de las operaciones elementales de deformación.	6
1.3-	Métodos experimentales empleados para estudiar las tendencias de Deformación Plástica Superficial por Rodillo.	8
1.4-	Herramientas para la deformación plástica superficial	8
1.5-	Aplicaciones de la deformación plástica superficial	9
1.6-	Ventajas de la deformación plástica superficial	10
1.7-	Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos deformación plástica superficial.	12
1.7.1-	Endurecimiento por deformación en frío	17
1.8-	Generalidades acerca del acero 45.	19
1.8.1-	Composición química del acero 45.	20
1.8.1.1-	Elementos de aleación y propiedades que confieren al acero 45	21
1.8.2-	Propiedades físico, mecánicas del acero 45	23
1.8.2.1-	Propiedades físicas del acero 45	23
1.8.2.2-	Propiedades Mecánicas	23
1.9-	Generalidades del Método de Elementos Finitos	23
1.9.1-	Análisis tenso-deformacional mediante la simulación	26
1.9.2-	Base del Método de los Elemento Finitos	28
1.10-	Conclusiones del capítulo	29
Capitulo II	**Materiales y Métodos**	30
2.1-	Introducción	30
2.1.1-	Características de la herramienta para la Deformación Plástica	31
2.2-	Selección del elemento deformante (rodillo).	31
2.2.1-	Selección del material a deformar plásticamente por rodillo.	32
2.2.1.2	Análisis microestructural	33
2.3-	Máquinas y Equipos empleados en la experimentación.	33
2.3.1-	Caracterización del torno 16 D 20.	34

2.3.1.1-	Equipo para medición de dureza	34
2.4-	Elaboración mecánica de las probetas para la deformación.	34
2.5-	Regímenes para la Deformación Plástica Superficial por rodillo.	34
2.6-	Calibración del modelo Método de Elementos Finitos	39
2.6.1-	Fuerza ejercida por la herramienta deformante (P)	39
2.6.2-	Tensión de contacto	40
2.7-	Procesamiento estadístico de los datos	43
2.8 -	Materiales y preparación de las muestras	43
2.9-	Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos	44
2.9.1-	Condiciones de fronteras	46
2.9.2-	Mallado	48
2.9.2.1-	Los elementos	48
2.9.3-	Resolución del sistema de ecuaciones (*solver*)	48
2.10-	Algoritmos de evaluación de integrales	51
2.10.1-	Modelos constitutivos	51
2.11-	Conclusiones de capítulo	52
Capítulo III	**Resultados y Discusión**	53
3.1-	Introducción	53
3.2-	Análisis de los regímenes para la deformación plástica superficial p rodillos.	53
3.2.1-	Determinación de la fuerza de compresión que actúa sobre la zona contacto.	53
3.2.2-	Determinación de la profundidad de la capa endurecida	55
3.2.3-	Determinación de la tensión máxima a la que se somete el material	55
3.2.4-	Determinación del radio del área del contacto circular	56
3.2.5-	Determinación del esfuerzo máximo que determina las tensiones máximas para lograr el aplastamiento**.**	56
3.3-	Resultados de la experimentación.	57
3.4-	Comportamiento de la profundidad en relación a la fuerza	58
3.4.1-	Comportamiento de las tensiones	59
3.4.2-	Calibración del Método de Elemento Finito	62
3.5-	Valoración Económica.	63
3.5.1-	Costo por experimentos físicos de la Deformación Plástica Superficial	64
3.5.2-	Costo de la simulación por el Método de Elementos Finitos de Deformación Plástica Superficial.	64
3.5.3-	Comparación de los costos por diferentes procedimientos.	65
3.6-	Valoración del impacto medio ambiental	65
3.7-	Conclusiones del Capítulo	67

CONCLUSIONES GENERALES 68

RECOMENDACIONES 69

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 70

ANEXOS ---

INTRODUCCION

En Cuba hoy en día constituye algo primordial el desarrollo de tecnologías que permitan más ahorro de recursos, menos gasto de energía y menos contaminación atmosférica. El incremento de la eficiencia en el uso racional de los recursos conlleva a la búsqueda de productos más competitivos, para sustituir viejos y costosos esquemas tecnológicos. La problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas están relacionados con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante sus períodos de explotación, para poder recomendar una estructura adecuada, en cuanto al material y tratamiento térmico seleccionado (teniendo en cuenta a la hora de seleccionar estos materiales las diferentes exigencias económicas, tecnológicas, de explotación e higiénicas), para lograr un incremento en la vida útil de los órganos de trabajo de las máquinas y por tanto para la economía del país.

A pesar del desarrollo de la rama industrial, la maquinaria tiene un enemigo que atenta contra su durabilidad y conservación: el desgaste. El desgaste genera considerables pérdidas de materiales, recursos y tiempo, con la consiguiente disminución de la producción, conlleva a la pérdida de medios para su reparación, así como en la elaboración o adquisición de nuevos elementos. A pesar de la gran variedad de factores que conllevan como consecuencia al desgaste, como por ejemplo las condiciones de trabajo y explotación a que están sometidos los elementos de máquinas, tienen particular significación en la durabilidad de los elementos las propiedades mecánicas y tecnológicas que puedan tener dichos elementos. Dentro de estas propiedades por su importancia se destaca la dureza para aumentar la fiabilidad y la longevidad de los elementos de máquinas.

Las propiedades mecánicas y funcionales idóneas del acero 45 para la eficaz explotación del equipamiento que lo utiliza, se han tratado de obtener por diferentes vías; mediante la aplicación de tecnologías de tratamientos térmicos y recubrimientos duros. Uno de los procedimientos que ofrece perspectivas alentadoras para lograr los buenos resultados en deformación en frío del acero 45 es el endurecimiento por deformación plástica, constituyendo un ejemplo de método novedoso que sustituyen operaciones como el

tratamiento térmico, brindándole a los materiales excelentes propiedades físico-mecánicas con el mínimo de costos y con menos contaminación del medio ambiente.

Los simulación por el método de elementos finitos (MEF) es una herramienta que garantiza una determinada precisión, en cambio conduce a la realización de un número de experimentos grandes que se realizan de manera virtual esto lógicamente reduce los costos de la experimentación; como proceso del Método Elemento Finito es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible.

Situación Problémica

Los materiales sometidos a esfuerzos de compresión generan en su superficie tensiones residuales que provocan el endurecimiento del mismo, trayendo consigo cambios en la estructura de los granos. Estas tensiones aumentan la resistencia a la fatiga y la durabilidad tiende a aumentar debido a la misma presión que se ejerce sobre ella. Los aceros con medio contenido de carbono, específicamente el acero 45 es un material propenso a estas condiciones.

Cuando el metal es tratado por métodos experimentales, no es posible determinar el grado de las tensiones que en el se originan, por lo que a través del empleo de los métodos de elementos finitos se puede determinar el comportamiento o la redistribución de estas tensiones remanentes de compresión.

Problema.

Las teorías existentes no fundamentan adecuadamente la distribución de tensiones que se generan en el proceso de deformación plástica por rodadura.

Hipótesis.

Es posible determinar las tensiones residuales que se crean en el acero 45 sometidos a proceso de endurecimiento superficial por rodadura a través de la simulación por el Método de Elementos Finitos.

Objeto.

Comportamiento del acero 45 bajo las condiciones de deformación plástica superficial por rodadura.

Objetivo

Caracterizar el comportamiento de la distribución de tensiones en el proceso de deformación plástica por rodadura del acero 45 empleando la simulación por el método de elementos finitos.

Objetivos Específicos

- ✓ Determinar el comportamiento de las tensiones residuales por el método de elementos finitos en el acero 45 sometido a diferentes procesos de carga.
- ✓ Calibrar del modelo FEM a través de las regularidades del comportamiento mecánico superficial del acero 45 por el método de rodadura.

Tareas

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Selección de las condiciones de frontera y los factores por estudiar.
3. Simulación por el Método de Elementos Finitos el proceso de deformación Plástica por Rodadura.
4. Calibración del modelo FEM
5. Valoración de los resultados obtenidos.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1. Introducción.

Para elevar la resistencia de los metales son utilizados diferentes tipos de tratamiento térmico, los cuales constituyen adicionalmente a los métodos ya referidos otras formas de consolidación de la dureza en los materiales, es ampliamente utilizado el temple de alta frecuencia, temple en horno, cianuración, cementación, entre otros. Por lo que es muy importante considerar la composición química y la estructura del material que será tratado térmicamente. Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas a que se someten los aceros para conseguir las propiedades y características más adecuadas a su empleo o transformación. No modifican la composición química pero sí otro factor como las propiedades mecánicas. No obstante con estos métodos de endurecimiento traen consigo grandes consumo de portadores energéticos y daños al medio ambiente por emisión de gases, calor aceite, sales.

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

La necesidad de determinar con mayor precisión, las regularidades del comportamiento de las propiedades mecánicas - funcionales y microestructural superficial de piezas simétricas rotativas fabricadas de acero 45 en presencia de las cargas por rodaduras que genera un rodillo al trasladarlo sobre una superficie previamente maquinada, el efecto que ellas provocan en la capacidad de endurecimiento del material y la explicación de su mecanismo de endurecimiento, nos conlleva a la presente investigación.

Este capítulo tiene como **objetivo**:

- Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada.

1.2. Método de deformación plástica por rodadura.

El endurecimiento por rodadura se produce al trasladar una rueda o rodillo de radio “R” sobre una superficie, de forma tal que al rotar un ángulo θ, el eje de la rueda se desplaza respecto a la superficie una magnitud rθ, produciéndose un movimiento denominado rodadura sin deslizamiento o rodadura pura, deformando el material a lo largo de la superficie formando surcos o cuellos en forma de espiral.

Este método se emplea por las siguientes razones:

1. El costo del proceso es muy bajo.
2. El consumo de energía es mínimo.
3. Es aplicable a piezas que tengan configuración cilíndrica.
4. Se puede realizar sin necesidad de un equipo especial.
5. El tiempo de operación es muy corto.

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

La Deformación Plástica Superficial por rodadura que emplea el rodillo como elemento deformante, es un proceso de elaboración en frío en la superficie de una pieza. La pequeña deformación plástica superficial originada por esta operación consiste en el desplazamiento del material de los “picos o crestas” a los “valles o depresiones” de las microirregularidades superficiales (Rose, 2003).

Este flujo ocurre bajo una fuerza controlada del rodillo que excede el punto de fluencia del material de la superficie de la pieza no endurecida, creándose una capa de metal consolidada que provoca el aumento de las propiedades funcionales en la superficie. Este proceso debe aplicarse preferentemente después del torneado (Gabb, et all, 2002).

El trabajo en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodillos ha sido estudiado por muchos investigadores y el proceso también mejora las propiedades de la pieza, ejemplo: alta resistencia al desgaste (Niberk, 1987, Michael, Saka, Rabinowicz, 1989), aumento de la dureza (Loh, et all, 1989), calidad de la superficie (Lee, et all, 1992), y un máximo incremento de la tensión residual en compresión (Fattouh, El-Khabeery, 2003). Los parámetros que determinan la calidad superficial son: presión, avance, material del rodillo, número de pasadas, material de la pieza.

1.2.1 Clasificación de las operaciones elementales de deformación.

A partir de los resultados expuestos por (Kruschov, 1957), se analiza en cuanto a la dureza incrementada en el material por la deformación plástica del mismo en la superficie. De acuerdo con (Lim, 1969), se ha demostrado que los metales simples de estructura cristalina cúbica son más desgastados que los que poseen una estructura hexagonal y por tanto, menos endurecido por deformación plástica debido a que estos poseen un solo plano simple de desplazamiento normalmente activo, mientras que los cúbicos tienen una gran cantidad de planos equivalentes, multiplican el deslizamiento y las altas concentraciones de dislocaciones y por tanto, un alto trabajo de endurecimiento**.**

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

Los procesos por Deformación Plástica Superficial se eligen en dependencia de las dimensiones, la configuración geométrica, el material de la pieza a tratar, condiciones de producción, entre otros factores, y para la aplicación efectiva de los mismos en la producción es necesario realizar investigaciones, ensayos y experimentos previos que

permitan alcanzar el efecto deseado, teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar (Hernández, 2004, Korotsiche, 1989)

En todos los casos de deformación plástica es necesario aplicar solicitaciones o esfuerzos suficientes para que, una vez transmitidos a los materiales a través de los utillajes apropiados, permitan sobrepasar el límite de fluencia del material, y se inicie el flujo de materia plástica que configure el producto deseado. A medida que un material se va deformando, puede sufrir transformaciones internas y redistribuciones de tensiones, que produzcan agrietamientos o malformaciones que invaliden el producto final obtenido. La presión de contacto está representada por una serie de cargas puntuales que actúan en cada nodo de la superficie. La deflexión en cualquier punto del modelo puede ser determinada mediante la superposición de las deflexiones causadas por cada carga discreta (Bower; Johnson, 1989)

Comparado con las condiciones de rodadura pura, el deslizamiento junto con la rodadura proporciona efectos de extremo adicionales. La presencia de deslizamiento puede incrementar la concentración de tensiones en el extremo de salida. El extremo de entrada, de acuerdo con Hu Nai-Sai (2002), puede beneficiarse por una reducción en la presión local en condiciones de deslizamiento. Por tanto, la influencia del deslizamiento en los esfuerzos sub-superficiales y las fallas de contacto pueden encontrarse a través de las alteraciones de la fuerza de contacto y no por la fricción superficial.

Un método novedoso de Deformación Plástica Superficial, lo constituye la Deformación a alta velocidad, donde el uso de cargas de contacto puede lograr mayor profundidad de endurecimiento que los métodos convencionales y lo hace con menor deformación que el endurecimiento por trabajo en frío convencional (Casals, 1999; Caraballo, 1999; 2004; 2006,).

El mecanismo de endurecimiento de materiales, cuando el material es sometido a las cargas de contacto que se producen a partir de la propagación de un pulso generado por la detonación de una sustancia explosiva, es un método, que aunque efectivo, requiere del empleo de recursos más deficitarios para su empleo que el método por Deformación Plástica Superficial por Rodillos, además es un método en el cual se puede correr riesgo de accidentes.

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

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

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

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

De la bibliografía consultada se pudo establecer que para el estudio del efecto de este tratamiento en las cualidades superficiales de las piezas han sido empleados diseños experimentales del tipo factorial completo en (Loh, 1989a, Loh, 1989b, Lee, 1992 y El-Axir, 2003), también se ha usado el diseño factorial parcial, Box y Hunter (El-Axir, 2000 y El-Khabeery, 2001) 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 cilindricidad y la reducción del diámetro.

1.4. Herramientas para la Deformación Plástica Superficial

Las herramientas que se utilizan en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodillo están agrupadas en dos clasificaciones:

1. Herramienta multi-rodillos (Roller burnishing tool): Presenta formas diferentes según la configuración de la superficie a elaborar cuyas dimensiones están normalizadas en un rango de medida determinado, tanto para superficies exteriores como interiores. Va colocada en máquinas bruñidoras, y según sus características, también puede ser instalada en máquinas herramienta convencional. Para su funcionamiento emplea

líquido refrigerante. Esta herramienta tiene posibilidades tecnológicas limitadas para la elaboración de superficies de diferentes diámetros. Su diseño y fabricación son complejos. Es muy productiva por lo que se utiliza en producciones masivas y en series grandes. Su precio de venta es relativamente alto (Bright Burnishing, 2005, Burnishing Tools, 2005, Cogsdill Tools, 2005, Monaghan, 2005 y Ogburn, F, 2001).

2. Herramienta de rodillo simple o mono rodillo (Single roller burnishing tool): Consta de un rodillo montado en un cojinete de rodamiento. Se puede mover en los dos ejes (transversal y longitudinal). Va montada en el portaherramientas de la máquina herramienta. En su empleo se usa líquido refrigerante. Su diseño, fabricación y explotación es sencillo porque su sistema de carga fundamentalmente es mecánico. Es universal pues se le pueden colocar rodillos de diferentes diámetros y formas. El proceso de tratamiento es rápido y es fácil de montar y desmontar en la máquina herramienta, además de su comodidad para medir la fuerza. Se emplean en producciones unitarias y en pequeñas y medianas series. Su precio de venta es relativamente bajo (Bright Burnishing, 2005, Burnishing Tools, 2005, Cogsdill Tools, 2005, Mech- India, 2005 y Monaghan, 2005).

1.5. Aplicaciones de la Deformación Plástica Superficial

Según Bright Burnishing (2005), Hasegawa, (2001), Sugino Corporation, (2004), Surfine Tools (2005), Westerman, (1983), pueden ser deformada plásticamente todas las piezas que se ensamblan y que requieren un gran nivel de dureza en las superficies de contacto y un fácil desmontaje (cilíndricas macizas o no), planas de perfil complejo (superficies de forma) entre algunas de ellas están:

- Láminas de rotores y estatores de motores eléctricos
- Partes y piezas de equipamiento hidráulico y neumático (bombas, turbinas, cilindros y compresores)
- Árboles y ejes (zonas donde van montados los cojinetes de rodamiento y otros elementos de máquinas)
- Piezas para la industria militar (ánima de las piezas de artillería convencional y reactiva), aeronáutica y aeroespacial (piezas de motores y turbinas), automotriz (pistones,

camisas, cigüeñales, árboles de leva, asiento de válvulas), química, electrónica y textil, entre otras.

1.6. Ventajas de la Deformación Plástica Superficial por Rodillo.

El endurecimiento superficial, se crea por la formación extensiva de dislocaciones y en ocasiones debido a la formación de otras fases generadas durante la deformación. Además la Deformación Plástica Superficial por Rodillos condensa y afina la estructura del grano de la superficie del metal provocando una compactación de la superficie y por tanto un aumento de la dureza superficial entre 5-10 o más, (Boada, 1985, Boada, 2003, 1997, Korotcishe, 1989). Ese incremento depende de:

- El tipo de material y sus características.
- Las características de la herramienta.
- Los parámetros de régimen de elaboración (Bright Burnishing, 2005, Cogsdill Tools, 2005, Sugino Corporation, 2004, Westerman, 1983).
- Precisión. Se pueden obtener tolerancias estrechas con medidas exactas (Bright Burnishing, et all, 2005, Westerman, 1983).
- Provoca mejorías en las propiedades físico-mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. Aumenta la resistencia al desgaste, porque al deformarse la superficie casi se igualan el tamaño de las crestas y los valles provocando que el desgaste de dicha superficie, al entrar en contacto con otra, sea mínimo. La resistencia a la fatiga aumenta de un 26% a un 35% por la acritud y la aparición de altas tensiones residuales compresivas en la capa superficial. Cualquier esfuerzo en la pieza debe sobrepasar esos valores de tensiones residuales, que eliminan los focos que pudieran provocarla como son los poros, las hendiduras y las marcas o huellas dejadas por la herramienta después del maquinado. También aumenta la resistencia a la corrosión, porque al reducirse la porosidad y las marcas de herramientas las sustancias reactivas o contaminantes tienen menos posibilidad de corroer la superficie deformada (Burnishing Tools, 2005, Hasegawa, 2000b, Mech-India, 2005, Sugino Corporation, 2005, Tubielewicz, 1997, Westerman, 1983) al no poder insertarse en las microranuras dejadas por las herramientas de corte.

- 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, et all, 2005, Sugino, Corporation, 2004; Westerman, 1983).
- 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, et all, 2005).
- 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).
- Puede realizarse en máquinas herramienta convencional y en máquinas herramienta con control numérico (Burnishingn Tools, 2005, Sugino Corporation, 2004, Surfine Tool, 2005, Westerman, 1983).

En resumen según Westerman (1983) las 4 razones principales para el empleo de la deformación plástica superficial en piezas con 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:

- Reducción del ruido
- Disminución del desgaste
- Reducción de las vibraciones

1.7. Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de deformación plástica superficial.

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

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

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

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

2. Tensiones de segundo género (microscópicas o cristalíticas): Se equilibran en el volumen de algunos cristales o bloques. Estas tensiones pueden o no estar orientadas (en dirección al esfuerzo que produjo la deformación plástica), llamadas también microtensiones (Lajtin, 1985, Pero-Sanz, 2000, Alfonso, 1992, Alfonso, 2002)

3. Tensiones de tercer género (deformaciones estáticas de la red cristalina): Se equilibran en los límites de pequeños grupos de átomos. En los metales deformados ellas se equilibran en los grupos de átomos que se encuentran cercanos a la frontera de los granos, a los planos de deslizamiento. Las deformaciones pueden estar relacionadas

con la presencia de dislocaciones. El desplazamiento de los átomos de las posiciones ideales puede surgir también en los cristales de las soluciones sólidas debido a la diferencia entre las dimensiones de los átomos y a la interrelación química entre los átomos del mismo género y de géneros diferentes, que componen la solución, son llamadas también submicroscópicas, (Lajtin, 1971; Pero- sanz, 2000; Alfonso, 1995; Alfonso, 2002)

El trabajo en frío (Moreno, 2005 y Arde-Pórtland) aumenta la cantidad de tensión necesaria para el deslizamiento. Este hecho se puede relacionar con la teoría de la dislocación, ya que la red cristalina deformada del metal impide el movimiento de las dislocaciones y la dislocación bloqueada solamente puede desplazarse si se incrementa la tensión. De esta forma, un metal endurecido por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo metal recocido antes de que ocurra la deformación.

Esto es fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones. En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida (Lim, 1969; Moya, 1996) da lugar a la obtención de un metal más resistente que el que se podría producir por cualquiera de otros tratamientos, solos hay que tener en cuenta lo siguiente: en la actualidad no se suministran comercialmente aceros laminados a temperaturas inferiores a 0 ^{0}C.

Según Key to Steel (2002), la fatiga superficial se relaciona fundamentalmente con estados tensionales del tipo plano. Es decir, aquellos donde no existen tensiones normales a la superficie de la pieza. Los valores de tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas, entre otros factores que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de tracción y compresión (las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales) y cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999; Pero-Sanz, 2000)

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

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

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

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

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

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

Para elevar la efectividad de los procesos tecnológicos de la Deformación Plástica Superficial hace falta tener un modelo del estado tensión deformación que se forma en el resultado de la elaboración.

Para conocer las peculiaridades de la deformación plástica del material es necesario analizar su comportamiento de desplazamiento contra la fuerza aplicada al mismo, el cual se muestra en la figura.1.1**.** En su artículo Mazein (2001) plantea, que las tensiones residuales y las deformaciones que aparecen en el proceso de elaboración, determinan en gran nivel la exactitud de las piezas y la calidad de su capa superficial.

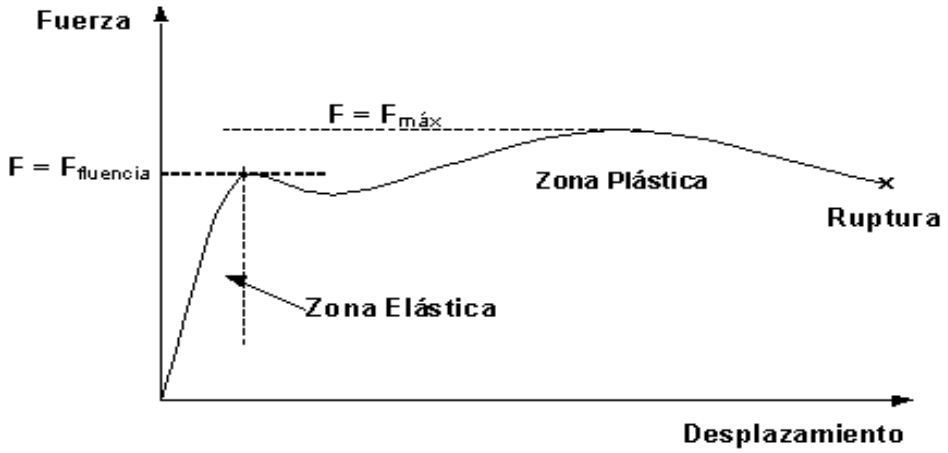


Figura.1.1. Muestra del gráfico de deformación plástica.

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

Se tiene entonces que en la zona elástica se cumple:

$F = K (L - L_0)$

Donde:

F = fuerza, N
K = constante del resorte
L = longitud bajo carga, mm
L_0 = longitud inicial, mm

Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el punto de fluencia, desde aquí el material comienza a adquirir una deformación permanente. A partir de este punto, si se retira la carga la probeta quedaría más larga que al principio. Deja de ser válida nuestra fórmula $F = K (L - L_0)$ y se define que ha comenzado la zona plástica del ensayo de tracción. El valor límite entre la zona elástica y la zona plástica es el punto de fluencia (yield point) y la fuerza que lo produjo la designamos como:

$F = F_{yp}$ (yield point)

Tanto Pero-Sanz, (1992), como Dieter (1967), coinciden en plantear que en materiales estables poco sensibles a la velocidad de deformación, como el acero, la curva real de

tensión (σ) deformación (ε), conocida también como curva de fluencia, y que solo es válido desde el comienzo en la zona de fluencia plástica o de estabilidad plástica hasta la carga máxima a partir de la que se inicia la estricción local. El modelo teórico es el de Ludwick, que se expresa como:

$$\sigma = K\varepsilon^n \qquad (1.1)$$

Donde:

σ = Tensión correspondiente a la carga aplicada (MPa)

ε = Deformación del material.

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

K = Constante de plasticidad.

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

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

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

Hay varios procesos tecnológicos importantes, entre lo que se encuentra la Deformación Plástica Superficial por Rodillo, que producen elevadas tensiones residuales de

compresión con un valor máximo en la superficie o en capas inmediatas debajo de ella y que disminuyen con rapidez al aumentar la distancia desde la superficie, lográndose un gradiente de tensiones brusco. Los granos superficiales y subsuperficiales, que fueron alargados plásticamente, quedarán en un estado de compresión. Estas altas tensiones permiten un aumento de la resistencia a la rotura por fatiga y también un aumento de la resistencia al agrietamiento por corrosión (Pero- Sanz, 2000, Schijve, 2001, Alvarez, 1999).

1.7.1. Endurecimiento por deformación en frío

El endurecimiento por deformación en frío (acritud) es una propiedad característica del estado metálico, que no presentan los polímeros ni los materiales cerámicos. El material resultará más duro cuanto menor sea el espesor final, es decir, cuanto mayor haya sido la reducción en frío, puede decirse que acritud es el aumento de dureza que adquiere un material por deformación en frío.

El grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al material metálico, naturaleza del esfuerzo y velocidad de aplicación de éste, pero sobre todo depende del grado de deformación en frío que el material experimenta y de la naturaleza del material (sistema cristalino, energía de defectos de apilamiento, tamaño de grano, pureza del metal). La acritud guarda relación con el sistema cristalino al que pertenece el metal o aleación (Smelyanky, Kalpin, Barinov, 1990)

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

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen

deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material (Alvarez, et all, 2004, Lubriner, 1986)

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

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

Según Badiola (2004) y Lubriner (1986), plantean que en la teoría de las dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura resulta del movimiento de dislocaciones por deslizamiento bajo la acción de la tensión aplicada.

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

Fernández (2007), realiza el procesamiento estadístico con todos los datos obtenidos de los controles realizados antes y después del deformado con ayuda del software Excel 2000 y Statgraphics versión 5.1. con los que grafica el comportamiento de las medias y los residuos de las variables fuerza y dureza, llegando a la conclusión que se mantiene la tendencia a incrementar la dureza en la medida que aumenta la fuerza; confirmando el

incremento del tensionamiento de la red y el endurecimiento del material, puesto que el mismo ofrece mayor resistencia a la penetración una vez deformado plásticamente a consecuencia directa del trabajo de deformación en frío provocado por la acción de las cargas de rodadura y obedece a la reducción en las distancias interplanares del metal tensionado. Plantea que la ocurrencia del endurecimiento a través del mecanismo de deslizamiento se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos y el aumento de la acritud. Pero no utiliza el Método de Elementos Finitos para obtener la distribución de las tensiones y comprobar valores que muestren el comportamiento de la Deformación Plástica Superficial generadas por un rodillo.

1.8. Características generalidades del acero 45.

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

El empleo industrial de este material en nuestro país es muy difundido, porque tiene amplia aplicación, el mismo presenta, una fácil maquinabilidad, es un acero muy dúctil, forjable, alcanzando valores de dureza de 56-58 HRC, cuando se somete a proceso de temple, es un acero medio de contenido carbono, su producción es nacional el cual requiere de un valor mínimo de costo de producción. (Bengton, 1991)

A escala mundial, existe en la actualidad una variedad de criterios para explicar el mecanismo de endurecimiento del acero 45, sobre todo a partir de la diversidad de métodos y procedimientos empleados en el proceso de deformación plástica. Se puede establecer que este es un tipo de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial en frío utilizado internacionalmente. Este proceso ha sido estudiado en Cuba por la comunidad universitaria, fundamentalmente de manera experimental, y aplicado en algunas empresas mecánicas, de manera empírica. Existe un conjunto de conocimientos y

experiencias sobre el proceso. La aplicación del mismo es simple y no requiere de una inversión capital para su realización. (Díaz. 2005, et all, 2005).

Según los criterios de (Caubet, 1971y Guliaev, 1983), el acero 45 en las condiciones de rozamiento, acompañado de grandes presiones, tiene una gran resistencia al desgaste. Este acero se utiliza fundido con menos frecuencia, permite una deformación fácil en frío, y posee la alta tenacidad y plasticidad típica de los aceros, al mismo tiempo que ofrece una buena resistencia al desgaste, esto se debe a que el proceso de endurecimiento va acompañado de la deformación plástica del metal, trayendo consigo un incremento en la fatiga residual compresiva interna y a un considerable aumento en la dureza de la superficie.

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

1.8.1. Composición química del acero 45.

La composición química estándar (ver tabla 1.1) de este acero según norma GOST y su equivalencias den otras normas como la American Society for Metals y editada por Databook (1988), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System-UNS, de la American Society for testing Materials-ASTM y la SAE.

Tabla 1.1. Composición química estándar del acero 45

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

1.8.1.1 Elementos de aleación y propiedades que confieren al acero 45

Los elementos fundamentales de aleación para el acero 45 están identificados como metálicos y no metálicos dentro de los que se encuentran:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Como se aprecia en la bibliografía consultada, está relacionada la influencia de los elementos de aleación con las propiedades mecánicas y funcionales de los aceros 45. Es significativo el papel que tiene el manganeso (en el rango de 0,65 a 0,90 %) conjuntamente con el carbono en el incremento de la resistencia mecánica, particularmente la resistencia a la dureza, al igual que la capacidad de endurecimiento por rodadura; las cuales constituyen las propiedades que se quieren obtener en las piezas que se fabrican con este material.

1.8.2. Propiedades físico, mecánicas del acero 45

En diferentes bases de datos (Materiales, 1996, Key to Steel, 2002) se hace referencia a las propiedades físico y mecánicas a temperatura ambiente, obtenidas en el acero 45. Estas son:

1.8.2.1. Propiedades físicas del acero 45

Para utilizar el acero en condiciones de trabajo por deformación plástica deben tenerse presente las propiedades físicas del material.

- Densidad. . . . . .7,85 Kg/dm^3
- Módulo de elasticidad.

  100 °C-205 kN/mm^2

  200 °C-195 kN/mm^2

300 °C-185 kN/mm^2

400 °C-175 kN/mm^2

600 °C-155 kN/mm^2

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

1.8.2.2. Propiedades Mecánicas

Tensión Límite de Fluencia mínima (MPa). . . .350

Tensión Límite de Fluencia de Cizallamiento (MPa). . 175

Tensión Límite de Resistencia (MPa). . . . 430

Elongación mínima (%).. 35

Estricción mínima (%). 35

Dureza (HB). 170

Resiliencia (J/ mm^2). 100

1.9. Generalidades del Método de Elementos Finitos

Modelar un sistema físico consiste en representar la realidad con cierto grado de aproximación. Se entiende por realidad el comportamiento de las iteraciones observables o medibles existentes en la naturaleza. Para representar la realidad es necesario un lenguaje preciso, las matemáticas por tanto son la principal herramienta. Las regularidades que se encuentran en el universo permiten la formulación de leyes generales que constituyen lo que hoy en día se denomina conocimiento físico. Las leyes físicas que rigen el comportamiento del universo son las herramientas fundamentales de la modelación cuando se expresan en un lenguaje tan preciso como es el de las matemáticas.

Se llama sistema a un conjunto de elementos en el cual todos se encuentran tan estrechamente vinculados entre si, que en relación con las condiciones circundantes se presenta (se distingue) como algo (un todo) único.

Elemento: es el último componente de un sistema, no se puede subdividir y el sistema está compuesto por la unión de varios elementos.

El término modelo se utiliza con múltiples connotaciones, según el campo en que se esté empleando. Pero cualquiera que se analice tendrá de común con los demás que constituye una representación (un simulacro, imagen) de una realidad objetiva.

El término **Simulación** infiere el estudio de un sistema mediante un modelo. Si se refiere a un modelo matemático se tendrá la simulación matemática. En síntesis la simulación, en general, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico.

Al respecto se puede considerar que la modelación no es, en general, un fin en si misma, sino un paso hacia la simulación. La modelación permite el estudio integral de un proceso basándose en los modelos desarrollados previamente y que definen el comportamiento individual de cada elemento. De manera que mediante la simulación se puede analizar, del sistema, el efecto de sus interrelaciones, determinar reciclos, hacer estudio de capacidades, detectar “cuello de botellas”, estudiar las condiciones límites de operación y otras aplicaciones más.

Luego, en primer lugar, la simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y en segundo lugar, se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente.

La combinación de la computadora digital y software profesionales conforman la simulación digital la que es una herramienta poderosa capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Se han obtenido actualmente experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: ANSYS, COSMOS, MATLAB, entre otros.

Un modelo matemático, como se ha expresado anteriormente es una representación simplificada de los aspectos del proceso real que está siendo investigado en términos de

ecuaciones matemáticas u otras formulaciones de esta naturaleza que permiten llegar a resultados en términos cuantitativos precisos y, de esta forma, tomar decisiones o seleccionar la alternativa de solución más adecuada.

El método de los elementos finitos (FEM) o método de aproximación por porciones es una técnica numérica empleada para obtener soluciones próximas de problemas matemáticos con condiciones de frontera que son dominados por las ecuaciones diferenciales.

Actualmente se considera el método de las diferencias finitas (FD) como una subclase del FEM. El cual se reduce al método de las FD cuando las mallas son regulares. (Ver figura 1.2)

Figura 1.2. Diferencias finitas y elementos finitos

Es por eso que muchas de las técnicas conocidas para la solución de problemas por medio de las FD pueden ser empleadas en la aplicación de los elementos finitos.

Algunas ventajas del FEM son:

- Permite realizar cálculos en geometrías asimétricas y en espacios dimensionales superiores para las cuales sería muy complicado hacer cálculos manuales.
- Puede aplicarse a cuerpos compuestos por varios materiales.
- Las formas irregulares que se presenten en la frontera pueden ser aproximadas usando elemento con lados rectos o exactamente usando lados curvos.
- El tamaño de los elementos puede variar.
- El método emplea una formulación integral para generar un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Reducción o sustitución de pruebas de laboratorios.

- Realización de números grandes de corridas experimentales.
- Solución de complejos problemas físico-matemáticos cuya resolución analítica resultaría prácticamente imposible.

1.9.1. Análisis tenso-deformacional mediante la simulación.

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

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

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

La gran evolución de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido perfeccionar el estudio de diversos fenómenos.

En la actualidad, el método de la simulación ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación se puede obtener la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Ingham y Moreland, 1993).

En lo referido al cálculo estructural, el método de simulación puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un

problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos del objeto.

Las incógnitas dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. Así pues, se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento en los que se subdivide el objeto, queda definido por un número finito de parámetros asociados a los puntos que en dicho momento se unen al resto de los elementos de su entorno. (Alfaro, 2001).

En el caso específico del análisis tenso-deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas dinámicas, el método permite la determinación de los componentes y la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja solicitación.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema, donde 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.

Plantea Alfaro (2001), que un programa de simulación es una pieza compleja de software en la que confluyen numerosas operaciones. Por este motivo suelen estar divididos en subsecciones, cada una de las cuales efectúan una operación determinada. Sin embargo, el tema no se limita al puro cálculo. La preparación de los datos y el análisis de los resultados numéricos que aparecen como producto del cálculo, son tareas arduas que actualmente se tiende e integra a su propio software. Así pues, un paquete de cálculo de simulación consta de un procesador, en el cual se incluyen todas las ayudas a la preparación de los datos y que generan los archivos de resultados, y un postprocesados que facilita el análisis e interpretación de los resultados, generalmente en forma de gráfica mediante trazado de curvas, gráficos tridimensionales, tablas.

1.9.2. Base del Método de los Elemento Finitos

En el cálculo estructural, el método de elementos finitos (MEF) puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos). Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando, pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. En realidad no se trata de nada nuevo. El cálculo de estructuras se efectúa también restringiendo el análisis corrimientos de los nudos de unión. La diferencia estriba en que el análisis del continuo, la segmentación en elementos y la correcta posición de los modos es, hasta cierto punto, arbitrario.

Así pues en el M.E.F. se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento, en los que se subdivide queda definido por un numero finito de parámetros (grados de libertad) asociados al los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (modos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los modos a través de una adecuada función de interpolación.

Como puede apreciarse, en el método de los elementos finitos son casi esenciales los conceptos de "discretizacion" o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de "interpolación", o acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto el M.E.F. es aproximado desde múltiples perspectivas y se caracteriza por:

a) Discretización.
b) Interpolación.
c) Utilización de métodos numéricos.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados 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

discretizacion utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.

1.10. Conclusiones del capítulo

1. El proceso conocido como Deformación Plástica Superficial por Rodillo Simple está establecido como un proceso de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial y tiene plena actualidad, resultando una variante tecnológica apropiada para proporcionar mayor resistencia al desgaste, mayor resistencia a la corrosión, mayor resistencia a la fatiga y una mayor durabilidad, por lo que es recomendable su aplicación en las condiciones particulares de Cuba.
2. La bibliografía consultada, aporta información sobre las propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero 45, pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales, y en ninguno de ellos se muestran las regularidades del comportamiento de la Deformación Plástica Superficial generadas por un rodillo a través del Método de Elementos Finitos.

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS

2.1. Introducción.

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

Como toda investigación científica este capítulo está avalado por ecuaciones que demuestren la veracidad del trabajo mediante la obtención de mediciones y resultados reales. Además se establece el diseño del plan experimental y se describen los procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan la simulación del proceso teniendo en cuenta el material seleccionado para los ensayos.

El capítulo tiene como objetivo:

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

2.1.1. Características de la herramienta para la Deformación Plástica Superficial por rodillo.

La Deformación Plástica Superficial por rodillo simple es un tratamiento del cual se conocen reportes de su empleo en Cuba, donde ha primado el empirismo. Se ha utilizado un herramental muy rústico y ordinario instalado en tornos paralelos convencionales. En casi la totalidad de los casos usan como elemento deformante la pista exterior de un cojinete de rodamiento y la fuerza se lograba con el carro transversal del torno.

Una de las cuestiones más importantes a tener en cuenta a la hora de la construcción de dicha herramienta es la selección del elemento deformante y de su geometría.

2.2. Selección del elemento deformante (rodillo)

El elemento deformante (rodillo) (Cogsdill Tools, 2005, Elliot Tools, 2004, Bright Burnishing, 2005, Odintov, 1987), es fabricado de acero rápido (HSS), aceros aleados con cromo, de aleaciones duras o de carburo cementado (metal duro), muy pulido. Debe poseer una alta dureza, entre 58 y 65 HRC y una alta resistencia al desgaste. Teniendo en cuenta todos estoe elementos Fernández (2007) emplea un rodillo con estas características.

La forma del perfil de trabajo del rodillo influye marcadamente en los resultados obtenidos en el proceso de elaboración de la superficie (Fernández 2007). El perfil del rodillo empleado se puede observar en la Figura 2.1.

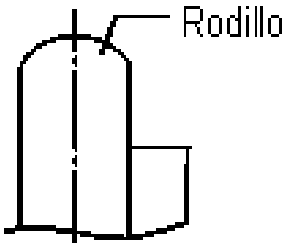


Figura 2.1. Forma del perfil de trabajo del rodillo.

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

El rodillo (1) (Anexo 1), tiene 50 mm de diámetro, es de acero AISI 5140 con una dureza de 65 HRC, un acabado Ra de 0,5 µm y un radio en el perfil de 2 mm, con banda cilíndrica y radio abierto, que se corresponde con el tipo de superficie que se va a tratar y que posee

salida libre para la herramienta. La justificación del empleo de este tipo de rodillo radica en que para el endurecimiento de piezas de poca rigidez es necesario utilizar rodillos con un radio de perfil pequeño, lo que permite obtener el mayor aumento de la dureza con esfuerzos relativamente pequeños. (Fernández, 2007, Hernandez 2005)

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

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

2.2.1. Selección del material a deformar plásticamente por rodillo.

El acero 45 presenta gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste, posee alta tenacidad, plasticidad, es un material con facilidad de conformar, su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga este endurece por deformación plástica.

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", Moa.

Tabla. 2.2. Composición química del acero 45.

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

2.2.1.2. Análisis microestructural de las probetas

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleó para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca ΠOMO METAN P1, este está dotado con un portaobjetos giratorio e iluminador vertical Watson. La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas. Las probetas se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. Para procesar la información se utilizó una cámara fotográfica digital marca CONCORD, modelo EYE-Q4363Z, con memoria de 4 MEGAPIXELS.

2.3. Máquinas y Equipos empleados en la experimentación.

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

2.3.1. Caracterización del torno 16 D 20.

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

❖ **Características principales del torno.**

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

2.3.1.1. Equipo para medición de dureza.

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

2.4. Elaboración mecánica de las probetas para la deformación.

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

Corte de las probetas L = 100 mm X 30 mm. Norma ASTM E 92

L= 100 mm X 40 mm. Norma ASTM E 92

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

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

n = 350 rev/min, S = 0,2 mm/rev.

En el torneado se empleó una cuchilla de 45^0 con sujeción mecánica Sandvik, código del vástago PSSN R 25 25 M 12, con una plaquita SNMG 12 04 08-PM de calidad 4 025 (SANDVIK Coromant KoroKey, 1996).

2.5. Regímenes para la Deformación Plástica Superficial por rodillo.

La magnitud del endurecimiento por deformación en frío y el nivel de las tensiones remanentes en la capa superficial dependen de la fuerza (P), del número de revoluciones

(n), del avance (S), de la geometría de la herramienta y la pieza, las propiedades iniciales del material en tratamiento (HB). Los parámetros del proceso de la Deformación Plástica Superficial deben corresponderse con la siguiente condición (Korotcishe, 1989; Fernández, 2007)

$$\sigma pr < \sigma B$$

Donde:

σB – Límite de resistencia del material antes del endurecimiento; MPa.

σpr – Tensiones creadas en la zona de contacto de la pieza con la herramienta de deformar, MPa.

Estas tensiones como fuerza de compresión actúan sobre toda la zona de contacto de forma distribuida y uniformemente a lo largo del sector y se determina

$$\sigma pr = a^3 \sqrt{\frac{PpE}{R_2^2}} \qquad .(2.5)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad de la pieza; MPa

a = Factor que tiene en cuenta los radios durante el trabajo con rodillos:

Se determina teniendo en cuenta la geometría de la pieza y de la herramienta deformante por la ecuación:

$$a = \frac{\frac{1}{2R_2}}{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)} \qquad .(2.6)$$

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

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

Pp = Fuerza en el rodillo; N.

Variando la fuerza sobre la herramienta de deformar, se puede de forma dirigida cambiar la magnitud y el carácter de la distribución de las tensiones creadas en la zona de contacto

y de este modo influir sobre el efecto de endurecimiento, el nivel y el carácter de distribución de las tensiones remanentes y determinarlo por la siguiente ecuación.

$$Pp = 12{,}5\sigma_T \left(\frac{d_{eje}}{100} \right)^2 \qquad (2.7)$$

El esfuerzo de deformación Pp está formado por tres componentes: axial (Px), radial (Py) y tangencial (Pz); Px, Pz, por su magnitud mucho menor que Py, por eso P $\approx$ Py, para evitar el resbalamiento del rodillo, provocado por la fuerza Px, es conveniente situarlo bajo un ángulo β = 4 - 10^0 hacia el eje de la pieza en tratamiento.

Siendo:

σT = Máxima tensión del material a la tracción; N/mm^2.

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

I2.5 = Coeficiente para la deformación plástica superficial con rodillos.

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

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

$$h = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \qquad (2.8)$$

Donde:

h = Profundidad de la capa endurecida; mm.

P = Fuerza ejercida por la herramienta; N.

σ_T = Máxima tensión del material a la tracción; N/mm^2

Con el aumento del coeficiente de la fricción externa y de la superficie de contacto del rodillo con la superficie de tratamiento, aumentan las irregularidades de la deformación plástica y como consecuencia el nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión. Las tensiones surgen durante la compresión mutua de dos cuerpos en contacto, bajo la acción de una fuerza externa, estando el material en un estado tensional

volumétrico, al no poderse deformar libremente en esta zona. Las tensiones de contacto tienen un carácter puramente local y disminuyen consecuentemente a medida que se alejan de la zona. El área real de tensiones máxima de contacto para la superficie de cuerpos curvos cuando se encuentran en contacto se determina a partir de la fórmula de Hertz, siempre que el estado tensional sea volumétrico. La expresión para determinar la magnitud del área de la deformación con rodillos según Alvarez, (1989) es:

$$\sigma_{máx} = 0{,}245.n_p.\sqrt[3]{Fn.E^2.\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)^2} \qquad (2.9)$$

siendo:

$\sigma_{máx}$ = Tensión máxima en el área de contacto; MPa.

Fn = Fuerza sobre la zona de contacto; N.

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

E = Módulo de elasticidad de la pieza; MPa

n_p = Coeficiente de seguridad de pandeo se determina por la ecuación:

$$\frac{R_1.R_2}{2.R_2+R_1} \qquad (2.9\ a)$$

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

$$r = 2{,}15.\sqrt{\frac{P}{E}\left(\frac{d_1.d_2}{d_1+d_2}\right)} \qquad (2.10)$$

con:

r = radio del área del contacto circular; mm^2.

P = Fuerza o carga de trabajo; N.

E = Módulo de elasticidad de la pieza; MPa.

$d_{1,2,}$ = Diámetro de la pieza y del rodillo respectivamente; mm.

En el caso que se analiza para una relación tensión-deformación y analizando las ecuaciones (2.7, 2.9 y 2.10), se resume que, durante el proceso de Deformación Plástica, el material sometido a este proceso, se logra el compactamiento de sus granos por el aplastamiento de los mismos, lo que permite incrementar su dureza por acritud. Las tensiones de aplastamiento se consideran uniformemente distribuidas sobre el área de aplastamiento y por lo tanto, la condición de resistencia al aplastamiento puede determinarse por la fórmula 2.11:

$$a_{máx\,aplast} = \alpha.\sqrt[3]{P.E^2\left(\frac{d_1+d_2}{d_1.d_2}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (2.11)$$

siendo:

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

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

P = Fuerza o carga de trabajo; N.

E = Módulo de elasticidad de la pieza; MPa.

$d_{1,2}$ = Radio de la pieza y del rodillo respectivamente; mm.

Para el caso de la deformación que se analiza, los materiales son de diferentes dureza, las superficies de estos cuerpos en contactos se analiza como un cilindro de R_2 y una esfera de $R_{1,}$ la relación, $\frac{A}{B}$, depende de los radios de curvatura principales de los cuerpos en contacto, denotándose como curvatura principal, las curvaturas máxima y mínima, situada en dos planos mutuamente perpendiculares, que pasan por el centro de la curvatura.

Para el cálculo de A = $\frac{1}{2R_1}$ . . . . . (2.12)

Para el cálculo de B = $\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$ . . . . . (2.13)

Teniendo en cuenta las configuraciones de las superficies a endurecer, y el hecho de que el propio proceso de endurecimiento será aplicado a una parte específica de la pieza (superficie de trabajo) en todo su volumen, se definió como forma de configuración de un cilindro y una esfera en la carga por rodadura para establecer el procedimiento de endurecimiento.

2.6. Calibración del modelo del Método de los Elementos Finitos

Para calibrar es necesaria la experimentación física y la determinación del error, para ello se toman como base las diferencias entre las tensiones reales propias del material y las obtenidas en la simulación por el Método de los Elementos Finitos.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\sigma_{máx}}{\sigma_{mín}}\right) \cdot 100\% \qquad (2.14)$$

$\sigma_{\max}$ - tensión máxima obtenida en la simulación por el Método de Elementos Finitos

$\sigma_{mín}$ - tensión máxima real del material trabajado

Teniendo presente que no se dispone de elementos, que permita fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan la calidad del proceso de endurecimiento del acero 45, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar de tema, se considera que son las más importantes:

- Presión ejercida por la herramienta deformante.
- Profundidad.
- Tensiones.
- Desplazamientos.

2.6.1. Fuerza ejercida por la herramienta deformante

La fuerza ejercida por la herramienta deformante es la influencia a considerar en el endurecimiento superficial de la pieza y en consecuencia sobre el efecto de endurecimiento que se produzca. Es una magnitud que se relaciona con las propiedades mecánicas a obtener en la pieza para el incremento de la resistencia al desgaste y la

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

Los niveles escogidos, mínimo, medio y máximo, se realizaron teniendo en cuenta las aplicaciones industriales del acero. En la bibliografía consultada (El Axir, 2000), al realizar su trabajo con un materiales no ferrosos como el aluminio comercialmente puro del tipo 2219-T8751, propone fuerza superiores a 250 N para lograr un buen acabado superficial y superiores a los 350 N para obtener una alta dureza, utilizar valores de avance entre 0,06 y 0,2 mm/rev y de tres (3) a cinco (5) pasadas de la herramienta, así como un rango de frecuencia de giro de 150 a 230 rev/min. Partiendo de las premisas de que el aluminio es más dúctil y maleable, con mayor facilidad de conformación que el acero se valoran estas recomendaciones y a partir de las mismas y en previo experimento se comprobó que para cargas de 400 N y avance de 0,25, la dureza y la profundidad de la capa obtenida en aceros al carbono no se correspondía con la dureza exigida en estos tipos de materiales, con valor de 400 N, la dureza estaba en el orden de los 200 HV y la profundidad de la capa endurecida en 0,2 mm, valores no representativos para las exigencias del trabajo a las cuales están sometidos. Con el máximo nivel los valores son representativos y se igualan a los obtenidos en el tratamiento térmico (Guliaev, 1989).

2.6.2. Tensión de contacto durante el proceso de deformación plástica

Durante el cálculo de resistencia a la fatiga superficial, es importante tomar en cuenta de forma especial el análisis de las tensiones de contacto en un número considerable de elementos de máquinas. Para determinar las tensiones que se desarrollan en el área de contacto, Hertz (1881 y 1882) se basó en los métodos de la teoría de la elasticidad y en las suposiciones siguientes:

1. Las cargas producen solamente deformaciones elásticas en la zona de contacto, de acuerdo con la ley de Hooke.
2. El área de contacto es pequeña en comparación con las superficies de los cuerpos en contacto.
3. Las fuerzas de compresión se distribuyen sobre la superficie de contacto.
4. Ambos cuerpos en el punto de contacto tienen un plano tangente común y una normal común a lo largo de la cual están dirigidas las fuerzas de compresión.

El análisis de las tensiones de contacto, al determinar la resistencia en la zona de contacto, se debe hacer tomando en cuenta las cuestiones siguientes:

1. Determinar los radios de curvatura de los cuerpos que se tocan, así como el ángulo entre sus planos principales de curvatura.
2. Calcular las dimensiones de los semiejes de la zona de contacto (Zona elíptica).

- Contacto de dos cuerpos comprimidos por la acción de la carga normal (figura 2.2), Fn, en dirección del eje Z.

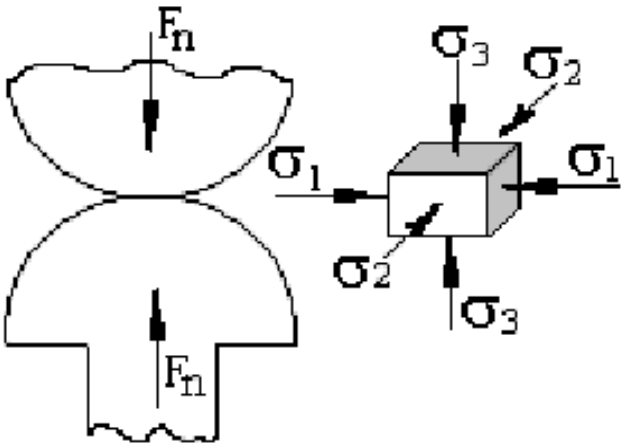


Fig.2.2. Estado tensional volumétrico en la zona de contacto.

En el caso general, el área de contacto está determinada por una elipse (Ramos, 1989), cuya ecuación es:

Ax + By =Δ = constante

Donde Δ es la magnitud del acercamiento de los cuerpos en contacto, que depende de la deformación de los materiales en la zona de contacto y tiene un valor constante de acuerdo con las propiedades elásticas de los materiales, o sea,

$$\Delta = \frac{1-\mu_1^{\,2}}{E_1} + \frac{1-\mu_2^{\,2}}{E_2} \qquad (2.14)$$

Los coeficientes A y B dependen de los radios de curvatura principales de los cuerpos en contacto.

El estado tensional que surge en el material en la zona de contacto es un estado tridimensional, ya que el material que se encuentra en esa zona no puede deformar

libremente, por lo que se encuentra comprimido en todas direcciones. Las tensiones de contacto dependen de la elasticidad propia del material y no constituyen funciones lineales de las cargas, por lo que aumenta al incrementarse las últimas.

Para dos cilindros de diámetros diferentes se determinan teniendo en cuenta las características del material y la geometría de ambos elementos (anexo #2. Tabla 2.3).

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

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

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

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. 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros de entrada de las corridas.

Parámetros	**Símbolo**	**Niveles**		
		Min.	Medio	Máx.
Fuerza (N)	**P**	**500**	**1 500**	**2 500**
Profundidades		**0.3**	**1.2**	**1.7**
Desplazamientos	**δ**			
Tensiones ( )	**σ**			
Diámetro del rodillo (mm)	**50**			

La matriz de planificación de las corridas se expone en la tabla. 2.5

Tabla 2.5 Matriz de planificación del experimento.

Niveles	Respuestas		Salidas	
	Prof.(mm)	P(N)		
Nivel superior (+1)	1.7	2 500		
Nivel medio (Δ)	1.2	1 500		
Nivel inferior (-1)	0.3	500		
Diámetros(mm)			Tensiones σ (MPa)	Desplaztos δ (mm)
30	0.3	500		
	1.2	1500		
	1.7	2500		
40	0.3	500		
	1.2	1500		
	1.7	2500		

2.7. Procesamiento estadístico de los datos

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente los diámetros, pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Una vez definidas las variables y sus niveles, se procede a la realización de las corridas de aplicación de rodadura.

2.8. Materiales y preparación de las muestras

El material con que se fabricará la pieza es: Acero AISI 1042 según norma GOST con módulo de elasticidad de $2.1*10^6$ kgf/cm^2**.** El mismo cumple satisfactoriamente con las propiedades físico-mecánicas necesarias para el funcionamiento del dispositivo.

Barras de 100 mm de longitud, 30 y 40 mm de diámetro respectivamente. Este material se empleó para fabricar probetas (fig.2.3), que se utilizaron como elementos a deformar. A partir de este material se prepararon numerosas muestras utilizando como elemento deformante el rodillo de 50 mm de diámetro, y variando las profundidades respecto a las fuerzas y diámetros.

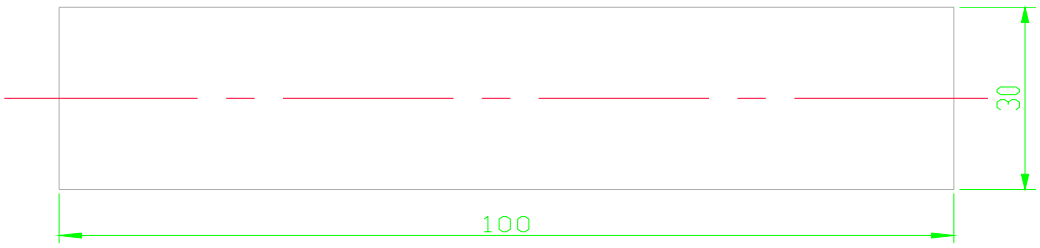


Figura 2.3 Probetas para diseño de experimento

- Las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente pulidas para poder realizar la observación microscópica, por lo que se propone la realización de un conjunto de operaciones que permitan lograr la calidad superficial deseada.

2.9. Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos

Al objeto de determinar las tensiones generadas en las barras de acero 45 a diferentes diámetros se realizan cálculos mediante simulación numérica por elementos finitos. Para ello se ha utilizado el paquete de software ANSYS V.10. El modelo empleado considera el contacto con fricción entre una barra de sección circular y un rodillo considerando el área de contacto del mismo en forma de esfera de radio (R = 2 mm). Para esta simulación se tuvo en cuenta:

1. Obtención del modelo geométrico
2. Aplicación de las condiciones de fronteras y de cargas
3. Mallado
4. Búsqueda de la solución(solver)
5. Realización del post procesamiento y obtención de las respuestas en el domino de las tensiones, los esfuerzos y los desplazamientos

En el Método de Elementos Finitos es necesario definir los esfuerzos y los desplazamientos; para los esfuerzos (Zienkiewicz, 2000) el sistema fijo de coordenadas cartesianas se denota como x,y,z ó en forma indexada x1, x2, x3, de la misma manera los desplazamientos pueden ser denotados como u,v,w ó u1,u2,u3. Por ello es posible definir xi como las coordenadas y ui como los desplazamientos, siendo los rangos de 1, 2, 3.

Para aplicaciones tridimensionales se puede definir el sistema de coordenadas de la manera siguiente:

$$x = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}$$

y los desplazamientos como:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$$

Las tensiones del objeto se expresan:

$$\sigma = \left[\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33}\sigma_{12}\sigma_{23}\sigma_{31}\right] = \left\lfloor \sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz}\sigma_{yx}\sigma_{yz}\sigma_{zx} \right\rfloor$$

y los esfuerzos

$$\xi = \left[\xi_{11}\xi_{22}\xi_{33}\gamma_{12}\gamma_{23}\gamma_{31}\right] = \left\lfloor \xi_{xx}\xi_{yy}\xi_{zz}\gamma_{yx}\gamma_{yz}\gamma_{zx} \right\rfloor$$

Siendo γ_{ij} - tensor de simetría, asumido teniendo en cuenta criterios de ingeniería con el valor de $2\xi_{ij}$ la aproximación de los desplazamientos de los elementos finitos y los desplazamientos virtuales se denotan en forma isoparamétrica por:

$$u(\xi, i) = N(\xi)\ddot{u}(t); \qquad \xi u(\varsigma) = N(\varsigma)\delta\ddot{u} \qquad \text{con} \quad x(\varsigma) = N(\varsigma)\overset{\cup}{x}$$

Para computarizar los esfuerzos virtuales se empleó:

$$\delta\varepsilon = S\delta u = (SN)\varepsilon\ddot{u} = B\delta\ddot{u}$$

en los que la matriz de esfuerzo- desplazamiento se calcula como:

$$B = \begin{matrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \\ N_2 & N_1 & 0 \\ 0 & N_3 & N_2 \\ N & 0 & N_1 \end{matrix}$$

El término P es comúnmente referido a la divergencia de las tensiones o de las fuerzas actuantes:

$$P(\sigma) = \int_{\Omega} B^t \sigma d\Omega$$

2.9.1. Condiciones de fronteras

Tan importantes como las ecuaciones de gobierno son las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. En casi toda la literatura especializada en técnicas numéricas se concede gran importancia a las discusiones sobre las posibles condiciones de contorno e iniciales.

Las condiciones iniciales definen el estado del sólido en el instante inicial considerado como origen para la evolución temporal. Por tanto, para la correcta definición de un problema se deberá conocer el valor que tienen todas las variables en ese instante. Muchas veces, en problemas resueltos mediante técnicas numéricas esto es imposible, con lo que se ha de buscar una alternativa. La más sencilla y habitual consiste en dar a todas las variables un valor cero, asumiendo que, si se avanza suficientemente en el tiempo, se llega a un estado estacionario, o periódico, independientemente de la solución inicial, según las condiciones de contorno sean constantes o periódicas. Tiene como ventaja la sencillez de implementación, pero tiene una gran desventaja, pues si dicha solución inicial se aparta bastante de la solución real, puede dar lugar a problemas de convergencia en cuanto a la resolución de las ecuaciones.

En función del tipo de evolución temporal, se clasifican las ecuaciones diferenciales y, por tanto los problemas de origen, en elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Una ecuación diferencial se clasifica dentro de un grupo ú otro dependiendo de la forma de dependencia espacio-temporal de la evolución de las variables.

Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos. Los más comunes en la práctica son:

- Condiciones de contorno tipo Dirichlet: La variable dependiente es conocida en la frontera física del problema.
- Condiciones de contorno tipo Neumann: Se conoce en la frontera física del problema el valor del gradiente normal de la variable dependiente.
- Condiciones de contorno tipo Robin: La condición conocida constituye una combinación lineal de los tipos anteriores.
- Condiciones de contorno mixtas. En unas zonas de la frontera física se tienen condiciones de contorno Dirichlet y en otras zonas condiciones del tipo Neumann.

La correcta definición de las condiciones de contorno constituye una parte fundamental en la definición de un problema numérico.

2.9.2. Mallado del modelo

La resolución de cualquier problema, ya sea mecánico o de cualquier otro tipo, mediante el método de los elementos finitos requiere definir previamente el mallado de elementos (i.e. discretizar el problema). El modelado mediante elementos finitos (FEM) involucra, además, la elección del tipo de elementos (i.e. las funciones de forma), del modelo constitutivo correspondiente a cada elemento y del tipo de algoritmo numérico (*solver*) que se utilizará para resolver el sistema de ecuaciones.

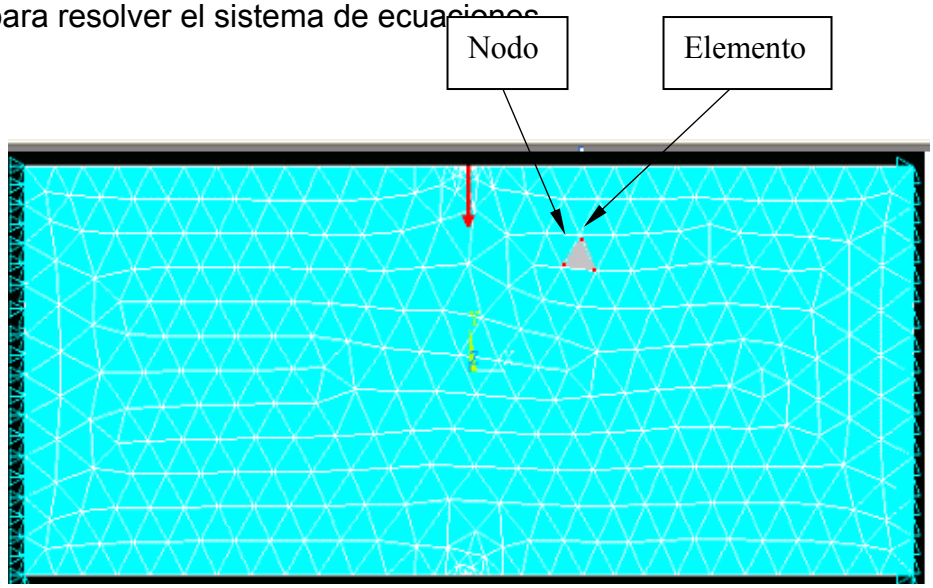


Figura 2.4 Ejemplo de división de un sistema 2D en elementos finitos.

Para cada nodo *j* se define una función, *Nj* con valores no nulos en la región *Vj* formada por los elementos que comparten dicho nodo (Figura 2.3). La función *Nj* se elige de forma que sea igual a la unidad en el nodo *j* y nula en el resto de nodos de la región *Vj.* En cada elemento *V e* solo toman valores no nulos las funciones *Nj* correspondientes a cada uno de sus nodos. Este hecho permite automatizar y simplificar notablemente la resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos tradicionales.

2.9.2.1. Los elementos en el mallado

Un elemento es algo más que una determinada región en una malla. Cuando se programa un elemento hay que definir la expresión analítica de las funciones de forma de sus nodos. El bloqueo de elementos es un fenómeno numérico que acontece cuando el número de ligaduras iguala al número de grados de libertad del elemento. Cuando esto sucede, el elemento no puede sufrir ningún tipo de deformación, i.e. se vuelve irrealmente rígido. Los elementos no lineales son más susceptibles de sufrir bloqueo, porque al aumentar el número de nodos aumenta el número de ligaduras.

2.9.3. Resolución del sistema de ecuaciones

El análisis de cualquier problema mediante el Método de Elementos Finitos requiere resolver un sistema de ecuaciones análogo al expresado en forma matricial. Este sistema tiene un número finito de incógnitas, tantas como desplazamientos nodales posibles.

Algunas de las incógnitas se determinan directamente al aplicar las condiciones de contorno a los nodos de la superficie *Au*, y el resto se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones mediante métodos de cálculo computerizado.

El procedimiento de resolución del sistema de ecuaciones, comúnmente denominado *solver*, es el corazón de cualquier programa de simulación por el Método de Elementos Finitos. Los métodos de resolución numérica de sistemas de ecuaciones se clasifican en dos grandes grupos: Métodos matriciales o directos y métodos vectoriales o indirectos.

Los métodos matriciales construyen la matriz de rigidez global del sistema, de ahí su nombre, y la invierten. Estos métodos son los más tradicionales y extendidos, entre otras razones porque desde el punto de vista. Es decir, el número de incógnitas es igual al número de grados de libertad de cada nodo por el número de nodos.

Para facilitar la resolución numérica del sistema de ecuaciones resultante conviene expresarlo en forma matricial. Así, en notación matricial los desplazamientos en cada elemento se definen como

$$u^e(r) = \sum_{t-1}^{n_{nod}^e} d_t^e N_t(r) = N^T d^e \qquad 3.13$$

donde r es el vector de posición de cualquier punto del elemento, d^e el vector de desplazamientos nodales del elemento y N^T la matriz de funciones de forma, que es independiente del elemento. En la expresión 3.13 los coeficientes d_t^e, representan los desplazamientos de los nodos del elemento. De este modo,

$$\delta u^e = \sum \delta d_t^e N_t(r) = N^T \delta d^e \qquad 3.14$$

Por consiguiente, denotando

$$\begin{aligned} \nabla^* u^e &= B d^e; \\ \nabla^* u^e &= B \delta d^e \end{aligned} \qquad 3.15$$

El operador $\nabla^* en \nabla^* u^e$ afecta solo a las funciones de forma puesto que los desplazamientos nodales son constantes.

donde B es una matriz cuyos elementos involucran derivadas parciales de las funciones de forma, es posible escribir la ecuación (3.16)

$$A_{e-1}^{nadm} \left[\int_{A_f^e} N^{T-t} dA + \int_{V^e} N^T b dV - \int_{V^e} B^{T-\sigma} dV \right] = 0 \qquad 3.16$$

siendo A el operador de ensamblaje que permite reproducir el sistema de ecuaciones global a partir de las integrales correspondientes a cada elemento (entre corchetes en (3.16)). El operador ensamblaje depende exclusivamente del mayado escogido. Efectivamente, el mayado determina que elementos son comunes a que nodos y por tanto que integrales elementales dan lugar a términos no nulos en cada ecuación del sistema.

Considerando que para cada elemento

$$\bar{\sigma} = C^e \nabla^S u^e = C^e B d^e \qquad 3.17$$

la ecuación (3.16) puede escribirse como

$$A_{e-1}^{nadm}\left[\int_{V^e} B^T C^e B dV\right] d^e = A_{e-1}^{nadm} f^e{}_{ext} \qquad 3.18$$

donde

$$f^e{}_{ext} = \int_{A_f^e} N^{T\neg\iota} dA + \int_{V^e} N^T b dV \qquad 3.19$$

es el vector de fuerzas externas que actúan sobre el elemento e. A su vez la matriz

$$K^e \equiv \int_{V^e} B^T C^e B dV \qquad 3.20$$

se denomina matriz de rigidez del elemento y determina la relación entre las fuerzas externas aplicadas y los desplazamientos que se generan en el elemento. Definiendo la matriz de rigidez global

$$K = \mathop{A}_{e-1}^{nadm} K^e \qquad 3.21$$

y el vector de fuerzas externas global

$$f = \mathop{A}_{e-1}^{nadm} f_{ext}^e \qquad 3.22$$

es posible escribir la ecuación matricial (3.18) de forma simplificada como

$$Kd = f \qquad 3.23$$

Donde d es el vector de desplazamientos nodales completo. Los desplazamientos nodales son las incógnitas permiten calcular el resto de parámetros de interés. A partir de la ecuación (3.23) se obtiene

$$d = K^{-1}f \qquad 3.24$$

Por tanto, para resolver el sistema basta con invertir la matriz de rigidez.

2.10. Algoritmos de evaluación de integrales

Uno de los objetivos en el desarrollo del método de elementos finitos es reducir el número de elementos necesarios para realizar un cálculo preciso, al objeto de disminuir el tiempo de cálculo y las necesidades de almacenamiento en memoria.

Esto es especialmente importante en problemas tridimensionales donde, incluso en modelos relativamente sencillos, el número de elementos se dispara rápidamente si se desea cierta precisión. Afortunadamente existen situaciones en las que se puede reducir un problema tridimensional a uno en dos dimensiones, gracias a las simetrías existentes. Este es el caso de problemas que presentan simetría de revolución (ej. un contacto hertziano), ya que el estado tensional es el mismo en cualquier plano perteneciente al haz generado por el eje de simetría. Por ello estos métodos de integración se denominan en ocasiones cuadraturas de Gauss-Legendre.

2.10.1. Modelos constitutivos

Todo elemento representa una porción de sistema con unas determinadas propiedades físicas. Por ejemplo, en un problema mecánico las propiedades físicas determinan la relación entre tensiones y deformaciones en el medio. Las expresiones que relacionan causa y efecto a través de propiedades físicas del medio se denominan ecuaciones o modelos constitutivos (también modelos de material). El gran potencial del análisis mediante elementos finitos reside precisamente en que no está restringido al estudio de problemas elásticos lineales, sino que es capaz de abordar cualquier tipo de no linealidad, ya sea geométrica o debida al comportamiento del material. La no linealidad en las ecuaciones constitutivas puede expresarse, en general, como una dependencia del tensor C respecto de algún parámetro mecánico: σ, δ, ÿ, entre otros. Para calcular cualquiera de estas variables mecánicas es necesario conocer previamente C que a su vez depende de estas variables.

En el Método de los Elementos Finitos la definición de las funciones de forma es independiente de la geometría del problema y de las condiciones de contorno. Por este motivo, este método constituye una potente herramienta de cálculo muy versátil para la resolución de numerosos problemas de interés práctico, funciones de forma locales que se anulan en todo punto, salvo en una región determinada del sólido. Cada función de forma

queda definida por una expresión analítica (generalmente poli nómica) y por la región donde toma valores no nulos.

Al objeto de utilizar estas funciones de forma, se divide el dominio *V* en una serie de regiones *V e*, que se denominan elementos finitos, o simplemente elementos, y que dan nombre al método. En la frontera de cada elemento se sitúan una serie de puntos denominados nodos o nudos. La rejilla de nodos y elementos resultante de esta división se conoce como mayado, o simplemente malla. La elección del mayado y de la geometría de los elementos depende de muchos factores: geometría del problema, minimización de errores, parámetros que se desean conocer, etc. Un ejemplo de mayado bidimensional se muestra en la Figura 2.4. Como puede apreciarse, los nodos se encuentran en la frontera entre dos o más elementos contiguos o en el contorno del sólido.

2.11. Conclusiones de capítulo

1. Las ecuaciones desarrolladas caracterizan el comportamiento del método de deformación Plástica Superficial por rodadura en función del carácter de la fricción de los dos cuerpos en contacto y posibilitan la estimación de la dureza en el acero 45 cuando es sometido a este proceso.
2. Los parámetros de deformación para la simulación por el Método de Elementos Finitos (fuerza, profundidad, diámetro) constituyen factores principales para establecer el comportamiento de la distribución de las tensiones en el proceso de deformación plástica por rodadura.

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, las expresiones matemático estadísticas que describan las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero 45 sometido a la acción de las cargas por rodadura que genera un rodillo al trasladarse sobre una pieza simétrica rotativa en las condiciones descritas en los experimentos. Así mismo se revela a partir de los modelos experimentales obtenidos el mecanismo de endurecimiento del acero 45 en las referidas condiciones.

Finalmente, se realiza una evaluación del procedimiento tecnológico para el endurecimiento mediante rodadura, de piezas simétricas rotativas fabricados de acero 45.

El objetivo del capítulo es:

- 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.

La fuerza de compresión actúa sobre toda la zona de contacto de forma distribuida y uniformemente a lo largo del sector (Ding, Lee, 1988, Gere, Timoshenko, 2000).

3.2. Análisis de los regímenes para la deformación plástica superficial por rodillos.

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

3.2.1. Determinación de la fuerza de compresión que actúa sobre la zona de contacto.

Para determinar la fuerza de compresión que actuará sobre la zona de contacto se empleará la ecuación 2.5, sabiendo que la magnitud del endurecimiento por deformación en frío dependerá del esfuerzo P.

En adecuación a la ecuación 2.5, se determina el coeficiente **a**, teniendo en cuenta la ecuación 2.6.

Siendo:

R_2 = 14.85 mm. Radio de la superficie de endurecimiento de la pieza; este valor depende de los diámetros, profundidades con que se trabaje.

R_1; R_3 = 25 y 2 mm respectivamente. Radios de la sección de trabajo del rodillo;

Para Diámetro 30 mm Para diámetro 40 mm

a = 0,25 a = 0.32

E = $2.1*10^6$ kgf/cm^2. Módulo de elasticidad de la pieza

El valor del Pp se determina por la ecuación 2.7

Para diámetro 30 mm

d_{eje} = 30 mm

σ_T = 430 N/mm^2 (acero 45)

el valor es

$Pp =$ 484 MPa

Para diámetro 40 mm

d_{eje} = 40 mm

$Pp =$ 860 MPa

Este valor establece la presión necesaria para el comienzo de la deformación del material, el comportamiento de la fuerza, teniendo en cuenta los radios de la pieza y del rodillo en la zona de contacto el material fluirá deformándose ya que excede el límite máximo de fluencia.

Calculado los valores de "**a** se determina la tensión de compresión teniendo en cuenta que el valor de "**a** es máximo para los menores valores de profundidad, para ello se empleará la ecuación 2.5:

Finalmente los valores de la tensión de compresión para cada valor de radio

Para diámetro 30 mm		Para diámetro 40 mm	
R_2 = 14.85 mm	$\sigma pr = 335$ MPa	R_2 = 19.85 mm	$\sigma pr = 334$MPa
R_2 = 14.4 mm	$\sigma pr = 345$ MPa	R_2 = 19.4 mm	$\sigma pr = 342$MPa
R_2 = 14.15 mm	$\sigma pr = 352$ MPa	R_2 = 19.15 mm	$\sigma pr = 346$ MPa

3.2.2. Determinación de la profundidad de la capa endurecida

Al analizar la profundidad de la capa endurecida por la ecuación 2.8 se tuvo en cuenta las diferentes fuerzas a la que fue sometido el material.

P= 500 N $h = 0{,}3$ mm

P=1 500 N $h = 1{,}2$ mm

P= 2 500 N $h = 1{,}7$ mm

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

3.2.3. Determinación de la tensión máxima a la que se somete el material

Las tensiones máximas a la que se somete el material se calcula por la expresión 2.9

Fuerza sobre la zona de contacto

Fn = 500 N

Radios de curvatura del rodillo y la pieza respectivamente:

R_1 = 25 mm R_2 = 14.85 mm

R_3 = 2 mm R_4 = 7.525 mm

Se determina el coeficiente de seguridad de pandeo (n_p) por la ecuación 2.9 b

y los resultados (ver tabla 3.1)

Tabla 3.1 Resultados de la tensión máxima a la que se somete el material

Fuerza (N)	Resultados de σmáx (MPa)	
	Diámetro 30 mm	Diámetro 40 mm
500	545	609
1500	1548	1639
2500	2410	2497

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

3.2.4. Determinación del radio del área del contacto circular

El área de contacto circular, que se considera el área reducida para las deformaciones por fluencia y el procedimiento por la ecuación 2.10:

Diámetro de la pieza y del rodillo respectivamente

d_1 =30 mm d_2 = 50 mm

Para distintas cargas sobre las probetas:

P= 500N r = 5.9. 10^4 mm

P = 1500 N r = 10.3. 10^4 mm

P =2500 N r = 13.4.10^4 mm

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

3.2.5. Determinación del esfuerzo máximo que determina las tensiones máximas para lograr el aplastamiento.

El compactamiento de los granos por el aplastamiento de los mismos permite incrementar la dureza por acritud.

Se determina por la relación $\frac{A}{B}$ = 0,4

Según las ecuaciones 2.12 y 2.13 de las condiciones de resistencia, se obtuvo el coeficiente (α = 0,536)

Al determinar las tensiones de aplastamiento considerada uniformemente distribuida sobre el área de aplastamiento, por la condición de resistencia al aplastamiento por la ecuación 2.11 el resultado sería:

Diámetro de la pieza y del rodillo respectivamente:

d_1 = 30 mm d_2 = 40 mm d_3 = 50 mm

Tabla 3.2 Resultados del esfuerzo máximo para lograr el aplastamiento.

Fuerza (N)	Resultados de $\sigma_{maxaplast}$ (MPa)	
	Diámetro 30 mm	Diámetro 40 mm
500	166.9	153.4
1500	289.2	265.68
2500	373	342.9

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

3.3. Resultados de la experimentación.

Se modeló la influencia de las diferentes condiciones de aplicación de las cargas de rodadura generadas por el rodillo, en el comportamiento de las tensiones. Dicho análisis se realizó atendiendo a las variables independientes: fuerza “P” y profundidad las cuales están relacionadas con los valores de tensiones.

En cada una de las probetas sometidas a la acción de la carga por rodadura, de acuerdo con el diseño del experimento anteriormente descrito en el Capitulo II, se consideran 6 mediciones a diferentes diámetros.

3.4. Comportamiento de la profundidad en relación a la fuerza

Al analizar el comportamiento de los regímenes de elaboración, en dependencia de las cargas aplicadas se obtuvieron capas endurecidas a diferentes profundidades (ecuación 2,8), permitiendo evaluar el comportamiento del proceso, en el gráfico 3.1 se observa el comportamiento de la capa endurecida en dependencia de la fuerza. Se evidencia que la profundidad de la capa endurecida depende de la mayor fuerza que se aplique, por consiguiente el material alcanzará más acritud. La figura 3.1 muestra que la profundidad de la capa endurecida es directamente proporcional a la fuerza.

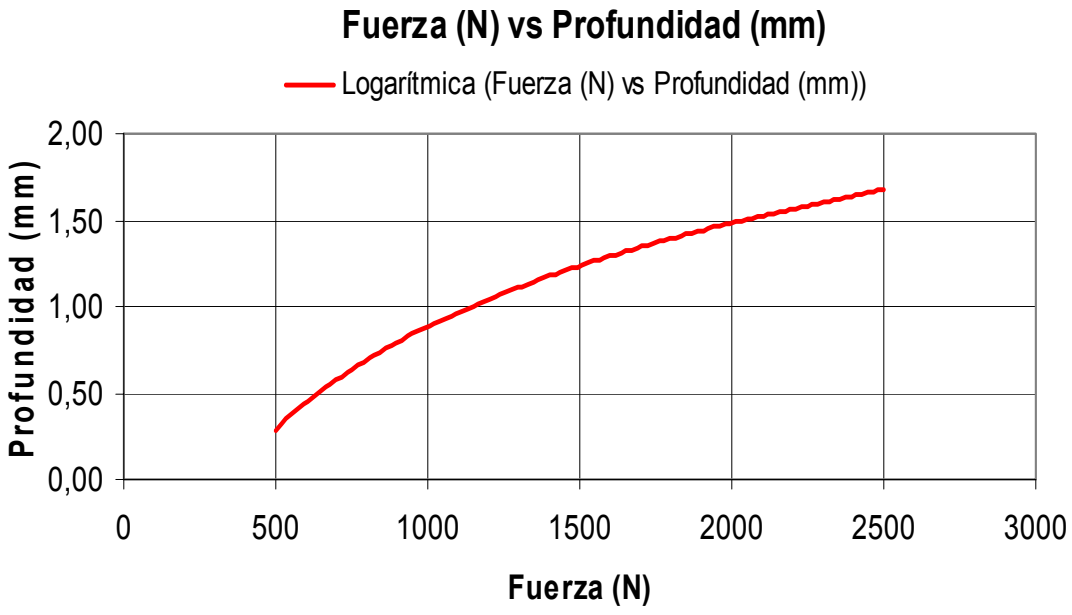


Figura 3.1. Relación de la profundidad y la fuerza.

La ecuación del modelo ajustado para la profundidad de la capa es:

$y = 0,8618Ln(x) - 5,0671$

$R^2 = 0,998$

3.4. Resultados de la simulación por Elementos Finitos.

Se realizó la modelación utilizando el paquete de software ANSYS V.10 como proceso del Método de Elementos Finitos, las corridas de los experimentos fueron hechas con la variación simultánea de dos diámetros, aplicando las cargas en el centro de la pieza como lugar donde existe mayor tendencia a la deformación plástica.

3.4.1. Comportamiento de las tensiones

Se realiza una valoración de la influencia que ejerce la Fuerza sobre el valor de tensión a obtener, se calculan valores estadísticos y gráficos en cada muestra, y ejecutará varias pruebas para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre muestras. Como se observa en la figura con el mínimo nivel de fuerza en ambos diámetros (30 y 40 mm) se obtiene un valor de tensión 617 y 658 MPa, para nivel medio 1655 y 1758 MPa, finalmente para su máximo nivel toman un valor de 2485 y 2512 MPa respectivamente por lo que se puede llegar a la conclusión, a medida que se aumentan las fuerzas y los diámetros las tensiones incrementan su valor de forma lineal.

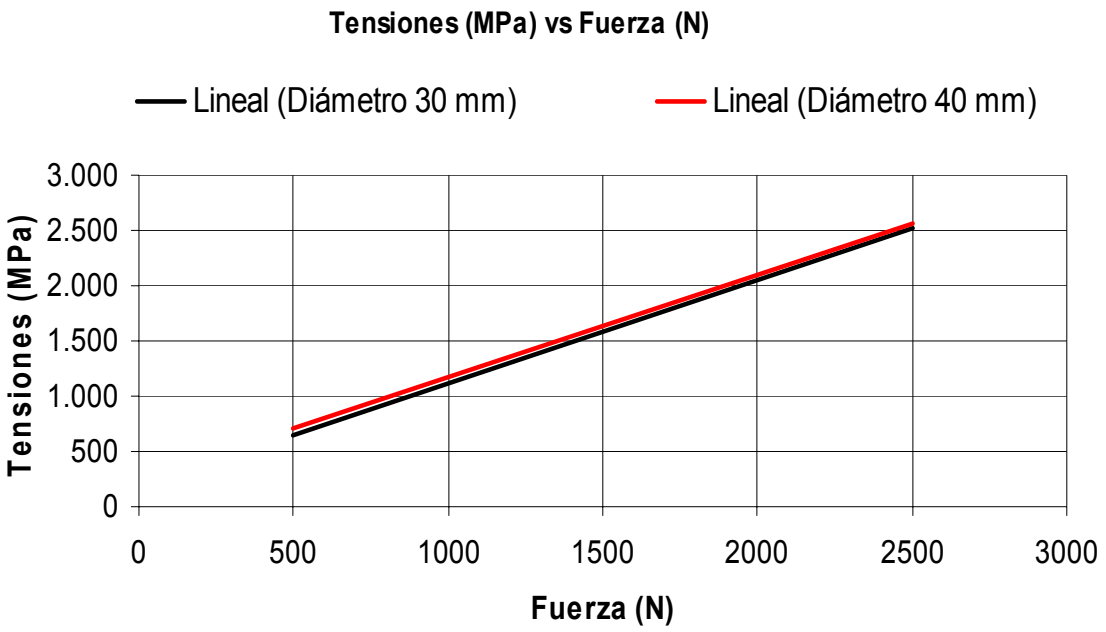


Figura 3.2. Relación de las tensiones y Fuerzas.

Se obtuvo la ecuación para el modelo de tensión y fuerza:

Para diámetro 30 mm

$y = 0{,}9338x + 185{,}11$

$R^2 = 0{,}9959$

Para diámetro 40 mm

$y = 0{,}9269x + 252{,}45$

$R^2 = 0{,}9885$

Los resultados de la simulación muestran que las máximas tensiones se localizan en la parte superior del cilindro que entra en contacto con el rodillo durante su desplazamiento, desde los valores máximos (color rojo), hasta valores mínimos (color azul), como se muestra en las figuras. Los valores de las tensiones en la zona de contacto se pueden observar en anexo 3 tabla 3.3.

El material se va tensionando según entra en contacto con el rodillo con máximos valores de tensiones (ver figuras 3.3; 3.4; 3.5).

Diámetro 40 mm

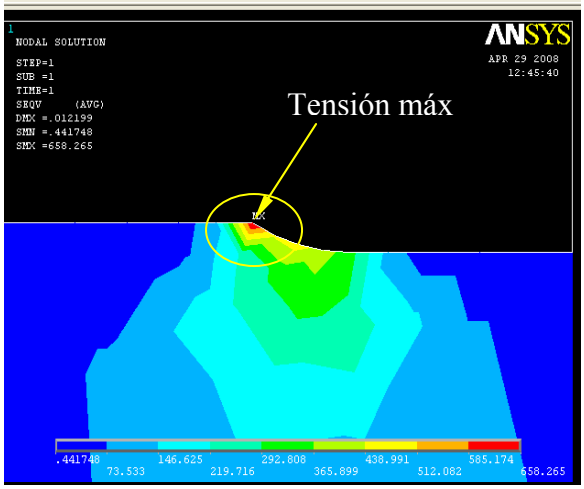


Figura 3.3 Distribución de tensiones (profundidad 0.3 mm y fuerza 500 N)

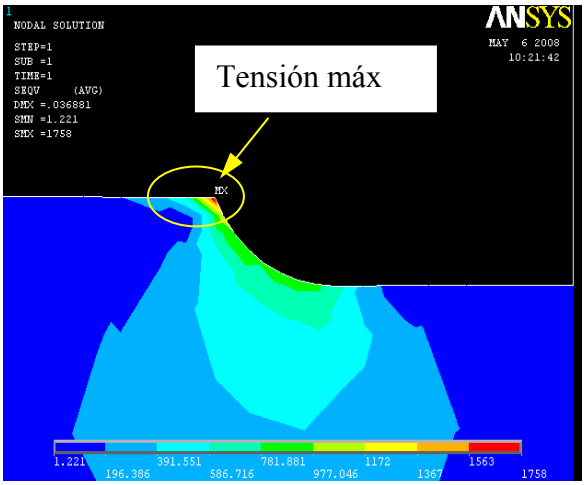


Figura 3.4 Distribución de tensiones (profundidad 1.2 mm y fuerza 1500 N)

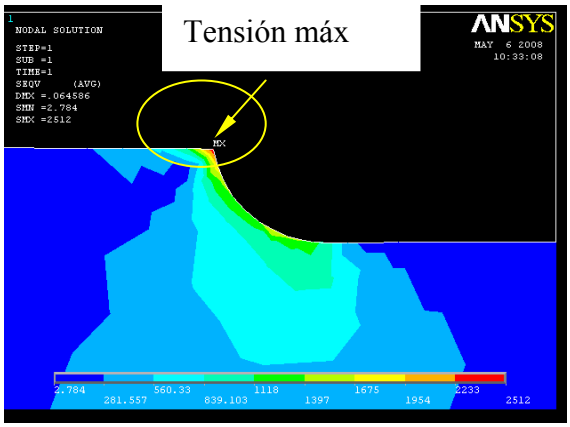


Figura 3.5 Distribución de tensiones (profundidad 1.7 mm y fuerza 2500 N)

Haciendo una comparación entre las figuras de simulación se puede observar que los valores de tensiones aumentan con el aumento de la fuerza y la profundidad, a medida que se va deformando.

Cuando el material comienza a deformarse los valores de las tensiones no son significativos, según va deformando toma valores significativos hasta alcanzar en el centro de la pieza los máximos valores de tensiones de deformación (fig.3.6), Analizando la microestructura en este punto para el nivel mínimo se obtiene la mínima compactación de los granos (fig. 3.7). Pero al incrementar los valores de las variables la compactación de los mismos también aumenta.

Diámetro 30 mm

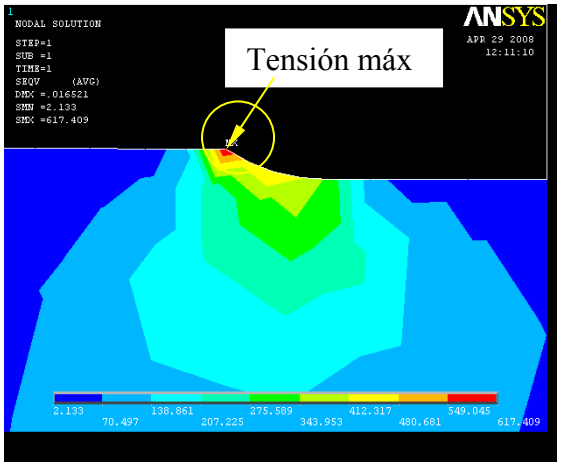


Figura 3.6 Distribución de tensiones (profundidad 0.3 mm y fuerza 500 N)

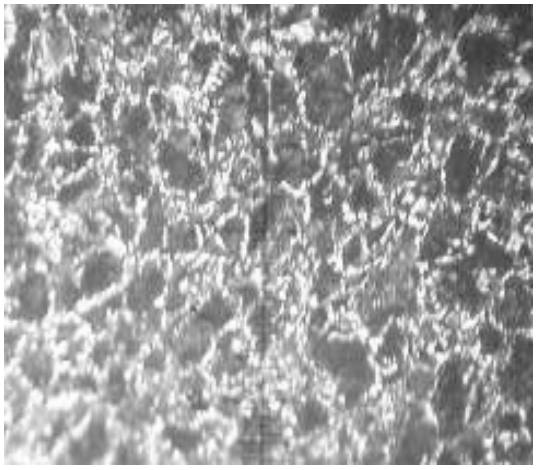


Fig. 3.7 Microestructura del acero deformado (fuerza 500 N)

Al aumentar el nivel los valores de tensiones se incrementan, en tanto en la microestructura la compactación de los granos es mayor.

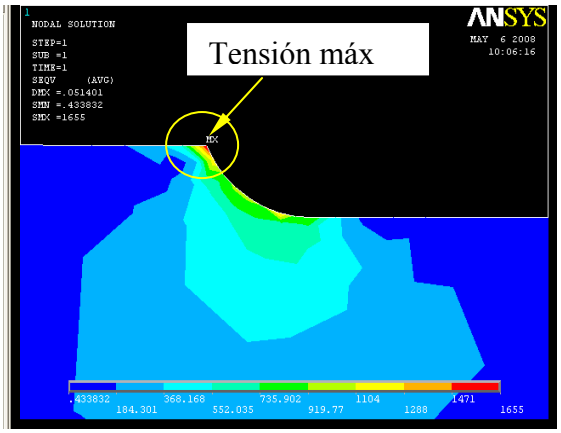


Fig. 3.8 Distribución de las tensiones profundidad 1.2 mm) fuerza 1500 N

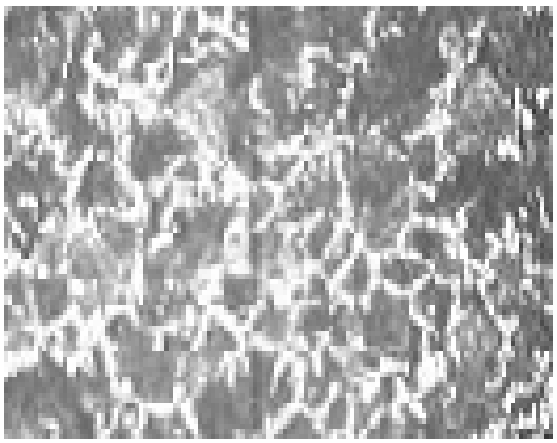


Fig. 3.9 Microestructura del acero deformado (fuerza 1500 N)

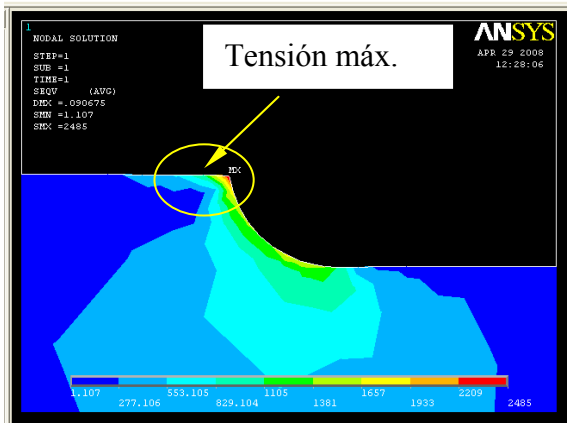


Figura 3.10 Distribución de tensiones (profundidad 1.7 mm y fuerza 2500 N)

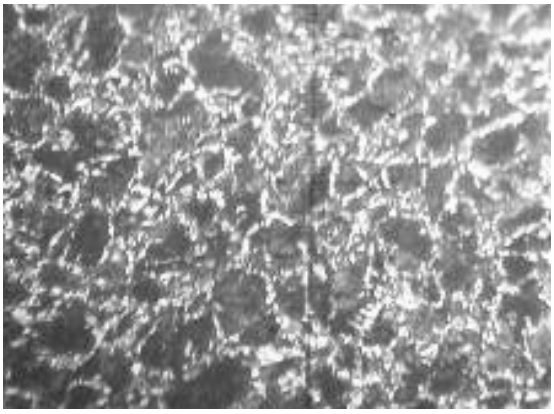


Fig. 3.11 Microestructura del acero deformado (fuerza 2500 N)

En el máximo nivel se observa mayor compactación de los granos, lo cual está motivado por el incremento de las variables, los mayores valores de dureza dados según las fuerzas 210; 224 y 218 HV.

Los valores nodales de tensiones a partir de su relación con el modelo creado en MEF se corroboran con los logrados por vía experimental mediante la técnica de medición periódica de tensiones. Lo cual demuestra la relevancia de las técnicas empleadas, tanto analíticas como experimentales.

Se demuestra la validez de los resultados y la fiabilidad de métodos computacionales como son los Métodos de Elementos Finitos, al comparar los valores de tensiones obtenidos por estos métodos con los obtenidos experimentalmente (alta concordancia). Lo cual concluye que se puede valorar una tecnología desarrollada antes de llevarla a la práctica, ajustando parámetros como fuerza, profundidad, permitiendo además definir cuál proceso es el más adecuado evitando la técnica de ensayo y los posibles errores.

3.4.2. Calibración del Método de Elemento Finito

Es importante analizar el error (ecuación 2.14) para saber las diferencias entre los valores reales del material y los obtenidos por la simulación.

Donde:

La tensión máxima obtenida en la simulación $\sigma_{\max}$ = 617 MPa

La tensión máxima del material trabajado $\sigma_{mín}$ = 666.84 MPa

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{617}{666.84}\right) \cdot 100\%$$

Finalmente el error es

$$\varepsilon = 7.42\%$$

El error entre las diferencias de las tensiones actuantes obtenidas en la simulación por el Método de Elementos Finitos y la tensión límite de rotura propia del material es de valor pequeño con 7.42%.

3.5. Valoración Económica.

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

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

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

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

A fin de revelar las ventajas en el orden técnico-económico, se procederá a la comparación entre la obtención de la simulación experimental del proceso de deformación plástica superficial por rodadura y una obtenida mediante la simulación por el Método de Elementos Finitos.

3.5.1. Costo de la simulación por experimentos físicos de la Deformación Plástica Superficial.

Una vez calculados los tiempos para la elaboración de la pieza Deformada Plásticamente, y teniendo en cuenta la incidencia de máquinas, operario, energía eléctrica, el costo estimado de fabricación de la pieza por el proceso por deformación plástica superficial, es 3 466, 74 CUC.

3.5.2. Costo de la simulación por el Método de Elementos Finitos de la Deformación Plástica Superficial.

Los diseños de experimentos establecidos con anterioridad en el trabajo de Fernández 2007, fueron realizados nuevamente de forma computacional por el Método de Elementos Finitos. A pesar que los métodos computacionales ahorran números de corridas, gastos de materiales, se debe tener en cuenta el consumo por concepto de energía eléctrica (ver tabla 3.2).

Tabla 3.2 Costo total de la simulación por MEF.

Consumo d la máq. en hr	Tiempo de traba computadora(hr)	Tarifa eléct. ISMM a 12 hrs diarias	Tarifa del operario 1 hr	Costo total ($)
350 Watt	108	0.044	18,75	3 688

Para este consumo es necesario tener en cuenta:

350 Watt consumo de la máquina en 1hr, por lo que para 108 hrs, tiempo consumido en la realización de la simulación es 37.8 kW

Al evaluar el comportamiento de la experimentación de la pieza por ambos procesos con un fondo anual de 108 hrs se tiene que:

- Deformación Plástica Superficial por experimentación física: $ 3 743,28 CUC.
- Deformación Plástica Superficial por simulación (MEF): $ 147,52 CUC.

3.5.3. Comparación de los costos por diferentes procedimientos.

Como puede apreciarse, el costo de fabricación de la pieza mediante la variante experimental física de la Deformación Plástica Superficial por rodillo simple, es mayor que por la simulación por el Método de Elementos Finitos, demostrándose que este es un proceso más económico para definir cuál proceso es el más adecuado evitando la técnica de ensayo y los posibles errores, y que es ecológicamente más limpio que los esquemas tecnológicos tradicionales. Se logra un ahorro de $ 3 595,76 CUC.

3.6. Valoración del impacto medio ambiental

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

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

Adicionalmente, para diferentes variantes de tratamiento térmicos se utilizan en ocasiones una serie de productos químicos y de combustibles, sólidos y gaseosos, que generan

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

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

3.7. Conclusiones del Capítulo III

1. Los resultados de la simulación demostraron que las mayores tensiones se localizan en la parte frontal que entra en contacto con el rodillo durante su desplazamiento, donde el resto de la pieza experimenta una mínima deformación. Las tensiones se incrementan en la medida que aumenta la fuerza, la profundidad y el diámetro de la pieza; obteniéndose un grado de compactación mayor de los granos.
2. Existe una analogía entre los resultados obtenidos experimentalmente y la simulación por el Método de Elementos Finitos realizada para los diámetros 30 mm y 40 mm, con error de 7.42%.

3. El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante Deformación Plástica Superficial por rodillo, de piezas fabricadas de acero 45, tiene un significativo efecto económico con respecto a la simulación por el Método de los Elementos Finitos, permite un ahorro de $ 3 595,76 CUC, en 108 hrs de trabajo.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se definió la distribución de las tensiones en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodadura con material acero 45 empleando el Método de Elementos Finitos; según este en la zona de interacción del rodillo con la pieza se localizan los máximos valores de tensiones, en correspondencia con el apilamiento de los granos.
2. Se comete un error con el empleo de la simulación por el Método de Elementos Finitos de 7,42 %.
3. El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante la deformación Plástica Superficial por rodillo de piezas fabricadas de acero 45, es técnicamente factible y económicamente racional. En 108 hrs de trabajo, el efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento por este método es de $ 3 743,28 CUC, y para el caso de la simulación la cifra de $ 147,52 CUC, en igual período, lo que constituye un ahorro de $ 3 595,76 CUC.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la simulación por el Método de Elementos Finitos para otro diámetro superior a los trabajados para comprobar el comportamiento de la distribución de las tensiones.
2. Valorar el empleo de otro tipo de rodillo, que permita evaluar las condiciones de endurecimiento del acero 45 en las mismas condiciones de trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Alfonso, E; Martin, J. Aplicación de la Ley de Wolf-Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física "DIDACFISU' 2000".
2. Alfonso, E. et.al. Investigación del mecanismo de formación de la acritud y tensiones residuales en las capas superficiales durante el proceso de corte de piezas endurecidas, p.52-56, Construcción de Maquinarias (Santa Clara). No. 1. 1995.
3. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición– microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas. 2002.
4. Alvarez, E; G, M. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1999. p 69-76.
5. Alvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires.Facultad de Ingeniería, 2004.
6. American Heller Corporation. "Skiving & Burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003, http: // www.americanheller.com.
7. Badiola, V. Materiales Departamento. Ingenierias Mecánica, Energética y de Materiales, Diseño de Máquinas I, 2004, España.
8. Barceinas, S y A.Juárez, H. Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
9. Barret, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p
10. Bengton, U. Design requeriments materials properties a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
11. Bencere Products. "Burnishing and Super Finishing",England, Obtenido de la Red mundial el 15 de Abril del 2003, http://www.bencere.co.uk.
12. Boada, O. "Métodos tecnológicos para aumentar la durabilidad de las piezas", Revista Construcción de Maquinaria, Año 10, No. 3, Septiembre-Diciembre 1985, Cuba.

13. Boada, O., Díaz, S., Campos, Y. "Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial", Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarria (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo-Agosto 2003, Pág. 53-58, Cuba. ISSN1029-516X.

14. Boada, O., Sviagolski, Y. "Dispositivo para rodilar superficies cilíndricas con fuerza de apriete controlada del rodillo" Revista Construcción de Maquinaria, Año 8, No. 2, Mayo-Agosto 1997, Cuba.

15. Bower, A F; Johnson, K L. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 37, no. 4, pp. 471-493. 1989.

16. Boyle, J.y Spence, J. Stress analysis for creep. Londres: Butteerwoths, 1989.

17. Buraya, D. Cristal Structure Analisys. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Materials Science and Engineering (3–0) 3. Febrero de 2001. Disponible en la World Wide Web. http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm

18. Bright Burnishing Tools. "What is roller burnishing?",India, Obtenido de la Red mundial el 3 de Mayo del 2003, http//www.brightburnishingtools.com.

19. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.

20. Caraballo, M. A. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 2. 2004.

21. Caraballo, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 1. 2004.

22. Caraballo, M. A. Endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield. Tesis en opción al titulo de Doctor. ISMMMoa. Metalurgia y Electromecánica. 2006.

23. Casals, B. Soldadura y embutición por explosión del titanio en la fabricación de recipientes a presión. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997.

24. Casillas, A., “Cálculo de tallers”. 5ª ed., Madrid, España 1982. Pág 316-321

25. Caubet, J.J. "Teoría y Práctica Industrial del rozamiento". España, 1971.

26. Cogsdill Tool Products, Inc. “Roller burnishing”, USA, Obtenido de la Red mundial el 8 de mayo del 2003, http://www.cogsdill.com.

27. Coromant Korokey. Guía de aplicación de herramientas. Pag 38-43. 1996

28. Cullity, B. D. Elements of X–Ray Difraction. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame. Instituto Cubano del Libro. Ediciones Revolucionarias. La Habana. 1967. 514p.

29. Díaz, S, Boada, O. “Caracterización del bruñido por rodillo simple en la elaboración del acabado superficial de piezas”. Revista Centro Azúcar, Universidad Central de Las Villas, No. 4, Octubre-Diciembre 2004. ISSN 0253-5757.

30. 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.

31. Dieter, G. Metalurgia Mecánica. MacGraw-Hill Book Company, Inc. 1967.

32. El-Axir, M.H. "An investigation into roller burnishing", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 11, September 2000, Pages 1603-1617, UK.El-Axir, M.H.

33. El-Axir, M.H. Ibrahim, A.A. “Some surface characteristics due to center rest ball burnishing”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 167, Issue 1, August 2005, Pages 47-53, The Netherlands.

34. El-Khabeery, M.M. “Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 132, Issue 1-3, January 2003, Pages 82-89, The Netherlands.

35. El-Khabeery, M.M., El-Axir, M.H. “Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity”, International Journal of

Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 12, September 2001, Pages 1705-1719, UK.

36. Ecoroll GmbH. "Roller burnishing", Germany, Obtenido de la Red mundial el 28 de Abril del 2005, http://www.ecoroll.de

37. Efunda, Inc. "Burnishing, Roller Burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 21 de febrero del 2005, http://www.efunda.com.

38. Elliot Tool Co. "Carbide roll burnishing tools", USA, Obtenido de la Red mundial el 25 de abril del 2004,http://www.elliottool.com.

39. Fattouh, M. El-Axir, M. H., Serage, S. M. "Investigations into the burnishing of external cilyndrical surface of 70/30 Cu-Zn alloy", Wear, Volume 127, Issue 2, 15 October 1988, Pages 123-137, UK.

40. Feschenkov, V, Majmutov, R. El torneado. Editorial Mir. Moscú. Pág 152-163. 1989.

41. Gabb, T.P. Telesman, J., Kantzos, P., Prevey, P.S. "Improved method being developed for surface enhancement of metallic materials", Advanced Materials and Processes, Volume 160, No. 1, January 2002, Pages 69-72, USA.

42. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 53-89

43. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 17-22

44. Gutierrez, F. y R. De la Vara, "Análisis y Diseño de Experimentos", Mc Garw Hill, 1ª ed, 237-264. Cd. México. México (2003).

45. Hasegawa, S. "The road to smoother surfaces", Manufacturing Engineering, Volume 126, No. 2, February 2001, Pages 70, 72, 74, 76, 78, USA

46. 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

47. Hernández, S. "Metodología de la Investigación." Editorial McGraw-Hil. México. 1997.

48. Hernández, T. Comportamiento de las variaciones mecánicas superficiales mediante la deformación Plástica por Rodadura. Tesis de Maestría. ISMMM. Moa. 2007. 83 p

49. Hu-Nai-Sai y Zhou Hui-Jiu The Effect of Surface Plastic Deformation on Fatigue Strength and its Mechanism. University Xian, China.2002.

50. Key To Steel. Fracture Thoughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en http://www.key-to-steel.com/

51. Key To Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World W ide Web en http: //www.key-to-steel.com/.

52. Korotcishe.L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág 53-64.

53. Kruschov, M.M. Resistance of metals to wear by abrasion, as related to hardness. "Proceedings of Conference on Lubrication and Wear". London 55- 59. 1957.

54. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359–360.

55. LAMBDA RESEARCH. The effect of prior cold working on the development of tensile residual stress following bulk deformation. Diffraction Notes. Nº28. Winter 2002. Disponible en la World Wide Web http://www.lambda-research.com/dn28.pdf.

56. 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.

57. Lee, S.S.G., Tam, S.C. Loh, N.H." Ball burnishing of 316L stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, Volume 37, Issue 1-4, February 1993, Pages 241-251, The Netherlands.

58. Lin, Y.C. Yan, B.H., Huang, F.Y. "Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi method", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 18, No. 9, 2001, Pages 673-682, UK.

59. 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.

60. Lubriner, J. Plasticity Theory. University of California at Berkeley. 1986. Charter 2, pág 77-86.

61. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.

62. Martinez, C. R. Ingeniería de Lubricación y Tribología. Fundamentos de tribología. Pág, 29-36, 43-47. 2006.

63. Martynenko, O.V, "The interconnection of strained condition in the area of contact with the kinematics of points of deformed surface points by the rollers plastic deformation of the surface", Proceeding of Fundamental and application problems of machine building technology International Conference, Technology 2002, March 1-September 10, 2002, Tula Technical University, Russia.

64. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996

65. Mazein, P.G. Prusakov, D.V., Tchunin, A.V. "Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations", Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue #1, (10). January-March 2001, Russia.

66. Mech-India. "Process of burnishing", India, Obtenido de la Red mundial el 25 de Marzo del 2005, http://www.mech.india.com.

67. Monaghan & Associates Inc. "Roller burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 22 de abril del 2003, http://www.monaghaninc.com.

68. Moreno, P. A. "Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas "Dpto. Mecánica de medios continuos. Universidad de Sevilla. Obtenido de la Red mundial el Lunes 28 de Febrero de 2005.

69. Normas Cubanas:

NC 10-55:86. Metalografía. Microfotografías. Escala de las Imágenes.

NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.

NC 10-57:86. Metalografía. Determinación del Tamaño del grano en los Metales. Métodos de Ensayo.

70. Niberk, A.N. “Resistencia al desgaste de guías tratadas por rodilado”, Máquinas y Herramientas, No. 5, 1987, Pág 25-26, URSS.

71. Ogburn, F. “Roll to the finish”, Cutting Tool Engineering, Volume 53, No. 6, June 2001, Pages 54-57, USA.

72. Odintsov, L.G. Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial", Editorial M, 1987. Pág 385-422, URSS.

73. 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.

74. Pero-Sanz, J.A. “Ciencia de los materials. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades”, Editorial DUSSAT SA, 1999. España.

75. Pero-Sanz, J.A. “Ciencia de los materials. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades”, Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. Pág 393-502. España.

76. Pickering, F.B. Proceedings of High Manganese Steel, ASTM A 128 AB. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 1996. 34 p.

77. Pochettino, A.A y Sánchez, P. Modelización del Endurecimiento por Trabajado en Materiales Metálicos. Aplicaciones a Materiales de Estructura Hexagonal Compacta. Vol. 157-162, 835-840, 1994.

78. Prevey, P.S. “Effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN718, Nickel base alloys”, ASM International, Heat Treating Including Advances in Surface Engineering: An International Symposium in Honor of Professor Tom Bell and Professor Jerome N. Cohen Memorial Symposium on Residual Stresses in the Heat Treatment Industry Proceedings of the 20th Conference; Volume 1, 2000, Pages 426-434, USA.

79. Prevey, P.S. Cammett, J. “Low cost corrosion damage mitigation and improved fatigue performance of low plasticity burnished in Al base alloy”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 10, No. 5, October 2001, Pages 548-555, USA.

80. Ramos, V. Resistencia de Materiales. Editorial Pueblo y Educación. 1989. p 156- 160.

81. Reshetov, P. Elementos de Máquinas. Editorial Mir. Moscú. Pág 231-265. 1989.

82. Schejve, J. Fatigue of structures and materials, eBook ISBN 0-306-48396-3, Kluwer Academic Publishers Dordrecht. New York, Boston, London, 2004 pág 160-172.

83. Smelianky, V. M., Kalpin Y. G., Barinov V.V. "Empleo de las posibilidades plásticas de los metales en la capa superficial de las piezas durante la elaboración por rodilado exterior." Revista "Novedades de la Construcción de Maquinarias". Moscú. Pág. 54-58. No. 8. 1990. URSS.

84. Smelianky, V.M., Blumenstein, V.Yu. "Technological succession mechanics succession appropriatenesses of the plasticity resource exhaustion at the stage of surface plastic deformation", Proceeding of International Conference of Materials", May 2001, Russia.

85. Smith, W.F. "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales", Mc Graw-Hill, 2001, España.

86. Stiopin,P.A. Resistencia de materiales. Editorial Mir. Moscú. Pág 26-92. 1985.

87. Sugino Corporation, "Superoll-Roller burnishing tool", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003, http: //www.suginocorp.com

88. Tubielewicz, K., Zaborski, A. "Top layer of enhanced quality steel after burnishing", Tribología, Volume 28, Nº. 5-6, 1997, Pages 956-962, Poland.

89. Westerman, W.J. "An overview of roller burnishing as a surface conditioning technique", Society of Manufacturing Engineers Magazine, 1981, Page 12, USA.

Anexos

Anexo I

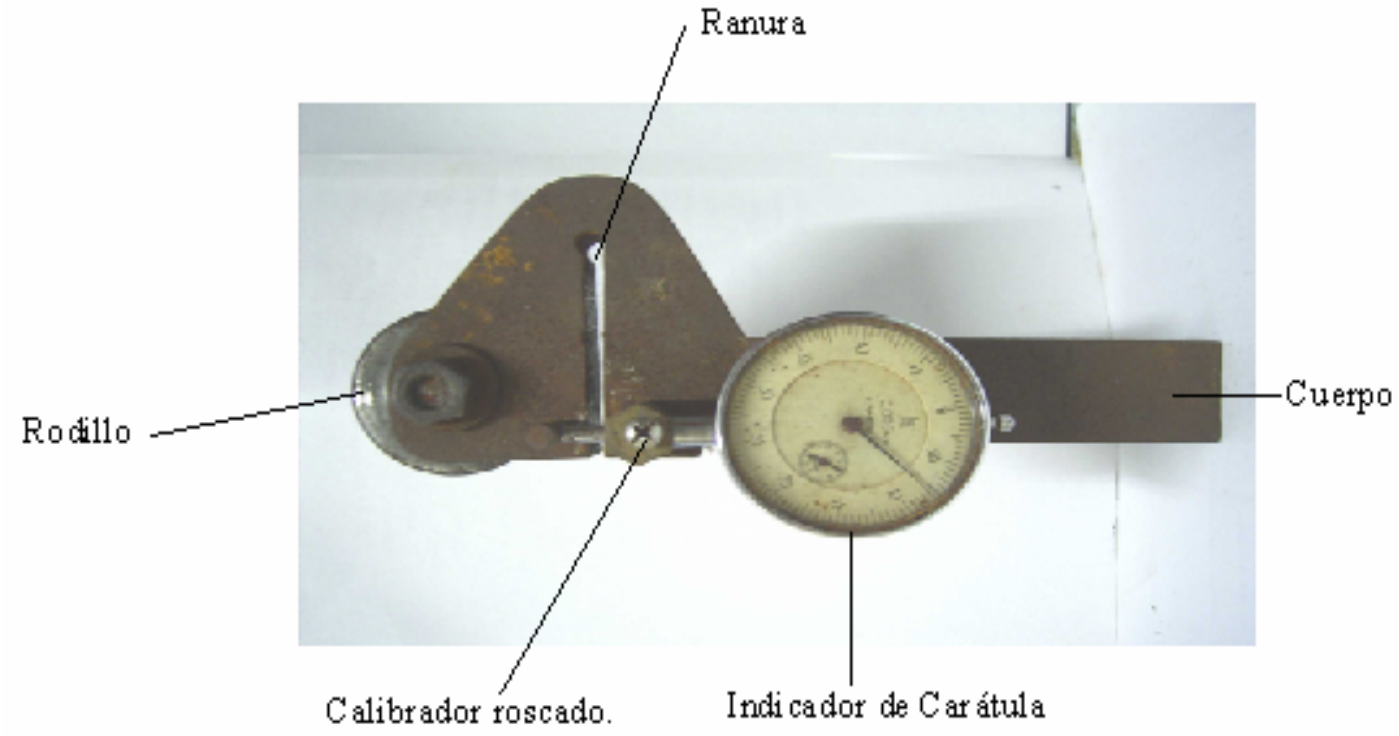
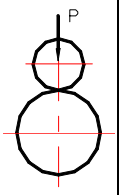


Figura 1. Herramienta empleada en la Deformación Plástica Superficial por rodillo.

Anexo # 2

Tabla 2.3 Determinación de las tensiones de contacto

Cuerpos e contacto		**Materiales distinto**	**Materiales iguales ($E_1 = E_2 = E_3$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.3$)**		
		σ_{max}	**σ_{max}**	**ζ_{max}**	**Profund. de ζ_{max}**
Dos cilindros $P' = \frac{P}{L}$		$0.564\left[\frac{P\left(\frac{R_1+R2}{R_1R_2}\right)}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}\right]$	$0.418\left[P'E\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$	**$0.3\sigma_{max}$**	**0.79 L**

ANEXO # 3 Resultados de las tensiones y desplazamientos obtenidos por la simulación el Método de Elementos Finitos

Tabla 3.3 Resultados del experimento.

Niveles	Respuestas		Salidas	
	Prof.(mm)	P(N)		
Nivel superior (+1)	1.7	2 500		
Nivel medio (Δ)	1.2	1 500		
Nivel inferior (-1)	0.3	500		
Diámetros(mm)			Tensiones σ (MPa)	Desplaztos δ (mm)
30	0.3	500	617.409	0.0168
	1.2	1500	1655	0.0514
	1.7	2500	2485	0.0906
40	0.3	500	658.265	0.0122
	1.2	1500	1758	0.0368
	1.7	2500	2512	0.0646