



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Dr. "Antonio Núñez Jiménez"

Facultad Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Título: Metodología para determinar el estado tensional
del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de
la cicloide**

Autor: Frank Ernesto Revé Tomacen

Tutores:

Ms.C Tomás Fernández Columbié

Ing. Dayanis Alcántara Borges

Moa - 2010

"Año 52 de la Revolución"

RESUMEN

El trabajo de diploma propone una metodología, con el objetivo de determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío, por el método de la cicloide. Para esto se propone un diseño de experimento factorial completo que describe la metodología del estado de tensión en la zona de contacto, a fin de evaluar la influencia en probetas simétricas de parámetros como el diámetro del rodillo (dp), la profundidad de penetración (hp); y el ángulo de contacto (φ_k), que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento por deformación plástica superficial generado por rodillo simple.

En el trabajo, como una potente herramienta se utilizan software como el Excel 2010 y el MathCAD para realizar los cálculos y graficar los resultados obtenidos por la metodología propuesta. Finalmente se analiza la influencia del proceso en el medio ambiente, así como la valoración económica para obtener un significativo efecto social y ambiental.

ABSTRACT

The work of diploma proposes a methodology, with the objective to decide the tensional state of the AISI 1045 steel deformed in cold, for the method of the cycloid. For this proposes a design of experiment complete factorial that describes the methodology of the state of tension in the area of contact, in order to evaluate the influence in symmetrical test tubes of parameters as the diameter of the roller (dp), the depth of penetration (hp); and the angle of contact (φ_k); that they could have a significant effect in the quality of the process of hardening for plastic superficial distortion generated for simple roller.

In the work, as a potent tool use to him software as the Excel 2010 and the MathCAD to carry out the calculations and graphic the obtained results for the proposed methodology they. Finally analyze the influence of the process in the halfback gives atmosphere, as well as the economic valuation to obtain a significant social and environmental effect.



DECLARACION DE AUTORIDAD

Yo: **Frank Ernesto Revé Tomacen**, autor de este trabajo de diploma y los tutores, Ms.C Tomás Fernández Columbié y la Ing. Dayanis Alcántara Borges, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Firma

Diplomante: Frank Ernesto Revé Tomacen

Firma

Ms.C Tomás Fernández Columbié

Firma

Ing. Dayanis Alcántara Borges

PENSAMIENTO

...la investigación es una empresa multilateral que requiere el más intenso ejercicio de cada una de las facultades psíquicas, y que exige un concurso de circunstancias sociales favorables; por este motivo, todo testimonio personal, perteneciente a cualquier período, y por parcial que sea, puede echar alguna luz sobre algún aspecto de la investigación...

Mario Bunge en ¿Cuál es el método de la ciencia?

AGRADECIMIENTOS

A DIOS porque si no fuera por el...

A mis tutores Ms.C Tomás Fernández Columbié y la Ing. Dayanis Alcántara Borges por contar con la paciencia necesaria para guiarme en la realización de este trabajo.

A mis compañeros de trabajo:

Iván Casals Breff, Dania Amat, Carlos Vinardell, Eider Sánchez, Elsis Ferrer, Magdalena, Raymundo Betancuort, William Quezada, Liban Montes de Oca, Terman Frómeta, Adrián Suarez Orduñez y Surelis Domínguez Oro. Les agradezco de todo corazón por brindarme sus conocimientos y su apoyo desinteresadamente.

A todos mis amigos y amigas porque gracias a ellos obtuve la fe para terminar este trabajo.

A la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.

Y especialmente para todos...

Eterno agradecimientos.



DEDICATORIA

Este trabajo de diploma está dedicado:

***Para mi madre y abuela, por alentarme día tras días en la realización
de mi VIDA.***

***Para la memoria de mi padre Diógenes Revé Videaux que en paz
descanse.***

Para mis primos y sobrinos, que les sirva de ejemplo.

Para todos mis compañeros de estudio.

ÍNDICE

Contenido	Pág
Introducción	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.	4
1.1. Introducción	4
1.2. Estudio de la deformación plástica superficial por rodillo	4
1.3. Generalidades acerca del acero AISI 1045	7
1.3.1. Composición química del acero AISI 1045	8
1.3.2. Propiedades físico, mecánicas del acero AISI 1045	10
1.4. Tensiones durante el proceso de deformación	11
1.5. Física química del contacto	14
1.6. Endurecimiento por deformación	15
1.7. Tratamientos superficiales contra el desgaste	16
1.8. Generalidades acerca de la cicloide	18
1.9. Conclusiones del capítulo 1	20
Capítulo 2. Materiales y métodos	21
2.1. Introducción	21
2.2. Selección del elemento deformante (rodillo)	22
2.3. Selección del material a deformar plásticamente por rodillo	23
2.4. Diseño de experimento.	23
2.4.1. Diámetro del rodillo	24
2.4.2. Profundidad de penetración	24
2.4.3. Ángulo de contacto (φ_k)	24
2.4.4. Tensiones normales y tangenciales	25
2.5. Metodología propuesta del estado de tensión en la zona de contacto	26
2.6. Conclusiones del capítulo 2	29
Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados	31
3.1. Introducción	31
3.2. Cálculo del ángulo de contacto (φ_k)	31
3.3. Cálculo la mitad del ancho de contacto (z_k)	32
3.4. Cálculo del movimiento por cicloide	33
3.5. Cálculo de las deformaciones relativas por cicloide	35



3.6.	Cálculo de la característica física - mecánica (m)	37
3.7.	Cálculo de la característica física - mecánica (A)	38
3.8.	Cálculo de la tensión inicial (σ_i) por cicloides.	39
3.9.	Cálculo tensiones normales y tangenciales	41
3.10.	Valoración económica	43
3.11.	Impacto medio ambiental	43
3.12.	Conclusiones del capítulo 3	45
	Conclusiones generales	46
	Recomendaciones	47
	Bibliografía	48
	Anexos	

Introducción

Introducción

Hoy día, expuesta la industria a un cambiante y cada vez más competitivo escenario económico, nos encontramos con la realidad de que valiosos recursos productivos no son utilizados eficientemente, debido a que el enemigo número uno de la industria, el desgaste, se ha encargado de retirarlos prematuramente de servicio. Es por eso que uno de los problemas más importantes del proceso tecnológico en la rama de la construcción de las máquinas herramienta es el aumento de la seguridad y de la vida útil de las piezas.

En las condiciones modernas de las relaciones de mercado, las empresas deben proponer al usuario una producción competitiva, que tenga alta seguridad, productividad y mantenimiento fácil por los precios más bajos en el mundo. Esta tarea puede ser resuelta con diferentes métodos constructivos y tecnológicos, siendo el método de deformación plástica superficial uno de los más efectivos para extender la seguridad de explotación de las máquinas, ventajoso respecto a los esquemas tecnológicos tradicionales empleados para aumentar la calidad de las superficies de las piezas, ecológicamente más limpio en comparación con otros métodos de endurecimiento de materiales, pues no se generan desperdicios al no haber arranque de virutas, disminuye el nivel de ruido, por lo que permite a los operarios mejores condiciones de trabajo con mayor eficiencia técnico-económica, desechado en determinados casos tratamientos térmicos o químico-térmicos.

Existen diversos procedimientos para el empleo del mismo como alternativa de endurecimiento de las piezas, es el rodilado o rodillado por rodillo simple o mono rodillo, un proceso muy empleado, pues resulta sencillo, de fácil aplicación y es posible emplearlo en una gran variedad de piezas y de metales como el acero AISI 1045.

El método de deformación plástica superficial constituye un método de tratamiento superficial de las piezas para incrementar sus cualidades físico-mecánicas y de acabado. Se aprovechan las características de plasticidad de los metales, para lograr evitar en muchos casos el empleo de esquemas tecnológicos tradicionales como el rectificado y los tratamientos térmicos, tales como el temple superficial y el mejoramiento que son altamente consumidores de energía y contaminadores del medio ambiente.

Las curvas cicloides forman parte del proceso de deformación plástica superficial, las mismas desempeñan un papel importante en el desarrollo histórico de la humanidad; dan solución a grandes problemas en la ingeniería. Estas se emplean en el diseño de los dientes de los engranajes, en ciertos toboganes en la industria aeronáutica, pues se requiere de una forma apropiada para deslizarse desde un avión en caso de emergencia.

En la bibliografía revisada no se ofrece una metodología para determinar el estado de tensión para el acero AISI 1045 deformado en frío, por el método de la cicloide en el proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple. Esto resulta un motivo más para que ante tal situación surja la siguiente situación problemática.

Situación problemática

El proceso de deformación plástica superficial en frío por rodillo del acero AISI 1045 se realiza en la relación de contacto que se establece entre el rodillo y la pieza. A través del mismo, entre ambos describe una curva llamada cicloide, esta es descripta por el rodillo.

Según la cinemática entre ambos elementos, la cual está caracterizada por ángulos que permiten describir el movimiento. Estos ángulos en su mayoría corresponden al elemento de mayor dureza ya que a través de él se realiza la deformación, característica fundamental en la forma del perfil del rodillo.

Durante el proceso de rodilado surgen tensiones normales y tangenciales de compresión ó de tracción que deforman el material gradualmente, lo que permite su endurecimiento superficial por acritud.

Problema

No existencia de una metodología para determinar estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide con el empleo del rodillo simple.

Hipótesis

Si se establece una metodología de cálculo que contemple el diámetro del rodillo (d_p), la profundidad de penetración (h_p); y el ángulo de contacto (φ_k) entonces se podrá determinar las tensiones normales y tangenciales ($\sigma_z; \sigma_y$) que deforman el acero AISI 1045 con el empleo del rodillo simple por el método de la cicloide.

Objetivo

Obtener una metodología para determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío, por el método de la cicloide.

Objeto de estudio

Acero AISI 1045 deformado por rodillo simple.

Campo de acción

Estado tensional por el método de la cicloide.

Objetivos específicos

1. Establecer la metodología para la determinación del estado de tensión en la zona de contacto con la cinemática de los puntos de la superficie deformada en el proceso de deformación plástica superficial con rodillos del acero AISI 1045.
2. Calcular por el método de la cicloide las tensiones normales y tangenciales (σ_z ; σ_y) que caracterizan el proceso de deformación plástica Superficial por Rodillo del acero AISI 1045.
3. Analizar los resultados de la metodología propuesta para validar los mismos, así como la valoración económica y el impacto medio ambiental del proceso.

Tareas

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Realización de los cálculos para el establecimiento de la metodología propuesta a partir de la caracterización de las operaciones que se emplean en la deformación plástica superficial por rodillo.
3. Análisis de los resultados y fundamentación de la metodología propuesta en la determinación de la cinemática de las tensiones durante el proceso de deformación plástica superficial por rodillo.

Capítulo 1

Capítulo 1. Marco teórico de la investigación

1.1 Introducción

La superficie de un material es la región más sensible a las agresiones del entorno. En comparación con otras causas de deterioro de un material, los problemas que afectan a la superficie (desgaste, fricción, corrosión), requieren un consumo energético mínimo debido a que son sólo los átomos de unas pocas capas superficiales y los enlaces que los unen entre sí los que deben hacer frente a las fuerzas y ataques químicos de entorno.

Estas interacciones siempre van a estar presentes y ningún proyecto de ingeniería puede considerarse completo si no se ha previsto cuál va a ser el comportamiento de la superficie.

En el presente capítulo se establece como objetivo:

- Establecer el estado actual del tratamiento de piezas mediante la deformación plástica por rodadura así como las herramientas utilizadas en estos procesos.

1.2 Estudio de la deformación plástica superficial por rodillo

El comportamiento de la función de una pieza maquinada tal como la resistencia a la fatiga, capacidad de carga del rodamiento, fricción, dependen de una larga extensión en la superficie como la topografía, dureza, naturaleza de tensión y deformación inducida en la región de la superficie. Hoy en día, alrededor del 50% de la energía aplicada es pérdida en la fricción de elementos en movimiento relativo (Korotsiche, 1989). Los valores de rugosidad menores que 0,1 mm se requieren para una buena apariencia estética, fácil moldeo, buena resistencia a la corrosión y alta resistencia a la fatiga.

Durante los últimos años, sin embargo, considerable atención ha sido prestada a las operaciones del post - maquinado de acabado del metal tales como el rodilado, el cual mejora las características de la superficie por deformación plástica de las capas superficiales (Loh, et al, 1989). El rodilado es esencial en el proceso de deformación en frío, en el cual el metal cerca de la superficie maquinada es desplazado desde las protuberancias hasta llenar las depresiones. Además de producir un buen acabado superficial, el proceso de rodilado tiene ventajas adicionales sobre otros procesos de maquinado, tales como el seguro aumento de la dureza, resistencia a la corrosión y vida

a la fatiga como resultado de la tensión residual compresiva producida. Las tensiones residuales son probablemente el aspecto más importante en la integridad señalada debido a su influencia directa en el comportamiento de servicio. Por eso, el control del proceso de rodilado (condiciones de rodilado) en tal forma como la producción de tensiones residuales compresivas en la región de la superficie podría conducir a un mejoramiento considerable en la vida de la pieza.

Una búsqueda bibliográfica muestra que muchos investigadores han trabajado en el proceso de rodilado y este proceso mejora las propiedades de las partes como por ejemplo, la resistencia a la corrosión, la dureza, la calidad de la superficie y el incremento al máximo de las tensiones de comprensión residuales.

(Díaz, 2005) realiza la implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple, donde se empleó indistintamente parámetros como fuerza desde 1 000 N hasta 2 000 N, número de pasadas de 3 a 5, avance desde 0,066 mm/rev hasta 0,228 mm/rev y diámetro del rodillo de 41 mm para evaluar la dureza, rugosidad superficial y profundidad de la capa endurecida.

Los trabajos más reciente relacionado con la deformación plástica superficial están en (Hernández, 2005) donde se realiza el estudio del acero AISI 1045, se tiene en cuenta variables de entrada como son fuerza (P) con valores de 500; 1500 y 2 500 N, Avance (S) de 0,075; 0,125 y 0,25 mm/rev con número de revolución del husillo de 27; 54 y 110 rev/min para evaluar una variable de salida la dureza (H) (205, 458 HV) se realiza el análisis estadístico y se analiza el comportamiento de las variables a través del programa Excel.

(Alcántara, 2007) propone un enfoque para la solución al problema del comportamiento mecánico microestructural a través de la operación de deformación plástica superficial por rodillos, donde se tiene en cuenta la influencia de la deformación plástica, se realiza la observación microscópica a partir de elementos previamente elaborados, después que las probetas se sometieron a la acción de rodadura en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento. Los valores de las variables que definieron la calidad del proceso de endurecimiento del acero AISI 1045 y que se tuvieron en cuenta fueron: El número de revoluciones del husillo (n), Fuerza ejercida por la

herramienta deformante (P), Avance de la herramienta (S), para evaluar su Dureza Superficial (H).

(Fernández, 2007) realiza una investigación, sobre la influencia generada por un rodillo de radio R en la deformación plástica superficial del acero AISI 1045 para determinar las regularidades de su comportamiento microestructural. Obteniéndose modelos lineales de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (n, P, S), las cuales están relacionadas con los valores de número de revolución, fuerza y avance.

Se utilizaron técnicas de microscopía óptica para la caracterización metalográfica y la determinación del estado microestructural de las muestras, al mismo tiempo se realizó ensayos de dureza. A partir del análisis de los resultados, fue posible establecer el mecanismo de endurecimiento del material fundamentado por el incremento de los defectos de empaquetamiento de acuerdo con los mecanismos de deslizamiento; los cuales se producen por la acción combinada de los efectos del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos, y el incremento de la acritud como resultado del trabajo de deformación en frío. Finalmente se describe el procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante rodadura, que permite duplicar el tiempo de explotación de piezas fabricadas de acero AISI 1045,

(Camejo, 2008) analiza los procesos de manufactura por los cuales transita la operación denominada deformación plástica superficial por rodillo, este proceso como variante tecnológica incurre en gastos de tiempo donde se tiene en cuenta una series de operaciones como son: costo del material, mano de obra, corte, fabricación de dispositivos, deformación de probetas, energía eléctrica, exámen micrográfico entre otros, de los cuales no se tiene un cálculo de costo estimado.

(Jiménez , 2008) realiza una investigación, sobre la influencia en la deformación plástica superficial del acero AISI 1045 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, sometido a la acción de rodadura en diferentes condiciones, se obtienen 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 por rodillo.

(Piñeiro, 2009) en el trabajo se realiza una investigación sobre el endurecimiento por deformación plástica superficial generado por rodillo, utilizando variables como el avance (S); número de revoluciones (n) y fuerza aplicada (N), a probetas construidas de acero AISI 1045 para obtener la curva tenso - deformacional y evaluar su comportamiento. Para esto se describe el procedimiento tecnológico de fabricación y la metodología de endurecimiento a que fueron sometidas por medio de una acción de rodadura en diferentes condiciones cumpliendo con el diseño de experimento planteado, a fin de evaluar la influencia de aquellos parámetros que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento. Los resultados garantizan el pronóstico del comportamiento de la curva tensión - deformación y muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas. Se utilizó el método de ensayos destructivos, especialmente el ensayo de tracción, con una máquina para realizar ensayos de tracción - compresión y valorar las propiedades mecánicas del material, apoyándose en software como el Excel el AutoCAD y el Mathcad como una potente herramienta de cálculos.

Se aprecia que han sido varios los trabajos relacionados con este proceso, sin embargo en ninguno de ellos se explica como determinar por el método de la cicloide el comportamiento tensional para la deformación plástica superficial por rodillo del acero AISI 1045, motivo que justifica la presente investigación.

1.3 Generalidades acerca del acero AISI 1045

Se llaman aceros de construcción 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, 1973 y Schejve, 2004)

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

1.3.1 Composición química del acero AISI 1045

La composición química estándar de este acero según Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System-UNS, de la American Society for testing Materials - ASTM y la SAE, se refleja a continuación en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Composición química estándar del acero AISI 1045

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

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

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

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

Manganeso: 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 AISI 1045. Es significativo el papel que tiene el manganeso (en el rango de 0,65 a 0,90 %) conjuntamente con el carbono en el incremento de la resistencia mecánica, particularmente la resistencia a la dureza, al igual que la capacidad de endurecimiento por rodadura; las cuales constituyen las propiedades que se quieren obtener en las piezas que se fabrican con este material.

1.3.2 Propiedades físico, mecánicas del acero AISI 1045

En diferentes bases de datos (MATERIALES, 1996 y Key to Steel, 2002) se hace referencia a las propiedades físico y mecánicas a temperatura ambiente, obtenidas en el acero AISI 1045. Las propiedades físicas aparecen reflejadas en la tablas 1.3.

Tabla 1.3. Propiedades físicas del acero AISI 1045.

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

En general la resistencia de los materiales disminuye con el aumento de la temperatura. Puesto la movilidad de los átomos se incrementa con la temperatura, los procesos de deformación son controlados por la difusión de materia, lo que tiene un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas a temperaturas altas. Éstas también favorecen la movilidad de las dislocaciones por el mecanismo de escalamiento o trepado.

La concentración de equilibrio de vacancias se incrementa con la temperatura. Mecanismos de deformación nuevos empiezan a jugar un papel importante a altas temperaturas. En algunos materiales los sistemas de deslizamiento cambian, o se activan sistemas adicionales. En la tabla 1.4 se reflejan las propiedades mecánicas del acero AISI 1045.

Tabla 1.4. Propiedades Mecánicas del acero AISI 1045.

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

La obtención de buenas propiedades mecánicas sin necesidad de tratamientos térmicos representa uno de los grandes logros de este tipo de conformado. Las bajas

temperaturas empleadas dan como resultado un tamaño pequeño de austenita y en consecuencia también de ferrita, así como un mayor endurecimiento por deformación.

1.4 Tensiones durante el proceso de deformación

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

Esto es fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones. En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida (Lin, Y.C. et al, 2001; Mallo, 1987) 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 que en la actualidad no se suministran comercialmente aceros laminados a temperaturas inferiores a 0 °C.

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) cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999; Pero Sanz, 2000; Key to Steel, 2002)

Alfonso (1995); Martínez (2006) consideran que 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.

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. 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.

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).

Pero Sanz (1999) señala que en la teoría de la plasticidad se aborda 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.

Mazein (2001) considera que las tensiones residuales y las deformaciones que aparecen en el proceso de elaboración, determinan en gran nivel la exactitud de las piezas y la calidad de su capa superficial. Para elevar la efectividad de los procesos tecnológicos de la deformación plástica superficial hace falta tener un modelo del estado tensión deformación que se forma en el resultado de la elaboración.

Para establecer una teoría matemática de la plasticidad es necesario precisar cómo cambia esta superficie de fluencia, es decir, definir una función de carga completa.

Después de haber analizado algunos elementos básicos de la teoría de plasticidad, se llega a precisar que en el proceso de obtención y aplicación de las ecuaciones constitutivas derivadas de esta teoría, las relaciones tensión-deformación en estos materiales plásticos vienen dadas por expresiones diferenciales. Una forma de solucionar estas expresiones es simular el proceso de deformación plástica. Este proceso de integración matemática complica y dificulta la aplicación y diversificación de la teoría de plasticidad en la solución de diferentes problemas de ingeniería, con el uso de los modelos plásticos y elastoplásticos.

También se puede destacar que los modelos plásticos y elastoplásticos, a pesar de tomar en cuenta el fenómeno de la rotura del material, no resuelven de forma general e

integral el fenómeno de modelación del estado tensional-deformacional en un punto de un material dado, porque desprecian, al igual que los modelos elásticos, la esencia de los fenómenos físicos reales.

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

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

Hay varios procesos tecnológicos importantes, entre los que se encuentra el bruñido 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.

Según (Sugino, 2003) en un ejemplo que muestra el bruñido en piezas de acero inoxidable SUS 304, la tensión residual compresiva puede llegar hasta valores entre -1000 y -1600 [MPa] a una profundidad de 0,08 a 0,1 mm de la superficie.

Los valores anteriores dependen del material y del proceso de elaboración. Dichas tensiones aparecen a una profundidad entre un 10 y un 50% de la profundidad de la capa endurecida.

En la Figura 1.1, tomada de la fuente anteriormente mencionada, se puede apreciar un esquema del comportamiento de la distribución de las tensiones residuales compresivas y observar cómo los valores más altos se encuentran en las capas subsuperficiales, zona muy cercana a la superficie. Además, se muestran las diferentes zonas de trabajo de este proceso.

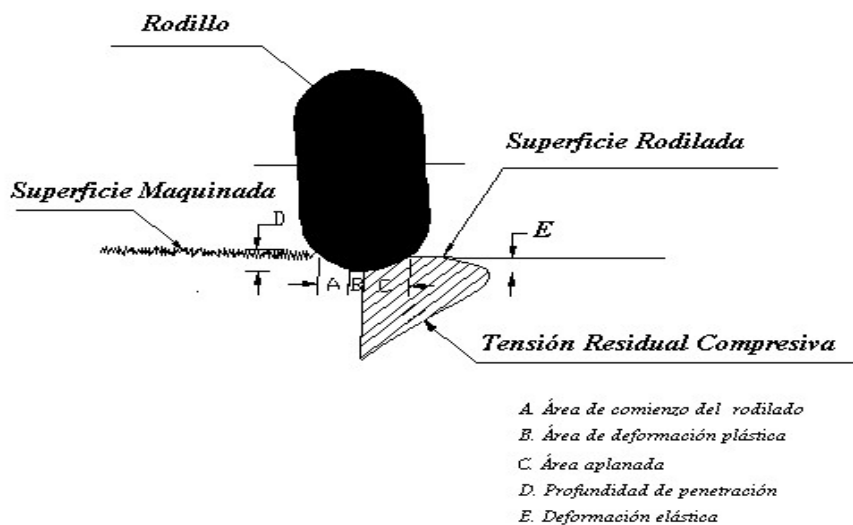


Figura 1.1. Esquema de la acción del empleo del rodillo simple y la distribución de la tensión residual compresiva

1.5 Física química del contacto

En el contacto de cuerpos sólidos, además de la mecánica es necesario tener en cuenta la interacción molecular de los materiales en las superficies de separación y en las fuerzas superficiales. Como estos procesos dependen de la naturaleza física y química de las superficies en contacto, es necesario describir las correspondientes características de estas superficies (Johnson y Bower, 1989).

Los autores (Tubielewicz et al., 2000) coinciden en plantear que desde el punto de vista de la física del estado sólido, la superficie de los cuerpos cristalinos es una brusca discontinuidad en la periodicidad del retículo cristalino, esta brusca discontinuidad en la red cristalina presenta las siguientes particularidades

- Reorientación estructural.

- Interacción de las superficies con el medio ambiente (adsorción física y química, oxidación o formación de capas).
- Variación en las propiedades físicas.

Las superficies técnicas tienen particularidades complementarias debido a los procesos de elaboración.

- Capas endurecidas mecánicamente.
- Superficie con texturas especiales.
- Campo de tensiones internas local.

Para describir la composición de las superficies reales, en 1936 Schmalts propuso diferenciar las capas existentes en el contacto seco, donde incluyó capas externas a las superficies formadas por impurezas, gases adsorbidos y óxidos, y las capas internas superficiales, donde se incluye la capa endurecida por la deformación y el metal base. El endurecimiento por deformación aumenta la resistencia al desgaste.

1.6 Endurecimiento por deformación

La introducción en el acero, mediante deformación, de una alta densidad de dislocaciones favorece el aumento del límite elástico. Al igual que ocurría con otros factores, (Cogsdill Tool Products, 2003).

La tensión de fluencia aumenta conforme la densidad de dislocaciones lo hace, y la velocidad a la que tiene lugar el endurecimiento por deformación depende de la velocidad a la que la densidad de dislocaciones, aumenta con la deformación. Esto significa que la velocidad de endurecimiento por deformación es dependiente de la forma en la que las dislocaciones se distribuyen e interactúan entre sí.

La deformación plástica superficial en frío es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza, el aumento del grado de deformación está muy vinculado con la aparición del fenómeno de endurecimiento y a medida que el grado de deformación es mayor, son necesarias más tensiones para continuar deformando. Por tanto el aumento del grado de deformación en frío aumenta la resistencia del metal a la deformación (Álvarez, 1995).

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 al., 2002).

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 y Blumenstein, 2001).

Según Badiola (2004) y Lubriner (1986) plantean que en la teoría de las dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura resulta del movimiento de dislocaciones por deslizamiento bajo la acción de la tensión aplicada. Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico, y consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro. Para que se produzca dicho deslizamiento, la tensión de cortadura sobre dicho plano deberá alcanzar un valor crítico, correspondiente al valor de la tensión de cortadura máxima en el ensayo de tracción, y que se define como resistencia al deslizamiento.

1.8 Tratamientos superficiales contra el desgaste

Los aspectos relacionados con la capacidad de trabajo de los sistemas tribológicos están íntimamente relacionados con la calidad superficial, caracterizada por los parámetros geométricos (macrogeometría, ondulaciones y rugosidad superficial), las propiedades físico - química que determinan la interacción de campos de fuerza de los átomos superficiales con el campo de fuerza de las moléculas del medio exterior que se encuentran en contacto con la superficie del cuerpo sólido, las propiedades físico-mecánicas (endurecimiento, tensiones residuales, profundidad de la capa endurecida) las cuales tienen una incidencia directa en los fenómenos superficiales que se producen debido a la fricción y el desgaste (Korotcishe.L, 1989).

(Ogburn, F, 2001) plantean que la mejor combinación de los parámetros de calidad superficial le corresponde a aquel método de elaboración que como resultado del procedimiento físico o químico de deposición de los elementos necesarios y del tratamiento térmico final, garantice la estructura y propiedades físico – mecánicas

óptimas. Cuando el estado de fricción es por deslizamiento y el deterioro de las capas superficiales es debido a la fatiga superficial, la corrosión, la adhesión, la erosión o cualquier otro tipo de deterioro, la estructura y propiedades físico - mecánicas de las finas capas superficiales juegan un papel importante y de estas depende la naturaleza de las estructuras dinámicas, de los mecanismos de destrucción superficial, y de la dinámica del desgaste. El surgimiento en la capa de un considerable nivel de las tensiones residuales a compresión posibilita incrementar la resistencia a la fatiga. Varios de los métodos termo – químicos permiten incrementar la resistencia a la corrosión tanto para temperaturas normales, como altas (Kruschov, 1957).

En la tabla 1.1, se establecen los diferentes parámetros que caracterizan los procesos de deformación plástica superficial en frío.

Tabla 1.1 Parámetros de los tratamientos por deformación en frío.

Método de endurecimiento	Grado rugosidad superficial	Dureza superficial	Tensiones Residuales [MPa].	Espesor (mm) min.	Espesor (mm) máx.
por municiones	2 - 7	aumenta 20 - 40%	4 - 8 Compresión.	0,4	1,0
granallas o perdigones	5 - 8	aumenta 20 - 40%	4 - 8 Compresión.	0,2	0,6
por rodillos	7 - 11	aumenta 20 - 50%	6 - 8 compresión	1,0	20
por esferas	9 - 11	aumenta 20 - 50%	6 - 8 compresión	0,3	5,0
por repujado	2 - 4	aumenta 20-50%	6 - 8 compresión	0,5	35
por arranque de viruta	3 - 5	aumenta 20 - 30%	3 - 7 compresión	0,05	0,5
vibrodinámico	4 - 7	aumenta 20 - 40%	3 - 6 compresión	0,1	0,7
hidropulido	8 - 11	aumenta 20 - 30%	3 - 7 compresión	0,01	0,20

La resistencia al desgaste y a la corrosión puede incrementarse sensiblemente con la deposición en las superficies de trabajo de materiales metálicos y no metálicos con altas propiedades de explotación. En la tabla anterior se puede observar que el proceso de deformación plástica por rodillos es uno de los métodos en el que se logra mejor acabado superficial, así como mayor dureza superficial.

Los procesos por Deformación Plástica Superficial se eligen en dependencia de las dimensiones, la configuración geométrica, el material de la pieza a tratar, condiciones

de producción, entre otros factores, y para la aplicación efectiva de los mismos en la producción es necesario realizar investigaciones, ensayos y experimentos previos que permitan alcanzar el efecto deseado teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar (Hernández, 2005; Korotsiche, 1989)

1.9 Generalidades acerca de la cicloide.

Según <http://www.wikipedia/lacicloide.com/> una cicloide es una curva generada por un punto perteneciente a una circunferencia generatriz al rodar sobre una línea recta directriz, sin deslizarse. Para mejor entendimiento (Ver Fig. 1.2)

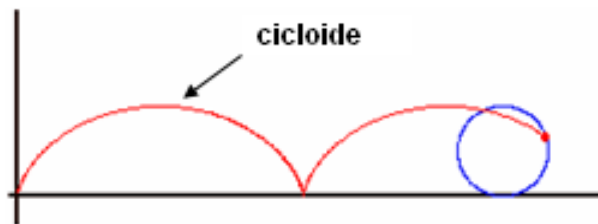


Figura1.2 Representación de la cicloide

La cicloide fue estudiada por primera vez por Nicolás de Cusa y, posteriormente, por Mersenne (monje, amigo de Descartes). En el año 1599 Galileo estudió la curva y fue el primero en darle el nombre con la que la conocemos, el intentó averiguar el área de esta curva sumando diferentes segmentos rectos situados sobre la misma, mediante aproximación.

Algunos años después, en 1634, G.P. de Roberval mostró que el área de la región de un bucle de cicloide era tres veces el área correspondiente a la circunferencia que la genera. En 1658, Christopher Wren demostró que la longitud de la cicloide es igual a cuatro veces el diámetro de la circunferencia generatriz.

En 1696 el matemático Johann Bernoulli anunció a la comunidad matemática la solución al problema de la braquistocrona (curva que sigue el descenso más rápido cuando existe gravedad y que es objeto de estudio en el cálculo de variaciones), mostrando que la solución era una cicloide.

Leibniz, Newton, Jakob Bernoulli y Guillaume de l'Hôpital, encontraron la solución del problema enunciado por Bernoulli. La cicloide se emplea para resolver el problema tautocrono (Descubierto por Christian Huygens), en el que si despreciamos el rozamiento y si invirtiésemos una cicloide dejando caer un objeto por la misma, por

ejemplo una bola, ésta llegará a la parte más baja de la curva en un intervalo de tiempo que no depende del punto de partida.

Entre las demostraciones acerca de sus propiedades se encuentra el matemático René Descartes que obtuvo mediante demostraciones efectivas y elegantes la fórmula de la recta tangente en un punto cualquiera del arco de la cicloide, empleando técnicas que después desarrollaría como la ciencia de la geometría diferencial.

A causa de las continuas disputas entre los matemáticos del siglo XVII la cicloide ha sido denominada "La Elena de los Geometrías", aunque existen opiniones que mencionan esta denominación poética hacia las bellas propiedades de esta curva. Sus propiedades atraen a los matemáticos de la época. En el año 1658 Blaise Pascal lanza un desafío a los matemáticos donde le propone determinar la longitud de un arco de la cicloide así como su centro de gravedad y la superficie del volumen de revolución que engendra el área plana que barre el arco de cicloide al girar, ya sea en torno al eje de las abscisas, o en torno al eje de las ordenadas, o bien, en torno al eje de simetría del arco de cicloide. Fueron muchos los esfuerzos realizados en el siglo XVII para tratar de comprender esta curva y sus propiedades, tanto geométricas como físicas, que han permitido desarrollar un gran número de aplicaciones industriales

1.9 Conclusiones del capítulo 1

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

- La bibliografía consultada, aporta información sobre las propiedades físicas, mecánicas y la composición química del acero AISI 1045 quedando establecido que el carbono es el ingrediente fundamental del mismo, porque eleva su resistencia, dureza y templabilidad.
- Se aprecia que han sido varios los trabajos relacionados con el endurecimiento por deformación plástica superficial por rodillo simple, sin embargo ninguno se muestra una metodología para determinar el estado de tensión del acero AISI 1045 deformado por el método de la cicloide, motivo que justifica la presente investigación.

Capítulo 2

Capítulo 2. Materiales y Métodos

2.1 Introducción

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, ante las cuales la austenita se transforma en martensita con una estructura menos densa. Con el aumento del coeficiente de fricción externa y de la superficie de contacto del instrumento con la superficie de tratamiento aumenta también las irregularidades de la deformación plástica como consecuencia del nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión (Korotsiche, 1989).

La deformación plástica superficial por rodillo, también llamado acabado sin viruta, es un trabajo en frío en la superficie del metal donde se aplica una fuerza que excede el límite de resistencia a la deformación del metal. Esto se realiza, principalmente, en diámetros interiores y exteriores de piezas previamente maquinadas, con herramientas rotatorias que contienen rodillos.

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

Es por ello que el desarrollo y el éxito de toda investigación esta basado en la fiabilidad de los resultados, herramienta fundamental para su validación, por lo que la adecuada selección de los métodos y materiales merece una especial atención.

En el presente capítulo se establece como objetivo:

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

2.2 Selección del elemento deformante (rodillo)

El elemento deformante (rodillo) (Cogsdill Tools, 2005; Elliot Tools, 2004; Bright Burnishing, 2005 y 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.

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

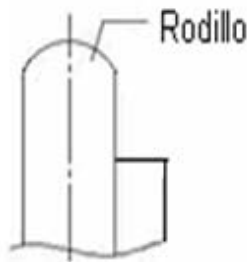


Figura 2.1. Forma del perfil de trabajo del rodillo. Fuente (Odintov, 1987).

El rodillo (1) (Anexo 1), tiene 50 mm de diámetro, es de acero AISI 1045 con una dureza de 65 HRC, un acabado Ra de 0,5 μm y un radio en el perfil de 2 mm, con banda cilíndrica y radio abierto, que se corresponde con el tipo de superficie que se va a tratar y que posee salida libre para la herramienta. La justificación del empleo de este tipo de rodillo radica en que para el endurecimiento de piezas de poca rigidez es necesario utilizar rodillos con un radio de perfil pequeño, lo que permite obtener el mayor aumento de la dureza con esfuerzos relativamente pequeños.

El cuerpo (2), es una barra de sección rectangular en forma de cuchilla que es la que permite instalarla en el portaherramientas de las máquinas herramienta. Una vez instalada la herramienta, se ajusta el calibrador roscado (3) donde va acoplado un indicador de carátula (4), con una precisión de 0,005 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.

2.3 Selección del material a deformar plásticamente por rodillo

El acero AISI 1045 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 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. Como se observa en la tabla 2.1

Tabla. 2.1. Composición química del acero AISI 1045.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0,46	0,24	0,98	0,01	0,019	0,19	0,02	0,06	0,005	0,01	0,16
Ti	V	W	Pb	Sn	As	Ce	B	Zn	Fe	
0,0047	0,00	0,01	0,002	0,009	0,01	0,005	0,001	0,0034	97,82	

2.4 Diseño de experimento.

Se escogió un diseño de experimento factorial completo (Gutiérrez y De la Vara, 2003), con tres variables y tres niveles. Este método de planificación estadística de la investigación, establece el número de ensayos (N) a realizar.

Las probetas fueron sometidas a la acción de rodadura en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento. Se tiene en cuenta que no se dispone de elementos, que permita fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan la calidad del proceso de endurecimiento del acero AISI 1045, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso, que después de un estudio preliminar del tema, se considera que las más importantes son:

- Diámetro del rodillo
- Profundidad de penetración.
- Ángulo de contacto.
- Tensiones normales y tangenciales

2.4.1 Diámetro del rodillo (dp)

Variable cuantitativa que define el comportamiento de la capa endurecida así como el de las tensiones internas del material. 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.

2.4.2 Profundidad de penetración (hp)

La profundidad de penetración es uno de los parámetros más importante que afectan los resultados de la herramienta con rodillo. Para una velocidad dada, un aumento en la profundidad de penetración provoca un incremento en el porcentaje de la microdureza y la reducción en el diámetro de la superficie deformada. El incremento del porcentaje de la microdureza y el incremento la reducción en el diámetro, cuando empleamos altas profundidades de penetración, puede ser atribuido al incremento de la presión del rodillo en la superficie de la pieza lo que resulta una compresión de mayor aspereza e incrementa el flujo de metal el cual conduce al llenado de más huecos que son sacados en la capa subsuperficial debido a la operación de maquinado (torneado, o como un defecto del material). La falta de redondez o circularidad de la superficie deformada, disminuye tanto como la profundidad de penetración aumenta como resultado de la regularidad de la fluencia de metal en la superficie del mismo.

2.4.3 Ángulo de contacto (θ_k)

Variable cuantitativa. Es una influencia a considerar en el endurecimiento superficial de la pieza y en consecuencia sobre el efecto de endurecimiento que se produzca. Es una magnitud que se relaciona con las propiedades mecánicas a obtener en la pieza para el incremento de la resistencia al desgaste y la fatiga. Es directamente proporcional a la

profundidad de penetración y en dependencia de cada una se obtendrá diferentes tensiones normales y tangenciales durante el proceso de deformación en frío del acero AISI 1045 por el método de I cicloide.

2.4.4 Tensiones normales y tangenciales (σ_Y, σ_Z)

Las tensiones mecánicas ejercidas sobre la zona de la superficie de la pieza durante la deformación plástica superficial por rodillo conducen a una modificación sostenida del estado de tensión residual. Después del proceso, ocurren tensiones residuales compresivas por toda la zona; sus curvas están en dependencia de la presión del rodillo. La tensión mecánica sobre la zona de la superficie de la pieza como resultado de la deformación plástica superficial por rodillo es tan grande que no es posible observar cualquier influencia del desgaste del filo cortante durante el proceso de torneado duro en las curvas de tensión residual a los más profundos niveles de la zona de la superficie. Las desviaciones están dentro de un rango de medidas incierto o disperso entre diferentes piezas.

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 aparecen reflejadas en la tabla. 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros de entrada del experimento.

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Mínimo	Medio	Máximo
Profundidad de penetración (mm)	hp	0,02	0,05	0,07
Diámetro del rodillo (mm)	dp	50		
Ángulo de contacto (grado)	θ_k			
Tensiones [MPa]	σ_{YZ}	σ_{YZ-1}	$\sigma_{YZ\Delta}$	σ_{YZ1}
Probetas de acero 1045	L = 100 mm y Ø 30 mm			

2.5 Metodología propuesta del estado de tensión en la zona de contacto

La metodología de cálculo del estado de tensión del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide en la zona de contacto, comienza a partir de la determinación del ángulo de contacto (θ_k), ángulo que se forma entre la vertical del eje (Y) y el radio hasta la distancia Z_k (Figura 2.1). Se establece por la ecuación (2.1) para su aplicación al proceso de la deformación plástica superficial por rodillos, se tiene cuenta la trayectoria de la cicloide (Martynenko, 2002).

$$\varphi_k = \cos^{-1} \left(1 - \frac{hp}{rp} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

hp : Profundidad de penetración del rodillo; en mm

rp : Radio del rodillo; en mm

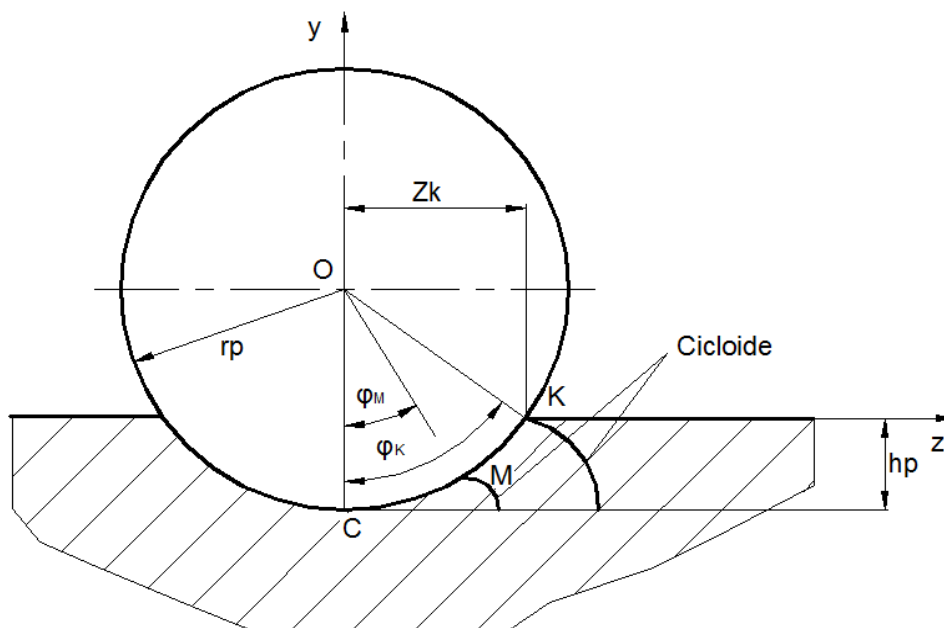


Figura 2.1: Rotación del rodillo absolutamente rígido por el espacio plástico rígido.

La determinación de la mitad del ancho de contacto (Z_k) del rodillo con la pieza durante el proceso de deformación en frío por cicloide, se analiza a partir de la relación trigonométrica con el ángulo de contacto (θ_k) por la ecuación (2.2)

$$Z_k = rp \cdot \cos \varphi_k \quad (2.2)$$

Donde:

r_p : Radio del rodillo; en [mm]

Como trayectoria de los movimientos de los puntos de la superficie al elaborar se toma la familia de las cicloides, se supone que el punto inferior C del rodillo de deformar en su corte dado perpendicularmente al eje, en el momento dado se desplaza sin deslizamiento. (Figura. 2.1) mostrada anteriormente. Entonces a partir de las ecuaciones paramétricas de la cicloide y según (Martynenko, 2002) el movimiento de los puntos de la superficie deformada por cicloides se describe por las ecuaciones (2.3) y (2.4)

$$S_z = r_p [(\varphi_k - \varphi_M) - \sin(\varphi_k - \varphi_M)] \quad (2.3)$$

$$S_y = r_p [1 - \cos(\varphi_k - \varphi_M)] \quad (2.4)$$

Donde:

r_p : Radio del rodillo; en [mm]

φ_k : Ángulo de contacto que corresponde a la mitad del ancho de contacto (Z_k); (grados°)

φ_M : Parámetro de familia que corresponde a la significación corriente del ángulo de contacto ($0 \leq \varphi_M \leq \varphi_k$).

Se realiza las transformaciones de las expresiones obtenidas por el ancho de contacto durante el proceso de deformación en frío por cicloide, determinamos las deformaciones relativas ε_z y ε_y por las ecuaciones (2.5) y (2.6) (Martynenko, 2002).

$$\varepsilon_z = \frac{dS_z}{dz} = \left[\frac{1}{\sqrt{r_p^2 - \frac{(z_M - z_K)^2}{r_p}}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{dS_y}{dy} = \left[\frac{z_K - z_M}{r_p \sqrt{1 - \frac{(z_M - z_K)^2}{r_p^2}}} \right] \quad (2.6)$$

Donde:

r_p : Radio del rodillo; en [mm]

z_K : Mitad del ancho de contacto; en [mm]

z_M : Cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto; en mm

Según (Martynenko, 2002) para la interrelación del estado de tensión en la zona de contacto con la cinemática de los puntos de la superficie deformada en el proceso de deformación plástica superficial con los rodillos, se puede pensar que el cuerpo rígido no lineal puede ser descrito con la ley de Hooke, donde el módulo de rigidez no es constante y depende de la deformación. La curva $\sigma - \varepsilon$ en el diagrama de tracción compresión se puede aproximar a la dependencia del tipo:

$$\sigma_i = A \varepsilon_0^m \quad (2.7)$$

Donde:

A, m : Constantes que dependen de las características físico – mecánicas del material.

$$A = \sigma_f m^{-n} \quad (2.8)$$

$$m = \varepsilon_0 \left| \ln \frac{\sigma_f}{\sigma_\varepsilon} \right| \quad (2.9)$$

Donde:

σ_f : Límite de fluencia del material; en [MPa]

σ_ε : Tensión elástica del material; en [MPa]

ε_0 : Deformación de ensayo del material; [mm]

Se tiene en cuenta la interrelación entre las tensiones y las deformaciones que se determinan según la fórmula (2.7) se puede determinar la distribución de las tensiones por la superficie de contacto en la superficie frontal del rodillo por las ecuaciones (2.10) y (2.11) (Martynenko, 2002).

$$\sigma_z = A \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{z_K - z_M}{r_p} \right)^2} \right]^m \quad (2.10)$$

$$\sigma_y = A \left[\frac{z_K - z_M}{r_p \sqrt{1 - \left(\frac{z_K - z_M}{r_p} \right)^2}} \right]^m \quad (2.11)$$

Donde:

A, m : Constantes que dependen de las características físico – mecánicas del material.

r_p : Radio del rodillo; en mm

z_K : Mitad del ancho de contacto; en mm

z_M : Cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto; en mm

2.6 Conclusiones del capítulo 2

- El ángulo de contacto (φ_k), la profundidad de penetración (h_p), son considerados como los más importantes entre los parámetros de entrada para evaluar las tensiones como variable de salida.
- La metodología propuesta en el epígrafe 2.5 establece la secuencia tecnológica para el endurecimiento mediante la deformación plástica superficial con rodillos simples, de piezas simétricas rotativas, fabricadas de acero AISI 1045 a partir del método de la cicloide.

Capítulo 3

CAPITULO 3. Análisis y discusión de los resultados

3.1 Introducción

Todo elemento representa una porción de sistema con unas determinadas propiedades físicas. 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).

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, el comportamiento las expresiones matemático estadísticas que describen las regularidades del de las tensiones generadas al endurecer el acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide, sometido a la acción de las cargas por rodadura que genera un rodillo al trasladarse sobre una pieza simétrica rotativa en las condiciones descritas en los experimentos.

El objetivo del capítulo 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.

3.2 Cálculo del ángulo de contacto (φ_k)

El endurecimiento del acero AISI 1045 se produce por rodadura al trasladar una rueda o rodillo de diámetro (dp) sobre una superficie, de forma tal que al rotar se forma el ángulo de contacto, produciéndose un movimiento denominado rodadura sin deslizamiento o rodadura pura, deformando el material a lo largo de la superficie se forman surcos o cuellos en forma de espiral. (Jiménez, 2008)

La profundidad de penetración del rodillo (hp) adecuada durante el proceso de deformación plástica superficial por rodadura está de 2 a 10 μm (Loh, et al., 1989; Chen, 2001). Se emplea un rodillo de material de acero aleado con cromo con radio de 25 mm, el par tribológico se considera un par directo ya que el material de mayor dureza rota por el de menor dureza. Se evalúa el ángulo de contacto (φ_k) para tres profundidades de penetración del rodillo (hp) diferentes (0,02; 0,05 y 0,07 mm), es decir un nivel mínimo, medio y máximo.

Se sustituye en la ecuación (2.1) del capítulo anterior y teniendo en cuenta el radio del rodillo y la variación de la profundidad antes mencionada, se tienen los siguientes resultados que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resultados del ángulo de contacto.

hp (mm)	ϕ_k °
0,02	2,29
0,05	3,62
0,07	4,29

Obtenidos los resultados de los ángulos de contacto, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.1).

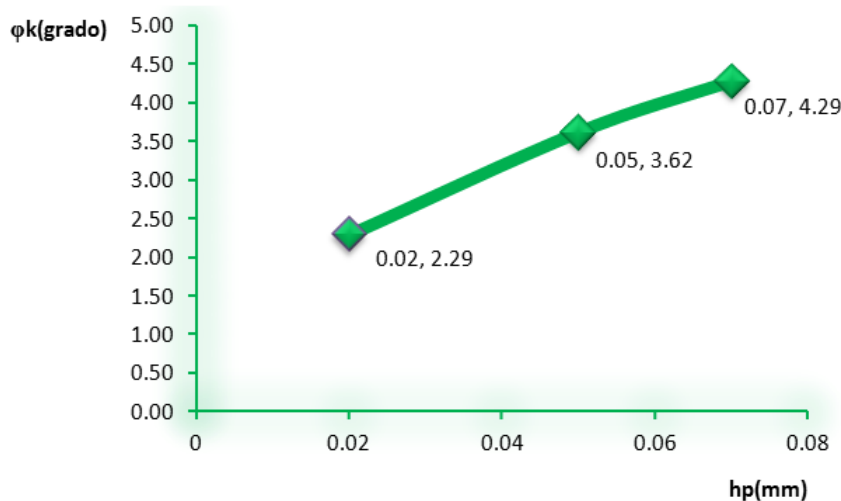


Figura 3.1 Comportamiento del ángulo de contacto

En la gráfica se muestra que al aumentar la profundidad de penetración del rodillo en la pieza para valores de (0,02 mm; 0,05 mm; 0,07 mm) aumentan los distintos valores del ángulo de contacto, y los mismos muestran un comportamiento ascendente, oscilando entre 2,29 ° y 4,29 °. Se demuestra que existe una proporcionalidad directa entre la profundidad de penetración y el ángulo de contacto durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.

3.3 Cálculo la mitad del ancho de contacto (Z_k)

La mitad del ancho de contacto es una variable que depende del ángulo de contacto, ya que existe una relación trigonométrica entre ellos. Se sustituye en la ecuación (2.2) del capítulo anterior y se tiene en cuenta la variación de la profundidad por lo que se realizó el experimento obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados de Z_k

hp (mm)	Z_k (mm)
0,02	24,98
0,05	24,95
0,07	24,93

Obtenidos los resultados de la mitad del ancho de contacto, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.2).

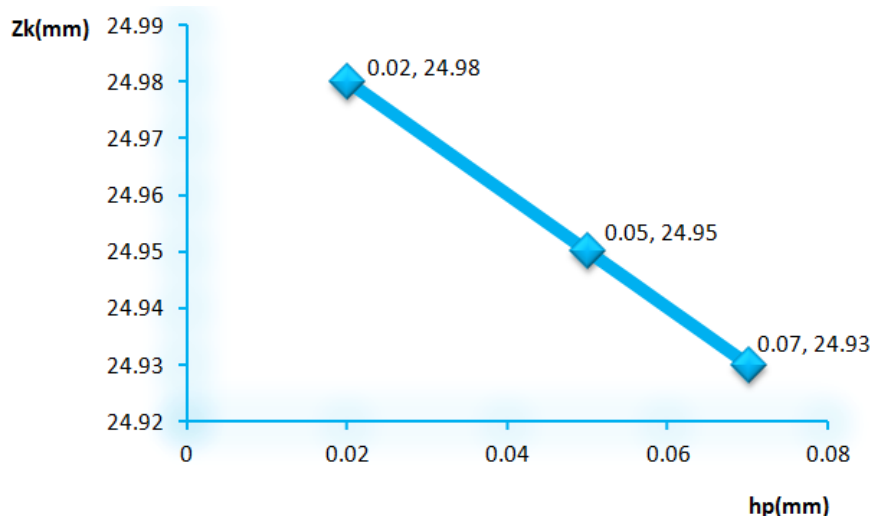


Figura 3.2 Comportamiento de la mitad del ancho de contacto

En la gráfica se muestra que al aumentar la profundidad de penetración del rodillo en la pieza, para valores de (0,02 mm; 0,05 mm; 0,07 mm) disminuyen los distintos valores de la mitad del ancho de contacto, y los mismos muestran un comportamiento descendente, oscilando entre 24,98 mm y 24,93 mm. Se demuestra que existe una relación de proporcionalidad inversa entre la mitad del ancho de contacto y la profundidad de penetración durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.

3.4 Cálculo del movimiento por cicloide

Se sustituye en las ecuaciones (2.3) y (2.4) del capítulo anterior, se tiene en cuenta el ángulo de contacto para la variación de la profundidad de penetración a las que se realizó el experimento y el parámetro de familia que corresponde a la significación corriente del ángulo de contacto ($0 \leq \varphi_M \leq \varphi_K$), se tienen los resultados que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Movimiento por cicloide en los ejes "z" y "y"

ϕk (grado)	ϕm (grado)	Sz (mm)	Sy (mm)
2,29	0	56,300	0,020
	1	31,736	6,356
	2	7,173	0,325
3,62	0	89,020	0,050
	1	64,455	0,026
	2	39,891	0,010
	3	15,328	1,483
4,29	0	105,355	0,070
	1	80,791	0,041
	2	56,227	2,000
	3	31,663	6,326
	4	7,099	0,000

Obtenidos los resultados de movimiento de los puntos de la superficie deformada por cicloides en los ejes Z e Y, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.3).

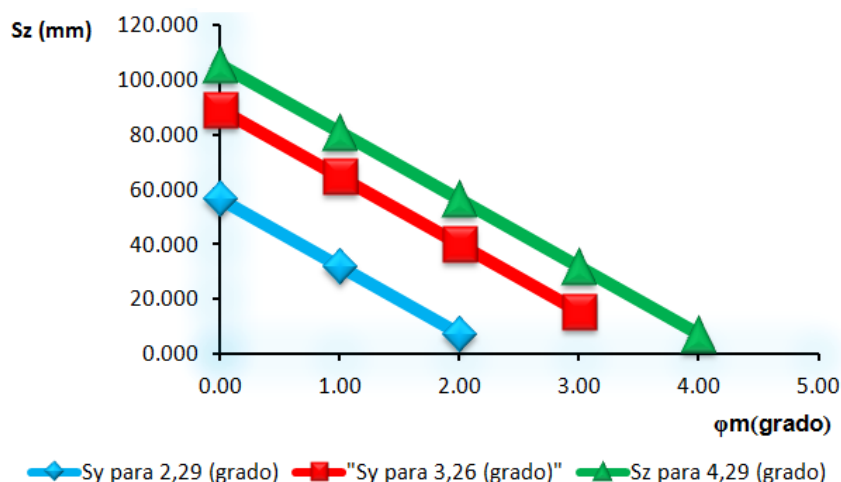


Figura 3.3 Comportamiento de movimiento por cicloide en el eje Z

En la gráfica se muestra que al variar el parámetro de familia que corresponde a la significación corriente del ángulo de contacto (desde 2^0 hasta 4^0 para los distintos ángulos de contacto obtenidos) disminuye el movimiento de los puntos de la superficie deformada por cicloides en el eje Z. Se demuestra que existe una relación de proporcionalidad inversa entre el movimiento de los puntos de la superficie deformada por cicloides en el eje Z, y la profundidad de penetración durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.

El movimiento de los puntos de la superficie deformada por cicloides en el eje Y se puede observar en la figura 3.4

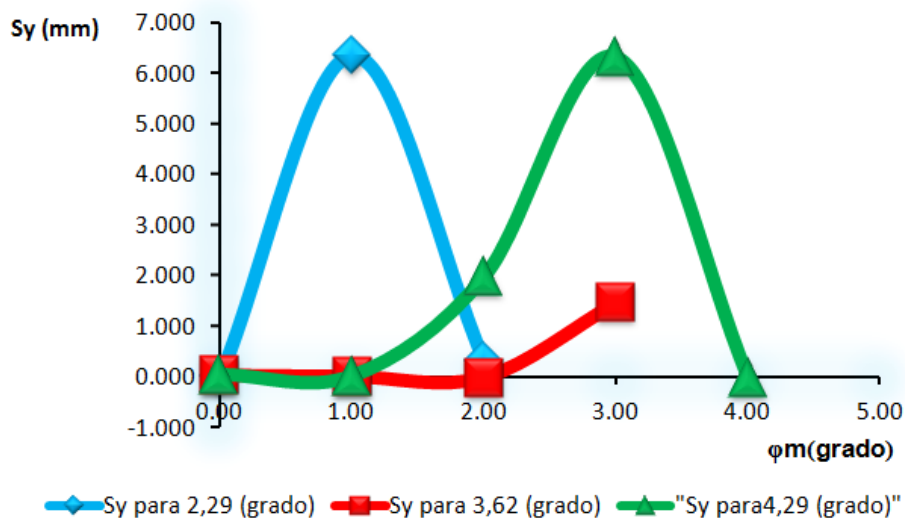


Figura 3.4 Comportamiento de movimiento por cicloide en el eje Y

En la gráfica se muestra que al variar el parámetro de familia que corresponde a la significación corriente del ángulo de contacto (desde 2° hasta 4° para los distintos ángulos de contacto obtenidos) el movimiento de los puntos de la superficie deformada por cicloides en el eje Y. Describe un comportamiento de tendencia cíclica, en la medida que se desplaza por la superficie del material, sin embargo para un ángulo de contacto de $4,29^\circ$, presenta ambas tendencia, esto demuestra que la variación de los ángulos con respecto al movimiento del rodillo no es constante y tiende a provocar cambios en la pieza durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.

3.5 Cálculo de las deformaciones relativas por cicloide

Los elementos en solución sólida pueden tener influencia en el comportamiento a deformación del material de varias formas. Estas incluyen el aumento en la velocidad a la cual las dislocaciones se incrementan, reduciendo la movilidad de las dislocaciones de modo que funcionan como una barrera más efectiva para la deformación del material. Las propiedades mecánicas son las más afectadas. El trabajo en frío produce un rápido incremento inicial del límite elástico, a partir del cual el incremento es más gradual y algunas veces se mantiene la misma tensión de rotura. Este incremento se obtiene a expensas de la ductilidad, entendida como el porcentaje de elongación en un ensayo de deformación, el cual produce una deformabilidad del material.

Se sustituye en las ecuaciones (2.5) y (2.6), se tienen los resultados de las deformaciones relativas en los ejes Z e Y en dependencia del ángulo de contacto y el

cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto (Z_m), que se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Deformaciones por cicloide en los ejes "z" y "y"

ϕk (grado)	Z_m (mm)	ϵ_z (mm)	ϵ_y (mm)
2,29	25,000	-0,960	-0,001
	24,996	-0,960	-0,648
	24,985	-0,960	-0,191
3,62	25,000	-0,960	-0,024
	24,996	-0,960	-0,024
	24,985	-0,960	-0,024
	24,966	-0,960	-0,023
4,29	25,00	-0,960	-0,041
	25,00	-0,960	-0,041
	24,99	-0,960	-0,040
	24,97	-0,960	-0,039
	24,94	-0,960	-0,038

Obtenidos los resultados de las deformaciones relativas en el eje Z, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.5)

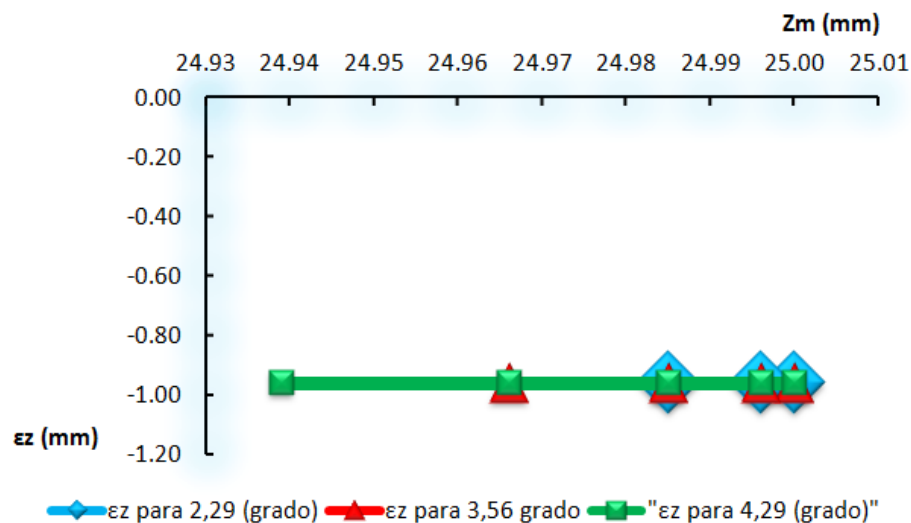


Figura 3.5 Comportamiento de la deformación por cicloide en el eje Z

En la gráfica se muestra que al variar el cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto (Z_m) con respecto a las deformaciones relativas en el eje Z durante el proceso de endurecimiento. Se mantienen constantes para cada ángulo de contacto empleado en el experimento, sin embargo, estas deformaciones al ser de compresión provocan la ruptura interna de la estructura cristalina, ya que las mismas atraviesan en el enrejado cristalino.

Los resultados de las deformaciones relativas en el eje Y, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.6)

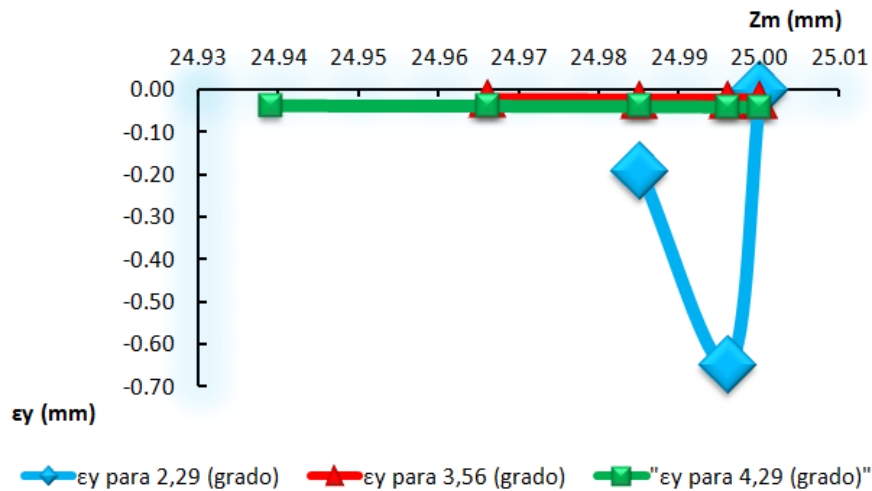


Figura 3.6 Comportamiento de la deformación por cicloide en el eje Y

En la gráfica se muestra que al variar el cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto (Z_m) con respecto a las deformaciones relativas en el eje Y durante el proceso de endurecimiento. Se observa que para iniciar el proceso de deformación, con un ángulo de contacto de 2,29 °, existe una mayor profundidad de deformación, no siendo así para ángulos de contacto de 3,56 ° y 4,29 °, las cuales se mantienen constantes. Estas fuerzas al presentar signos negativos se consideran tensiones de compresión durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.

3.6 Cálculo de la característica física - mecánica (m)

Las propiedades del material se afectan cuando son trabajados al frío. Cada una de estas propiedades como son la física, química y mecánica tienen su variación en dependencia del esfuerzo. Una de la propiedad fundamental a tener en cuenta durante el trabajo en frío es la propiedad mecánica.

Se evalúa la característica física - mecánica (m) para valores de profundidad (0,02 mm; 0,05 mm; 0,07 mm) aplicada a la pieza durante el experimento. Después de ser endurecida y traccionada la pieza se obtiene una deformación real $\epsilon = 0,1$ y una tensión elástica de 200 [MPa] (Hernández, 2010).

Se sustituye en la ecuación (2.3) del capítulo anterior y se tiene en cuenta los tres valores de profundidad de penetración para los que se realizó el experimento mostrándose los resultados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados de la característica física - mecánica (m).

hp (mm)	m (mm)
0,02	0,056
0,05	0,056
0,07	0,056

Los resultados de la característica física - mecánica (m), se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.7)

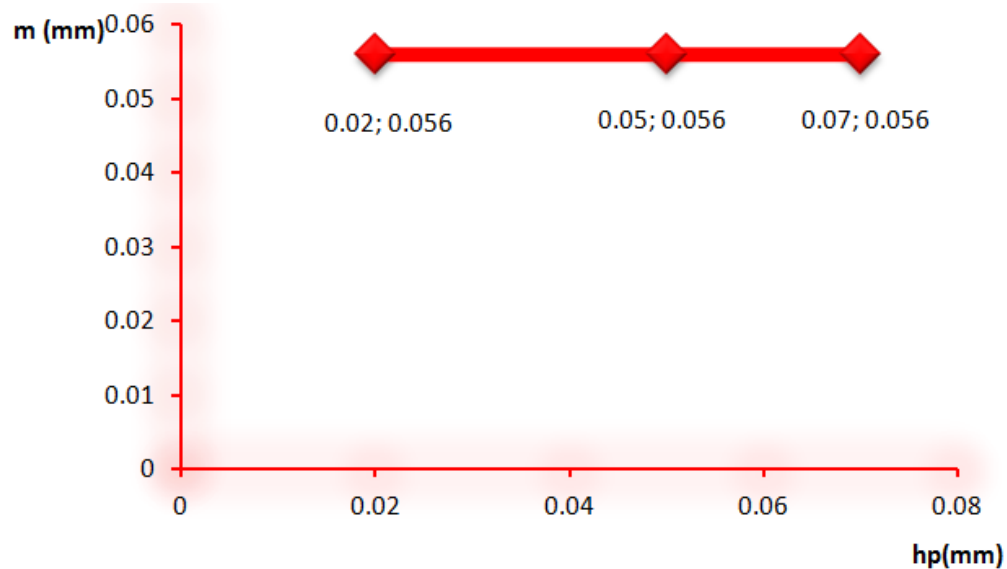


Figura 3.7 Comportamiento de la característica física - mecánica (m).

En la gráfica anterior se puede observar que hay una tendencia lineal de la característica física - mecánica (m), ya que en la medida que se incrementa la profundidad de penetración para valores de (0,02 mm; 0,05 mm; 0,07 mm), se mantiene constante, durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.

3.7 Cálculo de la característica física - mecánica (A)

Las mejoras en las propiedades físico - mecánicas de la superficie de la pieza conlleva aumentar la vida útil de la misma. Aumenta la resistencia al desgaste, porque al deformarse la superficie casi se iguala el tamaño de las crestas y los valles, provoca que el desgaste de dicha superficie al entrar en contacto con otra, sea mínimo.

Se sustituye en la ecuación (2.8) del capítulo anterior y se tiene en cuenta la variación de la profundidad de penetración para una deformación real del material de 0,1 mm, por lo que se realizó el experimento obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Resultados de la característica física - mecánica (A).

hp (mm)	A [Mpa]
0,02	524,03
0,05	524,03
0,07	524,03

Los resultados de la característica física - mecánica (A), se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.8)

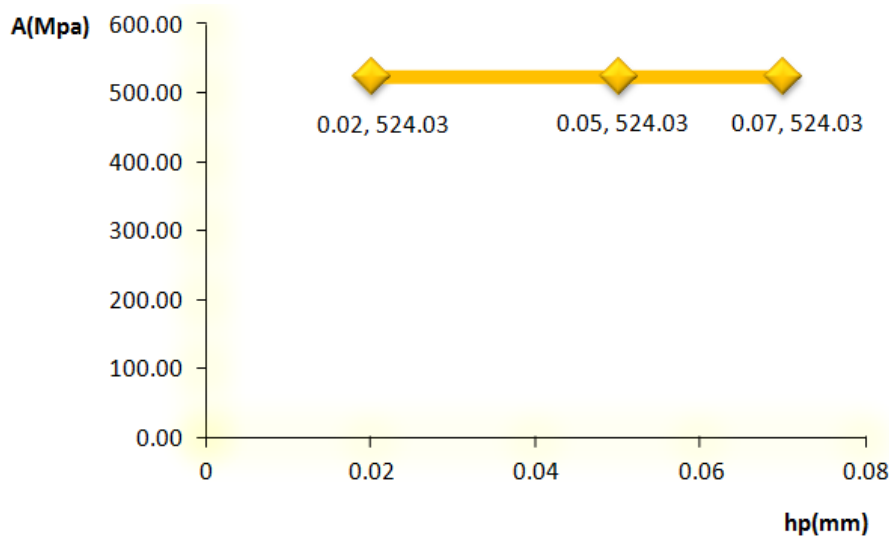


Figura 3.8 Comportamiento de la característica física - mecánica (A)

En la gráfica anterior se muestra que con el incremento de la profundidad de penetración, la característica física - mecánica (A) de la de la pieza se mantiene constante con un valor de 524,03 [Mpa].

3.8 Cálculo de la tensión inicial (σ_i) por cicloide

La ecuación (2.7) del capítulo anterior, planteada para el cálculo de la tensión inicial y que se corresponde con la ecuación de Hollomon permite evaluar el efecto de la cantidad de deformación sobre el endurecimiento que la misma suscita en el material.

La distribución de las fuerzas internas dentro de una sección de un sólido se puede caracterizar por la una magnitud que denominaremos tensión (que posee dimensiones de presión). Podemos definir el estado tensional de la muestra como el conjunto de tensiones.

Para cada valor de carga obtenemos un valor de A diferente, es decir que durante la deformación plástica con rodillo esta constante varía según la condición de ejecución.

Analizados los resultados de las ecuaciones 2.8 y 2.9 determinamos cada una de las tensiones iniciales, para cada profundidad de penetración empleada en el diseño de experimento. Los resultados se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Resultados de la tensión inicial.

hp (mm)	Tensión inicial [Mpa]
0,02	439,57
0,05	483,01
0,07	534,34

Los resultados de la la tensión inicial, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.9)

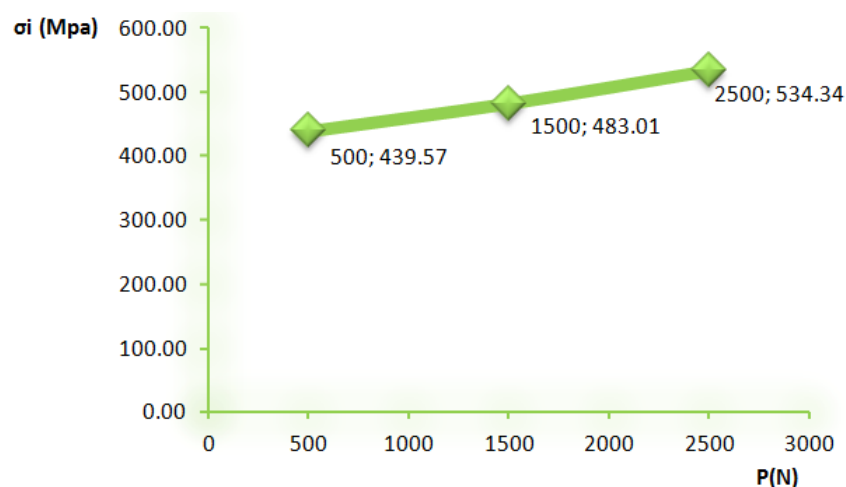


Figura 3.9 Comportamiento de la tensión inicial.

En la gráfica se muestra que al aumentar la profundidad de penetración del rodillo. Existen distintos valores de tensión inicial, y los mismos muestran un comportamiento ascendente, oscilando entre 439, 57 [Mpa] y 534,34 [Mpa]. Desde el punto de vista de las tensiones residuales este factor afecta sobre todo, las tensiones normales y tangenciales lo que provoca un aumento de las mismas, a medida que aumenta la profundidad de penetración. 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) cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999; Pero Sanz, 2000; Key to Steel, 2002)

3.9 Cálculo del las tensiones normales y tangenciales

La distribución de las tensiones por la superficie de contacto en la superficie frontal del rodillo aumenta conforme la densidad de dislocaciones lo hace, y la velocidad a la que tiene lugar el endurecimiento por deformación depende de la velocidad a la que la densidad de dislocaciones aumenta con la deformación. Esto significa que la velocidad de endurecimiento por deformación es dependiente de la forma en la que las dislocaciones se distribuyen e interactúan entre sí.

Sustituyendo en las ecuaciones (2.10) y (2.11) se tienen los resultados de las tensiones normales y tangenciales en los ejes Z e Y en dependencia del ángulo de contacto y el cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto (Z_m), que se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Tensiones por cicloide en los ejes "z" y "y"

ϕk (grado)	Z_m (mm)	σ_z (mm)	σ_y (mm)
2,29	25,000	489,244	348,752
	24,996	489,244	345,380
	24,985	489,244	326,501
3,62	25,000	560,700	430,858
	24,996	560,700	430,679
	24,985	560,700	430,138
	24,966	560,700	429,213
4,29	25,00	645,73	479,60
	25,00	645,73	479,45
	24,99	645,73	478,99
	24,97	645,73	478,23
	24,94	645,73	477,13

Los resultados de las tensiones normales y tangenciales en el eje Y, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.9)

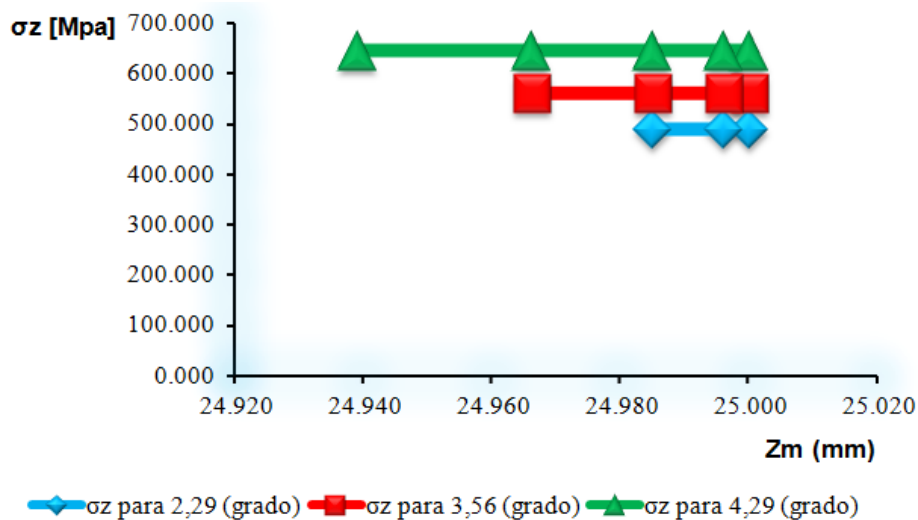


Figura 3.9 Comportamiento de la tensión por cicloide en el eje Z

En la gráfica se muestra que al variar el cambio de la característica corriente de la mitad del ancho de contacto (Z_m) con respecto a las tensiones normales en el eje Z durante el proceso de endurecimiento. Se mantienen constantes para cada ángulo de contacto empleado en el experimento, sin embargo, estas deformaciones al ser de compresión provocan la ruptura interna de la estructura cristalina, ya que las mismas atraviesan en el enrejado cristalino.

Los resultados de las tensiones normales y tangenciales en el eje Y, se grafican en el software Excel 2010 para ver su comportamiento (Figura 3.10)

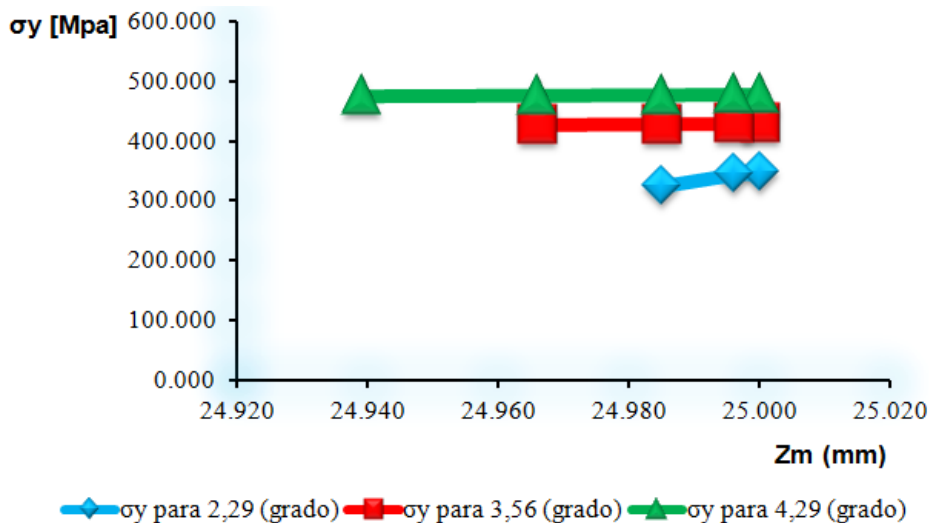


Figura 3.10 Comportamiento de la tensión por cicloide en el eje Y

En la gráfica se muestra las tensiones que se generan en el proceso durante la deformación por rodillo, el movimiento por cicloide que describe el rodillo para diferentes

ángulos de contacto, provoca la aparición de las dislocaciones, la cantidad de dislocaciones contenidas se incrementa ya que el proceso de generación y multiplicación de dislocaciones es más rápido que el aniquilamiento de las mismas durante un proceso de deformación. Por lo que se forman entramados de dislocaciones, subgranos, y la forma de los granos varían. Todos estos factores hacen disminuir la distancia libre de deslizamiento y proporcionan un incremento en la resistencia del material.

3.10 Valoración económica

Para la realización del análisis económico se toma como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante cálculo de los parámetros de trabajo en máquinas computadoras en la obtención y elaboración de las gráficas.

Tabla 3.9. Costo por concepto de tiempo para equipos eléctricos.

Por concepto de Tiempo				Por concepto de Consumo				
Operario	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo _{Ti} (\$)	Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiempo (h)	Costo _{Co} (\$)
Tecnólogo	2,34	0,16	0,37	2 - lámparas 1- Computadora 1 - Aire acondicionado	0,8 0,25 1,12	0,09	0,16	0,35
Costo Total para el cálculo con el programa.			$C_T = \text{Costo}_{Ti} + \text{Costo}_{Co}$ $C_T = \$0,72$					

3.11 Impacto medio ambiental

En el proceso de maquinado se producen grandes cantidades de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, debido a 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.

3.12 Conclusiones del capítulo 3

- La metodología propuesta muestra que existe una proporcionalidad directa entre la profundidad de penetración (h_p) y el ángulo de contacto (φ_k) durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide.
- La superficie deformada por cicloides en el eje Y describe un comportamiento de tendencia cíclica, en la medida que se desplaza por la superficie del material, sin embargo para un ángulo de contacto de $4,29^\circ$, presenta ambas tendencias, esto demuestra que la variación de los ángulos con respecto al movimiento del rodillo no es constante y tiende a provocar cambios en la superficie de la pieza.
- Las deformaciones en el eje Z durante el proceso de endurecimiento, se mantienen constantes para cada ángulo de contacto empleado en el experimento, este demuestra que en el desplazamiento por cicloide estos parámetros establecen el proceso de deformación plástica superficial por rodillo.

Conclusiones

Conclusiones generales

- Quedó establecida la metodología propuesta para la determinación del estado de tensión en la zona de contacto de la superficie deformada en el proceso de deformación plástica superficial con rodillos del acero AISI 1045 por el método de la cicloide.
- Las tensiones normales y tangenciales (σ_z ; σ_y) que caracterizan el proceso de deformación plástica Superficial por Rodillo del acero AISI 1045 se mantienen constantes para cada ángulo de contacto (φ_k) empleado en el experimento, sin embargo, estas deformaciones al ser de compresión provocan la ruptura interna de la estructura cristalina, ya que las mismas atraviesan en el enrejado cristalino.
- El estado tensional durante el endurecimiento del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide, para diferentes fuerzas aplicadas a la superficie de contacto de la pieza, las deformaciones se consideran de compresión al presentar estas, signos negativos.

Recomendaciones

Recomendaciones

- Aplicar la metodología propuesta para la determinación del estado de tensión en la zona de contacto de la superficie deformada en el proceso de deformación plástica superficial con rodillos del acero AISI 1045 por el método de la cicloide, en ejercicios de clases para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica.
- Valorar el empleo de la metodología propuesta otro tipo de material, que permita evaluar las condiciones de su endurecimiento en las mismas condiciones de trabajo.

Bibliografías

Bibliografías

1. Alfonso, E. et.al. Investigación del mecanismo de formación de la acritud y tensiones residuales en las capas superficiales durante el proceso de corte de piezas endurecidas, p.52-56, Construcción de Maquinarias (Santa Clara). No. 1. 1995.
2. Álvarez, E; G, M. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.
3. Alcántara, B.D. Comportamiento microestructural del acero AISI 1045 deformado en frío mediante la Deformación Plástica Superficial por rodadura.. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007
4. Bengton, U. Design requeriments materials properties a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
5. 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.
6. Boyle, J.y Spence, J. Stress analysis for creep. Londres: Butteerwoths, 1989.
7. Bright Burnishing Tools. "What is roller burnishing?",India, Obtenido de la Red mundial el 3 de Mayo del 2003, <http://www.brightburnishingtools.com>.
8. 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.
9. Cogsdill Tool Products, Inc. "Roller burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 8 de mayo del 2003, <http://www.cogsdill.com>.
10. Camejo, A.D.. Valoración económica del proceso de deformación plástica superficial por rodillo. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008
11. 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.
12. 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.
13. Dieter, G. Metalurgia Mecánica. MacGraw-Hill Book Company, Inc. 1967.
 14. Elliot Tool Co. "Carbide roll burnishing tools", USA, Obtenido de la Red mundial el 25 de abril del 2004, <http://www.elliotttool.com>.
 15. Fernández, M.F. Diseño, simulación y fabricación de un dispositivo para endurecimiento de piezas mediante la deformación plástica por rodadura. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007
 16. Gutierrez, F. y R. De la Vara, "Análisis y Diseño de Experimentos", Mc Garw Hill, 1^a ed, 237-264. Cd. México. México (2003).
 17. 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.
 18. 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
 19. Hernández, A.L.. Metodología para determinar el coeficiente n en piezas desformadas por rodillos simples. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2010
 20. Jiménez, D.M. Simulación del proceso de Deformación Plástica por Rodadura por el Método de Elementos Finitos. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008
 21. Key To Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>.
 22. Key To Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2008. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
 23. Korotcishe.L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág 53-64. Korotcishe.L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág 53-64.
 24. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359–360.

25. 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.
26. 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.
27. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.
28. Martinez, C. R. Ingeniería de Lubricación y Tribología. Fundamentos de tribología. Pág, 29-36, 43-47. 2006.
29. 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.
30. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996.
31. 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.
32. 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.
33. Odintsov, L.G. Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial", Editorial CM, 1987. Pág 385-422, URSS.
34. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los materiales. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
35. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los materiales. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. Pág 393-502. España.
36. Piñeiro, C.A. Obtención de la curva tenso-deformacional del Acero AISI-1045 endurecido por Deformación Plástica Superficial con rodillo. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2009

37. 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.
38. Sugino Corporation, "Superroll-Roller burnishing tool", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003. <http://www.suginocorp.com>
39. Tubielewicz, K., Jezierski, J., Znorko, D.A. "Calculation pressures and the contact field in the contact zone of a burnishing roller and worked material", Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wroclawskiej, No. 76, 2000, Pages 93-99, Poland.
40. **Página Web**
<http://www.wikipedia/lacicloide.com/>

Anexos

Anexo 1. Elemento deformante

