

Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial.

O. Boada Carrazana *, S. Díaz Rojas*, Y. Campos Pérez.**

*Departamento de Procesos Tecnológicos.

**Departamento de Mecánica Aplicada y Dibujo.

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Carretera a Camajuaní Km 5 ½ Santa Clara, C.P. 54830, Villa Clara, CUBA

Teléfono: (53) 42-281630

Fax: (53) 42-203113

E-mail: oboada@fim.uclv.edu.cu

(Recibido el 4 de Enero del 2003, aceptado el 22 de Mayo del 2003.)

Resumen.

El presente trabajo aborda lo referente al estado del arte de la modelación y el comportamiento de las superficies tratada por deformación plástica superficial (DPS). Se hace una breve descripción de la modelación elástica y plástica, de la teoría de la plasticidad y de las dislocaciones y se dan algunos resultados sobre la modelación del rodilado usando las técnicas de simulación y modelación, como el método de los elementos finitos, a partir del cual se obtienen los modelos matemáticos para calcular las tensiones y deformaciones máximas.

Palabras claves: deformación plástica superficial, rodilado, bruñido por rodillo, elementos finitos, modelación.

1. Introducción.

La asimilación de tecnologías no convencionales para la elaboración de piezas adquiere en la actualidad una importancia relevante dado el incremento de las exigencias que se le impone a los artículos, particularmente en la rama metalmecánica. La fiabilidad en el trabajo de las máquinas está muchas veces directamente asociada con la calidad de la capa superficial de las piezas y caracterizada por sus parámetros geométricos y físico-mecánicos. De la calidad de la capa superficial dependen las características de explotación, resistencia a la fatiga, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión entre otros aspectos. Desde el punto de vista del aumento de las características de explotación de las piezas es ventajoso que la capa superficial sea suficientemente dura, posea tensiones residuales de compresión y una forma aplanada de las micro irregularidades.

Entre los métodos de elaboración por deformación plástica superficial se encuentra el rodilado [1], que consiste en la elaboración de la superficie de la pieza con un rodillo de una forma geométrica determinada. En el presente trabajo se realiza un estudio del comportamiento del estado tensional y de la

deformación superficial de las piezas tratadas por rodilado mediante la modelación por el método de los elementos finitos.

2. Estado del arte de la modelación y el comportamiento de los materiales en la ingeniería.

La modelación del estado de tensión y de deformación que tienen lugar en los materiales resulta una tarea sumamente compleja y requieren de la determinación de expresiones que reflejen su comportamiento en las condiciones más reales posible. Las ecuaciones constitutivas de un material definen su respuesta frente a un conjunto de acciones. Para conseguir este objetivo de validez absoluta las ecuaciones han de cumplir una serie de requisitos de valor universal que constituyen los axiomas de consistencia. Además, en las mismas deben intervenir diferentes parámetros que definen el estado mecánico y termodinámico en que se encuentra el material. La modelación constitutiva de un material es una de las piedras angulares para la solución adecuada de problemas ingenieriles. Sin un modelo constitutivo

adecuado los cálculos no tienen ninguna validez, por otro lado, un buen modelo constitutivo sin un procedimiento de cálculo en el que pueda ser usado es únicamente un ejercicio académico.

Muchos de los modelos comunes son obtenidos de idealizaciones del estudio de los materiales, cuya composición es uniforme y reproducible, a tal grado que sus propiedades mecánicas son virtualmente las mismas que las obtenidas en laboratorios. Los parámetros que caracterizan estas ecuaciones se obtienen por ajustes de los datos experimentales a los modelos matemáticos, los cuales son seleccionados con alguna justificación teórica o empírica.

De estudios recientes en la búsqueda de leyes constitutivas que describan el comportamiento de diferentes materiales, entre ellos los aceros, se ha llegado al consenso que las mismas deben cumplir una serie de requerimientos [11]. El modelo elástico es la relación constitutiva básica de la que nacen la mayoría de los modelos actuales. Una de las vertientes que más se ha desarrollado en esta teoría es el caso de elasticidad lineal debido a su sencillez y operatividad en la solución de diferentes problemas de ingeniería.

La experiencia práctica demuestra que la capacidad de un metal de deformarse plásticamente es su propiedad más útil e importante. Las propiedades que exhiben las aleaciones metálicas, se deben precisamente a la existencia en ellas de ciertos defectos atómicos en sus redes cristalinas. Desde el punto de vista metalúrgico, las alteraciones de la secuencia en el ordenamiento atómico más importante son las de nivel lineal, conocidos como defectos lineales o dislocaciones atómicas. Se afirma que las dislocaciones son los defectos responsables de la deformación plástica irreversible de las estructuras metálicas y se consideran como las portadoras de la deformación. Por vías distintas, algunas investigaciones realizadas [2,4,10,14] demuestran que sobre el límite de deformación en la conformación influyen los factores siguientes:

- El valor de la tensión externa.
- Las propiedades del material sensibles a su estructura interna (capacidad de endurecimiento, sensibilidad a la temperatura, etc).
- Las condiciones del proceso de conformación (régimen de lubricación, condiciones de fricción, presión en la superficie, velocidad de la herramienta, etc).

La idea de caracterizar la plasticidad para operaciones de conformación sobre las bases de los datos clásicos del ensayo de tracción es predominante desde los últimos 30 años; pero estudiando con detenimiento la literatura especializada [12], se observa que tal aproximación esta siendo revisada y sobre esa

misma base otras mejores aproximaciones comienzan a ser encontradas. El análisis exacto del desarrollo de los procesos de conformación se dirige por el seguimiento a cada instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia. En las operaciones de conformación del metal, en que unas zonas están obligadas a no deformarse mientras otras son forzadas a adaptarse a una forma determinada, es necesario que el metal pueda deformarse sin que se produzcan deformaciones extremas localizadas.

Sobre la base de las anteriores consideraciones se organizó la tarea de modelar mediante el método de los elementos finitos los procesos de deformación plástica superficial mediante rodillos, conocido como rodilado

3. Modelación del proceso de rodilado por el método de los elementos finitos.

La solución de un problema mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) es un proceso que consta de una secuencia lógica de trabajo, la cual se puede dividir, como regla general, en las siguientes etapas [3,9,14]:

- a) Creación del modelo geométrico de la estructura o pieza a analizar.
- b) Definición de las propiedades mecánicas del material a utilizar.
- c) Generación de la malla de elementos finitos.
- d) Definición del esquema de carga y condiciones de contorno.
- e) Realización del análisis o cálculo.
- f) Visualización y análisis de los resultados.

Como es sabido, el rodilado es un proceso de acabado superficial que se basa en la deformación plástica de la capa superficial de la pieza. En la figura 1 se muestra esquemáticamente la zona de influencia del rodillo.

Las propiedades mecánicas, que deben introducirse en el software con implementación del Método de Elementos Finitos, dependen del tipo de análisis que se realizar. El análisis de las tensiones y deformaciones que se desarrolla en el presente trabajo corresponde con un problema estático no lineal [3,13]. La generación de la malla se ejecutó por la vía paramétrica, dando la posibilidad de definir el número de elementos en las dos direcciones (X, Y). El tipo de elemento utilizado un elemento plano formado por 4 nodos, el cual tiene como características ser un elemento plano isoparamétrico, recomendado para este tipo de análisis [3,8].

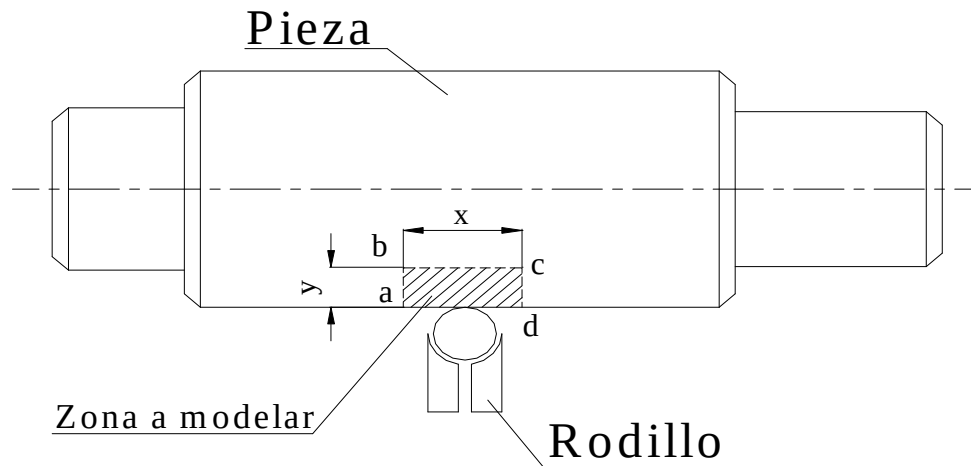


Figura 1. Zona o región a modelar.

Durante el proceso de rodilado, el rodillo ejerce una fuerza de compresión sobre la pieza, originándose deformaciones en la zona de contacto, las cuales no solo dependen de la fuerza aplicada, sino también de otros parámetros. La expresión para determinar la magnitud de estas deformaciones viene expresada por la siguiente fórmula (1).

$$a = 1.145 n_a \sqrt[3]{F \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (1)$$

Donde:

a: Dimensión de la zona contacto o de la zona deformada (mm)

F : Fuerza sobre la zona de contacto (N)

R_1, R_2 : Radios de curvatura del rodillo y la pieza respectivamente (mm)

E_1, E_2 : Módulo de elasticidad de 1^{er} orden del rodillo y la pieza respectivamente (MPa)

μ_1, μ_2 : Coeficiente de *Poisson* del rodillo y la pieza respectivamente

n_a : Coeficiente que depende de la relación: $\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot R_2 \cdot R_1}$,

A partir de la expresión (1) se procedió analizar la influencia que tenían los radios de curvaturas del rodillo y de la pieza, sobre la magnitud de la zona deformada manteniendo constante el resto de los parámetros que intervienen en la expresión. Durante el proceso de rodilado, el rodillo ejerce una fuerza de compresión F sobre la pieza, la cual debe ser capaz de deformar plásticamente la superficie de esta última, ver figura 2.

Dicha fuerza de compresión actúa sobre toda la zona de contacto de forma distribuida y uniformemente a lo largo del sector efg, ver figura 3 [5,6,7].

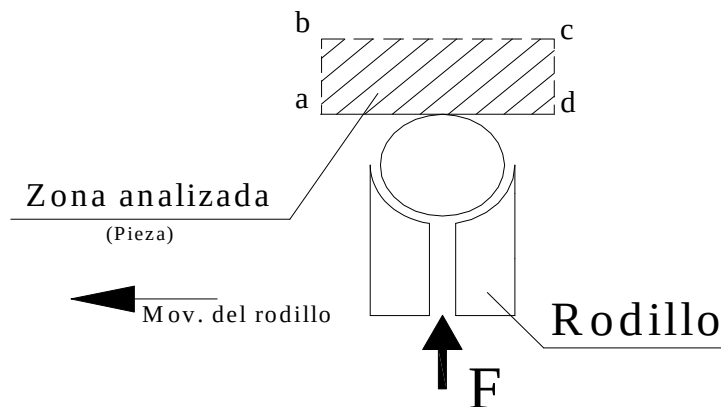


Figura 2. Fuerzas que ejerce el rodillo sobre pieza.

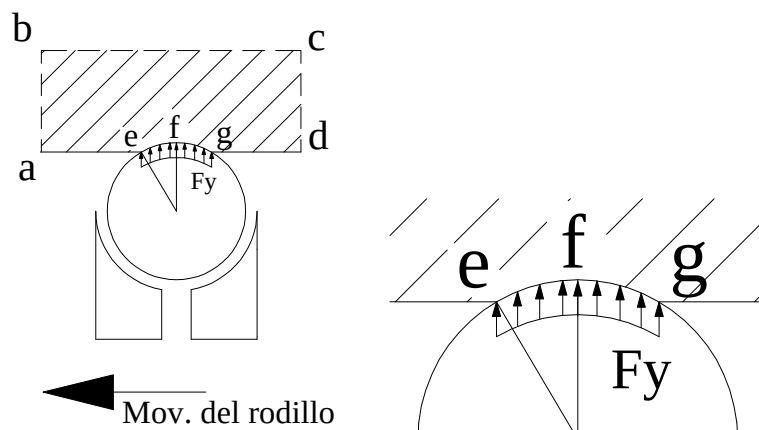


Figura 3. Distribución de la fuerza sobre la zona de contacto.

4. Análisis de los resultados.

Un aspecto importante en el estudio de la modelación por el MEF lo constituye el análisis de las tensiones y deformaciones, que se originan debido a las cargas que actúan sobre la pieza que se está modelando. En el presente trabajo pudo lograrse la distribución por contornos de estas tensiones en MPa, apreciándose que la zona de mayores tensiones se encuentra ubicada por donde se produce el contacto pieza-rodillo y va disminuyendo según nos alejamos de dicha zona. También se logró obtener la distribución y magnitud de

los desplazamientos en la dirección de eje Y. Partiendo de la expresión (1) y sobre la base del empleo del software *STATSGRAPHICS Plus 4.1*, el cual permite analizar modelos con más de una variable independiente, con un 95% de confianza, se obtuvo la formula (2). A partir de la expresión (2) se puede obtener la tensión equivalente máxima en función de los radios de curvatura, el módulos de elasticidad, el coeficiente de *Poisson* de ambas piezas y la fuerza de compresión del rodillo sobre la pieza, la cual sirvió finalmente para la elaboración del nomograma que se muestra en la figura 4.

$$\sigma_{equ} = \left(0.199 - 0.061 \cdot \left[1.145 \cdot n_a \cdot \sqrt[3]{F \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \right] \right) \cdot F \quad (2)$$

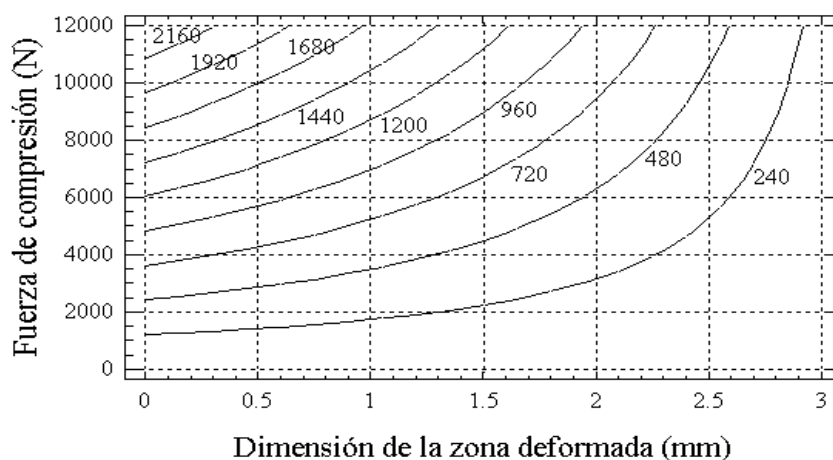


Figura 4. Nomograma para la determinación de la tensión máxima equivalente (MPa).

Del nomograma anterior se aprecia que la tensión máxima aumenta a medida que aumenta la fuerza de compresión para un valor fijo de la fuerza de compresión, a medida que disminuye el radio de curvatura del rodillo la dimensión de la zona deformada disminuye aumentando la tensión en la zona de contacto.

Así mismo se obtuvo la expresión (3) para determinar el desplazamiento máximo en función de la zona deformada y la fuerza de compresión, la cual fue utilizada para la obtención del nomograma que se muestra en la figura 5, mediante el cual se puede obtener los desplazamientos máximos.

$$Des = 89.361 \times 10^{-5} - 88.7253 \times 10^{-5} \cdot \left[1.145 \cdot n_a \cdot \sqrt[3]{F \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \right] + 1.04256 \times 10^{-6} \cdot F \quad (3)$$

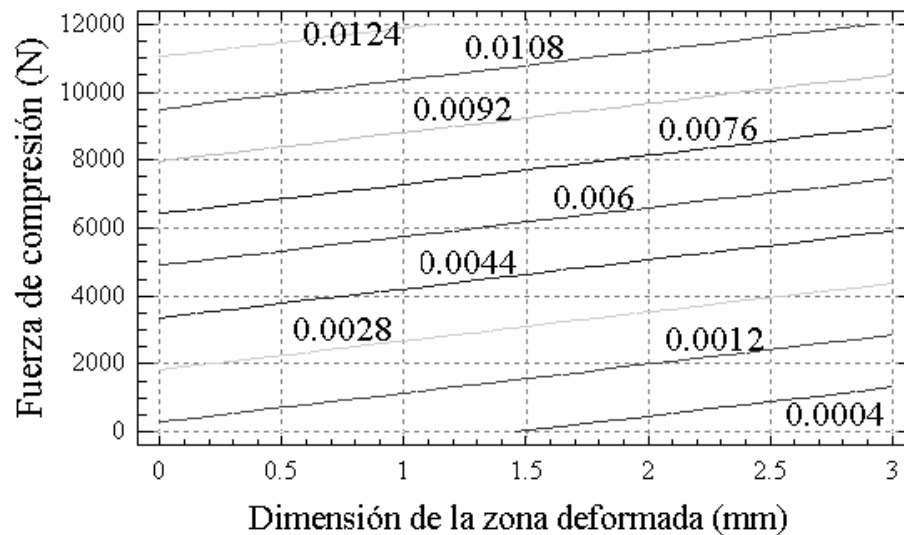


Figura 5. Nomograma para la determinación del desplazamiento máximo (mm).

5 Conclusiones.

1. En la actualidad existen un gran número de modelos que definen el comportamiento de los materiales en la ingeniería los cuales están en constante enriquecimiento y desarrollo.
2. Las ecuaciones constitutivas basadas en la teoría de la elasticidad, solo pueden ser empleadas en rangos de cargas donde los materiales experimenten un comportamiento elástico. En el caso de los modelos elásticos no lineales presentan la deficiencia de ser modelos puramente empíricos. Además, dada la complejidad y comportamiento de los materiales reales es difícil de establecer ecuaciones constitutivas que los representen realmente.
3. La mayor parte de las estructuras y piezas tienen de una forma u otra un comportamiento no lineal, pero en algunos casos se puede realizar un análisis lineal que represente el comportamiento de la pieza en forma exacta. La no-linealidad pueden presentarse de tres formas: no linealidad geométrica, no linealidad debido al material y la no linealidad debido a las condiciones de apoyo o análisis de contacto. Para cada uno de estos casos la solución se obtendrá a través de un proceso iterativo.
4. La mayor desventaja de trabajar con los problemas no lineales es que en algunas ocasiones la solución no puede encontrarse, es decir el proceso iterativo no converge, además la solución podría no ser única o no ser la solución necesaria.
5. Se realizó el análisis del proceso de rodado por el Método de los Elementos Finitos, a partir de un

modelo de cálculo donde se consideraron los principales factores que influyen en el mismo. A partir de los resultados obtenidos se obtuvieron las

expresiones matemáticas para determinar las tensiones y desplazamientos máximos, que se produce durante el proceso de rodilado.

6. Bibliografía.

1. Beer F., E., "Mecánica de Materiales", Mc Graw Hill, 1994.
2. Beer, F., "Mecánica vectorial para ingenieros I y II", Editorial Revolución, 1977.
3. Boada, O., Moya, J.C., "Aplicación industrial del rodilado como método alternativo", Revista Tecnología Mecánica, Ediciones Técnicas Mecánica, Diciembre 1999, Cuba.
4. Cárcel, A., Ferrer, C.; Sara, J., "Evaluación del comportamiento tribológico en la embutición de chapas recubiertas para carrocerías de automóviles. Estrategias de lubricación", Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 1, No. 1, pp 68-80, 1997.
5. COSMOS/M, Basic FEA system user guide, Structural Research & Analysis Corporation, Los Angeles, CA., 1999, Versión 2.6.
6. Ding, J. L., Lee, S. R. , "Constitutive modeling of the material behavior and related material testing", International Journal of Plasticity, Vol. 4, 1988.
7. Gere, J., Timoshenko, S., "Mecánica de Materiales", International Thompson Publishing Company, 2000.
8. Lindgren, Lars-Erik, "Formulation and modelation in simulation of material processing" – course note, Lulea University of Technology, 1998.
9. Meier, M., Zhu, Q., "Demonstrations of the quantitative differences between class M and class A deformations behavior within the composite model", Zeitschrift für Metallkunde, Vol. 84, pp 263-267, 1993
10. Naylon, D.J., "Constitutive laws for static analysis of embankment dams". Applcation of computational mechanics in engineering, Vargas , Balkema, Rotterdam,1994.
11. Pogodin, G.I y otros. "Procesos tecnológicos progresivos en la construcción de maquinaria", Editorial Pueblo y Educación, 1979.
12. Santiago, A.C., Zapata, M., "Revisión del método analítico para el calculo de esfuerzos de contacto en engranajes rectos por medio de elementos finitos", III Conferencia Anual de Usuarios COSMOS/™ , España, 2000
13. Schmidt, R. J., Wang, D. Q.; Hansen, A. C., "Plasticity model for transversely isotropic materials", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 119, No. 4, pp 748- 766, 1993
14. Smith I.M.; Griffiths D.V., "Programming the finite element", University of Manchester, UK, 1989.

Study of the mechanical and physical behavior of surfaces treated by superficial plastic deformation.

Abstract.

This paper deals with the state of the art of modelation and the behaviour of surfaces treated by superficial plastic deformation. It is given a brief description of the elastic and plastic modelation, theory of plasticity and dislocations, and showed some results about modelation of roller burnishing using simulation techniques like finite elements method to obtain the mathematics models in order to calculate the maximum stresses and strains.

Key words: Superficial plastic deformation, roller burnishing, finite elements method, modelation.