

Efecto de los parámetros del proceso de bruñido por rodillo en el campo de esfuerzos residuales

Effect of the parameters of the roller burnishing process in the residual stress field

Edgar López Martínez ^{1*}, Octavio Vázquez Gómez ^{2,3}, Héctor Javier Vergara Hernández ⁴

¹ *Campus Tehuantepec, Universidad del Istmo, México*

² *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México*

^{3,4} *Posgrado en Ciencias en Metalurgia, Instituto Tecnológico de Morelia, México*

***Autor de correspondencia:** lopeze@sandunga.unistmo.edu.mx

RESUMEN— Mediante la formulación de un modelo matemático resuelto con el método de elemento finito del proceso de bruñido por rodillo, se analizó el efecto de la fuerza, número de pases y avance del rodillo, sobre el campo de esfuerzos residuales, el máximo esfuerzo residual compresivo y su profundidad en discos de acero AISI 1045. La validación del modelo se llevó a cabo comparando los resultados experimentales del porcentaje de variación del diámetro de discos de acero (obtenidos de la literatura) con los obtenidos de la simulación. La principal diferencia entre estos resultados se debe a que, en la simulación, el rodillo presenta un comportamiento mecánico rígido. Se observó que la fuerza es el principal parámetro que influye sobre los parámetros de salida. Debido a la importancia del acero API X52 en la industria petrolera, se analizó el efecto de la fuerza de bruñido sobre el campo de esfuerzos residuales.

Palabras claves— *Acero AISI 1045, Acero API X52, Bruñido por Rodillo, Campo de Esfuerzo Residual.*

ABSTRACT— By formulating a mathematical model solved with the finite element method of the roller burnishing process, the effect of force, number of passes and feed were analyzed on the residual stress field and the magnitude and depth of the maximum compressive residual stress in AISI 1045 steel specimens. The model validation was performed comparing experimental results of the percentage change in diameter of steel discs (obtained from the literature) with those obtained from the simulation. The main difference between these results is due that in the simulation, the roller has a rigid mechanical behavior. It was observed that force is the main parameter influencing the output parameters. Because of the importance of API X52 steel in the oil industry, the effect of burnishing force on residual stress field was analyzed.

Keywords— *AISI 1045 Steel, API X52 Steel, Roller Burnishing, Residual Stress Field.*

1. Introducción

Diversos procesos de deformación plástica superficial (PDPS), se han desarrollado para mejorar algunas de las propiedades y características mecánicas de los materiales metálicos, tales como: la dureza, el acabado superficial y los esfuerzos residuales compresivos [1]–[7], con la finalidad de mejorar la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión asistida por esfuerzos y la resistencia a la fatiga [3], [6], [8], [9], sin dañar el medio ambiente [10]. Entre los procesos más importantes están el bruñido de baja plasticidad, bruñido por rodillo, bruñido por bola y lanzamiento de granalla. En el proceso de bruñido por rodillo, un rodillo cilíndrico duro aplica una fuerza compresiva sobre la superficie de un material, causando el flujo plástico debido a la fuerza aplicada. Los parámetros más importantes que influyen en este

proceso son: la fuerza compresiva, el avance del rodillo y el número de pases [11]–[14]. Otros parámetros que tienen menos influencia son: la velocidad de bruñido [11], [13], [14], la rugosidad inicial [15], la dureza superficial inicial [13], [15], la lubricación [16], la combinación con otros tratamientos [14], [15] y el ancho de contacto con el rodillo [16]. En especial, las características del material producidas por el bruñido por rodillo son: la rugosidad y la dureza superficial, la microdureza, el espesor de la capa endurecida, la disminución del diámetro externo, la resistencia al desgaste, los esfuerzos residuales, entre otros.

Se han realizado estudios experimentales, tanto en aceros como en aleaciones no ferrosas, sobre el efecto de los parámetros de proceso como: la tolerancia dimensional, la rugosidad, la dureza superficial, el campo de esfuerzos residuales y el espesor de la capa

endurecida [3]–[9], [11]–[13], [15], [17], [18], con la finalidad de obtener correlaciones empíricas para lograr un óptimo acabado superficial. Desafortunadamente, las correlaciones empíricas se encuentran limitadas a las condiciones de experimentación, por lo que no pueden ser extrapoladas a otros valores. Asimismo, se requiere un gran número de pruebas para obtener una correlación aceptable, lo que hace que sea una forma costosa para determinar el efecto de los parámetros de proceso. Una alternativa factible es el uso de modelos matemáticos empleando el método de elemento finito, para el estudio del efecto de los parámetros de proceso. El desarrollo de estos modelos se ha enfocado en dos grupos principales: 1) modelos para determinar el comportamiento de la rugosidad y 2) modelos para determinar el campo de esfuerzos residuales. Los modelos reportados para estos dos grupos han coincidido en modelar solo una parte de la pieza de trabajo a través de su máxima simetría, suponiendo que el comportamiento mecánico de la parte modelada es el mismo que en cualquier otra parte no modelada del componente. Otras simplificaciones de los modelos reportados son que el rodillo presenta un comportamiento rígido y que la pieza de trabajo no se mueve, con lo que se eliminan los cálculos de rotación de los nodos asociados al movimiento de la pieza. La modelación con elementos finitos de deformación plana en 2D simplifica en gran número la cantidad de cálculos computacionales, pero proporciona una mala estimación del campo de esfuerzos residuales en la dirección axial además de que se desconoce el área de contacto real entre la pieza de trabajo y el rodillo debido que ésta depende del diámetro, la geometría y las propiedades mecánicas. Dentro de los modelos reportados se encuentra el modelo de Bouzid y Saï [19], quienes diseñaron y utilizaron el código de elemento finito Zebulon para analizar la evolución de la rugosidad superficial por bruñido. Los resultados de su modelo fueron empleados para calcular el factor de rugosidad [20] y los esfuerzos residuales referentes a la geometría microscópica de contacto. Los resultados fueron satisfactorios para predecir el factor de rugosidad como una función del avance del herramental. Asimismo, los esfuerzos residuales simulados fueron comparados con resultados experimentales reportados en la literatura, donde observaron que los primeros eran de menor magnitud que los segundos. Prasad et al. [21] simularon el proceso de bruñido por rodillo mediante el uso del

paquete comercial ANSYS-10 para determinar el comportamiento de la rugosidad y los esfuerzos residuales como una función de la fuerza aplicada durante el proceso. Debido a la complejidad del problema, en el planteamiento de su modelo sólo consideraron una aspereza individual en 2D además de suponer que la rugosidad puede ser representada como una aspereza en forma triangular con un ángulo de 90° . Prasad también utilizó elementos finitos para deformación plana y propiedades mecánicas independientes de la rapidez de deformación y realizaron experimentos para validar su modelo mediante la comparación de la rugosidad experimental y simulada, cuya diferencia fue menor al 10%. Por otro lado, Zhuang y Wicks [22] propusieron un modelo de elemento finito 3D no lineal para simular y predecir los efectos de los parámetros de proceso y obtener el campo de esfuerzos residuales inducido por el proceso de bruñido de baja plasticidad en un motor de avión. Zhuang y Wicks emplearon el paquete comercial Abaqus/Standard para simular el proceso bruñido por bola, suponiendo que la herramienta de bruñido presentaba un comportamiento rígido, además de que despreciaron la fuerza de fricción que prevalece durante el contacto herramienta-pieza. Con datos experimentales reportados en la literatura para un sistema similar demostraron que su modelo es capaz de predecir los efectos de los parámetros del proceso sobre la distribución de los esfuerzos residuales y determinaron que la magnitud y la profundidad de los esfuerzos residuales compresivos se incrementan con la carga y el número de pases. Sartkulvanich et al. [23] formularon un modelo 3D en un sistema simple empleando el método de elementos finitos del proceso de bruñido por rodillo. El modelo fue utilizado para determinar la penetración máxima del rodillo para una presión específica; los parámetros de estudio fueron la presión de bruñido y el avance. A su vez, la penetración fue aplicada en un modelo 2D para determinar el efecto de los parámetros de entrada sobre la rugosidad final y el campo de esfuerzos residuales; ambos modelos fueron implementados en el paquete comercial DeformTM. De los resultados se observó que el campo de esfuerzos residuales calculado en la dirección tangencial tiene una buena concordancia con aquellos determinados experimentalmente, sin embargo, en la dirección axial, los resultados computacionales muestran un campo de

esfuerzos residuales de tensión sobre la superficie y hasta una cierta profundidad de la pieza bruñida, lo cual no concuerda con el campo compresivo obtenido experimentalmente en esa misma dirección debido a que en su modelo suponen un estado de deformación plana.

El objetivo de este trabajo es analizar, con la ayuda de simulación numérica, el efecto de los parámetros de proceso sobre el campo de esfuerzos residuales. Los parámetros de entrada analizados fueron la fuerza, el número de pases y el avance sobre el campo de esfuerzos residuales, el máximo esfuerzo residual compresivo y su profundidad; además, se analizó el efecto de las propiedades mecánicas del material comparando los resultados simulados para un acero AISI 1045 y un API X52.

2. Modelo matemático

El proceso de bruñido por rodillo consiste en deformar plásticamente la superficie de especímenes cilíndricos (discos) mediante el uso de un rodillo. El disco es colocado en un torno paralelo a velocidad constante (velocidad de bruñido) mientras que en el porta herramientas se coloca el rodillo. El rodillo se hace pasar a lo largo del espesor de la pieza a una velocidad constante, lo cual es conocido como el avance. Mientras se produce el avance, el rodillo aplica una fuerza contra la superficie del disco para provocar flujo plástico.

2.1 Método de solución

El método de elemento finito se ha utilizado ampliamente para resolver problemas que involucran el cálculo de los estados de esfuerzos y por lo tanto el de estado de deformaciones. Para la solución del problema, se decidió utilizar el paquete comercial Abaqus.

En la solución de problemas mecánicos por el método de elemento finito en donde la pieza, y más específicamente los elementos cambian de forma es común utilizar un punto de vista o sistema Lagrangiano en lugar de uno Euleriano. En un sistema Lagrangiano no existe transferencia de material a través de las fronteras de los elementos, es decir, los elementos se deforman y los nodos tienen grados de libertad de rotación, así como de traslación.

2.2 Implementación en Abaqus

Debido a la naturaleza no lineal del problema, las altas rapidezces de deformación y las interacciones de

contacto entre la pieza y la herramienta que se presentan, se trabajó con Abaqus /Explicit, que es un procedimiento dinámico explícito que puede ser lineal o no lineal.

La secuencia de cálculos se divide en dos partes:

1. Cálculos en los nodos (aceleraciones, velocidades y desplazamientos).

2. Cálculos en los elementos (deformaciones y esfuerzos a partir de ecuaciones constitutivas).

Debido a la naturaleza del bruñido, es computacionalmente muy caro implementar este proceso tal y como es físicamente, es decir, el tiempo que se requeriría para resolver el problema de un rodillo elástico que aplica una fuerza a un disco deformable elastoplásticamente, el cual se encuentra girando sobre su eje, es muy elevado, lo cual lo hace económicamente no factible. Debido a esto, aquellos investigadores que han trabajado con la modelación con elementos finitos [19], [21]–[24] han realizado ciertas simplificaciones. Todos ellos han coincidido en modelar solo una parte de la pieza a deformar plásticamente, es decir, obtienen la mayor simetría posible. Con esto suponen que el comportamiento mecánico en esta parte del disco es igual que aquel que se obtendría en cualquier otra parte del mismo. Otras simplificaciones son suponer que el rodillo presenta un comportamiento rígido y que la pieza no se mueve, con lo que eliminan los cálculos de rotación de los nodos asociados con el movimiento de la pieza. La modelación con elementos finitos de deformación plana en 2D simplifica en gran número la cantidad de cálculos, pero proporciona una mala estimación del campo de esfuerzos residuales en la dirección axial [23]; además se presenta el problema de que no se conoce el área real de contacto entre la pieza y el rodillo debido que esta depende del diámetro, geometría y propiedades mecánicas del rodillo y del disco. Por estas razones y para evitar un cálculo erróneo del campo de esfuerzos en la dirección axial, se formuló un modelo de elemento finito en tres dimensiones, en donde apoyándonos de la simetría sólo una parte del disco fue modelada (figura 1).

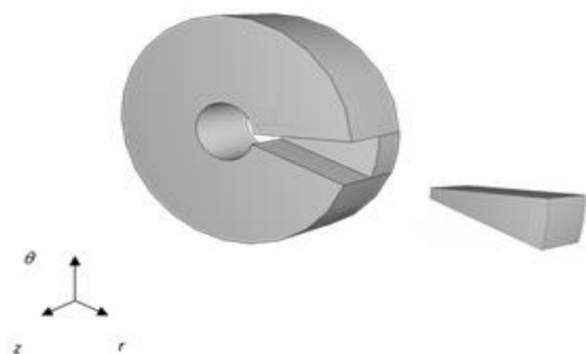


Figura 1. Sección del disco modelado.

En la interface de Abaqus, se creó la sección del espécimen cilíndrico como un sólido tridimensional deformable extruido; y el rodillo como una superficie rígida analítica de revolución. Se creó una sección sólida con las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 y se asignó una orientación de material en coordenadas cilíndricas. Al rodillo no se le asignó momento de inercia ni masa, debido a que todos sus grados de libertad se encuentran restringidos. Para simular el contacto, se creó una interacción de contacto entre el disco y el rodillo. El diámetro interior del disco, el cual está en contacto con el torno, y las caras de simetría, se asumieron como una frontera donde no existe flujo de material. En la figura 2 se muestran las condiciones de frontera.

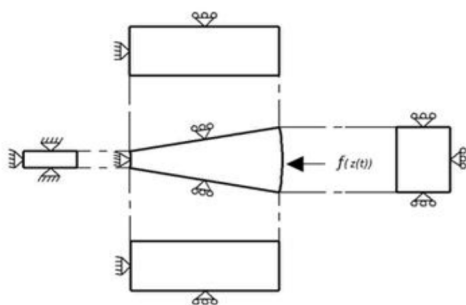


Figura 2. Condiciones de frontera de la sección del espécimen cilíndrico. $f(z(t))$ es la fuerza de bruñido que es función de la posición axial (z), y esta posición a su vez es función del tiempo.

Debido a que el campo de esfuerzos residuales suele desarrollarse alrededor de los 2 mm [11], [21]–[23], se utilizó un control de mallado estructurado hasta una profundidad de 2.6 mm aproximadamente con elementos ladrillo continuos lineales en un estado de deformación tridimensional y con integración reducida.

Para el resto del disco se utilizaron elementos triangulares continuos lineales en tres dimensiones, dando un total de 14,186 elementos. La figura 3 muestra la malla utilizada en la simulación, en donde se puede observar una mayor densidad de mallado en la zona cercana al contacto.

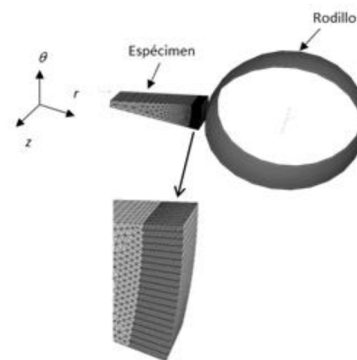


Figura 3. Mallado del sistema espécimen-rodillo. En este sistema solo aparece la superficie exterior del rodillo debido a que fue creado como una superficie rígida analítica.

Se crearon tres procedimientos de cálculo. En el primer procedimiento el rodillo aplica progresivamente una carga hasta alcanzar la fuerza requerida para el proceso; durante este procedimiento el rodillo está restringido en todas las direcciones con excepción de la dirección radial que es la dirección de carga. Una vez alcanzada la fuerza requerida (fuerza de bruñido), en el segundo procedimiento se mantiene esta fuerza y se aplica movimiento al rodillo en la dirección del avance (dirección axial), hasta alcanzar la orilla opuesta de la aplicación de la carga en el primer procedimiento, lo que significa que el rodillo realizó un pase. Si se requiere de dos pases, se aplica movimiento al rodillo en la dirección contraria a la del pase anterior hasta alcanzar la posición original del procedimiento 2; y así sucesivamente hasta alcanzar el número de pases requeridos. Por último, en el tercer procedimiento se retira el rodillo y se permite que el disco se recupere elásticamente.

3. Resultados y análisis

Los resultados experimentales de porcentaje de variación de diámetro obtenidos por Díaz y Robert [25], fueron utilizados para validar el modelo debido a que este dato también puede ser obtenido de los resultados de simulación.

3.1 Validación del bruñido por rodillo

El efecto que tiene la fuerza, el avance y el número de pases del proceso de bruñido por rodillo sobre el porcentaje de variación del diámetro de los discos se muestra en las figuras 4, 5 y 6 respectivamente. De las figuras, se puede observar que la fuerza y el número de pases son los parámetros que tienen una mayor influencia sobre éste parámetro de salida.

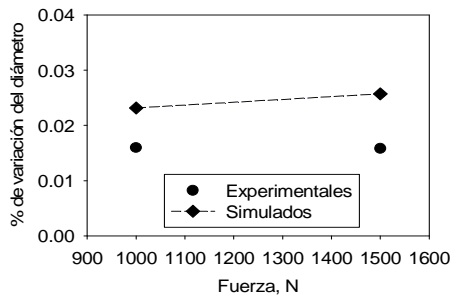


Figura 4. Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función de la fuerza aplicada durante el bruñido por rodillo. Los procesos se realizaron con 3 pases y con un avance de 0.228 mm/rev.

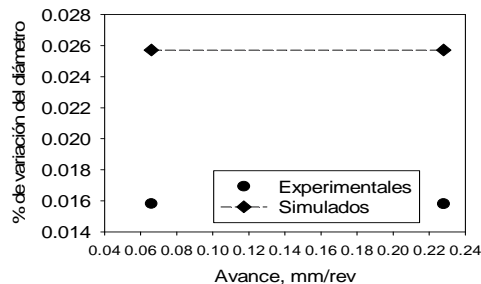


Figura 5. Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función del avance aplicado durante el bruñido por rodillo. Los procesos se realizaron en con 3 pases y con una fuerza de 1500 N.

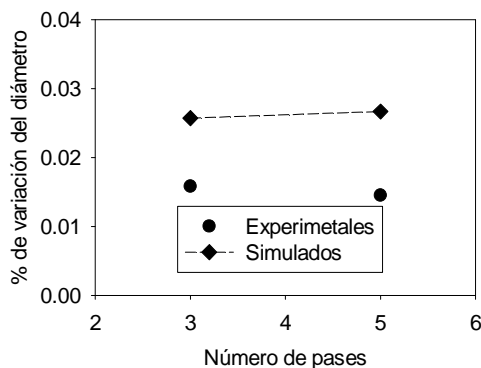


Figura 6. Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función del número de pases

aplicados durante el bruñido por rodillo. Los procesos se realizaron con un avance de 0.228 mm/rev y una fuerza de 1500 N.

Se puede observar un comportamiento similar de los resultados experimentales y los simulados del % de variación del diámetro, aunque numéricamente se sobre estiman los valores. En la modelación matemática se asumió un rodillo rígido, esto provoca que la fuerza aplicada deforme en mayor magnitud al disco, ya que el rodillo no admite ningún tipo de deformación, a diferencia del proceso real en donde el rodillo se deforma elásticamente. Otra causa de esta sobre estimación es que en la simulación no se consideró el efecto de la rapidez de deformación sobre las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, es decir, las propiedades mecánicas que se utilizaron fueron obtenidas de un ensayo de tracción realizado a una rapidez de deformación lenta; contrario a lo que ocurre durante el bruñido por rodillo donde se alcanzan rapidezces de deformación de hasta 4 s⁻¹. Para determinar éste efecto, se realizó un análisis de sensibilidad en donde tres casos fueron propuestos: 1) aumento de la resistencia a la fluencia en un 15%, 2) aumento de la resistencia a la fluencia en un 25%, y 3) aumento de la resistencia a la fluencia y a la tracción de 25%. La figura 7 muestra los resultados de estas simulaciones en donde se puede notar que efectivamente cuando la resistencia a la fluencia aumenta, como sería en el caso de un acero sensible a la rapidez de deformación, se obtiene un % de variación del diámetro menor. El aumentar la resistencia a la tracción no presenta un efecto significativo.

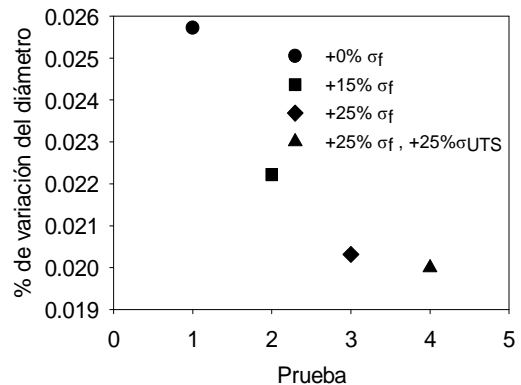


Figura 7. Análisis de sensibilidad de la resistencia a la fluencia y a la tracción en el % de variación del diámetro. Los

procesos se realizaron con un avance de 0.228 mm/rev y una fuerza de 1500 N.

3.2 Efecto de los parámetros de bruñido sobre el máximo esfuerzo residual compresivo

Debido a que los máximos esfuerzos residuales compresivos están ligados con el aumento en la dureza sub-superficial, resistencia a la corrosión bajo tensión, resistencia a la fatiga y resistencia a la fluencia, entre otras propiedades [15], [16], [26], [27], es importante determinar cuál es el efecto de los parámetros de bruñido de entrada sobre el campo de esfuerzos residuales, el máximo esfuerzo residual compresivo y la profundidad de éste. El máximo esfuerzo residual compresivo y su profundidad como función de la fuerza, el avance y el número de pases, son analizados en las figuras 8 y 9. En la figura 8 se observa que un aumento en la fuerza aplicada, aumenta el máximo esfuerzo residual compresivo para uno y tres pases, a diferencia del avance que presenta poco efecto sobre él. Sin embargo, con respecto a la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo, en un pase y con una carga de 1500 N se observa influencia del avance (figura 9 a); este efecto se debe a que, con un avance de menor magnitud, el rodillo pasa más tiempo cargando al disco en una misma posición, provocando que el campo de esfuerzos pueda tener una mayor penetración. Con tres pases el avance pierde su influencia debido a que se alcanza un equilibrio mecánico (figura 9 b). La mayor profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo se obtiene con una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228 mm/rev. En general el avance presenta poca influencia sobre el máximo esfuerzo residual compresivo, pero no en su profundidad cuando el proceso es realizado en un pase.

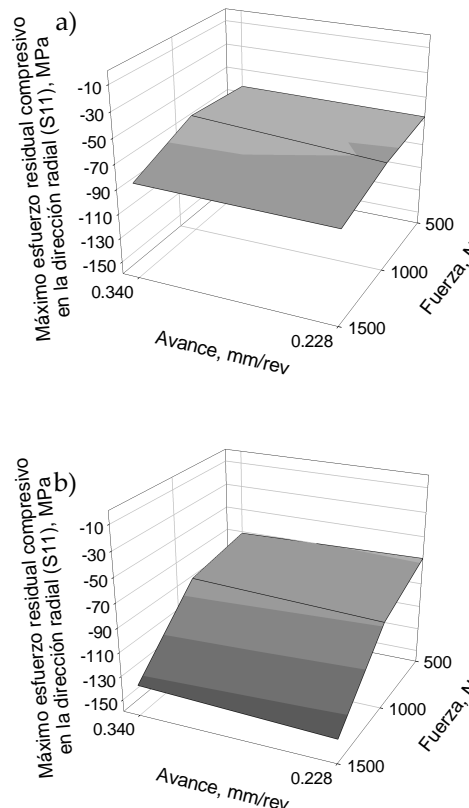


Figura 8. Efecto de la fuerza y el avance sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) un pase b) tres pases.

Las interacciones que existen entre la fuerza y el número de pases con respecto al máximo esfuerzo residual compresivo son mayores que en el caso de las interacciones fuerza-avance. El número de pases no afecta significativamente el máximo esfuerzo cuando se aplica una fuerza de 500 N, pero sí afecta la profundidad, en otras palabras, se puede lograr un mismo máximo de esfuerzo residual compresivo a diferentes profundidades variando el número de pases y manteniendo una fuerza de 500 N. La respuesta del máximo esfuerzo residual compresivo cuando se utiliza un avance de 0.34 mm/rev no es sensible al número de pases cuando se utiliza una fuerza baja (500 N) pero la profundidad sí se afecta, ya que se obtiene la menor cuando se realiza el proceso en un solo pase.

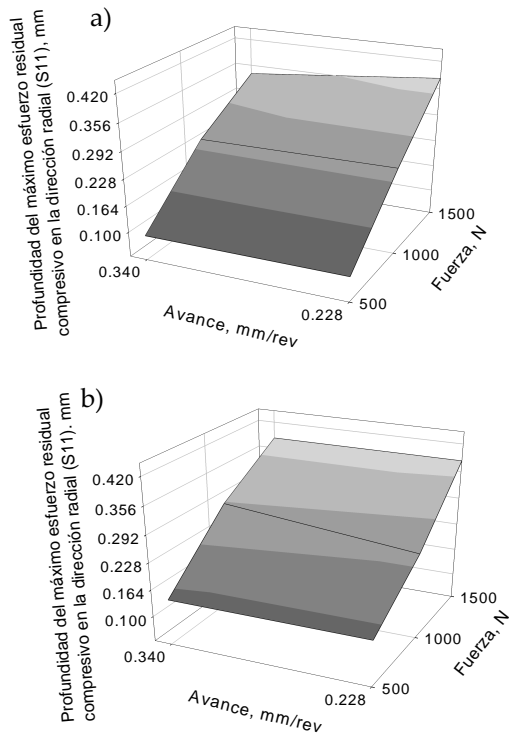


Figura 9. Efecto de la fuerza y el avance sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) un pase, b) tres pases.

El máximo esfuerzo residual compresivo aumenta cuando se aplica una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228 mm/rev en 3 pases; esto se debe a que el rodillo permanece durante más tiempo en una sola posición; lo que también provoca una mayor penetración del máximo esfuerzo residual compresivo. En otras palabras, en estas condiciones se produce el mayor endurecimiento por deformación. Cuando el avance aumenta a 0.34 mm/rev y se disminuye el número de pases, el rodillo pasa menos tiempo deformando el disco de acero por lo que se obtiene una menor profundidad y menor magnitud de este esfuerzo.

3.3 Efecto del material y la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales

En la figura 10 se observa la diferencia en comportamiento del campo de esfuerzos residuales en la dirección radial para un disco de acero AISI 1045 y para otro de acero API X52. El acero API X52 presenta una menor profundidad en el campo de esfuerzos debido a que presenta una resistencia mecánica mayor en

comparación con el acero AISI 1045. También al ser más resistente el acero API X52, la frontera en la dirección radial contraria al punto de aplicación de la carga (frontera sin flujo de material), afecta en menor grado al material provocando un campo de esfuerzo residual de menor magnitud. Por el contrario, el acero AISI 1045 al ser un material menos resistente, se ve más afectado por la frontera antes mencionada, resultando en un campo de esfuerzos residuales mayor; es decir, para una misma geometría y condiciones de bruñido (fuerza, avance y número de pases), el campo de esfuerzos residuales es función de las propiedades mecánicas del material.

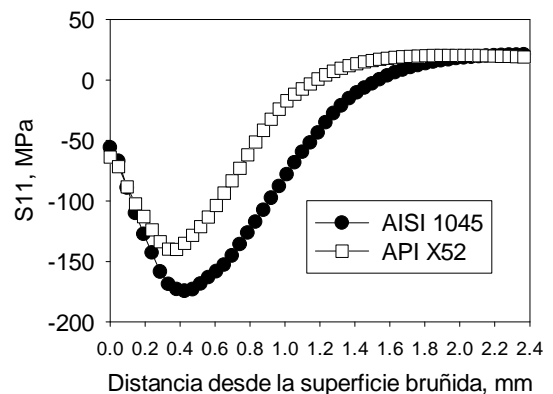


Figura 10. Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección radial (S11) obtenido de la simulación del proceso de bruñido por rodillo de un disco de acero AISI 1045 y otro de acero API X52. En la simulación se utilizó una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228 mm/rev en tres pases.

Cuando una pieza metálica va a estar sometida a un estado de esfuerzos tridimensional y/o a un medio corrosivo específico tal que se favorezca un proceso de corrosión bajo tensión, es necesario obtener un campo de esfuerzos residuales compresivos; y mientras de mayor magnitud sea éste, el material presentará un mejor comportamiento mecánico y de resistencia a la corrosión. Como se pudo advertir en las figuras 8 y 9, el parámetro de bruñido que presenta la mayor influencia sobre la magnitud y profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo es la fuerza. En las figuras 11, 12 y 13, se presenta el campo de esfuerzos residuales en la dirección radial, tangencial y axial respectivamente, a diferentes niveles de fuerza de bruñido para un disco de acero API X52. En la dirección radial, se observa que con una fuerza de 500 N es suficiente para producir esfuerzos residuales compresivos en la superficie y

cerca de ella, con una profundidad aproximada de 0.8 mm. Éste campo aumenta cuando la fuerza es aumentada a 1000 N debido a que al aplicar una mayor fuerza se provoca que el material experimente una mayor deformación tanto en la superficie como debajo de ella. Con una fuerza de 1500 N, el campo de esfuerzos interno continúa evolucionando aumentando su magnitud y su profundidad debido a que las capas internas de material se resisten a la compresión. Aunque el sistema se encuentra en un estado dinámico, con este nivel de carga debe de producirse un mayor espesor de endurecimiento antes de que la superficie continúe endureciéndose, por ésta razón el esfuerzo residual que se obtiene en la superficie es el mismo que el que se obtuvo con una fuerza de 1000 N.

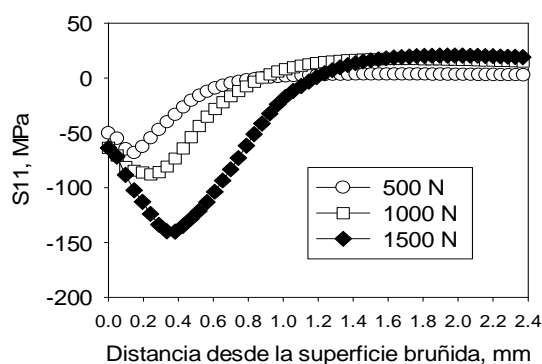


Figura 11. Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección radial (S11) de un disco de acero API X52. Simulación en tres pases y avance de 0.228 mm/rev.

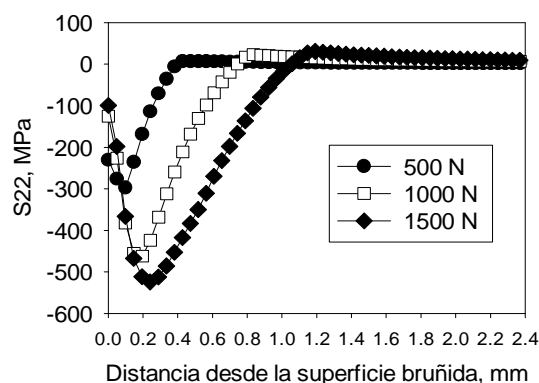


Figura 12. Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección tangencial (S22) de un disco de acero API X52. Simulación con tres pases y avance de 0.228 mm/rev.

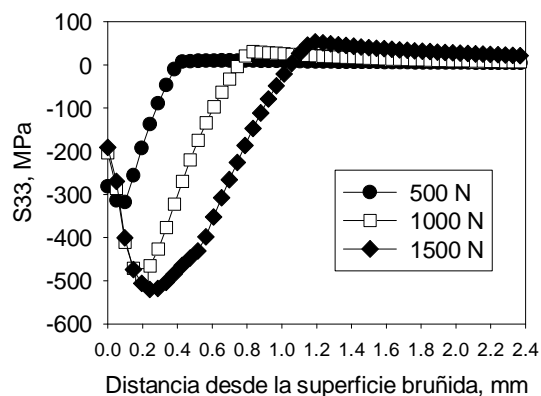


Figura 13. Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección axial (S33) de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pases y avance de 0.228 mm/rev.

Igual que en el caso de la dirección radial, en las direcciones tangencial y axial también se observa que se produce un campo de esfuerzos residuales compresivos cerca de la superficie (figuras 12 y 13); sólo que en éstas direcciones este campo presenta una magnitud mayor. Conforme la carga aumenta también se observa un aumento de esfuerzos residuales de tensión; esto se debe a que mientras una mayor fuerza se aplique con el rodillo al disco, éste va a responder con la misma fuerza en dirección contraria. Este comportamiento también se debe a que las fronteras del modelo se encuentran muy cercanas al punto de aplicación de la fuerza. En la superficie se obtiene una magnitud de esfuerzo residual compresivo mayor cuando se utilizó una fuerza de 500 N en comparación que cuando se utilizó una fuerza mayor. Esto se debe a que cuando se producen deformaciones mayores, las capas de material interno (que está más endurecido que la superficie) se oponen a las cargas compresivas pudiendo, dependiendo de la cantidad de deformación, llegar a tensionar al material en la superficie. En la dirección radial no ocurre esto porque existe una gran cantidad de material a deformar debido a que las fronteras se encuentran muy alejadas del punto de aplicación de la fuerza.

4. Conclusiones

Se formuló un modelo matemático para predecir el campo de esfuerzos residuales en el proceso de bruñido por rodillo de discos de acero. Debido a la dificultad en la medición experimental de los esfuerzos residuales, el modelo matemático se validó comparando el porcentaje

de reducción del diámetro experimental con los simulados para un acero AISI 1045, en donde se observó similitud en los resultados.

La principal diferencia del porcentaje de variación del diámetro entre los resultados experimentales y simulados se debe a la suposición de que el rodillo tiene un comportamiento mecánico rígido.

El modelo matemático se utilizó para determinar el efecto que presenta la fuerza de bruñido, número de pases y avance sobre el porcentaje de variación del diámetro, campo de esfuerzos residuales, máximo esfuerzo residual compresivo y profundidad de éste máximo.

De los resultados obtenidos de la modelación matemática, se llega a las siguientes conclusiones:

1. La fuerza es el parámetro que más afecta los parámetros de salida. Las piezas metálicas sometidas a un estado de esfuerzos alto, debido a la aplicación de una fuerza de bruñido alta, tendrán un porcentaje de variación del diámetro mayor en comparación con piezas sometidas a un estado de esfuerzos bajo; sin embargo, esta variación es menor al 0.021%.

2. Después de la fuerza, el número de pases es el parámetro que mayor influencia tiene sobre los parámetros de salida, dejando al avance como el parámetro con la menor influencia, ya que el máximo esfuerzo residual compresivo es poco afectado por él.

3. Las interacciones entre la fuerza y el número de pases presentan la mayor influencia sobre los parámetros de salida. Las interacciones entre la fuerza y el avance, y el número de pases y avance, presentan la menor influencia. Una combinación de alta fuerza, incremento en el número de pases y disminución del avance provoca la mayor penetración y el máximo esfuerzo residual compresivo.

4. El porcentaje de variación del diámetro y el campo de esfuerzos residuales también son función de las dimensiones y propiedades mecánicas del material a bruñir.

5. El aumento de la fuerza aumenta el máximo esfuerzo residual compresivo y la profundidad de éste en la dirección de la aplicación de la fuerza. Sin embargo, el esfuerzo residual compresivo en la superficie en la dirección axial y tangencial pierde magnitud.

6. Si se desea la máxima profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo con cualquier avance, se

debe de realizar el proceso en tres pases con la mayor fuerza.

5. Referencias

- [1] E. Rafati and M. S. Mahdieh. "Investigation of Variance of Roller Burnishing Parameters on Surface Quality by Taguchi Approach." *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 77–81, 2013.
- [2] M. Sayahi, S. Sghaier, and H. Belhadjsalah. "Finite element analysis of ball burnishing process: Comparisons between numerical results and experiments." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1665–1673, 2013.
- [3] K. A. Patel and P. K. Brahmabhatt. "Implementation of Taguchi Method in the Optimization of Roller Burnishing Process Parameter for Surface Roughness." in *Proceedings of First International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems: Volume 2*, S. C. Satapathy and S. Das, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 185–195.
- [4] M. F. A. Q. Firas. "The Effect of Roller Burnishing on Surface Hardness and Roughness of Aluminum Alloy." *Int. J. Mech. Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 37–40, 2015.
- [5] S. Mezlini, S. Mzali, S. Sghaier, C. Braham, and P. Kapsa. "Effect of a combined machining / burnishing tool on the roughness and mechanical properties." *Lubr. Sci.*, vol. 26, pp. 175–187, 2014.
- [6] K. Konefal, M. Korzynski, Z. Byczkowska, and K. Korzynska. "Improved corrosion resistance of stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 by slide diamond burnishing." *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 11, pp. 1997–2004, 2013.
- [7] X. L. Yuan, Y. W. Sun, L. S. Gao, and S. L. Jiang. "Effect of roller burnishing process parameters on the surface roughness and microhardness for TA2 alloy." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 85, no. 5, pp. 1373–1383, Jul. 2016.
- [8] N. Kumar, A. Sachdeva, L. P. Singh, and H. Tripathi. "Experimental investigation of effect of roller burnishing process parameters on surface roughness and surface hardness of C40E steel." *Int. J. Mach. Mach. Mater.*, vol. 18, no. 1/2, p. 185, 2016.
- [9] P. Zhang and J. Lindemann. "Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80." *Scr. Mater.*, vol. 52, no. 6, pp. 485–490, 2005.
- [10] S. Díaz Rojas. "Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas de bruñido por rodillo." Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, 2006.
- [11] M. H. El-Axir. "Investigation into roller burnishing." *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 11, pp. 1603–1617, 2000.
- [12] M. H. El-Axir and A. A. Ibrahim. "Some surface characteristics due to center rest ball burnishing." *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 167, no. 1, pp. 47–53, 2005.
- [13] M. H. El-Axir and M. M. El-Khabeery. "Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials." *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1, pp. 82–89, 2003.
- [14] S. J. Ebeid and T. A. Ei-Taweel. "Surface improvement through

- hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique.” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 219, no. 5, pp. 423–430, May 2005.
- [15] A. M. Hassan and A. S. Al-Bsharat. “Improvements in some properties of non-ferrous metals by the application of the ball-burnishing process.” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 59, no. 3 SPEC. ISS., pp. 250–256, 1996.
- [16] D. Butler. “Burnishing for fatigue strength.” *Adv. Mater. Process.*, vol. 163, no. 10, pp. 66–68, 2005.
- [17] L. Luca, S. Neagu-Ventzel, and I. Marinescu. “Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels.” *Precis. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 253–256, 2005.
- [18] P. Zhang and J. Lindemann. “Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80.” *Scr. Mater.*, vol. 52, no. 10, pp. 1011–1015, 2005.
- [19] W. Bouzid Saï and K. Saï. “Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel.” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, no. 5–6, pp. 460–465, 2005.
- [20] W. Bouzid, O. Tsoumarev, and K. Saï. “An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel.” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 120–125, Jul. 2004.
- [21] K. E. Prasad, S. Nahavandi, M. H. Mohammed, and V. N. Aditya. “Prediction of residual stresses in roller burnished components: a finite element approach.” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 153–163, 2006.
- [22] W. Zhuang and B. Wicks. “Multipass low-plasticity burnishing induced residual stresses: Three-dimensional elastic-plastic finite element modelling.” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 218, no. 6, pp. 663–668, Jun. 2004.
- [23] P. Sartkulvanich, T. Altan, F. Jasso, and C. Rodriguez. “Finite element modeling of hard roller burnishing: An analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses.” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 129, no. 4, 2007.
- [24] A. Saldaña-Robles, E. Aguilera-Gomez, H. Plascencia-Mora, E. R. Ledesma-Orozco, J. F. Reveles-Arredondo, and N. Saldaña-Robles. “Three-dimensional modeling of surface roughness for burnishing process.” *DYNA*, vol. 90, no. 4, pp. 423–432, 2015.
- [25] S. F. Díaz Rojas and T. Robert Núñez, “Bruñido por Rodillo Simple en el Acer4o AISI 1045,” *Ing. Mecánica Tecnol. y Desarro.*, vol. 2, no. 1, pp. 32–40, 2005.
- [26] P. S. Prevéy, R. a. Ravindranath, M. Shepard, and T. Gabb. “Case Studies of Fatigue Life Improvement Using Low Plasticity Burnishing in Gas Turbine Engine Applications.” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 128, no. 4, p. 865, 2006.
- [27] P. S. Prevéy and J. T. Cammett. “The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6.” *Int. J. Fatigue*, vol. 26, no. 9, pp. 975–982, 2004.