



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE QUIMICA

**MODELACIÓN MATEMÁTICA Y
COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DE PIEZAS DE ACERO
PROCESADAS POR EL MÉTODO DE
BRUÑIDO POR RODILLO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERÍA QUÍMICA - METALURGIA

P R E S E N T A :

IQM EDGAR LÓPEZ MARTÍNEZ

TUTOR:

JOSÉ BERNARDO HERNANDEZ MORALES



2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ

Secretario: DR. SERGIO ALONSO SERNA BARQUERA

Vocal: DR. ARMANDO ORTIZ PRADO

1^{er}. Suplente: M. EN I. VICTOR JORGE CORTES SUAREZ

2^{do}. Suplente: DR. JOSE BERNARDO HERNANDEZ MORALES

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALURGICA, FACULTAD DE QUIMICA

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSE BERNARDO HERNANDEZ MORALES

FIRMA

*De mi cuerpo descompuesto crecerán las flores y yo estaré en ellas,
eso es eternidad.*

Edvard Munch

Dedicatorias:

Dedicado a las personas con las que siempre podré contar, a los miembros de mi familia:
A mi mamá Concepción, a mi papá José, a mi hermano Fernando y a mi hermano Julio; y
por supuesto a Candy, Pinky, Honey y Pupillo.

A los nuevos miembros de la familia:
Diana, Samara y el que viene en camino ¿?.

A mi amigo de la maestría:
Octavio Vázquez

A mis compañeros de la maestría:
Allan y José

A mis compañeros de metalurgia:
Sergio, Héctor, Benjamín, Luís

Agradecimientos:

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado en mis estudios de maestría

A mi tutor Dr. José Bernardo Hernández Morales por su invaluable asesoría.

A la M en I Teresita Robert y al Dr. Silvio F. Díaz Rojas por la valiosa información y ayuda proporcionada para la realización de esta tesis

Al Dr. José Antonio Barrera por su amistad y por sus consejos siempre acertados.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, y en especial al IQM Guillermo Salas.

A los miembros del jurado por las valiosas críticas a este trabajo.

Índice

Notación	ii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas	vii
Resumen	viii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Antecedentes	5
Capítulo 3. Modelación Matemática	13
Capítulo 4. Procedimiento Experimental	18
4.1 Prueba de compresión	18
Capítulo 5. Resultados y Análisis	22
5.1 Prueba de compresión	22
5.2 Simulación y validación de la prueba de compresión	27
5.3 Simulación y validación del bruñido por rodillo	34
5.4 Efecto de los parámetros de bruñido sobre el porcentaje de variación del diámetro	48
5.5 Efecto de los parámetros de bruñido sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	62
5.6 Efecto de la fuerza de bruñido sobre el campo de esfuerzos residuales.	70
5.7 Efecto de las propiedades mecánicas del material bruñido sobre el campo de esfuerzos residuales.	73
Conclusiones	76
Anexo A. Método de solución e implementación en Abaqus	78
Bibliografía	82

Notación

F_i	fuerza de cuerpo
T_i	vector de esfuerzos
n_j	vector unitario
σ_{ij}	tensor de esfuerzos
σ_R	esfuerzo real
δv_i	campo de velocidad virtual
f_i	fuerza de cuerpo prescrita externamente
\ddot{u}_i	vector de aceleraciones
$\dot{}_i$	vector de velocidades
u_i	vector de desplazamientos
M_{ij}	tensor o matriz de masa
I_{ij}	tensor de fuerzas internas
P_{ij}	tensor de fuerzas externas
C_{ijkl}	tensor del modulo elástico
C_{ijkl}^{ep}	tensor de rigidez elástico-plástico
ε_{ij}	tensor de deformaciones
ε_{ij}^e	tensor de deformaciones elástico
ε_{ij}^p	tensor de deformaciones plástico
δ_{ij}	delta de Kronecker
$d\lambda$	función escalar que depende de la historia de deformación

ε_p	deformación plástica efectiva
ε	deformación real
e	deformación convencional
$\dot{\varepsilon}$	rapidez de deformación real
\dot{e}	rapidez de deformación convencional
f	superficie de fluencia
g	función de potencial plástico
k	parámetro de endurecimiento isotrópico
t	tiempo
ν	relación de Poisson
E	modulo de elástico o de Young
F	fuerza
ρ	densidad
V	volumen
S	superficie
A_0	área inicial
L	longitud
L_0	longitud inicial
ε_r^p	componente normal del tensor de deformaciones plástica
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	componentes normales del tensor de esfuerzos
PE11	Notación utilizada por Abaqus del componente normal del tensor de deformaciones plásticas
S11, S22, S33	Notación utilizada por Abaqus de los componentes normales del tensor de esfuerzos

Lista de Figuras

Figura 3.1: Disco de acero X52	14
Figura 3.2: Elemento deformante (rodillo)	15
Figura 4.1: Orientación de las probetas de compresión	20
Figura 4.2: Dimensiones de la probeta para la prueba de compresión. Unidades en mm	20
Figura 4.3: Probeta de compresión montada en la maquina de ensayos mecánicos	21
Figura 5.1: Diagrama esfuerzo-deformación convencional obtenido a partir de una prueba de compresión a diferentes rapidezces de deformación	24
Figura 5.2: Diagrama esfuerzo-deformación real obtenido a partir de una prueba de compresión a diferentes rapidezces de deformación	25
Figura 5.3: Comparación del esfuerzo de fluencia obtenido mediante pruebas de compresión y por pruebas de tensión como función de la rapidez de deformación	25
Figura 5.4: Condiciones de frontera de la probeta de compresión	28
Figura 5.5: Condiciones de frontera y mallado de la probeta de compresión	29
Figura 5.6: Esfuerzos residuales en la probeta de compresión después de haber sido ensayada	30
Figura 5.7: Mallado de la probeta de compresión en dos dimensiones	33
Figura 5.8: Sección del disco a ser modelada	35
Figura 5.9: Condiciones de frontera de la sección del disco de acero	36
Figura 5.10: Mallado del sistema disco-rodillo	37
Figura 5.11: Ampliación de la zona fina del mallado del disco	38
Figura 5.12: Secuencia de los procedimientos de calculo para la simulación del proceso de bruñido por rodillo	39
Figura 5.13: Campo de esfuerzos desarrollado en la dirección radial al final del primer procedimiento	40
Figura 5.14: Campo de deformación plástica en la dirección radial al final del primer procedimiento	41
Figura 5.15: Campo de deformación plástica en la dirección radial después de una pasada del rodillo durante el segundo procedimiento	41
Figura 5.16: Campo de deformación plástica en la dirección radial después de dos pasadas del rodillo durante el segundo procedimiento	42
Figura 5.17: Campo de deformación plástica en la dirección radial después de tres pasadas del rodillo	42
Figura 5.18: Campo de esfuerzos desarrollado en la dirección axial después de una pasada	

durante el segundo procedimiento	43
Figura 5.19: Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función de la fuerza aplicada durante el bruñido por rodillo	44
Figura 5.20: Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función del avance aplicado durante el bruñido por rodillo	44
Figura 5.21: Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función de los pasos aplicados durante el bruñido por rodillo	45
Figura 5.22: Análisis de sensibilidad de la resistencia a la fluencia y a la tracción en el % de variación del diámetro	46
Figura 5.23: Relación de la superficie deformada en la dirección radial con la capa endurecida. Simulación realizada con una fuerza de 2000 N, un avance de 0.228 mm/rev y 3 pasadas	47
Figura 5.24: Relación de la superficie deformada en la dirección radial con la capa endurecida. Simulación realizada con una fuerza de 1000 N, un avance de 0.228 mm/rev y 3 pasadas	47
Figura 5.25: Efecto de la fuerza de bruñido y el avance sobre el % de variación del diámetro	50
Figura 5.26: Efecto de la fuerza de bruñido y las pasadas sobre el % de variación del diámetro	51
Figura 5.27: Efecto del avance y las pasadas sobre el % de variación del diámetro	52
Figura 5.28: Efecto de la fuerza y el avance sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	55
Figura 5.29: Efecto de la fuerza y el avance sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	56
Figura 5.30: Efecto de la fuerza y el avance sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	57
Figura 5.31: Efecto de la fuerza y el avance sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	58
Figura 5.32: Efecto de la fuerza y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	59
Figura 5.33: Efecto de la fuerza y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	60
Figura 5.34: Efecto de la fuerza y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	61
Figura 5.35: Efecto de la fuerza y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	62
Figura 5.36: Efecto del avance y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	63
Figura 5.37: Efecto del avance y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	64

Figura 5.38: Efecto del avance y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo	65
Figura 5.39: Efecto del avance y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	66
Figura 5.40: Efecto del avance y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	67
Figura 5.41: Efecto del avance y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo	68
Figura 5.42: Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección radial de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pasadas y avance de 0.228mm/rev	71
Figura 5.43: Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección tangencial de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pasadas y avance de 0.228mm/rev	71
Figura 5.44: Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección axial de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pasadas y avance de 0.228mm/rev	72
Figura 5.45: Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección radial obtenido de la simulación del proceso de bruñido por rodillo de un disco de acero AISI 1045 y otro de acero API X52	74
Figura 5.46: Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección tangencial obtenido de la simulación del proceso de bruñido por rodillo de un disco de acero AISI 1045 y otro de acero API X52	74
Figura 5.47: Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección axial 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 utilizo una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228mm/rev en 3 pasadas.	75

Lista de Tablas

Tabla 4.1: Velocidad del pistón necesaria para obtener la rapidez de deformación requerida.	19
Tabla 5.1: Dimensiones iniciales y finales de las probetas de compresión.	23
Tabla 5.2: Resistencia a la fluencia del acero X52 como función de la rapidez de deformación	26
Tabla 5.3: Parámetros de entrada para el estudio del efecto de la altura final de la probeta de compresión	27
Tabla 5.4: Altura final calculada normalizada de las tres pruebas de compresión.	31
Tabla 5.5: Efecto de la resistencia a la fluencia en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)	31
Tabla 5.6: Efecto del número de elementos en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)	32
Tabla 5.7: Efecto del valor de “mass scaling” en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)	32
Tabla 5.8: Efecto del tipo de elemento en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)	33
Tabla 5.9: Propiedades mecánicas del acero AISI 1045	34
Tabla 5.10: Propiedades mecánicas del acero API X52 utilizadas en la simulación del proceso de bruñido por rodillo.	48
Tabla 5.11: Parámetros de entrada utilizados en la simulación del bruñido por rodillo de discos de acero X52	48

Resumen

En el proceso de bruñido por rodillo, un elemento deformante denominado rodillo deforma plásticamente la superficie de una pieza de material metálico. Mediante este proceso se consigue aumentar la resistencia mecánica, tal como la dureza sub superficial y resistencia a la fatiga, y la resistencia a la corrosión bajo tensión y corrosión fatiga. El aumento de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión tienen que ver con la introducción de un campo de esfuerzos residuales compresivos cerca de la superficie y a la disminución de la rugosidad de la superficie de las piezas. Por lo tanto, es de gran interés determinar cual es efecto de las variables independientes o parámetros de entrada en el proceso de bruñido por rodillo sobre las variables dependientes o parámetros de salida. Como primer paso y con el objeto de abrir un campo de investigación, los objetivos de esta tesis fueron determinar el efecto de la fuerza de bruñido, el avance y número de pasadas sobre el porcentaje de variación del diámetro, el campo de esfuerzos residuales y la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo en discos de acero. Para alcanzar estos objetivos, se decidió formular un modelo matemático basado en el método de elemento finito e implementarlo en el paquete comercial Abaqus. La validación del modelo matemático se llevó a cabo comparando los resultados simulados con los obtenidos de la literatura para discos de acero AISI 1045. Aunque el modelo no se validó satisfactoriamente, este se utilizó para analizar el efecto de los parámetros de entrada en discos de acero API X52, como primer paso para que en un futuro se pudiera llegar a aplicar algún tipo de bruñido en este tipo de acero. Se determinó que la fuerza es el parámetro de bruñido que mayor efecto tiene sobre el campo de esfuerzos residuales y sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. Después de la fuerza, el número de pasadas es el parámetro que mayor influencia tiene sobre los parámetros de salida, dejando al avance como el parámetro con la menor influencia.

Capítulo 1

Introducción

Los componentes metálicos son un elemento clave en el mundo industrializado, y en especial los componentes hechos de acero. El acero presenta grandes ventajas en comparación con otros tipos de materiales tanto metálicos como no metálicos, como son su relativo bajo costo de producción, sus propiedades y comportamientos físico, químico y mecánico. A causa de los procesos de manufactura de conformado mecánico, de solidificación, así como de los diferentes tratamientos posteriores (térmicos, químicos, termo mecánicos, etc.) que sufren los componentes de acero, su superficie puede presentar fisuras, rugosidad significativa y/o esfuerzos residuales de tensión, entre otras características. Esto va en decremento de las propiedades mecánicas y de su comportamiento, y esto puede llevar a que un componente pueda fallar bajo circunstancias normales de trabajo.

El acero API - X52 es un material usado para la fabricación de tubos destinados a la industria petrolera y de refinación. La fabricación de tubos se realiza por el método de estirado en caliente, lo que hace que el acero se normalice y adquiera las propiedades y comportamiento óptimos para el transporte de fluidos, los cuales suelen ser combustible de alto o bajo contenido de azufre o gas, aunque ocasionalmente puede transportar petróleo crudo. A causa del proceso de manufactura la superficie del tubo puede presentar esfuerzos residuales de tensión, que en combinación con el medio ambiente en el que opera, se puede llegar a producir daño superficial por corrosión bajo tensión (CBT)^{1,2}, la cual es un tipo de corrosión localizada. La corrosión se produce

en las fisuras de la superficie y, si no las hay, de cualquier forma es condición suficiente la presencia del campo de esfuerzos residuales de tensión y el medio ambiente específico para producir la CBT. Este tipo de corrosión es de las más devastadoras, debido a que el área de la zona donde se produce la reacción de oxidación es mucho menor que aquella donde se produce la reacción de reducción. Esto significa que existe una densidad de corriente anódica muy elevada lo que provocará un rápido crecimiento de la grieta. Con el propósito de evitar este tipo de corrosión, pueden ser utilizadas técnicas electroquímicas como lo es la protección catódica por corriente impresa. También pueden ser utilizados inhibidores o recubrimientos para evitar el contacto de las piezas metálicas con el medio^{1, 3, 4}; o en su defecto, proceder a la sustitución de la sección dañada. Desafortunadamente, los costos que se generan para la inspección de la corrosión y la reparación o sustitución de las secciones son muy elevados. En Estados Unidos, se estima que los costos anuales exceden un billón de dólares en la aviación militar⁵.

Para evitar la corrosión bajo tensión se necesita eliminar el contacto del medio con el tubo, eliminar la rugosidades (ya que estas son puntos de nucleación para fisuras), y/o eliminar el campo de esfuerzos residuales de tensión o mejor aún introducir un campo de esfuerzos residuales compresivos. Este campo puede ser introducido mediante un proceso de deformación plástica superficial (PDPS), como lo son los procesos de bruñido. El bruñido es un proceso de trabajo mecánico en frío de acabado superficial en donde la pieza a ser tratada sufre una ligera deformación plástica en la superficie por la acción de una herramienta (rodillo) la cual actúa como el elemento deformante. Debido a la deformación plástica superficial y al campo de esfuerzos residuales compresivos que se producen, el material se endurece superficialmente lo que aumenta su resistencia a la fluencia, a la fatiga y a la corrosión bajo tensión entre otros. Los parámetros de entrada más comunes en los PDPS son la fuerza que se aplica para deformar al material base, el avance y el número de pasadas (o simplemente pasadas). Debido a la naturaleza del proceso de bruñido por rodillo, no se puede procesar piezas de dimensiones grandes (como lo sería un tubo); si no por el contrario, las piezas deben tener una geometría cilíndrica y un tamaño adecuado tal que se puedan montar en un torno. Entonces, como una primera aproximación, y con el objetivo de estudiar el comportamiento mecánico del acero API X52 sometido a un PDPS, se decidió utilizar el proceso de bruñido por rodillo para introducir un campo de esfuerzos residuales en este tipo de acero. Con esto, los objetivos específicos de ésta tesis son determinar el efecto de la fuerza, avance y número de pasos sobre: 1) el % de variación del diámetro, 2) el máximo esfuerzo residual compresivo y 3) la profundidad de éste, de un disco de acero API X52 sometido a un proceso de bruñido por rodillo.

En el proceso de bruñido por rodillo cada probeta debe ser montada en un torno el cual va a estar trabajando a una velocidad constante de giro (velocidad de bruñido). Mediante el rodillo se aplica una fuerza constante a la superficie del disco. El tiempo de duración del proceso depende del número de pasos (o pasadas) y del avance del rodillo. El avance es la velocidad con la cual se va a mover el rodillo en dirección del espesor del disco y el número de pasos indica cuantas veces va a pasar el rodillo a través del espesor.

Para alcanzar los objetivos se requiere realizar un análisis de los parámetros de entrada de bruñido. En general, en un análisis de procesos se pueden usar varios procedimientos para resolver un problema; entre ellos están: 1) mediciones en planta, 2) diseño de experimentos y 3) modelación matemática combinada con experimentos. La elección del procedimiento para resolver el problema depende de varios factores y recursos; entre estos se encuentran los económicos, humanos y de disponibilidad de materiales, equipos y tecnología. En éste caso en particular, las mediciones en planta que se puedan realizar (en la mayoría de los casos) no van más allá de la obtención de las dimensiones de las probetas, y de medición de durezas, por lo que no responderían al efecto que se tiene de los parámetros de entrada sobre el campo de esfuerzos residuales. Un diseño experimental nos permitiría determinar el efecto que estamos investigando. Para llevar a cabo los experimentos se requiere de una cantidad considerable de acero para fabricar los discos; también es necesario construir o comprar la herramienta bruñidora y el elemento deformante. Existen dos caminos para determinar el campo de esfuerzos residuales, uno es mediante difracción de rayos X y el otro es por medios mecánicos; dependiendo del camino seleccionado, se requiere de equipo especializado para realizar las mediciones. Por otro lado, un modelo matemático de un proceso físico (ya sea mecánico, térmico, de flujo de fluidos, etc.), es una poderosa herramienta para realizar un análisis del proceso. Una vez que se cuenta con él y ha sido validado, el efecto de los parámetros de entrada (variables independientes) sobre los parámetros de salida (variables dependientes) puede ser estudiado. Si se decide formular el modelo matemático, inevitablemente se necesitan realizar experimentos para validarlo. En la actualidad se han realizado reconocidos estudios experimentales sobre los procesos de deformación plástica superficial⁵⁻²¹, por lo que se dispone de suficiente información experimental para validar el modelo. Se decidió la formulación de un modelo de elemento finito y se aplicó en el ambiente de trabajo del paquete comercial Abaqus para alcanzar los objetivos. La validación del modelo se llevo a cabo comparando el diámetro final de las piezas bruñidas medido experimentalmente por Díaz¹⁸ y Díaz y Robert¹⁹, con los valores obtenidos numéricamente bajo condiciones similares.

Cuando se resuelve un modelo matemático de un proceso mecánico, se necesita determinar las propiedades mecánicas del material; por esta razón tuvieron que ser programadas pruebas de

compresión para determinar éstas propiedades lo más cercano posible a la rapidez de deformación que se desarrolla durante el bruñido por rodillo.

Capítulo 2

Antecedentes

Se sabe que el acabado superficial tiene un alto impacto en la vida útil de un componente metálico. Un componente libre de defectos tales como rayas o asperezas generalmente tiene un periodo de vida útil mayor debido a que no concentra esfuerzos. Diversos procesos de deformación plástica superficial, (PDPS), se han utilizado para mejorar el estado de la superficie, entre algunos de ellos se encuentran: bruñido de baja plasticidad (low plasticity burnishing), bruñido por rodillo (roller burnishing), bruñido por bola (ball burnishing) y bruñido por lanzamiento de granalla (shot peening). Los PDPS⁶⁻⁸, son tratamientos mecánicos de superficie que mejoran el acabado superficial eliminando las asperezas e inducen un campo de esfuerzos residuales compresivos en componentes mecánicos. Durante un PDPS una herramienta (que actúa como el elemento deformante) aplica una fuerza sobre la superficie del material con el objetivo de deformar plásticamente una región cercana a la superficie del material.

Las mejoras que se pueden conseguir mediante la introducción de un campo de esfuerzos residuales compresivos son: aumento en la resistencia a la corrosión bajo tensión (ya que esta está relacionada con esfuerzos de tensión) y a la corrosión por fatiga, y aumento en la resistencia a la fatiga (la tenacidad de un metal o aleación puede mejorar). Esto lo han estudiado numerosos investigadores⁸⁻¹⁶ en donde han determinado que los parámetros de entrada generales, o variables independientes, para todos los PDPS son: rapidez de alimentación (o avance), número de pasos (o

número de pasadas) y fuerza aplicada. Otros parámetros que también son considerados pero en menor medida son: rugosidad inicial, velocidad de bruñido, material del elemento deformante, material de la pieza de trabajo y lubricación. Estos trabajos han derivado en correlaciones experimentales, las cuales pueden ser utilizadas para obtener un acabado superficial óptimo, como lo son las tolerancias dimensionales, rugosidad, dureza superficial, campo de esfuerzos residuales, espesor de la capa endurecida, etc. Hassan y Al-Bsharat⁹ estudiaron la rugosidad de la superficie, dureza, resistencia última a la tensión (UTS) y resistencia a la fatiga para aluminio comercial puro y bronce, antes y después de un proceso de bruñido por bola. La bola para bruñido de 10 mm de diámetro fue diseñada y fabricada de acero al cromo. Mediante el uso de este proceso incrementaron la dureza superficial, obtuvieron mejoras en el acabado superficial disminuyendo la rugosidad de la superficie, observaron un incremento en la UTS debido al endurecimiento por deformación e incrementaron la resistencia a la fatiga. En un trabajo posterior Hassan¹⁰, trabajando con los mismos materiales (aluminio comercial puro y bronce), realizó una comparación de los efectos de los parámetros de fuerza aplicada y número de pasos sobre la rugosidad y la dureza superficial, entre los procesos de bruñido por rodillo y por bola. El maquinado de las piezas y los procesos de bruñido fueron realizados sin lubricación pero limpiando continuamente la herramienta para evitar la introducción de partículas duras que pudieran dañar el acabado superficial. La fuerza que utilizaron en el bruñido por bola fue menor, debido a que ésta presenta una menor área de contacto con los materiales tratados. Bajo estas consideraciones y en el rango de las variables independientes estudiadas, determinaron que en ambos procesos cuando la fuerza y el número de pasadas aumentan la rugosidad disminuye, pero con el aumento subsiguiente de estos parámetros, la rugosidad tiende a aumentar, en otras palabras, la rugosidad presenta un mínimo. Sus resultados también muestran que la dureza aumenta con el aumento de la fuerza y el número de pasadas. Con el proceso de bruñido por bola, obtuvieron la menor rugosidad y el mayor incremento en la dureza. El-Axir¹¹, investigó el efecto de los parámetros del proceso de bruñido por rodillo (velocidad de bruñido, fuerza, avance y número de pasadas) en la rugosidad y microdureza superficial final, así como la relación que existe entre los parámetros más importantes del bruñido, rapidez y fuerza, y los esfuerzos residuales para un acero St 37 (0.2% C, 0.3% Si, 0.8% Mg). Los esfuerzos residuales los determinó utilizando una técnica de deflexión. Los experimentos fueron llevados a cabo bajo un diseño rotatorio de segundo orden con cuatro variables independientes. Observó que la fuerza es una de las variables más importantes en el proceso, debido a que ésta incrementa la cantidad de deformación plástica. Los aspectos importantes a considerar de su trabajo son: 1) el incremento en la velocidad de bruñido con una alta fuerza o un alto número de pasos deteriora la rugosidad de la superficie; 2) para producir el mayor incremento en dureza, se debe de utilizar una fuerza alta, pero

por el contrario, una fuerza menor, produce la mejor rugosidad final; 3) los mejores resultados en dureza y rugosidad los obtuvo con el valor de avance menor. Con respecto al campo de esfuerzos residuales, cuando se utiliza una fuerza pequeña (para las condiciones de trabajo de éste autor esto significa menos de 25 Kgf) se obtienen esfuerzos de tensión; para una fuerza mayor los esfuerzos se vuelven compresivos; si esto se combina con una velocidad de bruñido alta (con un máximo de 370 rev/min), se obtienen los esfuerzos compresivos más altos. Continuando con su investigación, El-Axir *et al*¹², diseñaron un trabajo experimental en un torno, el cual fue adecuado con tres herramientas bruñidoras de una, dos y tres bolas, diseñadas y construidas por ellos mismos. El objetivo de su trabajo fue estudiar el efecto de sus herramientas y los parámetros del torno (velocidad de bruñido, fuerza y avance), sobre la rugosidad de la superficie, redondez y reducción del diámetro. Seleccionaron un acero dulce (0.25%C, 0.25%Si, 0.55%Mn, 0.045%P y 0.045%S) como pieza de trabajo por su importancia industrial y su susceptibilidad al daño superficial durante la operación de bruñido. Las piezas que maquinaron fueron diseñadas de tal forma que fue posible utilizar las tres herramientas en tres diferentes zonas. Utilizaron un lubricante debido a que las condiciones de bruñido en seco producen una pobre calidad de la superficie; la lubricación que utilizaron fue aceite soluble en agua suministrado a través del sistema de enfriamiento del torno. No lo mencionan, pero en sus resultados se puede ver que la rugosidad disminuye desde velocidades de bruñido bajas hasta la velocidad de 1 m/s, en donde comienza a aumentar (es decir, que sus resultados presentan un mínimo en la rugosidad entre la velocidad de bruñido alta y baja); esto es muy notorio cuando se utiliza una herramienta con una o dos bolas, pero cuando se utilizan tres, este mínimo no se presenta. Concluyeron que la fuerza de bruñido y el avance son los parámetros más importantes en controlar los valores de las características de la superficie. Luca *et al.*¹³ utilizaron el proceso de bruñido por bola con el objetivo de examinar la influencia de los parámetros del proceso sobre la rugosidad final de componentes de acero tratados térmicamente con una dureza superior a 65 HRC. Usaron un diseño experimental factorial con cinco factores y dos niveles. Sus parámetros de entrada fueron: 1) la fuerza de bruñido, 2) avance, 3) velocidad de bruñido, 4) alimentación durante el maquinado de las piezas, y 5) la rugosidad previa al proceso de bruñido. Demostraron que los parámetros utilizados durante el maquinado de las piezas tienen la mayor influencia sobre la rugosidad, pero el avance y la fuerza de bruñido también tienen una influencia significativa; en cambio, la velocidad de bruñido y sus interacciones con los demás parámetros no presentan una influencia apreciable. Hamadache *et al.*¹⁴ desarrollaron una herramienta de bruñido por rodillo y bola para producir deformación plástica superficial y analizar la evolución de la rugosidad, dureza y resistencia a la abrasión para un acero estructural Rb40. Diseñaron pruebas de abrasión para estimar la resistencia de los materiales después del bruñido con bola y rodillo y

después de maquinado sin tratamiento de bruñido; la pérdida de peso se representó por la diferencia del peso antes y después de la prueba. Determinaron que el proceso de bruñido por rodillo provee los mejores resultados de rugosidad, especialmente cuando la calidad de la superficie inicial es cercana a los 3 micrones. Con respecto a la dureza, concretaron que el proceso por bola provee el mayor aumento en ésta propiedad mecánica. Basados en la rugosidad, recomiendan limitar el número de pasadas a dos, mientras que para obtener una alta dureza es aconsejable dar más de tres pasadas. Sólo mencionan que el efecto de la fuerza de bruñido en la rugosidad es gobernada por una interacción entre los dos procesos. Las pruebas de abrasión que realizaron mostraron una apreciable resistencia en comparación con aquellas que no fueron bruñidas. Para ambos procesos concluyeron que la dureza y rugosidad óptima son obtenidas por un régimen específico de parámetros.

El estudio de la técnica de bruñido por rodillo o bola, no han estado limitados a aceros; la factibilidad de utilizar el bruñido por rodillo para materiales no ferrosos, ha sido estudiada por Zhang y Lindemann¹⁵, quienes investigaron el efecto del bruñido por rodillo sobre el comportamiento en la fatiga de una aleación de magnesio AZ80 de alta resistencia, obtenida por un proceso de forja. Los experimentos fueron ejecutados usando un sistema hidráulico de un rodillo operando en un torno convencional. Utilizaron una velocidad de bruñido constante, y la fuerza utilizada para producir el flujo plástico fue variada desde 50 hasta 400 N. A las piezas se les removieron 200 micrones de espesor de material por medio de la técnica de electropulido para evitar la influencia del maquinado en los resultados de fatiga. Las pruebas de resistencia a la fatiga después del bruñido fueron realizadas a una amplitud de esfuerzos constante, los resultados de ésta muestran que la resistencia aumenta cerca de un 110% cuando se aplican cargas de bruñido grandes, pero presenta un máximo porque después de cierta carga la resistencia disminuye; los autores explican este comportamiento con el hecho de que la calidad superficial disminuye cuando se produce una sobre-deformación debida a una carga excesiva. En un estudio anterior¹⁶, estos investigadores demostraron que la resistencia a la fatiga de ésta misma aleación puede ser significativamente mejorada por el proceso de lanzamiento de granallas (shot peening). La comparación de estos dos procesos (lanzamiento de granallas y bruñido por rodillo), demostró que el proceso de bruñido por rodillo fue más efectivo en mejorar la resistencia a la fatiga; los autores lo atribuyen a la baja rugosidad, la gran cantidad de deformación plástica y a los altos esfuerzos compresivos inducidos. Una nueva rama de combinación de procesos de maquinado no mecánicos y de deformación superficial han empezado a ser ensayados. Así lo han hecho Ebeid y E-Taweel¹⁷, que investigaron la factibilidad de mejorar la calidad superficial por medio de la combinación de un proceso de maquinado electroquímico en combinación con uno de bruñido por rodillo. La razón de esto es que un componente metálico que ha sido tratado por el proceso electroquímico disminuye su

resistencia a la fatiga, la cual puede ser mejorada si se produce un endurecimiento por deformación de la superficie. Utilizaron la técnica de Taguchi de diseño de experimentos para determinar el efecto de los parámetros de trabajo (voltaje aplicado, presión del electrolito, velocidad, y fuerza de bruñido), sobre la rapidez de remoción de material, rugosidad de la superficie y la mejora de la relación de rugosidad de superficie (por ciento), en una aleación Al-Zn-Mg. Su pretensión era obtener una máxima rapidez de remoción de material, mínima rugosidad de superficie y una máxima relación de rugosidad. Determinaron que el proceso combinado de maquinado electroquímico y de bruñido por rodillo mejora la calidad superficial, además de que se producen capas deformadas plásticamente y por lo tanto zonas de alta dureza cerca de la superficie maquinada. Aunque un incremento en la dureza superficial está relacionado con un incremento en la resistencia a la fatiga, ellos no realizaron experimentos para comprobar esto.

Prevéy y Cammett⁵ utilizaron el proceso de bruñido de baja plasticidad (low plasticity burnishing) para introducir un campo de esfuerzos residuales compresivos y reducir la rugosidad de componentes metálicos; esto con el objetivo de aumentar la resistencia a la corrosión por picaduras y corrosión fatiga de una aleación de aluminio 7075-T6 sometida a un medio marino que contiene un 3.5% de NaCl. Ellos no tuvieron por objetivo como otros investigadores determinar el efecto de los parámetros de bruñido (rapidez de bruñido, alimentación, pasos, etc.) sobre el campo de esfuerzos residuales. Las magnitudes de los parámetros de bruñido las eligieron por la experiencia que tenían para producir un óptimo campo compresivo con la herramienta que poseen. Utilizaron la técnica de rayos X para determinar el grado de trabajo en frío y la magnitud de los esfuerzos residuales en la dirección longitudinal. Determinaron que cuando se aplica el proceso de bruñido de baja plasticidad a un componente previamente expuesto a ambos mecanismos de corrosión (picaduras y fatiga), se incrementa el límite de resistencia tres veces; y en el caso de la resistencia a fatiga, ésta aumenta 100 veces. Atribuyeron la mejora en la resistencia a la introducción de un campo de esfuerzos residuales compresivos, los cuales presentaron una magnitud y profundidad suficiente como para retardar la iniciación y propagación de grietas.

En comparación con otros métodos tradicionales de endurecimiento como son los tratamientos térmicos, Díaz^{18, 19}, estudió el efecto de los parámetros de bruñido por rodillo (fuerza, avance y número de pasadas) en la rugosidad, la dureza superficial, variación del diámetro y la profundidad de la capa deformada de una pieza de un disco de acero AISI 1045. Para tal motivo diseñó y construyó una herramienta bruñidora la cual fue montada en un torno convencional en paralelo. Utilizó un diseño experimental del tipo factorial completo, con tres variables independientes en dos niveles; el análisis estadístico de sus resultados mostró que la fuerza como variable individual, es el parámetro que mayor afecta a la dureza. Con respecto a la rugosidad final,

el avance es el que presenta el mayor efecto sobre ella; para lograr un buen acabado superficial se deben de utilizar valores altos de dureza y numero de pasos, y valores bajos de avance. Sus resultados los comparó con aquellos obtenidos mediante un temple y revenido y su posterior rectificación. Determinó que los costos de producir piezas endurecidas por tratamiento térmico, son casi 4.5 veces mayor que por bruñido por rodillo; además el bruñido es un proceso más limpio ya que no genera gases contaminantes ni desechos sólidos como lo hacen los tratamientos térmicos.

Desafortunadamente las correlaciones experimentales se encuentran limitadas a las condiciones experimentales utilizadas, por lo que no pueden ser extrapoladas; aunado a esto, el numero de experimentos y piezas necesarios para obtener estas correlaciones es muy elevado, y a veces imposibles de realizar. Black²⁰ *et al.* usaron un modelo de campo de línea de deslizamiento de un proceso de bruñido simplificado para obtener ecuaciones que estimen la fuerza de bruñido, la profundidad de la capa deformada y la deformación plástica en ésta capa; los efectos de la rapidez de deformación no los consideraron. Sus experimentos fueron llevados al cabo en condiciones de deformación plana. La herramienta de bruñido consistió en una cuña, la cual penetra la superficie horizontal de la pieza; la pieza fue movida en dirección paralela a su superficie con el objeto de producir flujo plástico. Sus resultados experimentales mostraron una buena concordancia con los teóricos. Con el objeto de estudiar el comportamiento mecánico y físico de los PDPS, otros investigadores han trabajado con modelos teóricos, como lo son Luo *et al.*²¹, quienes vieron la necesidad de realizar un estudio teórico con el objeto de extender las aplicaciones del bruñido. Herramientas esféricas han sido preferidas en el pasado, pero se ha encontrado que es difícil fabricarlas y alinearlas a la herramienta de bruñido²²; por esta razón construyeron y diseñaron una herramienta cilíndrica de diamante policristalino. En la modelación, la superficie de la pieza a ser bruñida fue caracterizada considerando asperezas esféricas con el mismo tamaño y mismo radio con una distribución Gaussiana, mientras la herramienta fue considerada totalmente plana. A causa de la distribución Gaussiana, el modelo tomó en consideración una sola aspereza; entonces con un modelo estadístico extendieron el estudio al proceso con muchas asperezas. Los parámetros de entrada fueron: velocidad de bruñido, avance y profundidad de bruñido; esta última es un nuevo parámetro estudiado; significa que en lugar de aplicar una fuerza a la pieza para producir flujo plástico, se establece una profundidad de penetración de la pieza y con esto, experimentalmente y con el modelo se determina la fuerza necesaria para producir la deformación plástica. Los resultados de la medición de la fuerza experimentalmente concordaron satisfactoriamente con los obtenidos con su modelo.

Especial interés ha tomado la determinación del campo de esfuerzos residuales, debido a que éste es el que produce una mejora en el comportamiento mecánico de las piezas metálicas. El método de elemento finito es una herramienta poderosa para simular PDPS's, pero su aplicación ha estado principalmente limitada a modelar los procesos de lanzamiento de granalla²³. Actualmente se cuenta con pocos trabajos de modelado con elementos finitos para otros PDPS's^{24, 26-28}. El desarrollo de estos modelos ha estado enfocado en dos grupos generales: 1) comportamiento de la rugosidad, y 2) determinación del campo de esfuerzos residuales. Con el objetivo de analizar la evolución de la rugosidad de superficie por bruñido, Bouzid Sai y Sai²⁴, diseñaron y usaron el código de elemento finito Zébulon para el análisis numérico, donde el comportamiento elástico-plástico de la pieza fue tomado en cuenta para determinar el desplazamiento del material. Los resultados del modelo los utilizaron para calcular el factor de rugosidad con el modelo que presentan Bouzid *et al.*²⁵. Su modelo permitió también el cálculo de los esfuerzos residuales referentes a la geometría microscópica de contacto. Concluyeron que los resultados de desplazamiento dados por el análisis de elemento finito fueron satisfactorios para predecir el factor de rugosidad como función del avance; además de que este factor es función del avance, también depende del desplazamiento normal y de la rugosidad inicial. Los resultados de esfuerzos residuales simulados que obtuvieron los compararon con resultados experimentales obtenidos de la literatura, donde observaron que los simulados eran mucho menores. Prasad *et al.*²⁶ simularon el proceso de bruñido por rodillo mediante el uso del paquete comercial ANSYS-10. El objetivo de su trabajo fue determinar el comportamiento de la rugosidad y los esfuerzos residuales como función de la fuerza aplicada durante el proceso, manteniendo constantes todos los demás parámetros de bruñido. Debido a la complejidad del problema, en el planteamiento de su modelo sólo consideraron una aspereza individual en 2D, y además supusieron que la rugosidad puede ser representada como asperezas en forma triangular con un ángulo de 90° (contrario a lo que presenta Luo *et al.*²¹). Utilizaron elementos finitos para deformación plana y propiedades mecánicas que no son función de la rapidez de deformación. Condujeron experimentos con acero dulce y aluminio comercialmente puro para validar su modelo con la comparación entre la rugosidad obtenida experimentalmente y numéricamente. Las diferencias entre los resultados experimentales y numéricos fueron menores del 10%. Para obtener un óptimo campo de esfuerzos residuales inducido por un proceso LPB (low plasticity burnishing) en un motor de avión, Zhuang y Wicks²⁷ propusieron un modelo de elemento finito tridimensional no lineal para simular y predecir los efectos de los parámetros del proceso. Ellos utilizaron el paquete comercial Abaqus/Standard para simular el proceso de LPB. Su modelo consistió de 40000 elementos tridimensionales con integración reducida. Supusieron que la herramienta de bruñido (bola) presentaba un

comportamiento rígido, es decir, presenta una muy pequeña deformación elástica; también despreciaron la fuerza de fricción que prevalece durante el contacto herramienta-pieza. Con datos experimentales que obtuvieron de 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. Con su estudio determinaron que la magnitud y la profundidad de los esfuerzos residuales compresivos se incrementan con la carga y el número de pasadas. Taylan y Ciro²⁸ advirtieron la necesidad de formular matemáticamente el proceso de bruñido por rodillo utilizando el método de elemento finito, para facilitar el entendimiento de la mecánica del proceso. Sus parámetros de estudio fueron la presión de bruñido y el avance. Aunque mencionan que estudiaron el proceso de bruñido por rodillo, en realidad su trabajo se trata del bruñido por bola debido al tipo de herramienta que utilizaron (según la clasificación oficial de los procesos de bruñido). Debido a la complejidad del problema, no es económicamente ni computacionalmente posible formular el problema tal y como se presenta físicamente; por esta razón primero plantearon un problema en 3D en un sistema simple con el objetivo de determinar la penetración máxima de la bola para una presión dada. Ésta penetración la utilizaron en su modelo 2D para determinar el efecto de los parámetros de entrada sobre la rugosidad final y el campo de esfuerzos residuales. Sus modelos en 2D y 3D fueron implementados en el paquete comercial DeformTM. De sus resultados se puede observar que el campo de esfuerzos residuales calculado en la dirección tangencial tiene una buena concordancia con aquellos determinados experimentalmente también por ellos; sin embargo en la dirección axial, los resultados computacionales muestran un campo de esfuerzos residuales de tensión en la superficie y hasta cierta profundidad de la pieza bruñida, lo cual no concuerda con el campo compresivo obtenido experimentalmente en esa misma dirección. La explicación que dan para este último resultado es el hecho de que ellos supusieron un estado de deformaciones plana, lo cual no concuerda con la realidad.

Capítulo 3

Modelación Matemática

Descripción del problema de bruñido por rodillo

El proceso de bruñido por rodillo consiste en colocar la pieza a bruñir (en éste trabajo un disco de acero X52, Figura 3.1) en un torno paralelo a una velocidad constante (conocida como la velocidad de bruñido), mientras tanto, en el porta herramientas se coloca la herramienta bruñidora la cual contiene al elemento deformante (rodillo, Figura 3.2). La herramienta se hace pasar a lo largo del espesor de la pieza a una velocidad constante; esto es conocido como el avance o alimentación. Mientras se produce el avance, la herramienta bruñidora aplica una carga contra la superficie del disco para provocar flujo plástico. Si la herramienta bruñidora sólo pasa una vez a través del espesor del disco, se dice que el proceso se realizó en un paso.

Justificación

Se desea analizar el efecto de los parámetros del bruñido por rodillo sobre el comportamiento del campo de esfuerzos residuales compresivos cerca de la superficie; esto con el fin de mejorar el comportamiento mecánico del acero X52. Con un diseño de experimentos del tipo factorial completo se puede determinar el efecto de los parámetros de entrada más importantes (fuerza, avance y número de pasos) sobre el campo de esfuerzos residuales; es decir, que se puede determinar funciones semi empíricas de la relación existente entre los parámetros. En muchos

casos, un procedimiento experimental mecánico o de difracción de Rayos X para determinar el campo de esfuerzos residuales requiere de mucha precisión y exactitud, además de equipos especializados, recursos humanos y tecnológicos. A esto se suma la obtención del número de piezas, lo que lo vuelve una tarea costosa y de un consumo de tiempo muy elevado. Por otra parte, la fase experimental ha sido muy estudiada y lo sigue siendo; sin embargo la parte de modelación aún se encuentra muy simplificada y en la parte inicial. Por estas razones, se decidió formular un modelo matemático basado en el método del elemento finito del proceso de bruñido por rodillo. Para validar el modelo se utilizaron datos reportados por Diaz^{18, 19}

Alcance

Se utilizó la teoría incremental para la modelación matemática. Se planteó un modelo 3D considerando que no existen fuentes de calor y que el material es homogéneo e isotrópico. Esto basado en que la microestructura del acero API X52 está compuesta en su mayoría por granos equiaxiales de ferrita.

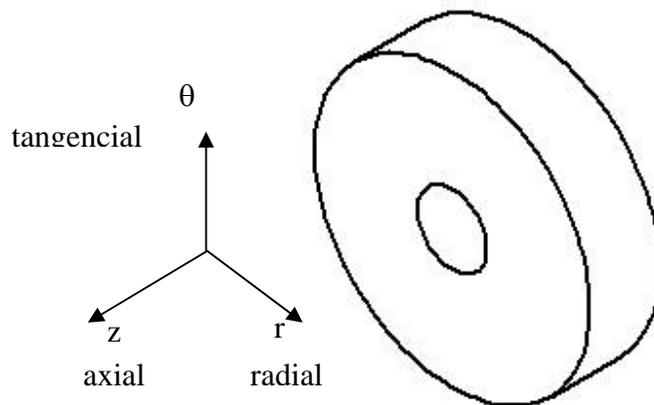


Figura 3.1: Disco de acero X52.

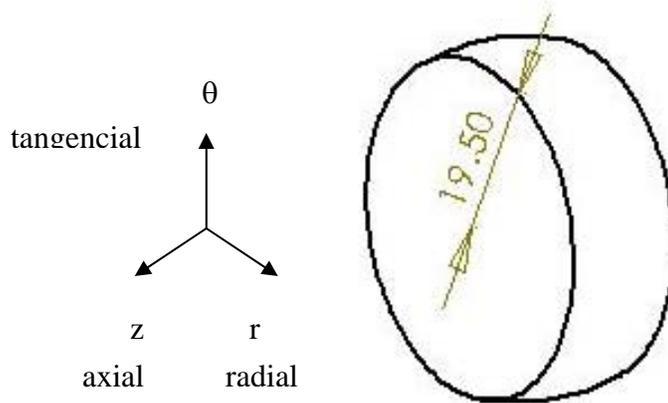


Figura 3.2: Elemento deformante (rodillo).

Suposiciones

- Problema en tres dimensiones.
- El material del que está compuesto el disco presenta un comportamiento isotrópico.
- Debido a la naturaleza del proceso de bruñido de pequeñas deformaciones plásticas, el material presenta un comportamiento elasto-plástico.
- Durante el proceso de deformación plástica no existen cambios de volumen en el disco.
- La respuesta mecánica en la zona elástica obedece la ley de Hooke.
- El componente deformante (rodillo), presenta un comportamiento mucho más rígido que el disco de acero, es decir, que no presenta ningún tipo de deformación, ni plástica ni elástica.
- No existen fuerzas de fricción durante el contacto entre el rodillo y la pieza.
- Proceso isotérmico

Formulación matemática²⁹⁻³⁴

Para establecer las ecuaciones diferenciales gobernantes se procede denotando con V el volumen ocupado por una parte del cuerpo y S a la superficie de ese volumen como se muestra en la Figura 3.3,. Se obtiene la siguiente condición de equilibrio:

$$\int_S \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} dS + \int_V \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} dV = 0 \quad (3.1)$$

donde T_i es el vector de esfuerzos y F_i cualquier fuerza de cuerpo.

La formula de Cauchy para esfuerzo tiene la forma:

$$T_x = \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z \quad (3.2)$$

$$T_y = \tau_{yx} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z$$

$$T_z = \tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y + \sigma_z n_z$$

con lo que se tiene:

$$\int_S \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} dS + \int_V \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} dV = 0 \quad (3.3)$$

aplicando el teorema de la divergencia se puede transformar a la integral de superficie en una de volumen, con lo que obtenemos:

$$\int_V \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} dV + \int_V \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} dV = 0 \quad (3.4)$$

Resolviendo la ecuación (3.4) en un volumen arbitrario se llega a:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = 0 \quad (3.5)$$

obteniendo la divergencia del tensor de esfuerzos se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales, o generalmente denominadas ecuaciones de equilibrio, que son equivalentes a las ecuaciones 3.5:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{xz}) + F_x = 0 \quad (3.6a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{yz}) + F_y = 0 \quad (3.6b)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z) + F_z = 0 \quad (3.6c)$$

El método de solución para estas ecuaciones se presenta en el Anexo A.

Capítulo 4

Procedimiento Experimental

4.1 Prueba de compresión

La solución numérica de cualquier proceso de deformación superficial (elástica, plástica o elástica-plástica) requiere del conocimiento de las propiedades mecánicas del material y de su comportamiento plástico. Debido a que el bruñido por rodillo es un proceso dinámico, en el cual se logran rapidezces de deformación tan grandes como 4 s^{-1} , estas propiedades, en especial la resistencia a la fluencia, necesitan ser determinadas experimentalmente como una función de la rapidez de deformación. Michel *et al*³⁵ determinaron mediante pruebas de tensión que la resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área del acero API X52 son función de la rapidez de deformación aplicada. A una rapidez de deformación de entre $4.7\text{E-}4$ y 1 s^{-1} las propiedades no presentan una gran sensibilidad, pero a rapidezces mayores (hasta $2\text{E}2 \text{ s}^{-1}$) el comportamiento mecánico del acero se vuelve sensible a la rapidez de deformación. Con estos resultados se puede adelantar que este acero es sensible a la rapidez de deformación por lo que se requieren experimentos para cuantificar ésta sensibilidad.

Puesto que el bruñido es un proceso en el cual una pieza se deforma plásticamente mediante la aplicación de una fuerza compresiva (esto significa que el flujo plástico se produce por compresión), se programaron pruebas de compresión a diferentes rapidezces de deformación con el objeto de obtener las propiedades mecánicas del acero API X52. Estas pruebas fueron diseñadas

para un desplazamiento de 2 mm del cabezal móvil de la máquina de ensayos mecánicos, es decir, las probetas no se probaron hasta la falla. Esto porque las deformaciones que se esperan en los discos de acero procesados por el método de bruñido son pequeñas. En otras palabras, los discos de acero no van a fallar por fractura o exceso de deformación plástica, esto lleva a que sólo se requiera determinar una pequeña porción del comportamiento plástico del diagrama esfuerzo – deformación. La Tabla 4.1 muestra la rapidez de deformación convencional ensayada, y la velocidad del cabezal necesaria para obtener esta rapidez. Debido a que se producirá sólo una pequeña cantidad de flujo plástico, se supone que la rapidez de deformación real es igual a la rapidez de deformación convencional.

El procedimiento no contempló la determinación del módulo de elasticidad a causa de que éste no es sensible a la estructura y es poco sensible a la composición química de los aceros.

Tabla 4.1: Velocidad del pistón necesaria para obtener la rapidez de deformación requerida.

<i>No de Probeta</i>	<i>Rapidez de deformación convencional, s^{-1}</i>	<i>Velocidad del cabezal, mm/s</i>
1	1E-3	0.0254
2	1E-2	0.254
3	1E-1	2.54
4	1	25.4
5	2	50.8

En el taller mecánico se maquinaron ocho probetas de compresión con una relación altura-diámetro de 2:1 como lo marca la norma ASTM³⁶. Estas probetas no tuvieron ningún acabado superficial después del maquinado. La Figura 4.1 muestra la orientación de las probetas tal como fueron obtenidas del tubo de acero API X52, y la Figura 3.2 las dimensiones.

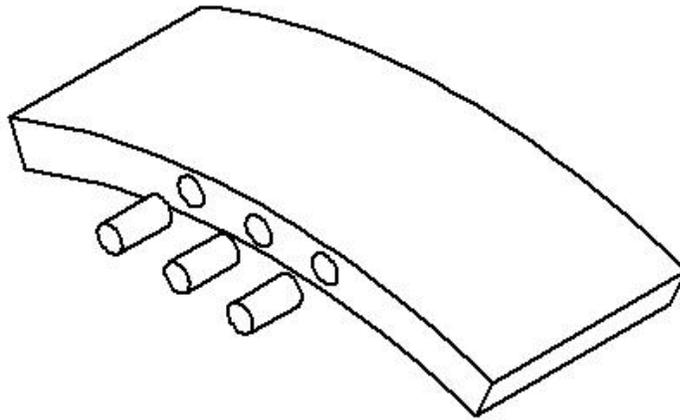


Figura 4.1: Orientación de las probetas de compresión.

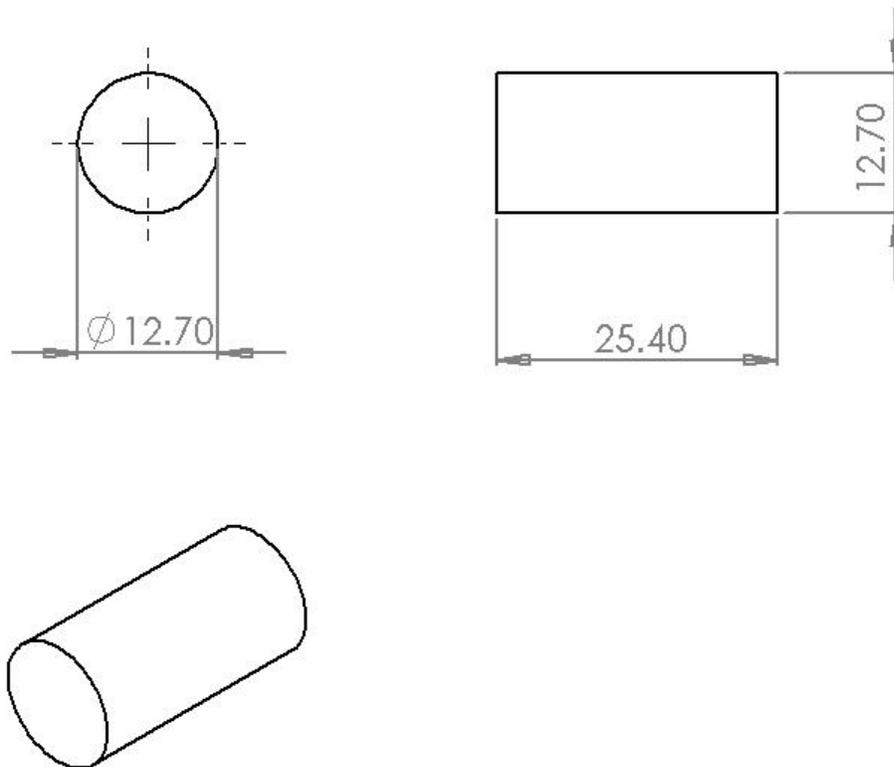


Figura 4.2: Dimensiones de la probeta para la prueba de compresión. Unidades en mm.

Para realizar las pruebas de compresión se utilizó una maquina universal de ensayos mecánicos marca MTS, modelo 810, con el sistema de adquisición de datos testlink versión 2.0. El cabezal inferior de ésta maquina se mantiene fijo, mientras el superior es el que se desplaza. Las probetas fueron colocadas entre dos bloques de orientación fabricados de acero O1 templado, los cuales tienen una dureza de 59 HRC (Figura 4.3), además de que están pulidos con el objeto de disminuir la fricción. El sistema fue ajustado para proporcionar la velocidad y desplazamiento del cabezal como lo indica la Tabla 4.1. Las probetas y los ensayos mecánicos se hicieron en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química.

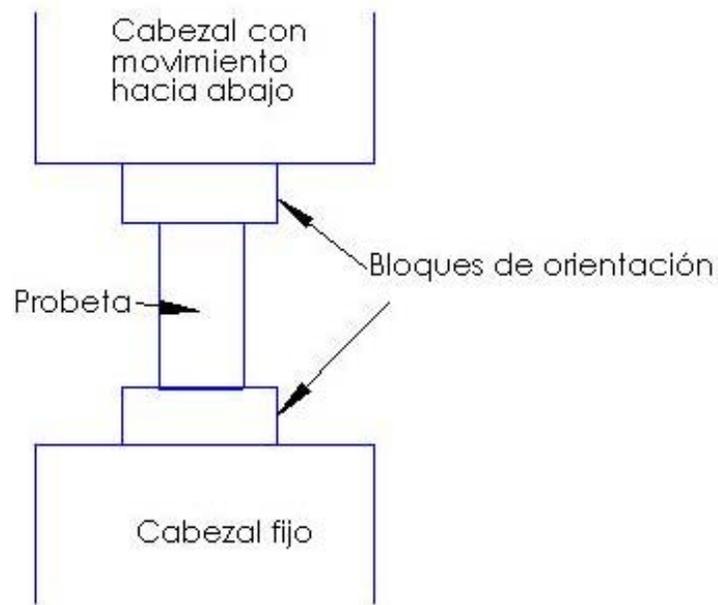


Figura 4.3: Disposición de la probeta de compresión montada en la maquina de ensayos mecánicos.

No a escala

Capítulo 5

Resultados y Análisis

5.1 Prueba de compresión

Después de realizar las pruebas de compresión, se procedió al tratamiento de los datos para la construcción de las curvas esfuerzo-deformación y la obtención de las propiedades mecánicas del acero API X52.

La Tabla 5.1 muestra los valores de la altura, diámetro y área antes y después del ensayo. En la Figura 5.1 se muestra el diagrama esfuerzo – deformación convencional obtenido de la conversión de los datos de fuerza-desplazamiento de la prueba de compresión. Sólo se presentan los resultados para las rapidezces de deformación de $1E-3$, $1E-2$ y $1E-1 \text{ s}^{-1}$, los resultados para las otras dos rapidezces (1 y 2 s^{-1}) no pudieron ser adquiridos a causa de que las necesidades de rapidez de adquisición de datos eran de cada 0.004 y 0.0004 s respectivamente. El adquisidor utilizado tiene una máxima rapidez de adquisición de 0.1 s , lo cual está alejado de las necesidades experimentales; por esta circunstancia la máxima rapidez de deformación que pudo ser adquirida fue la de $1E-1 \text{ s}^{-1}$, y aún en ésta se perdieron algunos datos ya que las exigencias de adquisición eran de cada 0.04 s . Por este mismo problema de adquisición, parecería que cada probeta ensayada presenta un diferente

porcentaje de elongación manifestado en la deformación total, lo que no concordaría con la realidad ya que cada probeta fue disminuida una misma cantidad (2 mm). Esto se debe a que la rapidez de adquisición de datos es a intervalos regulares, es decir, a un mismo espaciado de tiempo, y estos intervalos no fueron los mismos para todas las probetas, lo que provoca que cuando se alcanza el desplazamiento de 2 mm del cabezal, el sistema no adquiere los datos de carga-desplazamiento porque se encuentra en medio del intervalo del tiempo de adquisición.

Tabla 5.1: Dimensiones iniciales y finales de las probetas de compresión.

Probeta	Altura inicial, mm	Altura final, mm	Diámetro inicial, mm	Diámetro final, mm	Área inicial, mm ²	Área final, mm ²
1	25.30	24.00	12.70	13.02	126.68	133.14
2	25.30	24.00	12.60	12.98	124.69	132.32
3	25.40	24.00	12.60	13.00	124.69	132.73
4	25.30	24.00	12.70	13.00	126.68	132.73
5	25.30	24.00	12.70	13.12	126.68	135.19

El diagrama de esfuerzo-deformación real que se presenta en la Figura 5.2 se obtuvo a partir de los datos de esfuerzo y deformación convencional y las funciones³³:

$$\sigma_R = \frac{F}{A_0}(e + 1) \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (5.2)$$

donde F es la fuerza, e la deformación convencional y A_0 el área inicial transversal de la probeta. Se puede observar que la resistencia mecánica aumenta con la rapidez de deformación, lo que indica que el acero X52 es sensible a ésta rapidez. Las curvas esfuerzo-deformación convencional y real de este acero cuando se cambia la rapidez de deformación de $1\text{E-}2$ a $1\text{E-}1 \text{ s}^{-1}$, no varían demasiado en comparación con las rapidezces que se encuentran entre $1\text{E-}3$ y $1\text{E-}2 \text{ s}^{-1}$. Con estos resultados se podría esperar que el acero fuera insensible a rapidezces de deformación mayores a $1\text{E-}1 \text{ s}^{-1}$, pero según el trabajo realizado por Michel *et al*³⁵, a rapidezces mayores a 1 s^{-1} , el acero se vuelve muy

sensible. La Figura 5.3 muestra la comparación de la resistencia a la fluencia obtenida en estos experimentos y los presentados en la referencia 35. La Tabla 5.2 presenta la resistencia a la fluencia obtenida de las pruebas de compresión. La resistencia a la compresión no fue obtenida debido a que las pruebas de compresión no fueron realizadas hasta producir la falla de las probetas.

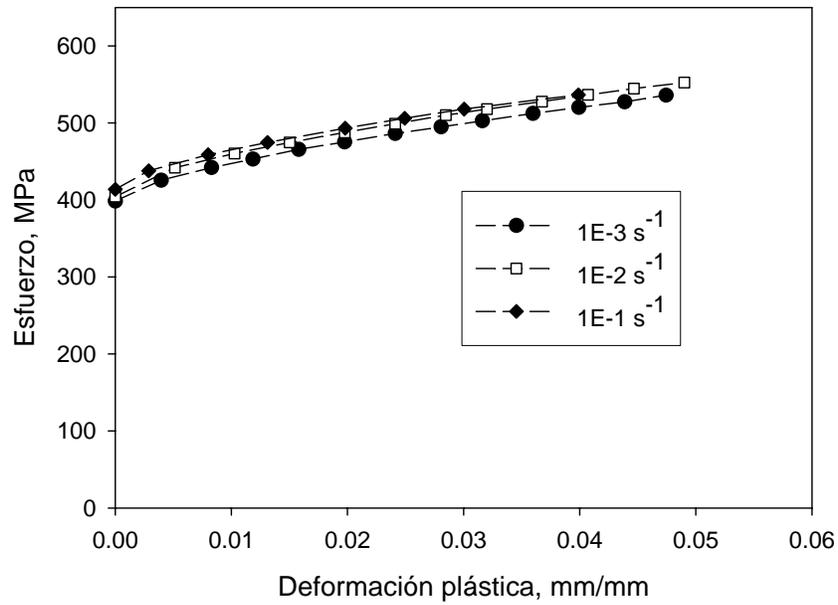


Figura 5.1: Diagrama esfuerzo-deformación convencional obtenido a partir de una prueba de compresión a diferentes rapidezces de deformación.

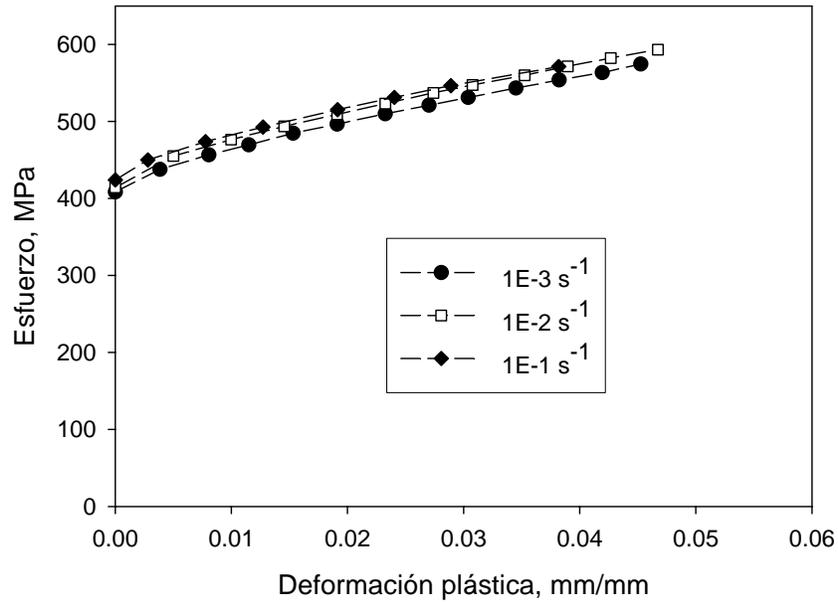


Figura 5.2: Diagrama esfuerzo-deformación real obtenido a partir de una prueba de compresión a diferentes rapidezces de deformación.

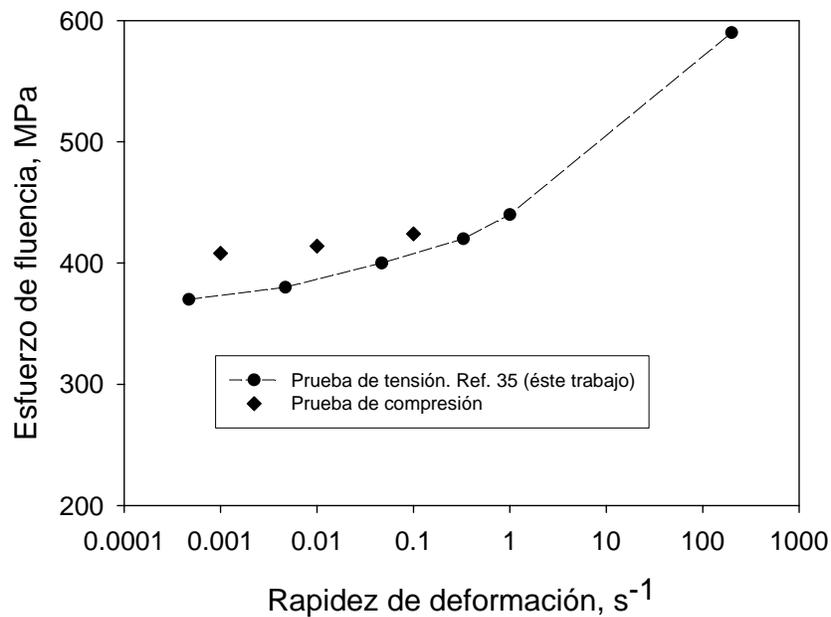


Figura 5.3: Comparación del esfuerzo de fluencia obtenido mediante pruebas de compresión (rombos) y por pruebas de tensión (puntos con líneas discontinuas)³⁵, como función de la rapidez de deformación.

Durante el ensayo se proporcionó una velocidad del cabezal móvil constante, que es condición suficiente para mantener una rapidez de deformación convencional constante, pero la velocidad de deformación real aumenta durante el proceso debido a que la probeta disminuye su altura. Favorablemente, las deformaciones ensayadas y más aun las requeridas para el proceso de bruñido por rodillo son pequeñas, por lo que las dimensiones de las probetas no cambian demasiado. Esto lleva a que la rapidez de deformación convencional sea muy próxima a la rapidez de deformación real. Para determinar esta última, se utilizó la relación³³:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{L_0}{L} \dot{e} \quad (5.3)$$

Tabla 5.2: Resistencia a la fluencia del acero API X52 como función de la rapidez de deformación.

<i>Probeta</i>	<i>Rapidez de deformación convencional, s⁻¹</i>	<i>Rapidez de deformación real final, s⁻¹</i>	<i>Resistencia a la fluencia, MPa</i>
1	1E-3	1.08E-3	408
2	1E-2	1.08E-2	414
3	1E-1	1.08E-1	424

5.2 Simulación y validación de la prueba de compresión

Debido a que la simulación numérica del proceso de bruñido es poco eficiente (esto significa que se requiere de una gran cantidad de horas-cálculos computacionales), analizar el efecto que presentan parámetros mecánicos o parámetros del modelo sería una tarea costosa. Con el propósito de disminuir en cierta cantidad este número de cálculos, se decidió estudiar el efecto de estos parámetros en la prueba de compresión, donde el parámetro de salida es la altura final de la probeta. Los parámetros de entrada se dividen en dos grupos como lo muestra la Tabla 5.3

Tabla 5.3: Parámetros de entrada para el estudio del efecto de la altura final de la probeta de compresión.

Grupo 1	Grupo 2
Parámetros mecánicos	Parámetros del modelo
Resistencia a la fluencia	Tipo de elemento
	Número de elementos
	Valor del concepto “mass scaling”

El sistema de ecuaciones diferenciales de equilibrio que describen el estado de esfuerzos de la probeta en 3D están determinadas por las ecuaciones 3.6. Debido a la geometría de la probeta de compresión, el sistema de ecuaciones se expone en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{rz}) = 0 \quad (5.4a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sigma_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{z\theta}) = 0 \quad (5.4b)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{z\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_z) = 0 \quad (5.4c)$$

Las condiciones de frontera necesarias para resolver este problema se muestran en la Figura 5.4. Se creó un modelo elasto-plástico 3D y 1D en Abaqus para determinar la altura final de una probeta de compresión. La paquetería que se utilizó fue la de Abaqus/Explicit debido a que el proceso de bruñido también fue simulado con ésta y por las razones expuestas en el Capítulo 3.

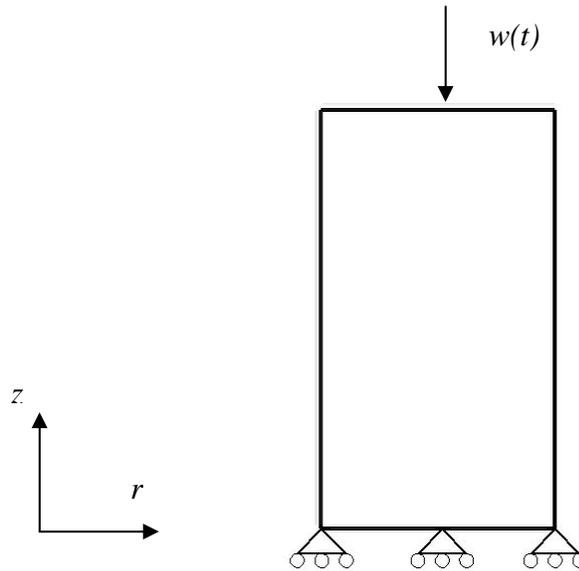


Figura 5.4: Condiciones de frontera de la probeta de compresión. w es el desplazamiento en la dirección z .

El sistema en 3D se compone de un sólido deformable extruido (probeta) y una superficie rígida analítica de revolución (bloque de orientación superior, el cual se mueve con el cabezal móvil), lo que indica que todo lo que no sea la probeta no presentará ningún tipo de deformación, ni elástica, ni plástica. El bloque de orientación inferior no fue necesario incluirlo ya que se trata de una frontera en la cual no existe flujo de material. A la probeta se le asignó una orientación de material en coordenadas cilíndricas y una sección sólida del material API X52 el cual posee las propiedades mecánicas obtenidas de la prueba de compresión. Se crearon dos procedimientos de cálculo consecutivos: el primero consistió en la aplicación del desplazamiento de 2 mm del bloque de orientación móvil (establecer el contacto y comprimir la probeta), y el segundo en la remoción de este bloque hasta que quedara totalmente fuera de contacto con la probeta para permitir su recuperación elástica. En el establecimiento del contacto entre la probeta y el bloque de remoción superior y durante toda la prueba, se supuso que no existían fuerzas de fricción entre ellos. Se utilizaron elementos C3D8R para mallar la probeta de una forma estructurada. Las letras y números C3D8R indican la familia de elementos, grados de libertad, número de nodos, formulación e integración. Para este caso se trata de elementos continuos con 8 nodos cada uno, para un estado de esfuerzos en tercera dimensión, integración reducida, formulación Lagrangiana y la función que se utiliza para interpolar entre nodo y nodo es lineal.

Generalmente es necesario generar una malla muy fina de la pieza a ser deformada (lo que significa generar elementos muy pequeños), debido a las necesidades en los resultados de la respuesta mecánica y a la misma naturaleza del problema a resolver. Esto lleva a que Abaqus Explicit se vea forzado a utilizar un incremento del tiempo muy pequeño para la integración del problema; es decir, un procedimiento explícito presenta un límite de estabilidad pequeño. Con el fin de optimizar el tiempo de cálculo, se puede escalar las masas de los elementos controlantes sin afectar el comportamiento dinámico del problema. Esto se logra incrementando artificialmente la densidad del material, ρ , por un factor f^2 , lo que reduce el tiempo total de cálculo t_t a t_t/f . Este concepto se llama “mass scaling”. En el caso de la simulación de un ensayo de compresión la malla generada no necesita ser muy fina por lo que no es necesario utilizar el concepto “mass scaling”; sin embargo, con el objetivo de determinar el efecto del concepto sobre la respuesta de salida, se utilizaron diferentes valores de “mass scaling” en la simulación.

La Figura 5.5 muestra a la probeta de compresión mallada estructuralmente con 320 elementos del tipo C3D8R y, adelantándonos al análisis del bruñido, la Figura 5.6 muestra el campo de esfuerzos residuales de la misma probeta después de ser comprimida.

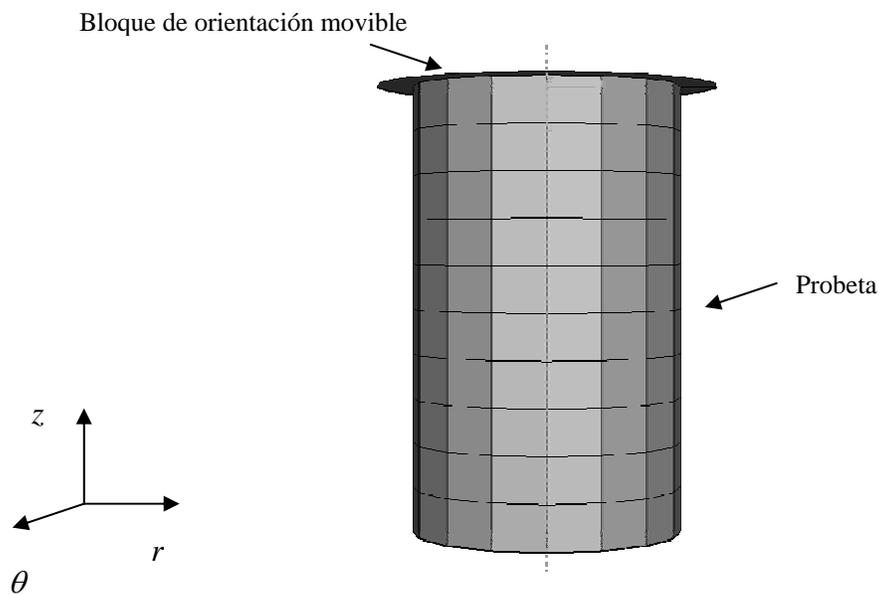


Figura 5.5: Condiciones de frontera y mallado de la probeta de compresión. w es el desplazamiento de la dirección z .

Bloque de orientación
movible

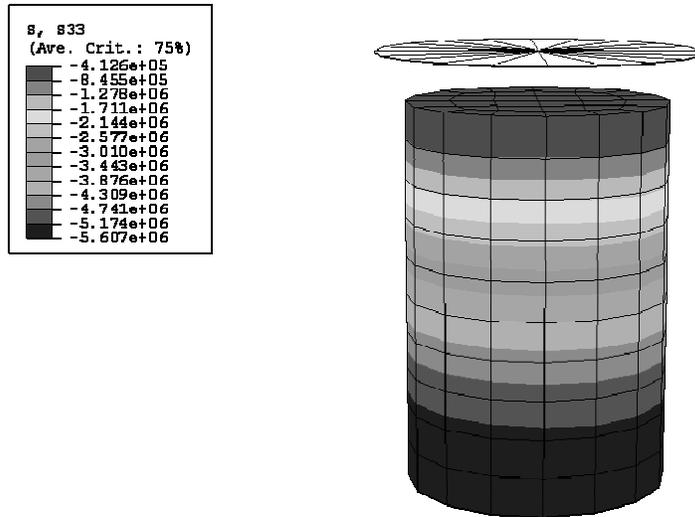


Figura 5.6: Esfuerzos residuales en la probeta de compresión después de haber sido ensayada.

Las alturas finales que se obtiene de la simulación de las tres pruebas de compresión se muestran en la Tabla 5.4. Se observa que conforme aumenta la rapidez de deformación el error aumenta, es decir la probeta pierde menos altura, debido a que se produce una menor cantidad de flujo plástico. Esta manifestación se debe a que a rapidezces de deformación altas, es difícil determinar correctamente el punto de fluencia. Para comprobar esto, la resistencia a la fluencia determinada experimentalmente fue aumentada y disminuida cierta magnitud; estos resultados son presentados en la Tabla 5.5. La resistencia a la fluencia determina el momento en el que comienza a producirse flujo plástico, por lo tanto es de vital importancia su adecuada estimación para ser utilizada en la modelación matemática. Si se subestima, con una carga menor se producirá un exceso de deformación plástica lo que llevara a una disminución de sus dimensiones más allá que las experimentales. Si se sobreestima, las dimensiones finales de la pieza sometida a la carga serán menores a las esperadas experimentalmente por una falta de deformación permanente.

Tabla 5.4: Altura final calculada normalizada de las tres pruebas de compresión.

No de Probeta	Rapidez de deformación	Tipo de elemento	Numero de elementos	Valor de la función "mass scaling"	Altura final calculada normalizada	% de error
1	1E-3	C3D8R	320	60000	1.0045	-0.4566
2	1E-2	C3D8R	320	60000	1.0051	-0.5091
3	1E-1	C3D8R	320	60000	1.0096	-0.9608

Nota 1: La altura normalizada se obtiene de dividir la altura final calculada entre la altura final experimental.

Nota 2: En los cálculos se utilizó las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente de las pruebas de compresión.

Nota 3: Estos resultados son llamados "escenario medio".

Tabla 5.5: Efecto de la resistencia a la fluencia en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)

Resistencia a la fluencia, MPa	Tipo de elemento	Numero de elementos	Valor de la función "mass scaling"	Altura final calculada normalizada	% de error
375	C3D8R	320	60000	0.9756	2.4408
414 (Escenario medio)	C3D8R	320	60000	1.0051	-0.5091
476	C3D8R	320	60000	1.0125	-1.2500

La Tabla 5.6, muestra el efecto del número de elementos utilizados sobre la altura final normalizada. Como puede apreciarse, la solución tiende a converger cuando se utiliza un mayor número de elementos, aunque con esto, se obtiene un mayor porcentaje de error. La Tabla 5.7 presenta el efecto del concepto "mass scaling". La primera observación que se puede hacer, es que con un valor bajo de esta función, se produce un mayor error de la altura calculada con respecto a la experimental; no obstante, a valores más altos se advierte una convergencia con una disminución considerable del tiempo de cálculo. Con esta serie de cálculos se tiene que decidir si el porcentaje de error se encuentra dentro de los términos de tolerancia aceptables para la solución con un determinado valor del concepto "mass scaling".

Tabla 5.6: Efecto del número de elementos en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)

Tipo de elemento	Número de elementos	Valor de la función “mass scaling”	Altura final calculada normalizada	% de error	Tiempo de cálculo, s
C3D8R	96	60000	1.0049	-0.4867	15
C3D8R	320	60000	1.0051	-0.5092	30
C3D8R	640	60000	1.0052	-0.5154	70

Tabla 5.7: Efecto del valor de “mass scaling” en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = 1E-2)

Tipo de elemento	Numero de elementos	Valor de la función “mass scaling”	Altura final calculada normalizada	% de error	Tiempo de calculo, s
C3D8R	320	100	0.9987	0.1346	1405
C3D8R	320	10000	1.0051	-0.5075	175
C3D8R	320	60000	1.0051	-0.5092	30

Debido a la pequeña deformación que sufre la probeta de compresión y la simetría que presenta el sistema, el problema fue simplificado a un problema en una dimensión (1D). El efecto que presenta la dimensión de los elementos sobre el % de error y el tiempo de calculo se muestra en la Tabla 5.8 Las condiciones de frontera y el mallado de la probeta se muestra en la Figura 5.7. El nuevo tipo de elemento utilizado fue el T2D2, que significa que son elementos barra en segunda dimensión con dos nodos cada uno. La nomenclatura que utiliza Abaqus indica que este tipo de elemento es de 2 dimensiones aunque se trate de elementos línea y no de área. El % de error que se obtiene con elementos en 1D es semejante con el que se obtiene con elementos 3D; la diferencia está en que el tiempo de calculo se reduce notablemente

Tabla 5.8: Efecto del tipo de elemento en la altura final calculada normalizada de la probeta 2 (rapidez de deformación = $1E-2$)

Tipo de elemento	Numero de elementos	Valor de "mass scaling"	Altura final calculada normalizada	% de error	Tiempo de calculo, s
C3D8R	320	60000	1.0051	-0.5092	30
T2D2	10	60000	1.0052	-0.5196	8

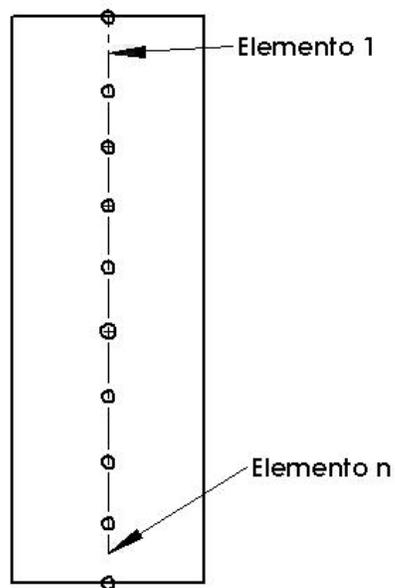


Figura 5.7: Mallado de la probeta de compresión en dos dimensiones.

5.3 Simulación y validación del bruñido por rodillo

Con el fin de validar el modelo matemático, los resultados obtenidos mediante la formulación en el paquete Abaqus fueron comparados con los resultados experimentales de diámetros finales obtenidos por Diaz¹⁸, quien realizó sus experimentos de bruñido utilizando discos de acero AISI 1045 de 63 mm de diámetro y 16 mm de espesor. El plan inicial para validar el modelo era comparar el campo de esfuerzos residuales determinado experimentalmente, con aquel obtenido numéricamente, pero no fue posible asistir al lugar donde se llevaría a cabo el proceso de bruñido (Santa Clara, Cuba). Debido a esta situación, no se contemplan experimentos para determinar las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, por lo que se obtuvieron de la literatura¹⁹. La Tabla 5.9 muestra las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 utilizadas en la simulación del proceso de bruñido.

Tabla 5.9: Propiedades mecánicas del acero AISI 1045.

<i>Resistencia a la tracción, MPa</i>	673
Resistencia a la fluencia, MPa	353
% de elongación	14
Modulo de elasticidad, GPa	210

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 elasto-plásticamente, el cual se encuentra girando sobre su eje, es de alrededor de 1 año utilizando una computadora de escritorio Dell Precision con procesador Pentium (R) 4 a 3.00 GHz y con 1.00 GB de Ram. Debido a esto, aquellos investigadores que han trabajado con la modelación de elementos finitos^{24, 26-28} han tenido que realizar ciertas simplificaciones. Todos ellos han coincidido en modelar sólo una parte de la pieza a deformar plásticamente, es decir, obtienen la mayor simetría posible. Con esto suponen que el comportamiento mecánico en ésta 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 axial²⁸; además se presenta el problema de que no se conoce el área real de contacto entre la pieza y el rodillo debido que ésta

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 formulo un modelo de elemento finito en tres dimensiones, en donde apoyándonos de la simetría sólo una parte del disco fue modelada (Figura 5.8).

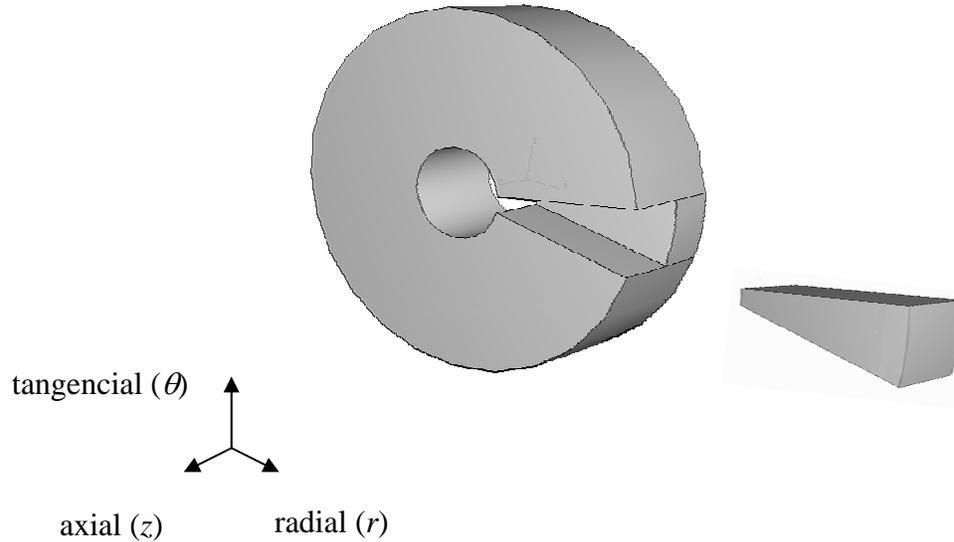


Figura 5.8: Sección del disco a ser modelada. No a escala.

Las ecuaciones diferenciales que describen el estado de esfuerzos de la sección del disco a ser modelada en 3D son:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{rz}) = 0 \quad (5.5a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sigma_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{z\theta}) = 0 \quad (5.5b)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{z\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_z) = 0 \quad (5.5c)$$

La Figura 5.9 muestra las condiciones de frontera de este sistema.

Igual que en el ensayo de compresión, el proceso de bruñido por rodillo fue formulado en Abaqus y resuelto con la librería Abaqus/Explicit. El disco fue creado en el modulo “parte” como

Para mallar el disco, éste fue dividido en dos partes. Debido a que el campo de esfuerzos residuales suele desarrollarse alrededor de los 2 mm^{11, 26-28}, 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 (elementos C3D8R, los cuales son los mismos que se utilizaron para el caso de la simulación del ensayo de compresión). Para el resto del disco se utilizó un control de mallado barrido con elementos triangulares continuos lineales en tres dimensiones (elementos C3D6R). Se utilizaron un total de 14,186 elementos. El rodillo no necesita ser mallado debido a que fue creado como una superficie rígida analítica. La Figura 5.10 muestra la malla utilizada en la simulación y la Figura 5.11 una ampliación de la zona más densamente mallada. Nótese la alta densidad de elementos cerca de la superficie del disco, esto debido a que esta zona es la más afectada por el rodillo.

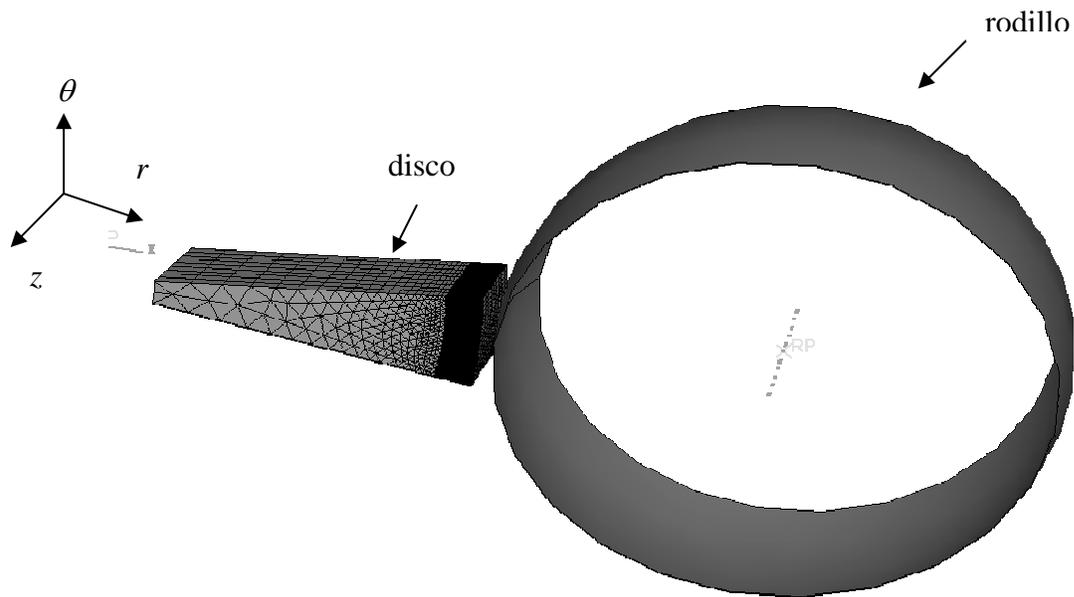


Figura 5.10: Mallado del sistema disco-rodillo. En este sistema sólo aparece la superficie exterior del rodillo debido a que fue creado como una superficie rígida analítica.

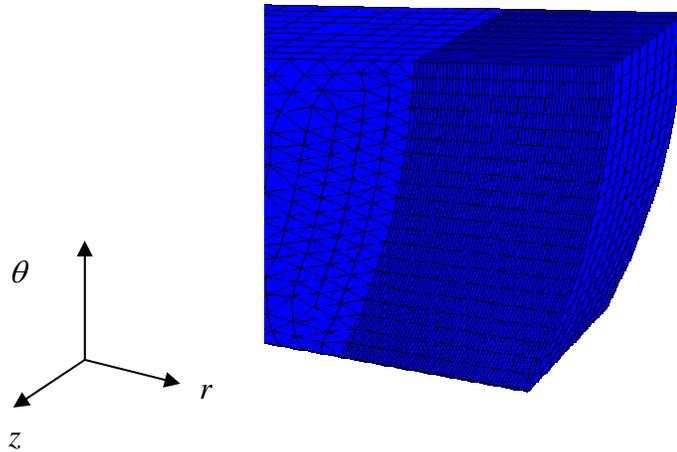


Figura 5.11: Ampliación de la zona fina del mallado del disco. El rodillo ha sido removido en esta imagen para facilitar la visualización de la malla.

Se crearon tres procedimientos de cálculo debido a que establecer el contacto entre el disco y el rodillo no es una tarea fácil. 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 (Figura 5.12). 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 una pasada. Si se requiere de dos pasadas, se aplica movimiento al rodillo en la dirección contraria a la de la pasada anterior hasta alcanzar la posición original del procedimiento 2; y así hasta alcanzar el número de pasadas requeridas. Por último, en el tercer procedimiento se retira el rodillo y se permite que el disco se recupere elásticamente. El tiempo de cálculo del procedimiento 2 disminuye considerablemente con la simplificación de modelar sólo una parte del disco (Figura 5.8) debido a que sólo es considerado el tiempo en el que el rodillo se encuentra en la misma posición tangencial.

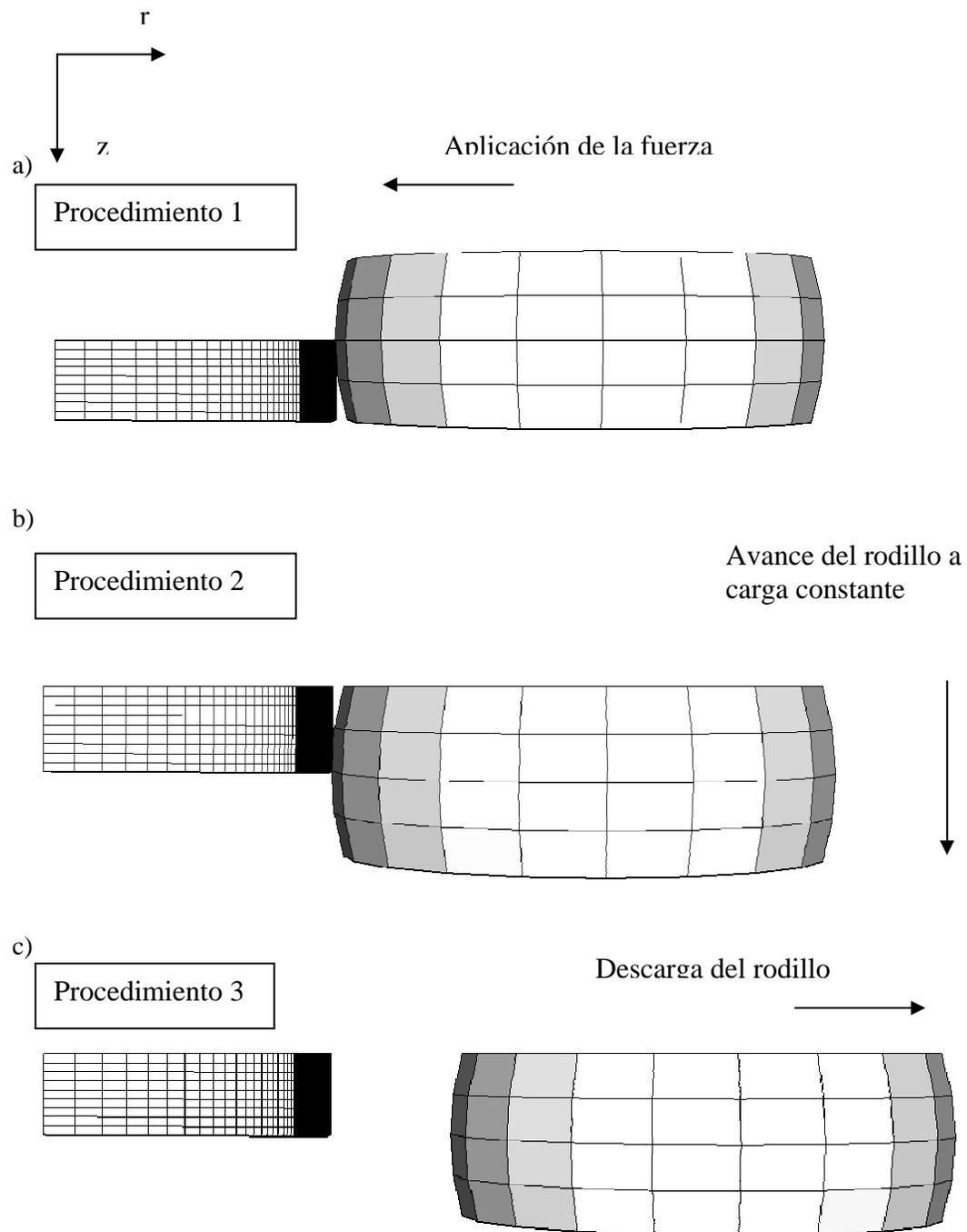


Figura 5.12: Secuencia de los procedimientos de cálculo para la simulación del proceso de bruñido por rodillo. a) Carga del rodillo sobre el disco, b) carga constante y movimiento del rodillo en la dirección axial, para producir el avance, y c) descarga del rodillo.

La Figura 5.13 presenta el campo de esfuerzos desarrollado en la dirección radial, σ_r , al termino del primer procedimiento de calculo. En la simulación de este proceso se utilizo una fuerza de 1000 N, un avance de 0,228 mm/rev y 3 pasos. Se puede observar simetría del proceso en el eje tangencial, lo cual indica que la suposición de simetría fue adecuada. Esta simetría se debe a que la formulación del material considera un comportamiento isotrópico.

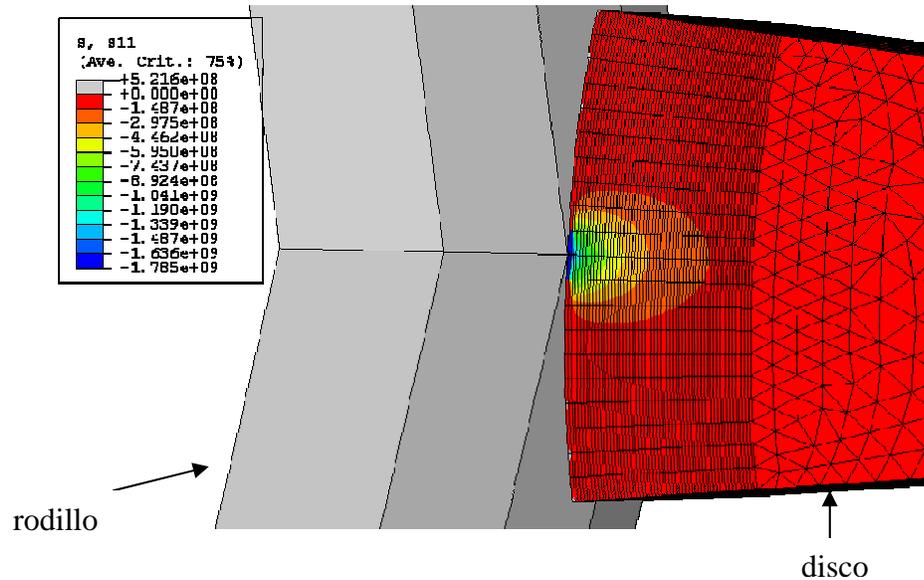


Figura 5.13: Campo de esfuerzos desarrollado en la dirección radial, σ_r , al final del primer procedimiento. Los parámetros de entrada fueron: fuerza=1000 N, avance=0.228 mm/rev y numero de pasadas=3.

Las figuras 5.14 a la 5.17, presentan la evolución del campo de deformación plástica en la dirección radial, ϵ_r^p . El rodillo ha sido eliminado en las imágenes sólo por cuestiones de visualización. Se puede observar que la deformación plástica aumenta conforme aumenta el número de pasadas. Las zonas grises en las figuras representan las regiones hacia donde el material fluyo. En la frontera libre se puede observar un mayor flujo plástico; esto se debe a que en ésta zona no existe material para oponerse a la deformación, es decir, existen efectos de frontera.

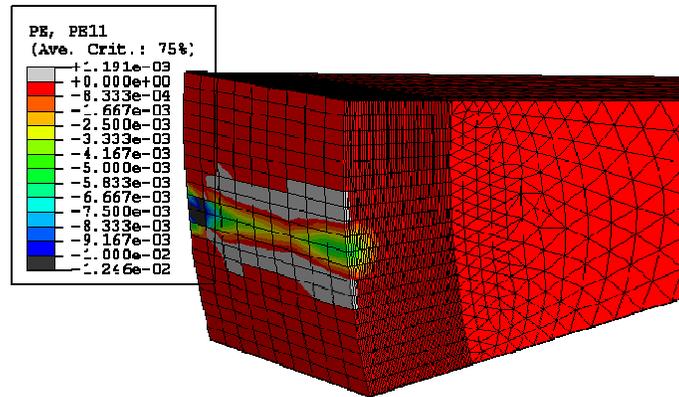


Figura 5.16: Campo de deformación plástica en la dirección radial, ε_r^p , después de dos pasadas del rodillo durante el segundo procedimiento.

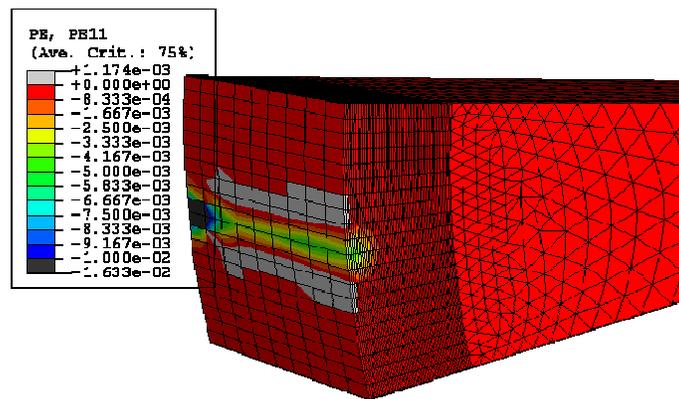


Figura 5.17: Campo de deformación plástica en la dirección radial, ε_r^p , después de tres pasadas del rodillo.

La Figura 5.18 presenta el campo de esfuerzos desarrollado en la dirección axial, σ_z , después de que han transcurrido una pasada del rodillo. El campo de esfuerzos se encuentra localizado en la zona donde se encuentra el rodillo en ese momento.

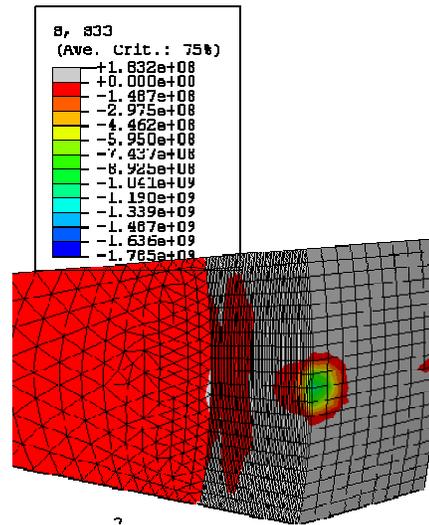


Figura 5.18: Campo de esfuerzos desarrollado en la dirección axial, σ_z , después de una pasada durante el segundo procedimiento. Los parámetros de entrada fueron: fuerza =1000 N, avance =0.228 mm/rev y pasadas=3.

El efecto que tiene la fuerza, el avance y las pasadas del proceso de bruñido por rodillo sobre el % de variación del diámetro de los discos se muestra en las Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21, respectivamente. La fuerza y las pasadas son los parámetros que tienen una mayor influencia sobre éste parámetro de salida.

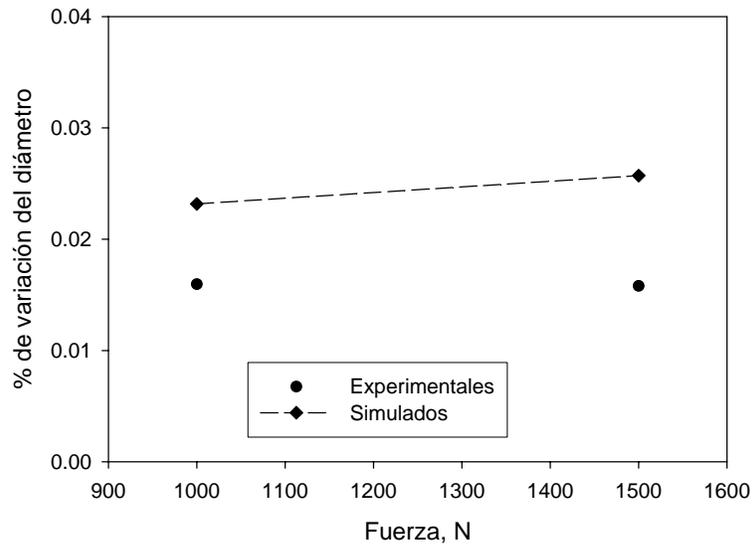


Figura 5.19: Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función de la fuerza aplicada durante el bruñido por rodillo. Los procesos se realizaron en 3 pasadas y con un avance de 0.228 mm/rev.

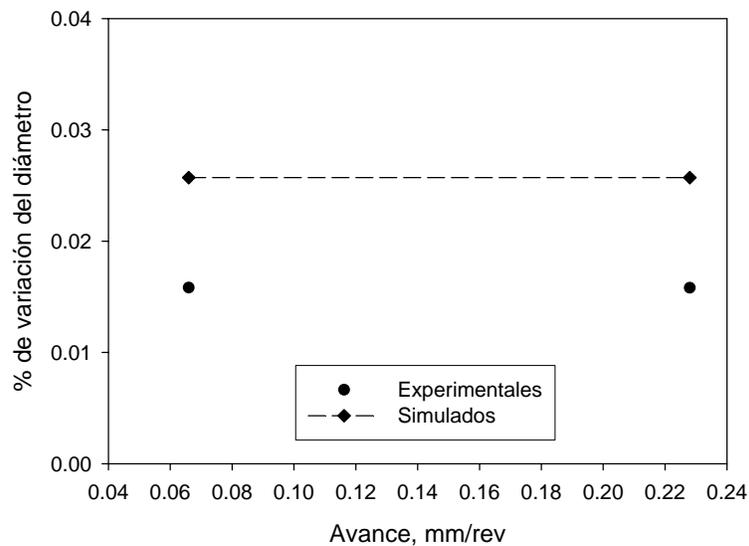


Figura 5.20: Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función del avance aplicado durante el bruñido por rodillo. Los procesos se realizaron en 3 pasadas y con una fuerza de 1500N.

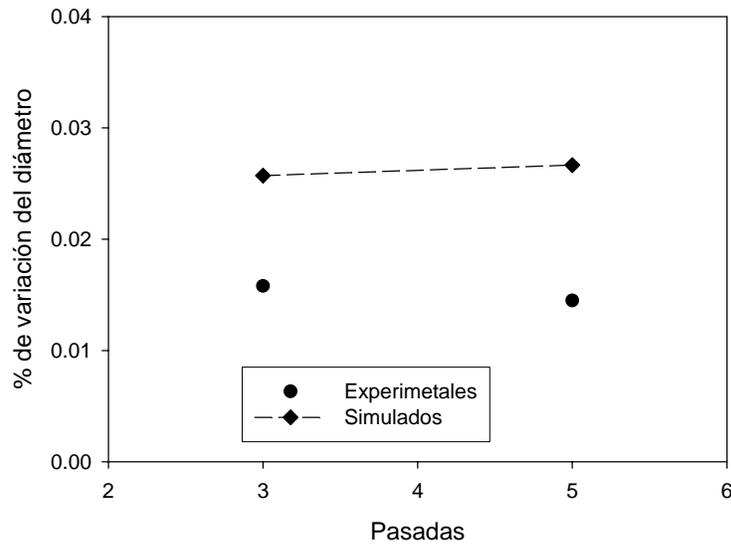


Figura 5.21: Porcentaje de variación del diámetro exterior de los discos de acero 1045 en función de los pasos aplicados durante el bruñido por rodillo. Los procesos se realizaron con un avance de 0.228 mm/rev y una fuerza de 1500N.

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. Físicamente el rodillo tiene un modulo de elasticidad por lo que durante el proceso real la fuerza que se aplica además de deformar al disco, también deforma al rodillo. Debido a que en la formulación del proceso se supuso un comportamiento totalmente rígido del rodillo, el rodillo no sufre ningún tipo de deformación, así que toda la fuerza aplicada es utilizada para deformar al disco de acero AISI 1045. Otra causa de ésta sobre estimación es que en la simulación no se considero el efecto de la rapidez de deformación sobre las propiedades mecánicas de este acero, es decir, las propiedades mecánicas que se utilizaron fueron obtenidas de un ensayo de tracción realizado a una rapidez de deformación lenta¹⁹; contrario a lo que ocurre durante el bruñido por rodillo donde se alcanzan rapidezces de deformación de hasta 4 s^{-1} . Para determinar este efecto se realizo 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 2) aumento de la resistencia a la fluencia y a la tracción de 25%. La Figura 5.22 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 menor % de variación del diámetro. El aumentar la resistencia a la tracción no presenta un efecto significativo.

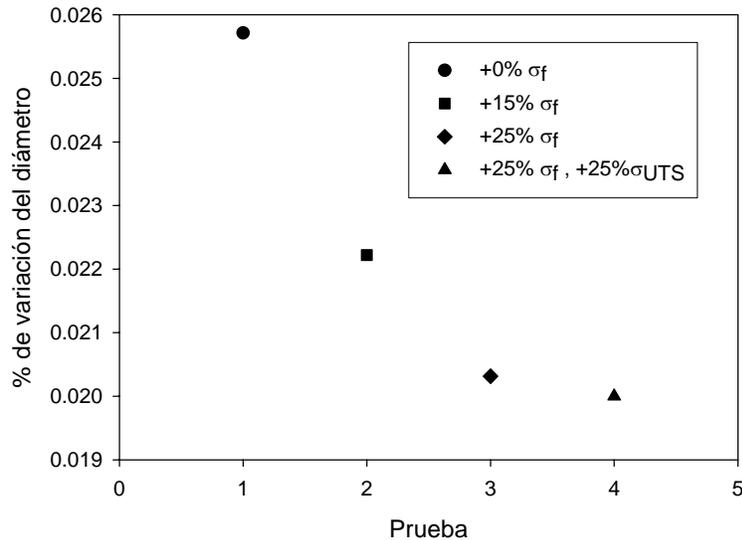


Figura 5.22: Análisis de sensibilidad de la resistencia a la fluencia y a la tracción en el % de variación del diámetro. Los procesos se realizaron con un avance de 0.228 mm/rev y una fuerza de 1500 N.

Las Figura 5.23 y 5.24 relacionan la microdureza subsuperficial (capa endurecida) obtenida experimentalmente con la deformación plástica calculada (capa deformada) en la dirección radial, con la aplicación de una fuerza de 2000 y 1000 N respectivamente. Para el proceso experimental como el de simulación, se utilizó un avance de 0.228 mm/rev y 3 pasadas del rodillo. Computacionalmente se observa que el campo de deformaciones plásticas aumenta cuando la fuerza de bruñido aumenta, además de que la capa deformada se incrementa de 1 mm para una fuerza de 1000 N a 1.5 mm para una fuerza de 2000 N. Debido a que la dureza subsuperficial está relacionada con la deformación plástica y por consiguiente con la fuerza aplicada, experimentalmente la dureza aumenta con el aumento de la fuerza como se muestra en las figuras; sin embargo, el espesor de la capa endurecida no se incrementa con la fuerza. La causa de que el espesor de la capa endurecida no se incremente con la fuerza, es probablemente debida a las dificultades técnicas que se tienen cuando se realizan mediciones de microdureza. El autor del trabajo experimental, Diaz¹⁹, menciona la necesidad de perfeccionar la forma de realizar las mediciones.

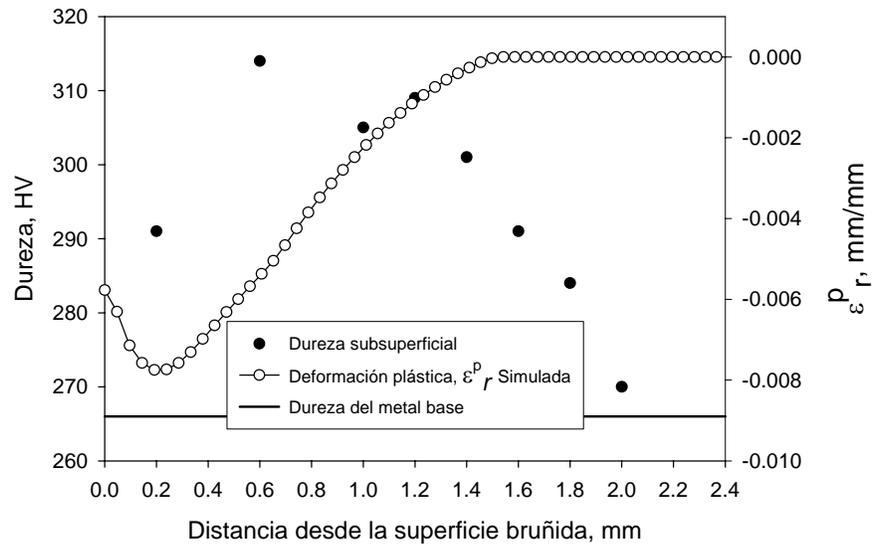


Figura 5.23: Relación de la superficie deformada en la dirección r con la capa endurecida. Simulación realizada con una fuerza de 2000 N, un avance de 0.228 mm/rev y 3 pasadas.

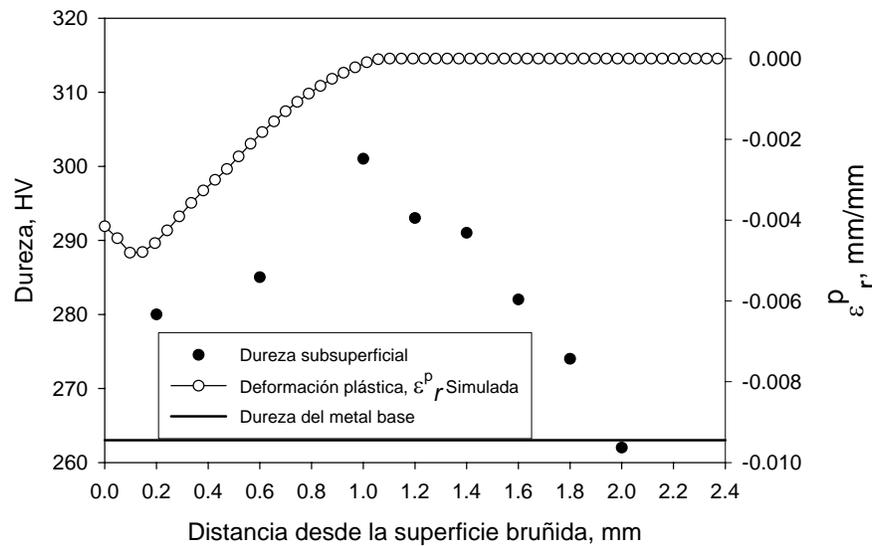


Figura 5.24: Relación de la superficie deformada en la dirección r con la capa endurecida. Simulación realizada con una fuerza de 1000 N, un avance de 0.228 mm/rev y 3 pasadas.

5.4 Efecto de los parámetros de bruñido sobre el porcentaje de variación del diámetro.

Se llevó a cabo un análisis del efecto de los parámetros de entrada sobre el comportamiento mecánico de un disco de acero API X52 bajo un proceso de bruñido por rodillo. Se utilizaron las mismas simplificaciones que se hicieron en la simulación del bruñido por rodillo para discos de acero AISI 1045. La Tabla 5.10 muestra las propiedades mecánicas del acero API X52 utilizadas en la simulación del proceso. La Tabla 5.11 muestra los parámetros de entrada y los niveles utilizados en la simulación.

Tabla 5.10: Propiedades mecánicas del acero API X52 utilizadas en la simulación del proceso de bruñido por rodillo.

<i>Rapidez de deformación convencional, s^{-1}</i>	<i>Resistencia a la fluencia, MPa</i>	<i>Modulo de elasticidad, GPa</i>
1E-3	408	210
1E-2	414	210
1E-1	424	210

Tabla 5.11: Parámetros de entrada utilizados en la simulación del bruñido por rodillo de discos de acero X52.

<i>Parámetro</i>	<i>Nivel bajo</i>	<i>Nivel intermedio</i>	<i>Nivel alto</i>
Fuerza, N	500	1000	1500
Avance, mm/rev	0.228	----	0.34
Pasadas	1	----	3

Los parámetros de salida que fueron obtenidos de la simulación son: 1) % de variación del diámetro, 2) máximo esfuerzo residual compresivo, 3) profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo y 4) campo de esfuerzos residuales.

La Figura 5.25 muestra el porcentaje de variación del diámetro con respecto a la fuerza y al avance aplicado. Cuando el proceso de deformación plástica es realizado en una sola pasada, la máxima variación de diámetro es obtenida con una combinación de fuerza y avance de 1500 N y 0.228 mm/rev respectivamente. Esto corresponde al hecho de que conforme mayor sea la fuerza aplicada a un material, mayor deformación será producida, lo que se traduce en una mayor pérdida

de dimensiones. También, mientras el rodillo avance más lentamente, este permanecerá un mayor tiempo en una misma posición lo que lleva a un mayor flujo de material; esto si no se alcanza un punto de equilibrio entre la fuerza que aplica el rodillo y la que se opone a la deformación, es decir, la fuerza que ejerce el disco sobre el rodillo. Con una fuerza de 500 N, se obtiene la misma pérdida de dimensiones del disco sin importar el avance que se aplique. Esto podría deberse a que se llega a un punto de equilibrio donde la fuerza de 500 N sólo puede deformar en cierta cantidad al disco y aunque se aplique durante un mayor tiempo la fuerza no es suficiente para producir un mayor flujo plástico; pero la Figura 5.25 b) muestra que con tres pasadas del rodillo se obtiene una mayor disminución del diámetro con la misma carga de 500 N, aunque sin importar nuevamente el avance. Esto indica que con una fuerza de 500 N se obtendrá la misma variación del diámetro sin importar el avance aplicado. Con tres pasadas y 1500 N de fuerza aplicada, se obtiene prácticamente la misma disminución del diámetro a los dos diferentes niveles de avance, lo que no ocurre con una pasada. En la primera pasada se logra el mayor porcentaje de reducción, aunque no se logra la deformación completa que corresponde a esta carga, las pasadas subsiguientes son para continuar deformando a una deformación plástica que corresponda a la carga aplicada, es decir que con el aumento del número de pasadas se va a llegar a un punto donde el porcentaje de variación ya no va a cambiar.

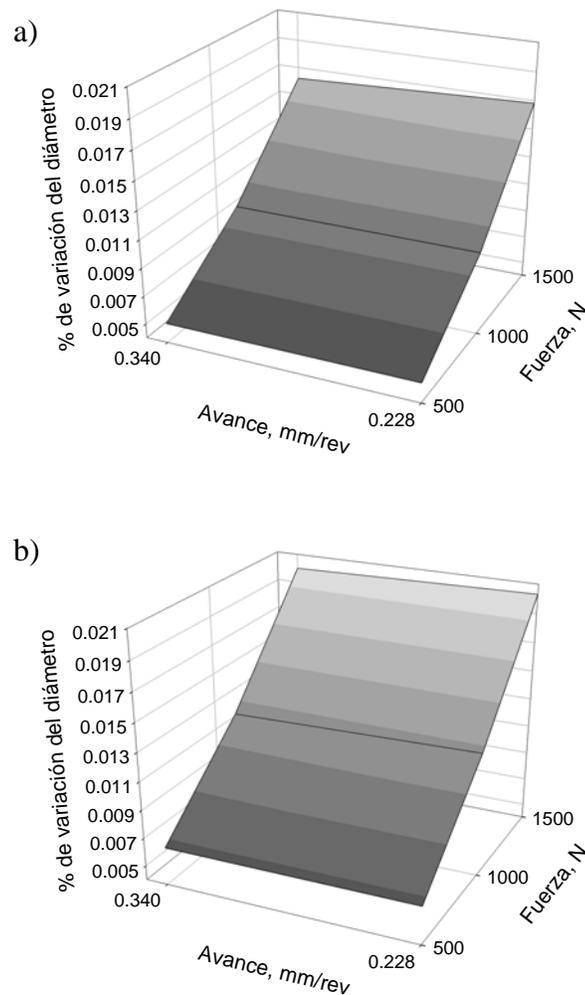


Figura 5.25: Efecto de la fuerza de bruñido y el avance sobre el % de variación del diámetro. a) en 1 pasada, b) en 3 pasadas.

La combinación de la fuerza y el número de pasadas presentan un mayor efecto sobre la variación del diámetro como se puede ver en la Figura 5.26. La mayor disminución del diámetro se obtiene cuando se aplica una fuerza de 1500 N en tres pasadas debido a que se genera un mayor esfuerzo durante un mayor tiempo resultando en una mayor deformación plástica; la menor disminución de diámetro se obtiene con 500 N y 1 pasada debido al caso contrario.

El efecto de mantener la fuerza constante y variar el número de pasadas y el avance, se muestra en la Figura 5.27. Cuando se aplica una fuerza de 500 N, ésta no es de una magnitud lo suficientemente grande como para producir suficiente deformación plástica, así que aunque se

apliquen tres pasadas el disco no se deformará más allá de lo que le corresponde a ese nivel de esfuerzo. Con el aumento de la fuerza a 1500 N la diferencia entre aplicar una pasada o aplicar tres se hace más notorio debido a que una mayor fuerza producirá un mayor esfuerzo.

La pérdida de dimensiones en cualquier caso analizado es de menos del 0.021% aunque igual que en el caso del acero AISI 1045 las deformaciones elásticas del rodillo no fueron tomadas en cuenta

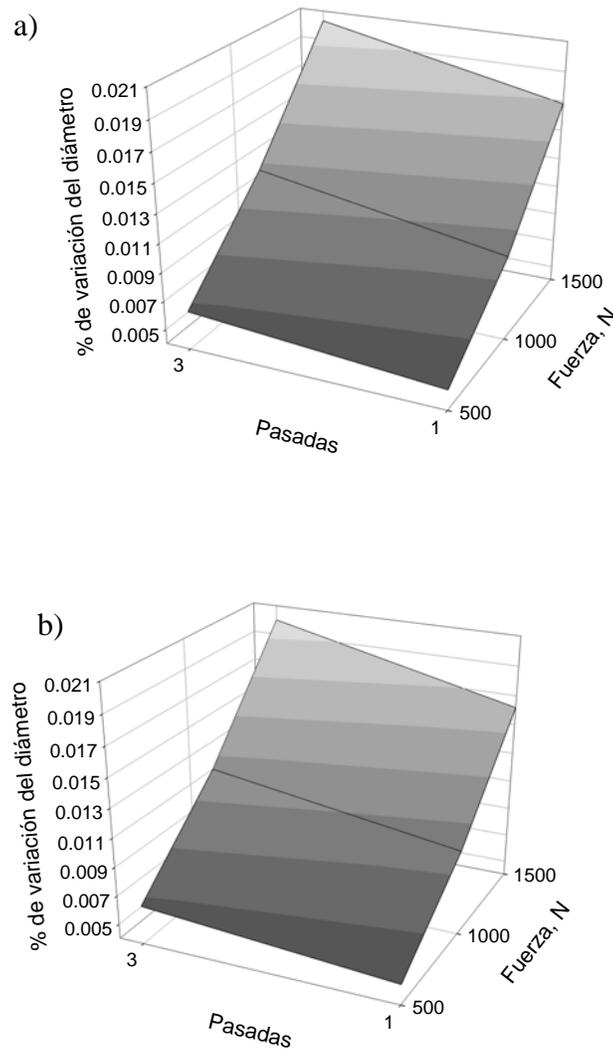


Figura 5.26: Efecto de la fuerza de bruñido y las pasadas sobre el % de variación del diámetro. a) con un avance de 0.228 mm/rev, y b) con un avance de 0.34 mm/rev.

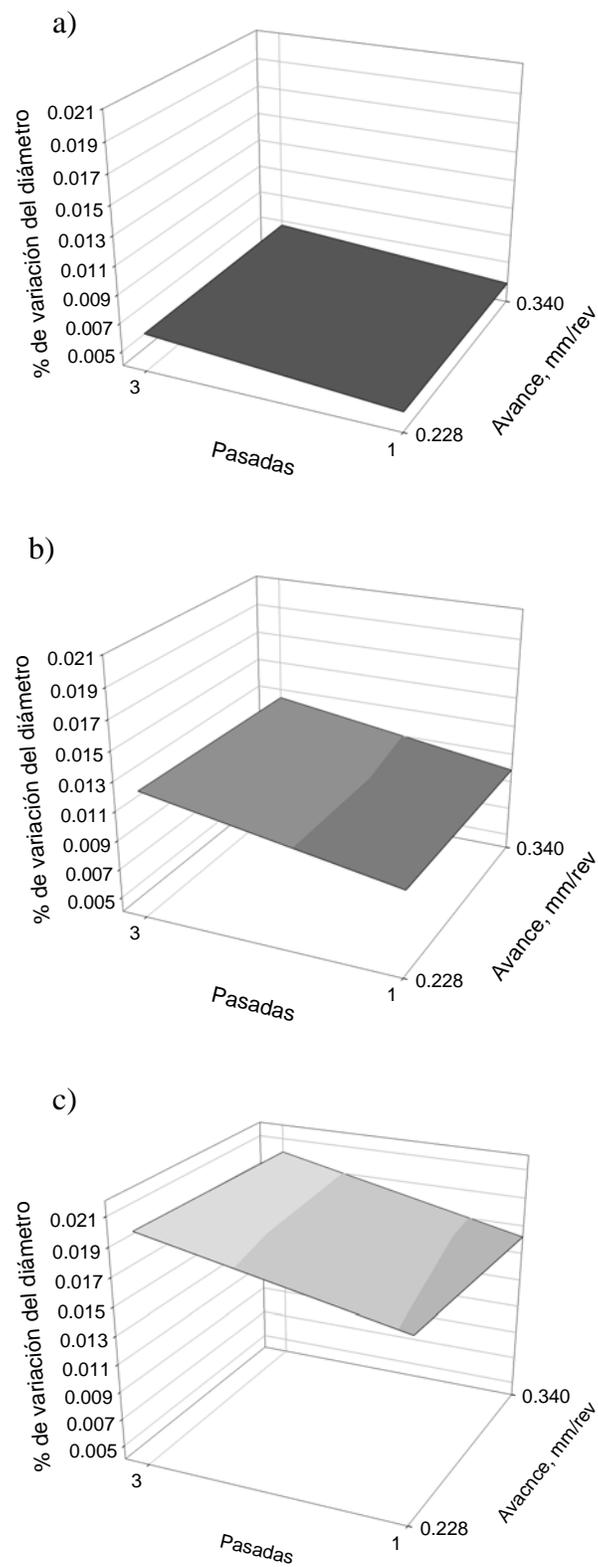


Figura 5.27: Efecto del avance y las pasadas sobre el % de variación del diámetro, aplicando una fuerza de: a) 500 N, b) 1000 N y c) 1500 N.

5.5 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 propiedades⁵⁻⁹, es importante determinar cual 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 este.

El máximo esfuerzo residual compresivo y su profundidad como función de la fuerza y el avance, son analizados en las Figuras 5.28 a la 5.31; en estas se observa el efecto de la fuerza de bruñido y el avance en una y tres pasadas del rodillo. Se observa que un aumento en la fuerza aplicada, aumenta el máximo esfuerzo compresivo (Figuras 5.28 y 5.29 para una y tres pasadas respectivamente), a diferencia del avance que presenta poco efecto sobre el. Sin embargo, con respecto a la profundidad, en una pasada y con una carga de 1500 N se presentan una influencia del avance (Figura 5.30); este efecto se debe al hecho de que el rodillo pasa más tiempo cargando al disco en una misma posición a un avance menor, provocando que el campo de esfuerzos pueda tener una mayor penetración. Con tres pasadas el avance pierde su influencia debido a que se alcanza un equilibrio mecánico (Figura 5.31). La mayor profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo se alcanza en la dirección radial con una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228mm/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 una pasada.

Las interacciones que existen entre la fuerza y el número de pasadas con respecto al máximo esfuerzo residual compresivo son mayores que en el caso de las interacciones fuerza-avance, como se puede observar en la Figura 5.32 y Figura 5.33. El número de pasadas no afecta significativamente el máximo esfuerzo cuando se aplica una fuerza de 500 N, pero sí afecta la profundidad como se puede observar en la Figura 5.34 y Figura 5.35. Lo que indican las Figuras 5.32 y Figura 5.34 es que se puede lograr un mismo máximo de esfuerzo residual compresivo (en la dirección radial y en la axial) a diferentes profundidades variando el número de pasadas y manteniendo una fuerza de 500 N, o se puede lograr una misma profundidad con diferentes valores del máximo esfuerzo variando el número de pasadas con una fuerza de 1500 N. En el caso de la dirección tangencial, el número de pasadas sí afecta el máximo esfuerzo, pero no así la profundidad de éste, la cual se mantiene al mismo nivel (esto con 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 pasadas 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 una sola pasada.

Si se desea la máxima profundidad del máximo de esfuerzo residual compresivo con cualquier avance, se debe de realizar el proceso en tres pasadas con la mayor fuerza.

Las Figuras 5.36, 5.37 y 5.38 presentan el máximo esfuerzo residual compresivo como función del avance y número de pasadas, y las Figuras 5.39, 5.40 y 5.41 sus correspondientes profundidades utilizando una fuerza de 500, 1000 y 1500 N respectivamente. La combinación entre el número de pasadas y el avance no presenta una diferencia significativa en el valor del máximo esfuerzo residual compresivo cuando se utiliza una fuerza de 500 N como se puede observar en la Figura 5.36. Pero en la Figura 5.37 y Figura 5.38 se puede observar que se vuelven significativos cuando la fuerza aumenta a 1000 y 1500 N respectivamente. Comparando la Figura 5.36 y Figura 5.39 se precisa que es posible obtener el mismo máximo esfuerzo residual compresivo con una y tres pasadas y a cualquier nivel de avance, pero a diferentes profundidades; esto la dirección radial y axial, siendo el de las tres pasadas el de mayor profundidad. Cuando la fuerza se aumenta a 1500 N, aumenta el valor del máximo esfuerzo así como la profundidad; el mayor incremento de profundidad se logra en la dirección radial (Figura 5.38 y Figura 5.41). La fuerza de 1000 N presenta un efecto intermedio (Figura 5.37 y Figura 5.40).

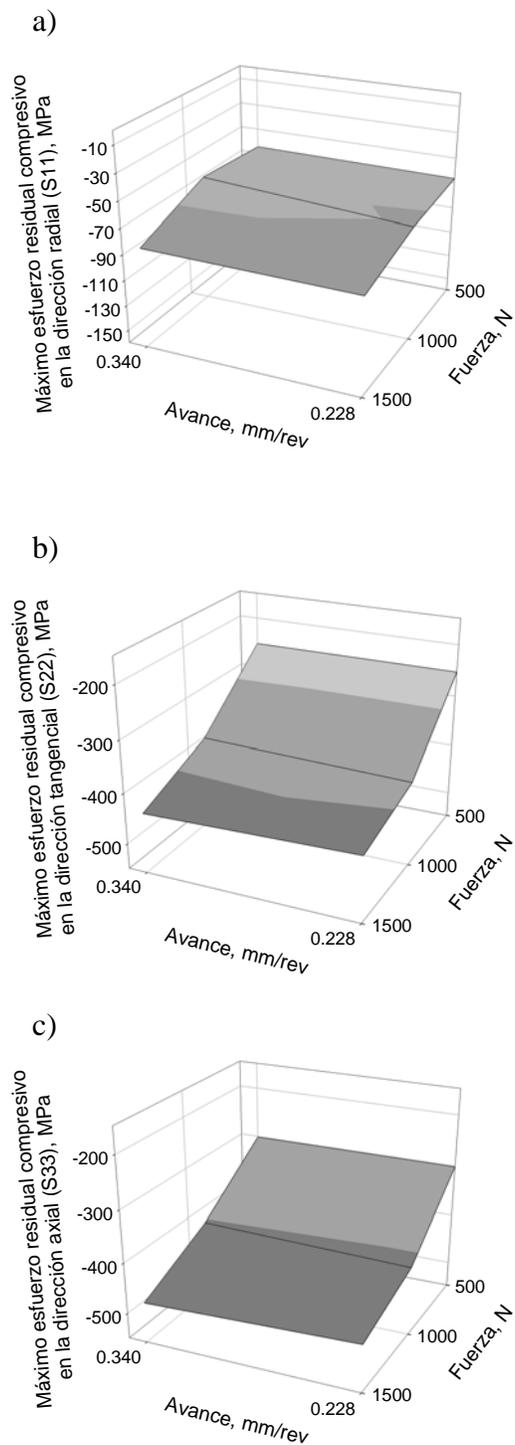


Figura 5.28: Efecto de la fuerza y el avance sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso en 1 pasada

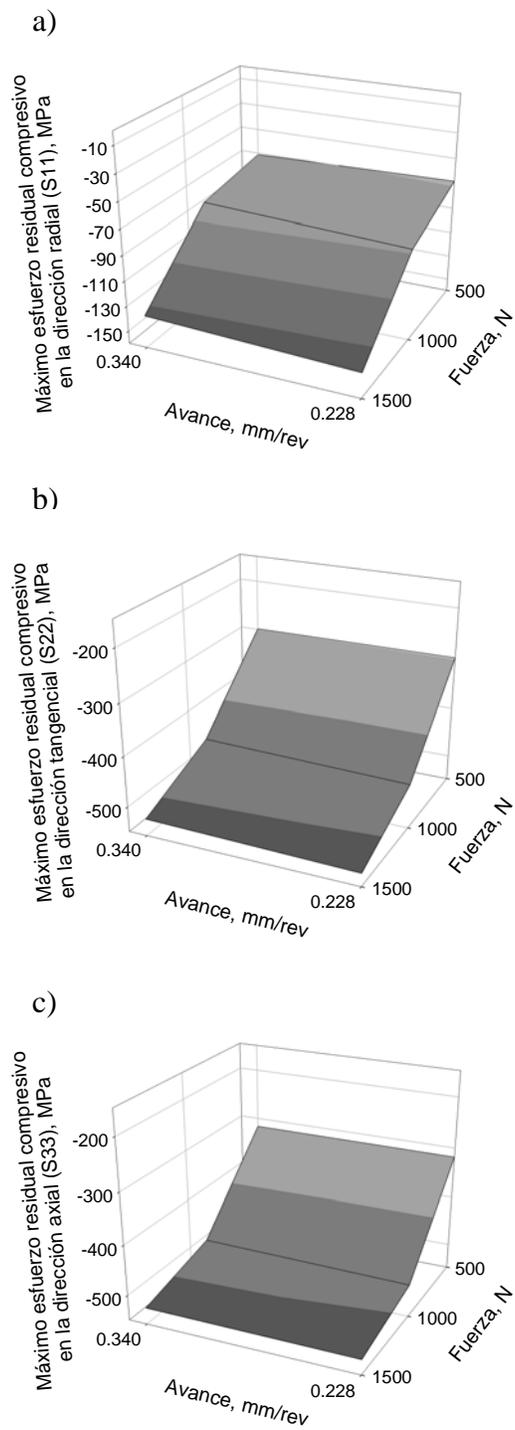


Figura 5.29: Efecto de la fuerza y el avance sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso en 3 pasadas.

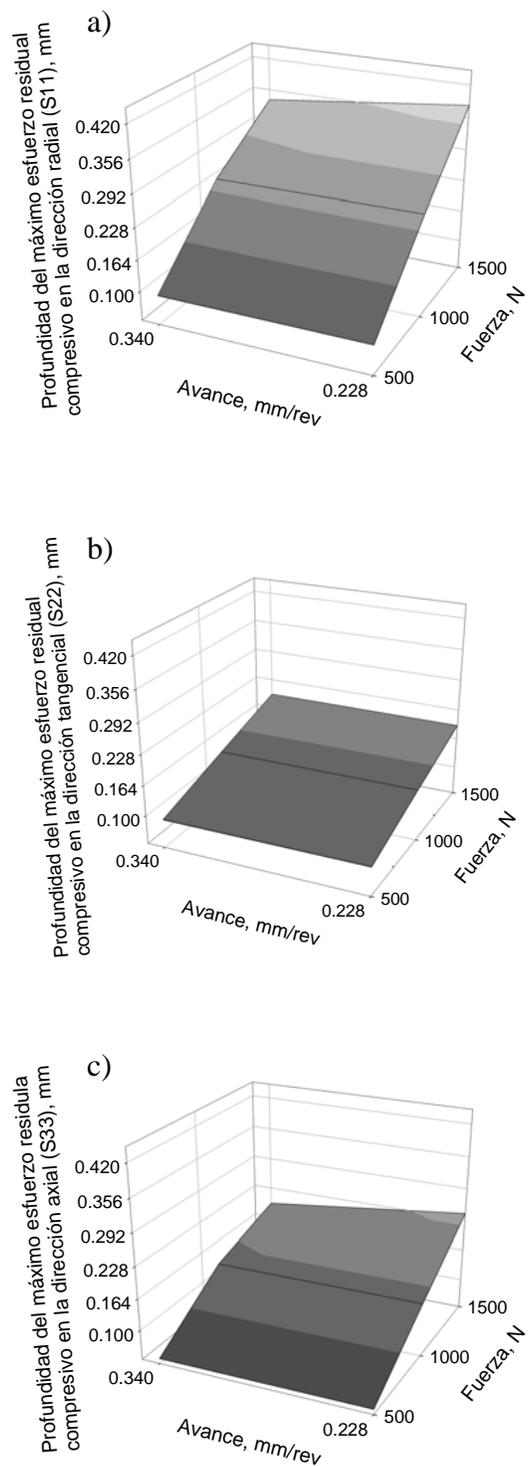


Figura 5.30: Efecto de la fuerza y el avance sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso en una pasada.

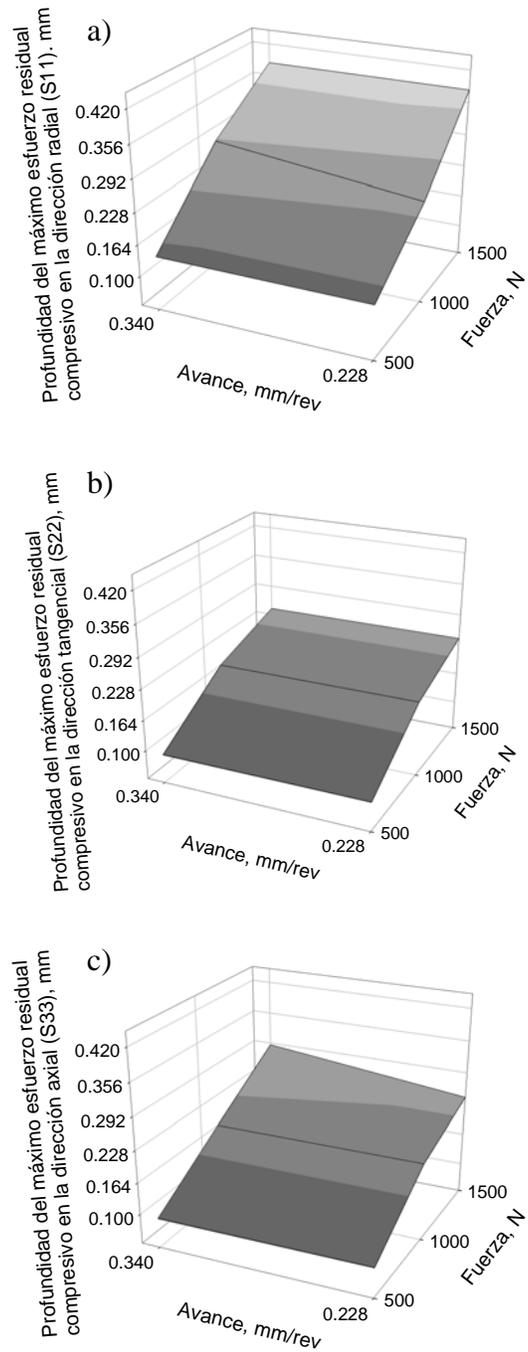


Figura 5.31: Efecto de la fuerza y el avance sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso en tres pasadas.

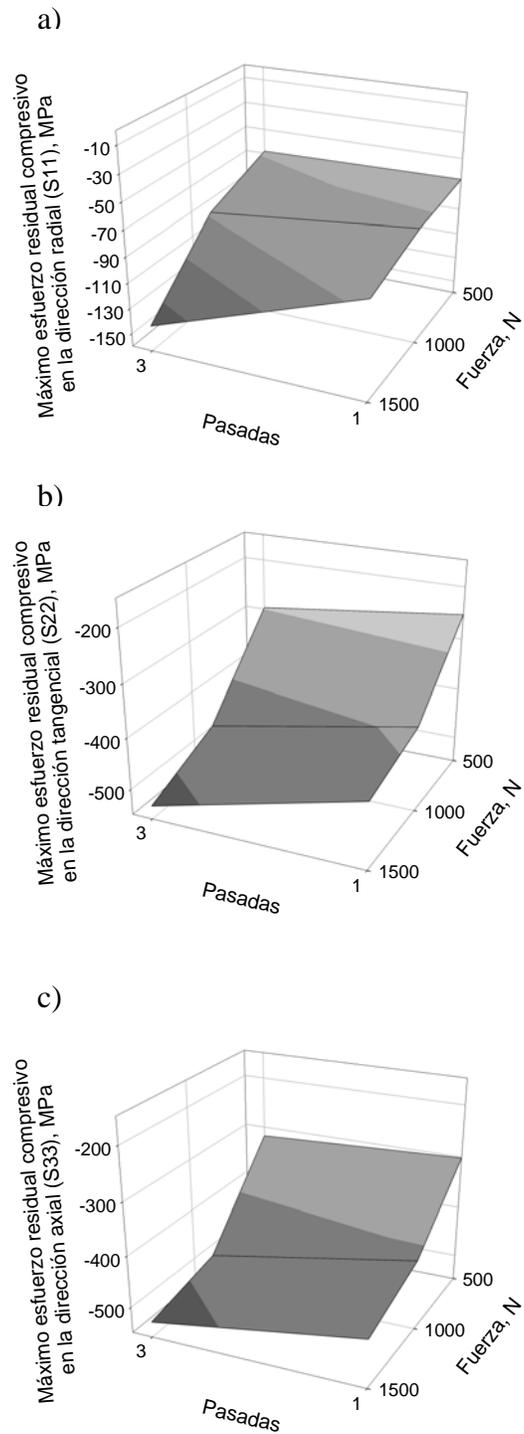


Figura 5.32: Efecto de la fuerza y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z).

Proceso con un avance de 0.228 mm/rev.

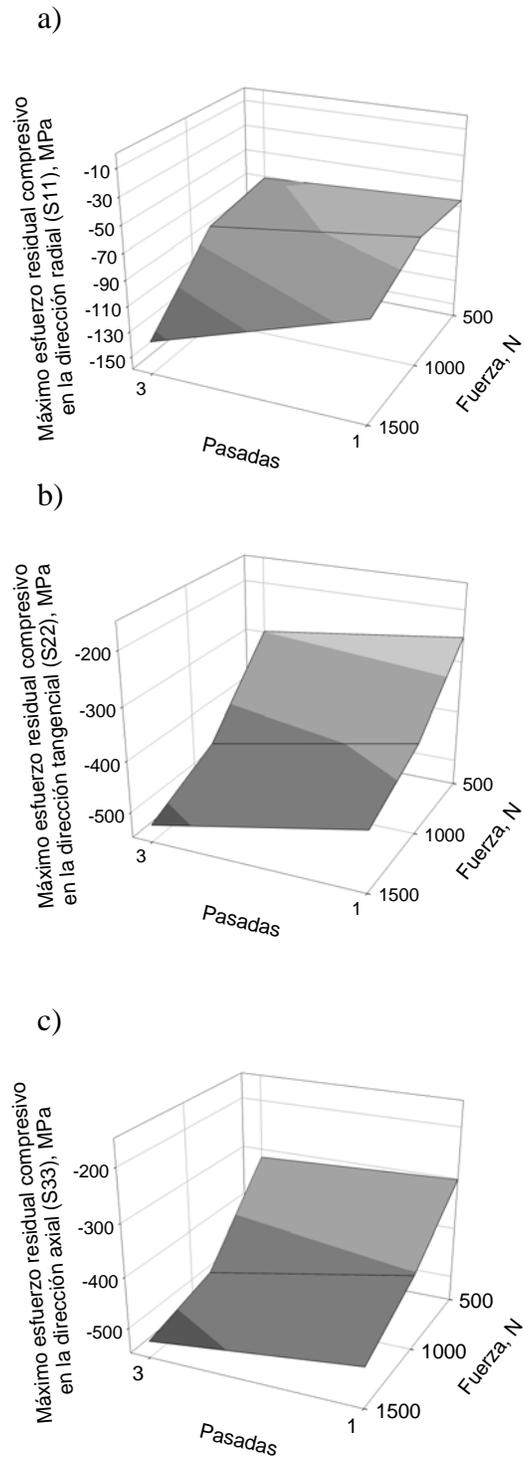


Figura 5.33: Efecto de la fuerza y el número de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso con un avance de 0.34 mm/rev.

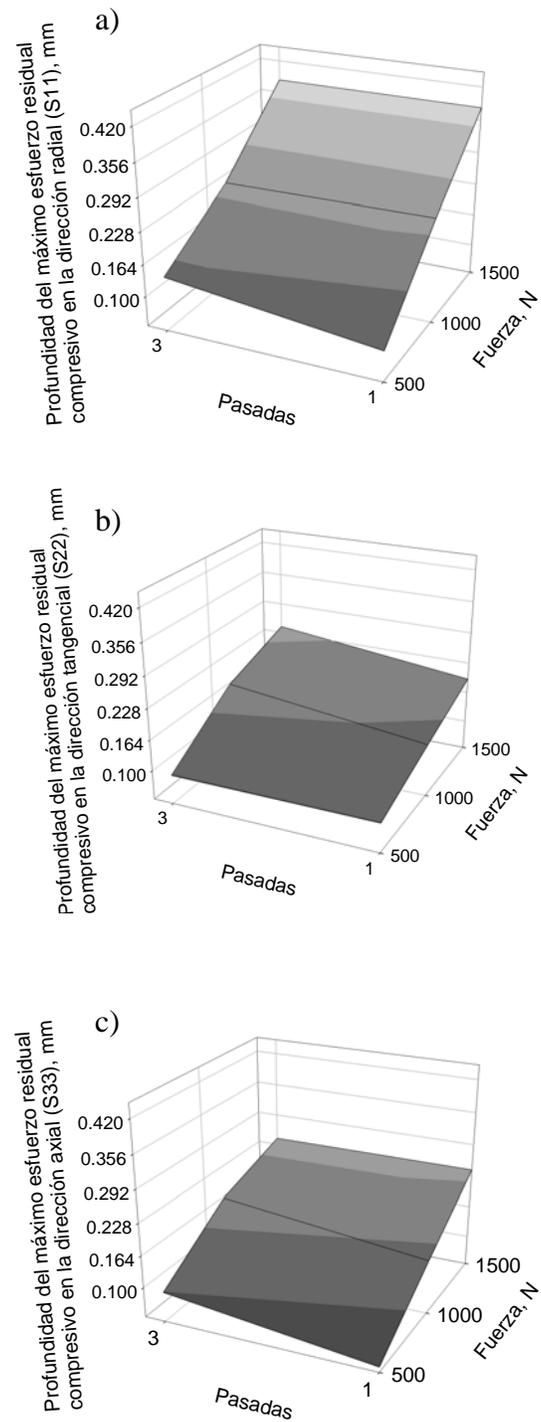


Figura 5.34: Efecto de la fuerza y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso con un avance de 0.228 mm/rev.

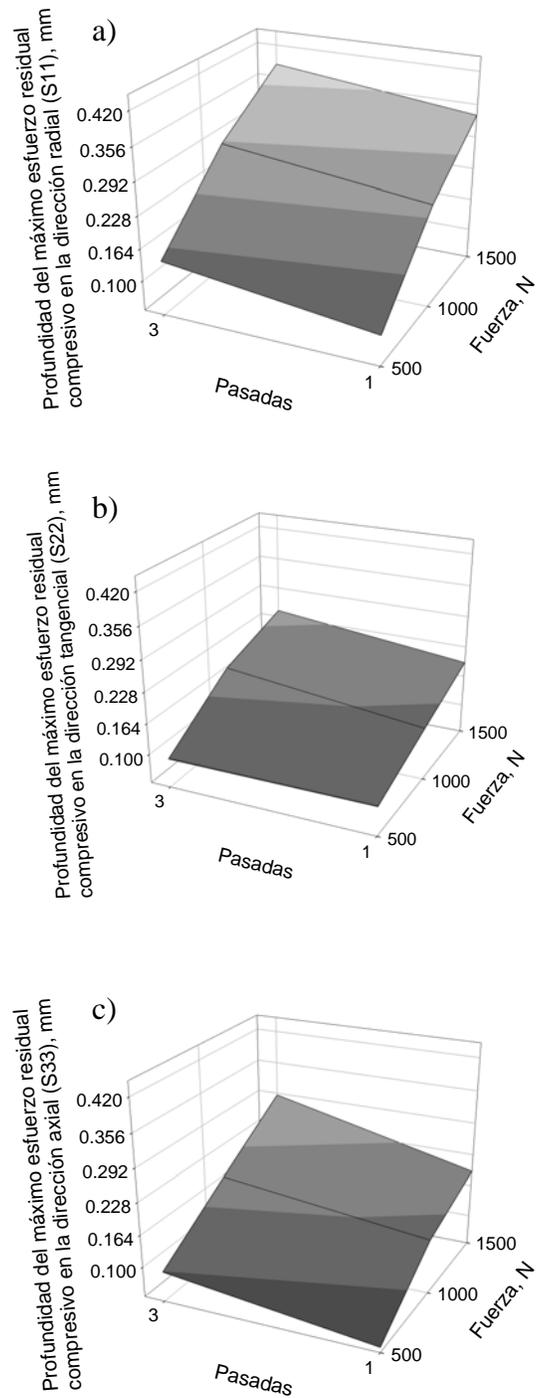


Figura 5.35: Efecto de la fuerza y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial σ_z .

Proceso con un avance de 0.34 mm/rev.

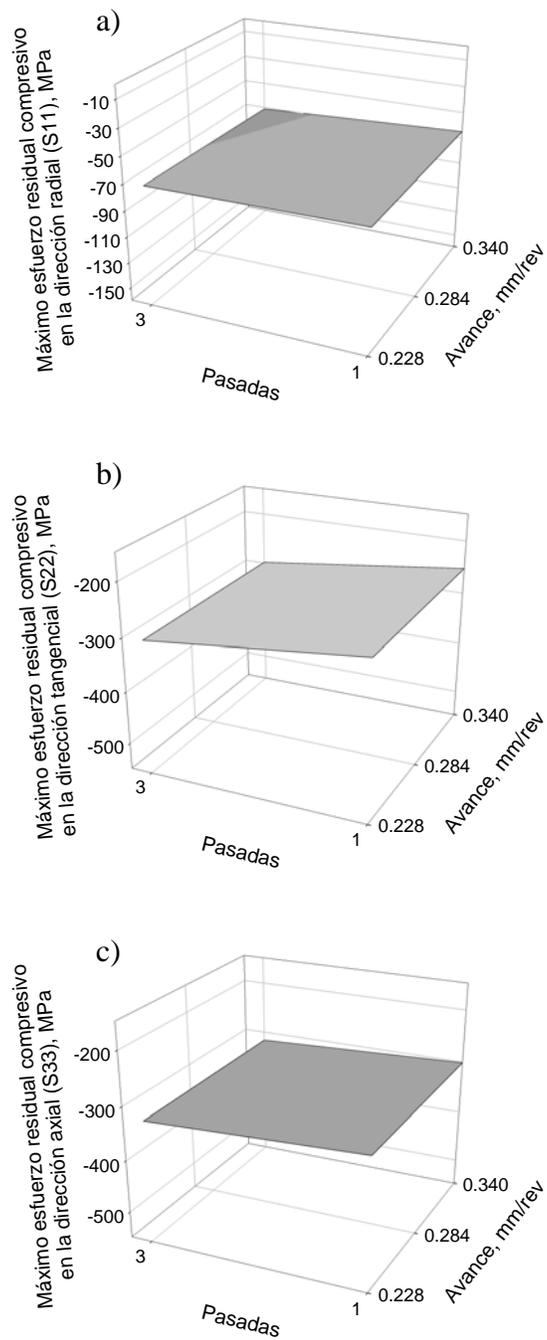


Figura 5.36: Efecto del avance y el numero de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso con una fuerza de 500 N.

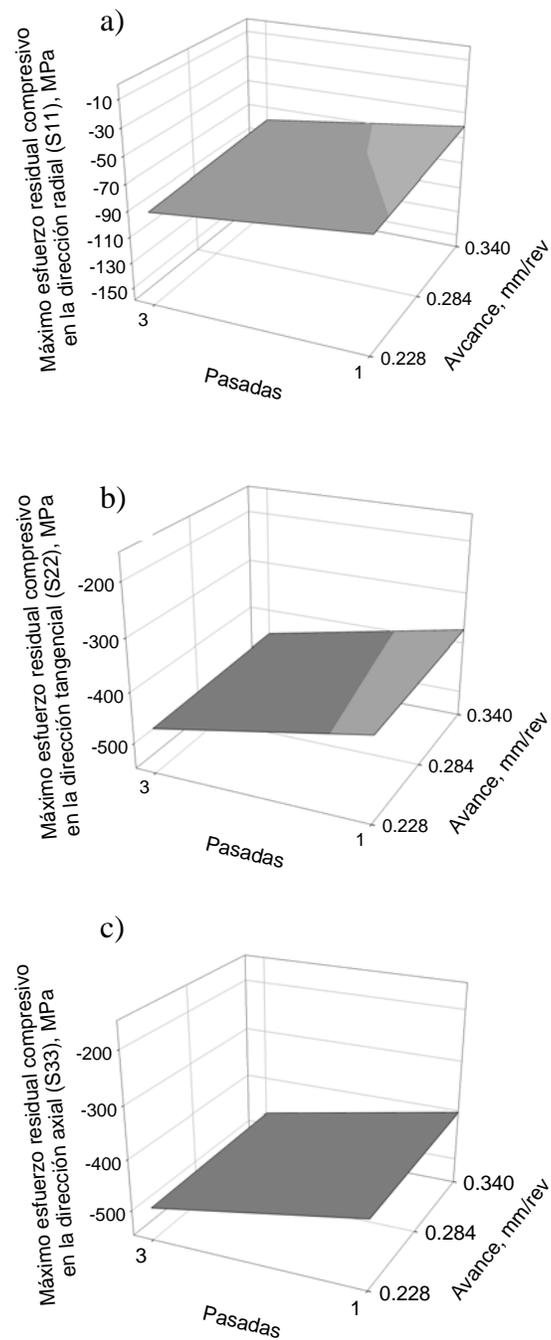


Figura 5.37: Efecto del avance y el numero de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z).

Proceso con una fuerza de 1000 N.

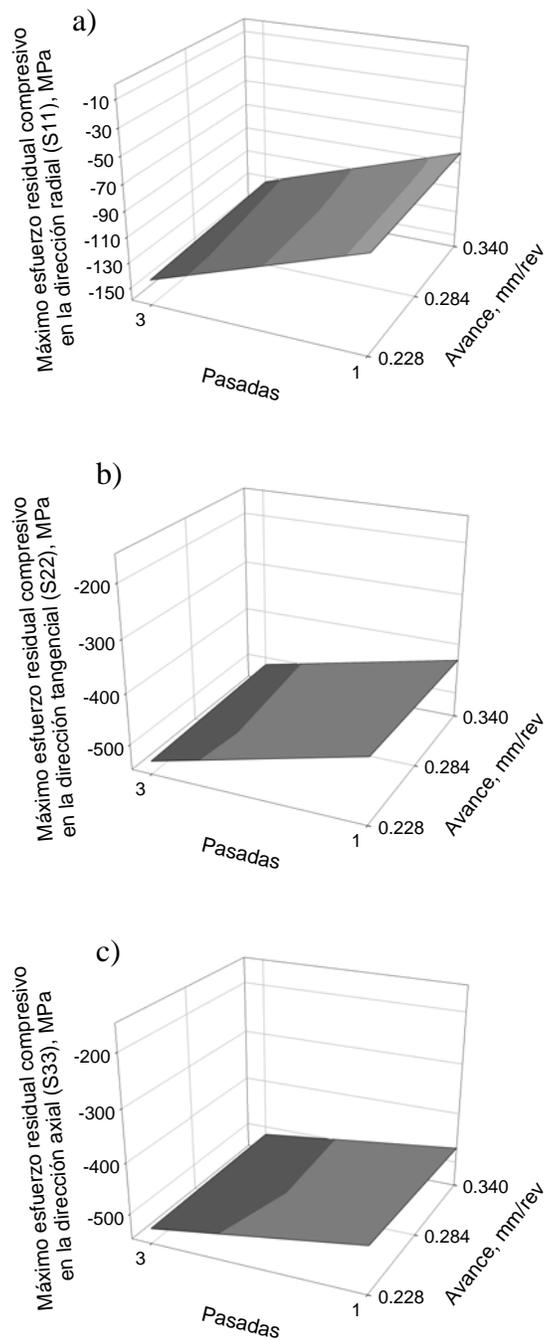


Figura 5.38: Efecto del avance y el numero de pasadas sobre el máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso con una fuerza de 1500 N.

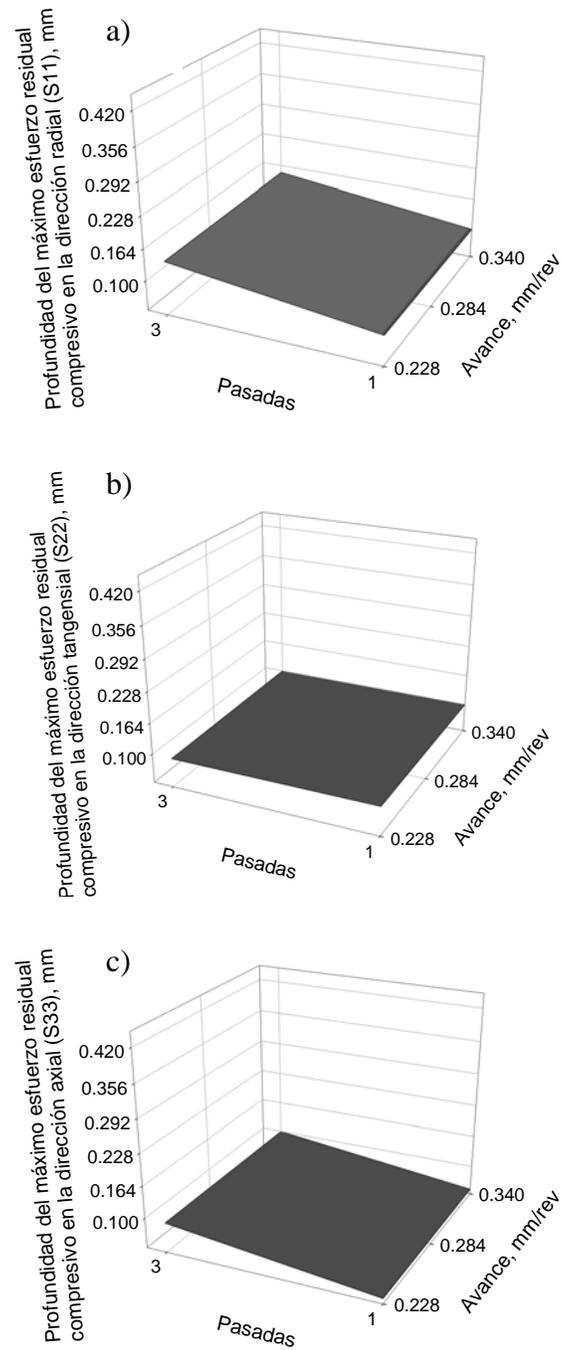


Figura 5.39: Efecto del avance y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z).

Proceso con una fuerza de 500 N.

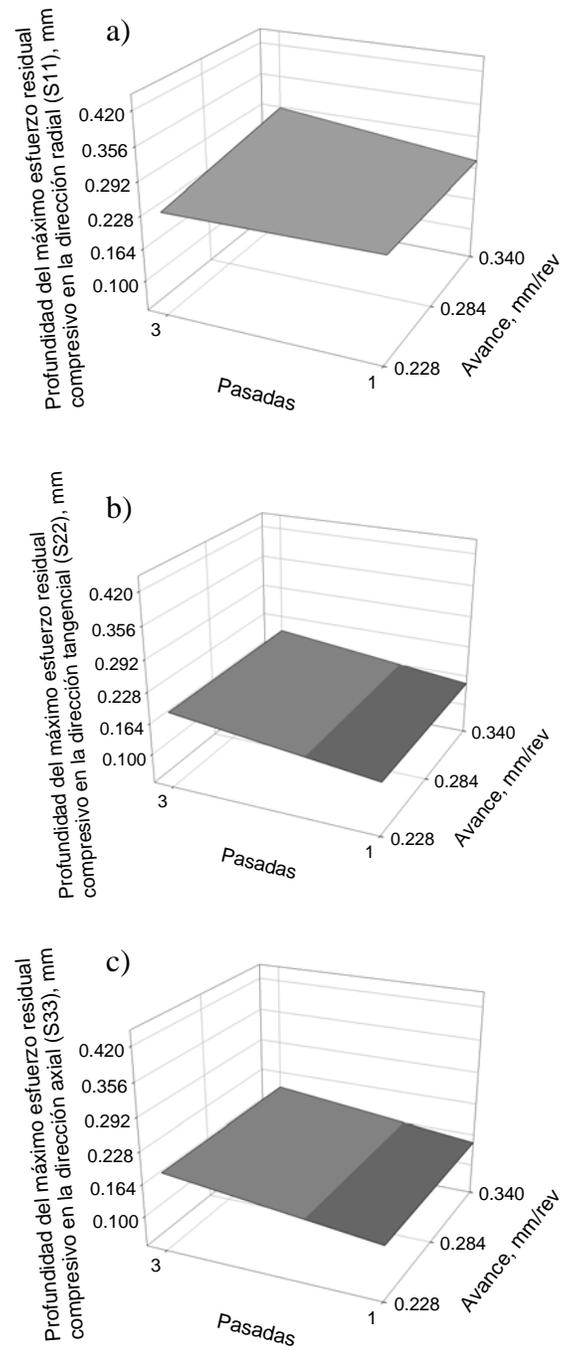


Figura 5.40: Efecto del avance y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z). Proceso con una fuerza de 1000 N.

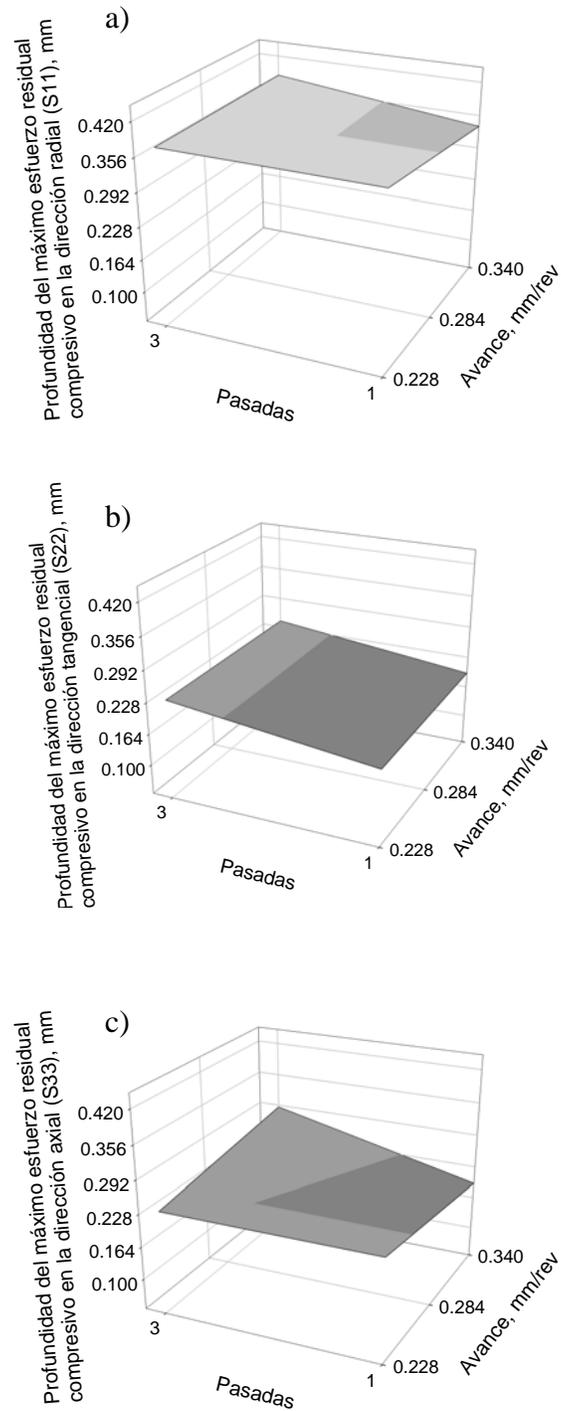


Figura 5.41: Efecto del avance y las pasadas sobre la profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo. a) dirección radial (σ_r), b) dirección tangencial (σ_θ) y c) dirección axial (σ_z).

Proceso con una fuerza de 1500 N.

Los máximos esfuerzos compresivos en la dirección radial, tangencial y axial aumentan cuando se aplica una fuerza de 1500N y un avance de 0.228 mm/rev en 3 pasadas; 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 pasadas, el rodillo pasa menos tiempo deformando el disco de acero por lo que se obtiene una menor profundidad y menor magnitud de éste esfuerzo.

En la dirección radial se presenta un menor aumento del máximo esfuerzo compresivo debido a que en esta dirección se encuentra una gran cantidad de material deformable; esto quiere decir que la carga aplicada es utilizada para dos tareas: la primera para deformar plásticamente la superficie y la segunda para deformar elásticamente el resto del material (la matriz). En la dirección tangencial y axial la magnitud del máximo esfuerzo residual compresivo es mayor debido a que hay menos material para deformar y a que las fronteras rígidas se encuentran mucho más cerca del punto de aplicación de la carga.

5.6 Efecto de la fuerza de bruñido sobre el campo de esfuerzos residuales.

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 en las tres direcciones; 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 la sección anterior (sección 5.5), el parámetro de bruñido que presenta la mayor influencia sobre la magnitud y profundidad del máximo esfuerzo residual compresivo es la fuerza. Las Figuras 5.42, 5.43 y 5.44 presentan el campo de esfuerzos residuales a diferentes niveles de fuerza en la dirección radial, tangencial y axial respectivamente.

La Figura 5.42 presenta el campo de esfuerzos residuales (en la dirección radial) obtenido después del proceso de bruñido por rodillo. 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.

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 (Figura 5.43 y Figura 5.44); 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 opone 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 carga.

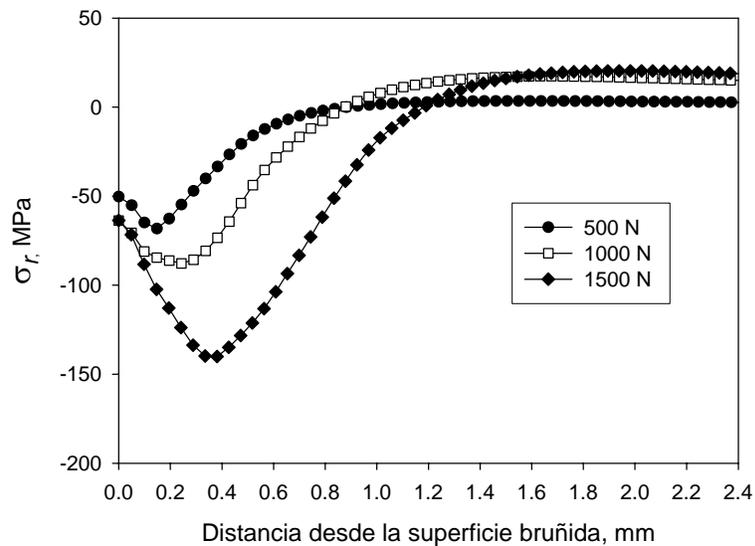


Figura 5.42: Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección radial (σ_r) de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pasadas y avance de 0.228mm/rev.

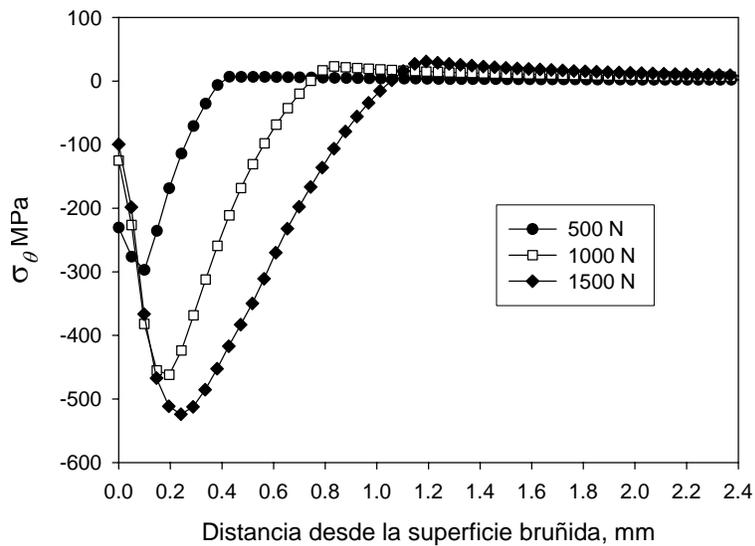


Figura 5.43: Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección tangencial (σ_θ) de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pasadas y avance de 0.228mm/rev.

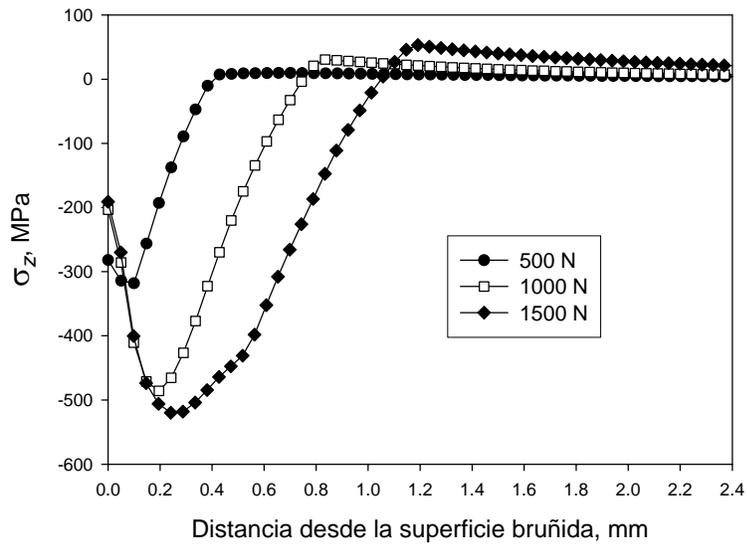


Figura 5.44: Efecto de la fuerza sobre el campo de esfuerzos residuales en la dirección axial (σ_z) de un disco de acero API X52. Simulación con 3 pasadas y avance de 0.228mm/rev.

5.7 Efecto de las propiedades mecánicas del material bruñido sobre el campo de esfuerzos residuales.

En las Figuras 5.45 a la 5.46 se puede observar la diferencia en comportamiento del campo de esfuerzos residuales en las direcciones radial, tangencial y axial 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 al 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 (la cual es una frontera rígida, ver Figura 5.9), 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 pasadas), el campo de esfuerzos residuales es función de las propiedades mecánicas del material. En las direcciones tangencial y axial se presenta prácticamente el mismo máximo esfuerzo residual compresivo para ambos aceros, esto se debe a que las fronteras en esta dirección se encuentran mucho más cerca del punto de aplicación de la carga.

Del efecto que presentan las fronteras, se puede indagar que para las mismas condiciones de bruñido, la geometría (tamaño de las piezas) presenta un efecto sobre el campo de esfuerzos residuales.

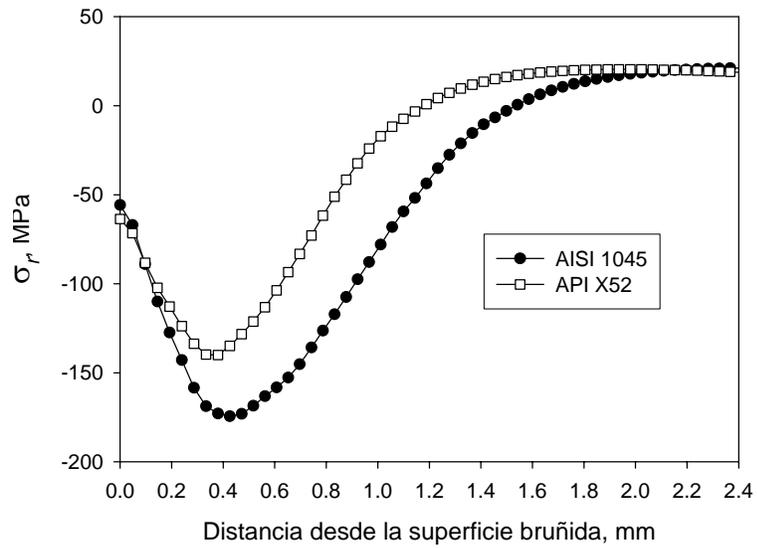


Figura 5.45: Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección radial (σ_r) obtenido de la simulación del proceso de bruñido por rodillo de un disco de acero AISI 1045 y otro de acero API X52. En la simulación se utilizó una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228mm/rev en 3 pasadas.

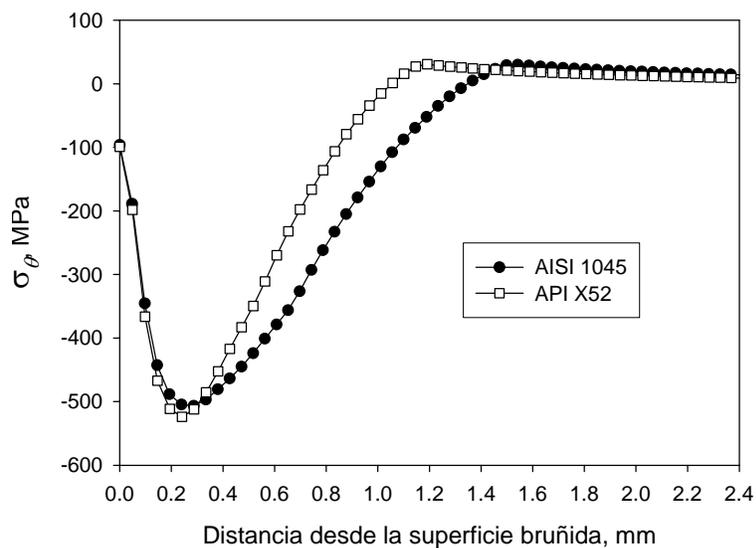


Figura 5.46: Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección tangencial (σ_θ) obtenido de la simulación del proceso de bruñido por rodillo de un disco de acero AISI 1045 y otro de acero API X52. En la simulación se utilizó una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228mm/rev en 3 pasadas.

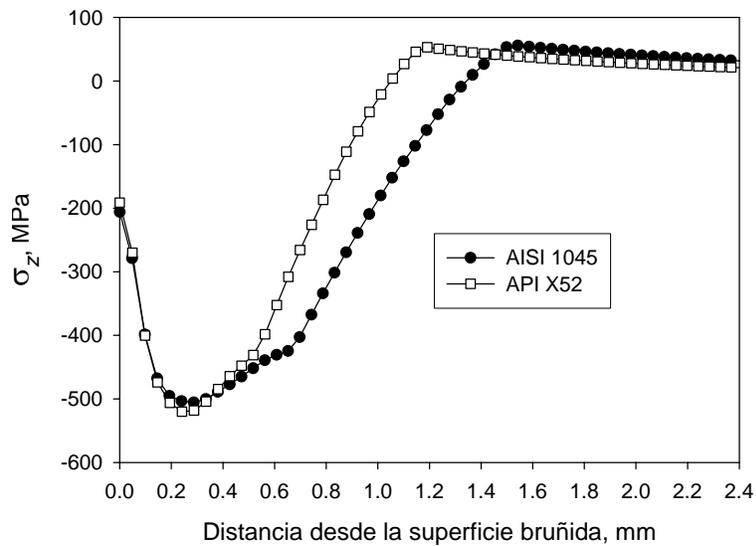


Figura 5.47: Comparación del campo de esfuerzos residuales en la dirección axial (σ_z) obtenido de la simulación del proceso de bruñido por rodillo de un disco de acero AISI 1045 y otro de acero API X52. En la simulación se utilizó una fuerza de 1500 N y un avance de 0.228mm/rev en 3 pasadas.

Conclusiones

Aunque no se obtuvo una validación aceptable del modelo matemático, la simulación numérica permitió estudiar el efecto de los parámetros de entrada tales como: fuerza, número de pasadas y avance sobre los parámetros de salida como son el % de variación del diámetro, máximo esfuerzo residual compresivo y profundidad de este máximo, del proceso de bruñido por rodillo.

De los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de que la fuerza empleada en el bruñido es la variable de entrada que más afecta los parámetros de salida de la siguiente manera:

- Las piezas metálicas sometidas a un estado de esfuerzos alto, debido a la aplicación de una fuerza de bruñido alta, tendrán un % 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%, con lo que se puede obtener las tolerancias dimensionales requeridas para las piezas.
- El incremento de la fuerza aumenta el máximo esfuerzo residual compresivo y la profundidad de éste en la dirección de la aplicación de la fuerza.

También se observó que después de la fuerza aplicada, el número de pasadas es la variable de entrada que afecta más a los parámetros de salida, dejando al avance con la menor influencia, ya que el máximo esfuerzo residual compresivo es poco afectado por este.

Con respecto a las interacciones que existen entre los parámetros de entrada sobre el % de variación del diámetro, máximo esfuerzo residual compresivo y profundidad de este máximo se concluye que:

- Las interacciones entre la fuerza y el número de pasadas presentan la mayor influencia.
- Una combinación de fuerza alta, incremento en el número de pasadas y disminución del avance provoca la mayor penetración y el máximo esfuerzo residual compresivo.
- Las interacciones entre la fuerza y el avance, y el número de pasadas y avance, presentan la menor influencia.

Por otro lado, el % de variación del diámetro y el campo de esfuerzos residuales son función de las dimensiones y propiedades mecánicas del material a bruñir.

Finalmente, cuando se simula o modela cualquier proceso de deformación en donde existen condiciones de frontera de contacto, el uso de herramientas rígidas (tal como el rodillo en el proceso de bruñido por rodillo) resulta en una sobre estimación de la pérdida de dimensiones de las piezas procesadas; además de que se requiere un adecuado conocimiento de la propiedades mecánicas del material tratado.

Anexo A

Método de solución

Para resolver el problema mecánico del proceso de bruñido por rodillo es necesario aplicar un método numérico debido a que soluciones analíticas sólo pueden ser obtenidas para situaciones simplificadas. El método de elemento finito es ampliamente utilizado para resolver problemas que involucran el cálculo de los estados de esfuerzos y por lo tanto el de estado de deformaciones. El paquete comercial Abaqus (que utiliza el método de elemento finito) es una herramienta de simulación con la que se cuenta para resolver problemas mecánicos por lo que se decidió su utilización.

En la solución de problemas mecánicos por el método de elemento finito en donde la pieza, y más específicamente los elementos cambian de forma (esto debido a que están involucrados un estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos), 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. En un sistema Euleriano los elementos no se deforman por lo que existe transferencia de material a través de sus fronteras. Los sistemas Eulerianos son preferibles cuando se simulan procesos de transferencia de calor o de flujo de fluidos.

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.

Las razones por las cuales se decidió trabajar con la librería ABAQUS/Explicit son:

1. Ésta paquetería simula mejor los eventos dinámicos de alta velocidad en comparación con métodos implícitos.
2. Las condiciones de contacto se simulan de mejor manera con métodos explícitos.

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 las ecuaciones constitutivas)

1. Cálculos en los nodos

Abaqus/Explicit usa una regla de diferencia central (método de Crack-Nicholson)^{31, 34} para integrar las ecuaciones de movimiento explícitamente a través del tiempo, usando las condiciones cinemáticas en un incremento para calcular las condiciones cinemáticas en el siguiente incremento. En el inicio del incremento el programa resuelve el equilibrio dinámico donde las fuerzas de inercia se igualan a la diferencia entre las fuerzas aplicadas externas y las fuerzas internas:

$$M_{ij} \ddot{u}_i = P_{ij} - I_{ij} \quad (A1)$$

donde M_{ij} es la matriz de masa nodal, \ddot{u}_i es la aceleración, I_{ij} son las fuerzas internas y P_{ij} son las fuerzas externas aplicadas. Las aceleraciones al inicio del tiempo actual son calculadas como:

$$\ddot{u}_i |_{(t)} = M_{ij}^{-1} \cdot (P_{ij} - I_{ij}) |_{(t)} \quad (A2)$$

Las aceleraciones se integran a través del tiempo usando una regla de diferencia central, que calcula el cambio de la velocidad suponiendo que la aceleración es constante. Este cambio en velocidad se suma a la velocidad correspondiente a la mitad del incremento previo para determinar las velocidades en la mitad del tiempo actual:

$$\dot{u}_i |_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{u}_i |_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{(\Delta t |_{(t+\Delta t)} + \Delta t |_{(t)})}{2} \ddot{u}_i |_{(t)} \quad (A3)$$

Las velocidades se integran a través del tiempo y se suman (después de multiplicar por el paso del tiempo) a los desplazamientos en el inicio del incremento para determinar los desplazamientos al final del incremento:

$$u_i |_{(t+\Delta t)} = u_i |_{(t)} + \Delta t |_{(t+\Delta t)} \dot{u}_i |_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} \quad (A4)$$

Las aceleraciones se obtienen satisfaciendo el equilibrio dinámico al inicio del incremento. Conociendo las aceleraciones, las velocidades y los desplazamientos se calculan explícitamente a

través del tiempo. Para que el método produzca buenos resultados, el incremento del tiempo debe ser muy pequeño para acercarse lo más posible a una aceleración constante.

2. Cálculos en los elementos

Una vez obtenido los desplazamientos en los nodos, las deformaciones y los esfuerzos se determinan a partir de las ecuaciones constitutivas. El estado de esfuerzos y deformaciones en la zona elástica se calcula directamente de la ley generalizada de Hook. En la zona plástica, el proceso de cálculo se realiza iterativamente a causa de la no linealidad del problema y de que la solución del problema depende de la historia de deformaciones.

Antes de usar una relación esfuerzo-deformación (ecuación constitutiva), durante los cálculos se debe de revisar si el material se encuentra en un estado de carga plástica mediante el empleo de un criterio de carga. Este criterio se obtiene a partir de la condición de consistencia (ecuación 3.27).

Un material se encuentra en un estado de carga plástica si el criterio de carga es mayor a cero:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} > 0 \quad (\text{A5})$$

la ecuación A5 es el criterio de carga en un estado de carga plástica. Cuando un material se encuentra en esta situación, la ecuación siguiente ecuación debe de ser utilizada para determinar el estado de esfuerzos:

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl} \quad (\text{A6})$$

Para una carga neutral, se tiene que $d\varepsilon_{ij}^p = 0$, o $d\lambda = 0$. Con la condición de consistencia se obtiene el criterio de carga a carga neutra

:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} = 0 \quad (\text{A7})$$

en esta condición, la relación esfuerzo-deformación que se debe de utilizar es:

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} \quad (\text{A8})$$

en un estado de descarga, la condición de consistencia es menor a 0 y $d\lambda = 0$; con lo que se obtiene el último criterio de carga:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} < 0 \quad (\text{A9})$$

en este estado, también la ecuación A8 se utiliza para determinar el estado de esfuerzos en un estado de descarga.

Bibliografía.

1. S. Sh. Abedi, A. Abdolmaleki y N. Adibi. Failure Análisis of SCC and SRB Induced Cracking of a Transmission Oil Products Pipeline. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, 2007, pp 250-261.
2. M.A.L. Hernández, D. Martínez, R. González, A. Pérez, R.D. Mercado, y J. Rodríguez. Corrosive Wear Failure Analysis in a Natural Gas Pipeline. *Wear*, Vol. 263, 2007, pp 567-571.
3. P. Morales, G. Negrón, M. Romero, C. Ángeles, y M. Palomar. Corrosion Inhibition of Pipeline Steel Grade API 5L X52 Immersed in a 1 M H₂SO₄ Aqueous Solution Using Heterocyclic Organic Molecules. *Electrochimica Acta*, Vol. 49, 2004, pp 4733-4741.
4. R. Vásquez, L. Hazan, J. Uruchurtu, J.M. Malo y J. Genescá. Corrosión y protección de un acero API-X52 en crudo de petróleo. *Afinidad*, Vol. 60 (504), 2003, pp 136-143.
5. P. S. Prevéy y John T. Cammett. The Influence of Surface Enhancement by Low Plasticity Burnishing on the Corrosion Fatigue Performance of AA7075-T6. *International Journal of Fatigue*, Vol. 26/9, 2004, pp 975-982.
6. Anonymus. Longer life with low-plasticity burnishing. *Manufacturing Engineering*, Vol. 127, No. 6, 2001, pp 34-38.
7. D. Butler. Burnishing for fatigue strength. *Advanced Materials and Processes*, 2005, pp 66-68.
8. P. S. Prevéy, R. A. Ravindranath, M. Shepard y T. Gabb. Case Studies of Fatigue Life Improvement Using Low Plasticity Burnishing in Gas Turbine Engine Applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 128, 2006, pp 865-872.
9. A. M. Hassan, y A. S. Al-Bsharat. Improvements in some properties of non-ferrous metals by the application of the ball-burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, 1996, pp 250-256.
10. A. M. Hassan. The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 72, 1997, pp 385-391.

11. M. H. El-Axir. An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, 2000, pp 1603-1617.
12. M. H. El-Axir y A. A. Ibrahim. Some surface characteristics due to center rest ball burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, 2005, pp 47-53.
13. L. Luca, S. Neagu-Ventzel y I. Marinescu. Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision Engineering*, Vol. 29, 2005, pp 253-256
14. H. Hamadache, L. Laouar, N. E. Zeghib y K. Chaoui. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 180, 2006, pp 130-136.
15. P. Zhang y J. Lindemann. Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. *Scripta Materialia*, Vol. 52, 2005, pp 1011-1015.
16. P. Zhang, y J. Lindemann. Influence of Shot Peening on High Cycle Fatigue Properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. *Scripta Materialia*, Vol. 52, 2005, pp
17. S. J. Ebeid y T. A. El-Taweel. Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 219, No. 5, 2005, pp 423-430.
18. S. F. Díaz Rojas. **Implementación de un Procedimiento Metodológico para la Elaboración de Piezas por Bruñido con Rodillo Simple**. 2006. Tesis Doctoral. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Republica de Cuba.
19. S. F. Díaz y T. Robert. Bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045. *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, Vol. 2, No. 1, 2005, pp 32-40.
20. A. J. Black, E. M. Kopalinsky y P. L. B. Oxley. Analysis and Experimental Investigation of a Simplified Burnishing Process. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 39, No. 6, 1997, pp 629-641.
21. H. Luo, J. Liu, L. Wang y Q. Zhong. Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 180, 2006, pp 9-16.
22. X. Yu y L. Wang. Effect of Various Parameters on the Surface Roughness of an Aluminum Alloy Burnished with a Spherical Surfaced Polycrystalline Diamond Tool. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 39, 1999, pp. 459-469.
23. M. S. ElTobgy, E. Ng y M. A. Elbestawi. Three-dimensional elastoplastic finite element model for residual stresses in the shot peening process. *Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol. 218 Part B, 2004, pp 1471-1481.

24. W. Bouzid Saï y K. Saï. Finite element modelling of burnishing of AISI 1042 steel. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 25, 2005, pp 460-465.
25. W. Bouzid, O.Tsoumarev y k. Saï. An investigation of Surface roughness of burnishing AISI 1042 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 24, 2004, pp 120-125.
26. K. E. Prasad, S Nahavandi, M. H. Mohammed y V. N. Aditya. Prediction of Residual Stresses in Roller Burnished Components- A Finite Element Approach. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 1, N 2, 2006, pp 153-163.
27. W. Zhuang y B. Wicks. Multipass low-plasticity burnishing induced residual stresses: three-dimensional elastic-plastic finite element modeling. *Proc. Instn. of Mech. Engrs*. Vol. 218, No. 6, 2004, pp 663-668.
28. P. S. Taylan, y F. J. Ciro. Finite Element Modelling of Hard roller Burnishing: An Analisis on the Effects of Process Parameters Upon Surface Finish and Residual Stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, 2007, pp 705-716.
29. W. F. Chen y D. J. Han. **Plasticity for Structural Engineers**. Springer-Verlag, EUA. 1988.
30. Wai-Fah Chen. **Constitutive Equations for Engineering Materials, Vol. 2: Plasticity and Modeling**, Studies in Applied Mechanics 37B, Elsevier 1994.
31. D. S. Burnett. **Finite Element Analysis. From Concepts to Applications**. Addison-Wesley Publishing Company, EUA, 1987.
32. J. Chakrabarty. **Theory of Plasticity**. Tercera Edición, Elsevier Butterworth-Heinemann, Reino Unido, 2006.
33. G. E. Dieter. **Metalurgia Mecánica**. McGraw-Hill, España 1967.
34. www.abaqus.com
35. J. Michel, M. Bursak y I. Mamuzi'c. Influence of Strain Rate on Mechanical Properties of Microalloyed Steels. *Metalurgija*, Vol. 35, 1996, pp 69-72.
36. ASTM E9. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. Annual Book of ASTM Standards, 1999.