Mejora superficial mediante el proceso de bruñido con esfera sobre una pieza torneada en acero SAE 12L14.

Manuel Arturo González Ramírez.

Universidad ECCI.

Facultad de Posgrados.

Bogotá, Colombia

2022.

Mejora superficial mediante el proceso de bruñido con esfera sobre una pieza torneada en acero SAE 12L14.

Manuel Arturo González Ramírez.

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería con énfasis en mecánica.

Director (a):

MSc. MEng. Daniel Eduardo Villalobos Correa.

Línea de Investigación:

Materiales y procesos – Diseño Mecánico

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Diseño Mecánico y Materiales (GIDMyM)

Universidad ECCI.

Facultad de Posgrados

Bogotá, Colombia

2022

A mi papá, Alberto, quien usaría el resultado de esta investigación diariamente, A mi mamá, Natividad, por su infinito amor y quien sin su apoyo incondicional esta investigación no hubiese sido posible, a mi hermano, Daniel, por su lealtad y complicidad.

A Dios por la bendición de conocer el amor a través de todas las personas que están en mi vida.

Agradecimientos

Al profesor Msc. Ing. Daniel Villalobos, tutor y docente investigador adscrito a la vicerrectoría de investigación de la universidad ECCI, quien desde el inicio del proyecto tuvo afinidad con los objetivos y cuya acertada orientación en cada una de las etapas de la investigación dio como resultado un proyecto exitoso.

Al profesor PhD. Giovany Orozco, docente investigador adscrito a la facultad de posgrados de la universidad ECCI, quien aportó su amplia experiencia en análisis de resultados experimentales con el objetivo de concluir la etapa práctica de la investigación.

A la facultad de posgrados de la universidad ECCI y al programa de maestría en ingeniería con énfasis en mecánica, quien dispuso de todo su talento humano para cimentar las bases académicas e investigativas, que hoy dan como resultado este proyecto de investigación.

Resumen

El bruñido con esfera es un proceso de manufactura que se utiliza para mejorar el acabado superficial de una pieza. En este proyecto de investigación, se utilizó el proceso de bruñido sobre unas barras de acero SAE 12L14 que previamente fueron mecanizadas con un proceso de torneado convencional. Inicialmente, se realizó una simulación por elementos finitos para validar que la deformación superficial de la pieza se llevara a cabo sin afectar su integridad utilizando varios niveles para los factores que intervienen en el proceso; Para la etapa experimental, se desarrolló una propuesta de mandril de bruñido y se realizaron varios experimentos con el fin de encontrar la combinación de factores que diera como resultados la mayor mejora. Posteriormente, se realizó un ajuste en el perfil del modelo para simulación y se realizó una comparación entre los resultados experimentales y los resultados simulados dando como resultado que la mayor mejora de rugosidad se obtiene con la combinación de: mayor fuerza de bruñido, menor avance de herramienta, menor velocidad de bruñido y mayor número de pasadas.

Palabras clave: Simulación, bruñido, rugosidad, deformación

Abstract

Ball burnishing is a manufacturing process used to improve the surface finish of a workpiece. For this research project, the ball burnishing process was used on SAE 12L14 steel bars that were previously machined with a conventional turning process. Initially, a finite element simulation was performed to validate that the surface deformation of the workpiece was carried out without affecting its integrity using several levels for the factors involved in the process; for the experimental stage, a proposal of a burnishing tool was developed and several experiments were carried out in order to find the combination of factors that would result in the greatest improvement. Subsequently, an adjustment was made to the model profile for simulation and a comparison was made between the experimental results and the simulated results giving as a result that the greatest improvement in roughness is obtained with the combination of: higher burnishing force, lower tool feed, lower burnishing speed and higher number of passes.

Keywords: Simulation, burnishing, roughness, deformation

Objetivos

General

Mejorar el estado superficial de una pieza torneada en acero SAE 12L14 utilizando el proceso de bruñido con esfera.

Específicos

- Establecer un diseño experimental apropiado para realizar el proceso de bruñido con esfera en piezas fabricadas en acero SAE 12L14.
- Evaluar el comportamiento de la superficie mediante simulación por elementos finitos con base en los tratamientos del diseño experimental definido.
- Diseñar y construir un mandril para bruñido con esfera que se pueda utilizar en un portaherramientas de un torno convencional para operaciones de cilindrado.
- Validar experimentalmente algunos tratamientos del proceso de simulación por el método de los elementos finitos.

Contenido

Objetivos ..... **XI**
General XI
Específicos XI

Lista de figuras ..... **XIV**

Lista de tablas ..... **XVII**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XVIII**

Introducción **1**

1. Marco Teórico **5**
1.1 Estado del arte 5
1.1.1 Nacional 5
1.1.2 Internacional. 6
1.2 Proceso de bruñido. 11
1.2.1 Introducción. 11
1.2.2 Fuerza 12
1.2.3 Avance 13
1.2.4 Velocidad. 14
1.2.5 Número de pasadas. 14
1.3 Estado superficial. 14
1.3.1 Rugosidad 14
1.4 Técnicas de caracterización 18
1.4.1 Microscopía óptica 18
1.5 Simulación por elementos finitos. 19
1.5.1 Generalidades. 19
1.5.2 Cálculo y análisis de resultados. 21
1.6 Diseño experimental. 22
1.6.1 Etapas en el diseño de experimentos. 23
1.6.2 Análisis de los resultados. 24
1.6.3 Diseño experimental factorial. 24

2. Desarrollo Experimental **25**
2.1 Selección del diseño experimental 25
2.2 Modelo CAD 26
2.3 Simulación de bruñido por elementos finitos. 28
2.3.1 Tipo de análisis. 29
2.3.2 Datos de ingeniería o “engineering data”. 30

2.3.3 Geometría o “Geometry”. 34
2.3.4 Modelo o “Model”. 35
2.4 Diseño y fabricación de mandril. 44
2.5 Equipos de fabricación y medición. 46
2.5.1 Etapa de fabricación de las probetas. 46
2.5.2 Equipo para medición de rugosidad. 47
2.5.3 Microscopio estereoscópico. 48
2.5.4 Equipo de cómputo. 50

3. Resultados y discusión. 53
3.1 Diseño experimental aplicable. 53
3.2 Simulación por elementos finitos. 54
3.3 Especificación del mandril. 61
3.3.1 Diseño de mandril. 64
3.3.2 Costos de manufactura. 67
3.4 Resultados experimentales. 69
3.5 Comparación de resultados. 74

4. Conclusiones y recomendaciones 79
4.1 Conclusiones. 79
4.2 Recomendaciones. 80

A. Anexo: Rugosidades características según proceso de manufactura. 81

B. Anexo: Certificado de trazabilidad acero SAE 12L14. 82

C. Anexo: Ficha técnica de unidad de transferencia. 83
D. Anexo: Plano de ensamble de mandril de bruñido…….…….84

E. Anexo: Ecuación de regresión del modelo. 85

F. Anexo: Ejecución del proceso de bruñido con esfera en un proceso de torneado convencional. 88

G. Anexo: Comparación visual entre superficie torneada vs. Superficie bruñida. 89

H. Anexo: Tabla de mejora de dureza HRB. 90

Bibliografía. 91

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Modelo geométrico y mallado de la porción de material a análisis junto con la esfera de trabajo. 7
Figura 2. Porción característica de material a analizar. 8
Figura 3. Proceso de bruñido con esfera a) Esquema; b) Proceso aplicado en una operación de torneado..... 11
Figura 4. Perfiles de una superficie. 15
Figura 5. Esquema representativo de Ra. 16
Figura 6. Esquema representativo de Rz..... 17
Figura 7. Ejemplo del uso de la microscopia para observar el cráter (a) y el flanco (b) desgastado de un inserto de carburo cementado para mecanizado. 18
Figura 8. Estructura típica formada por elementos interconectados. 19
Figura 9. Convergencia de la solución de un elemento finito basado en la fórmula de desplazamiento compatible. 22
Figura 10. Esquema de distribución de zonas para bruñido de probetas..... 26
Figura 11. Procedimiento para la selección del tipo de análisis en ANSYS WORKBENCH. 30
Figura 12. Procedimiento para asignar valores de propiedades mecánicas en ANSYS WORKBENCH 17.2..... 31
Figura 13. Procedimiento para ingresar la curva de esfuerzo-deformación para el acero SAE 12L14. 34
Figura 14. Ventana para configuración a un estudio en 2D. 35
Figura 15. Asignación de comportamiento y tipo de material para (a) esfera, (b) pieza. . 36
Figura 16. Selección de contactos entre elementos. 38
Figura 17. Mallado de la pieza usando la opción "Edge sizing". 39
Figura. 18 Opciones generales para el mallado..... 40
Figura 19. Selección de tamaño de malla..... 41
Figura 20. Configuración de análisis para bruñido 2D. 42
Figura 21. Condiciones de frontera para la simulación del bruñido..... 43
Figura 22. Diseño de mandril hidráulico. 44
Figura 23. Diseño de mandril neumático. 45

Figura 24. Diseño de mandril electrónico..... 46
Figura 25. Torno convencional utilizado para la fabricación de las probetas. 47
Figura 26. Montaje de rugosimetro TR100 marca TIME para realizar las mediciones del acabado superficial de las probetas. 48
Figura 27. Montaje en el microscopio MSZ 5000 para tomar las imágenes de la superficie de las probetas..... 50
Figura 28. Especificaciones el equipo de cómputo utilizado para desarrollar la investigación. 51
Figura 29. Grafica de esfuerzo deformación para acero SAE 12L14. 55
Figura 30. Grafica de deformación vs tiempo de un punto ubicado en un pico de la superficie..... 56
Figura 31. Grafica comparativa de los resultados de deformación de acuerdo al tamaño de mallado..... 57
Figura 32. Trazado de deformaciones en el eje “Y” de una sección superficie de bruñido con Lm=0.8 mm. 58
Figura 33. Resultado de deformación en "Y" para 1 pasada con diferentes fuerzas de bruñido. 58
Figura 34. Resultado de deformación en "Y" para 2 pasada con diferentes fuerzas de bruñido. 59
Figura 35. Comparación de deformación para 95 N. 60
Figura 36. Comparación de deformación para 166 N. 60
Figura 37. Comparación de deformación para 237 N. 61
Figura 38. Diagrama de función de calidad para la selección del tipo de mandril a utilizar. 63
Figura 39. (a) Imagen de una bola de transferencia con Flanche, (b) corte de una bola de transferencia. 64
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre de la interacción entre la pieza a bruñir y la bola de transferencia. 65
Figura 41. Imagen del mandril de bruñido de accionamiento hidráulico..... 68
Figura 42. Diagrama de Pareto para mostrar la influencia de las variables sobre el resultado del bruñido..... 70
Figura 43. Grafica de resumen de residuos para porcentaje de mejora de Ra. 71
Figura 44. Grafica de efectos principales sobre el resultado de mejora de Ra. 72
Figura 45. Grafica de interacciones entre factores. 73

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Valores recomendados de cut-off y lm para diferentes valores de rugosidad según la norma ISO 4288-1996. 17
Tabla 2. Lista de variables para el diseño experimental. 25
Tabla 3. Lista de parámetros de corte para barra de prueba. 26
Tabla 4. Evolución del modelo CAD para la simulación del proceso de bruñido, Fuente de las imágenes: El Autor. 28
Tabla 5. Tabla de tipos de contactos de Ansys Workbench; Consultado: [24] J. Martín, «Quasi-Static Study on the Fluid and Structure Interactions of the Subsurface Safety Valves (SSSV) for Extreme High Pressure and High Temperature (XHPHT) Applications», 2010. 37
Tabla 6. Tabla de combinación de variables para experimentación de bruñido. 54
Tabla 7. Tabla de relación entre presión manométrica y fuerza de bruñido. 67
Tabla 8. Tabla de costos de fabricación de mandril de bruñido de accionamiento hidráulico. 69
Tabla 9. Tabla resumen de modelo. 70
Tabla 10. Tabla de comparación de resultados para mejoras de Ra y Rz entre los métodos experimentales y simulados. 76
Tabla 11. Tabla de mejoras de dureza HRB realizada a una muestra bruñida a alta velocidad. 90

Lista de Símbolos y abreviaturas

F Fuerza de bruñido.

Ra Rugosidad superficial media aritmética.

n Velocidad de bruñido.

Vc Velocidad de corte de la herramienta.

f Avance.

Lm Longitud de muestreo.

λ_m Longitud de muestreo según DIN.

E Módulo de elasticidad.

Rx Rugosidad (genérico).

Rq Rugosidad media aritmética.

Zi Rugosidad parcial.

Rmax Rugosidad máxima.

Rz Rugosidad media a partir de Zi.

Rt Profundidad total de la rugosidad.

Rp Cresta de mayor perfil.

HV Dureza en escala Vickers.

HB Dureza en escala Brinell.

HRB Dureza en escala Rockwell B.

v Coeficiente de Poisson.

R Radio de herramienta.

Introducción

El acabado superficial es un factor determinante durante la vida útil de una pieza, en la actualidad los procedimientos más utilizados para alcanzar valores de rugosidad bajos se realizan a través de elementos abrasivos y por lo general, se requiere un tipo de maquinaria especializada para realizar estos procedimientos, sin embargo, cuando la geometría es muy compleja estos procesos se realizan a mano. De acuerdo a la tabla "*Procedimiento de fabricación y aspereza de superficies"* que se encuentra en la norma DIN 4766 (Anexo A), existe un rango de rugosidad inherente a cada proceso de manufactura, por ejemplo, para superficies muy ásperas como las producidas con fundición encontramos valores de hasta 1000 µm, por el contrario, con superficies muy finas como las que encontramos en los bloques patrón se alcanzan valores de 0.06 µm.

Alcanzar un valor de rugosidad bajo influye directamente en los costos de fabricación de una pieza, esto, teniendo en cuenta que se debe sumar un tiempo adicional de producción y un tiempo adicional de transporte de las piezas al costo final de fabricación. Es por esta razón que el proceso de bruñido es una solución viable para los pequeños fabricantes, ya que permitirá ofrecer al cliente piezas con mejores acabados superficiales y mayor resistencia[1], utilizando una herramienta que se puede fabricar de forma sencilla, económica y es de fácil mantenimiento.

En este trabajo de investigación se estudia la disminución de rugosidad utilizando el bruñido con esfera sobre una superficie cilíndrica de acero SAE 12L14, esta superficie ha sido previamente mecanizada con una operación de cilindrado en un torno convencional. El objetivo del proceso es disminuir la rugosidad alcanzada durante el torneado mediante

---

[1] Resistencia a la fatiga, a la corrosión y al desgaste.

el uso de una esfera endurecida que se hace rotar sobre la cara externa de la pieza buscando el aplastamiento de los picos superficiales.

Para realizar este proceso de mejora superficial, se requiere un cabezal de bruñido que es el encargado de transmitir la fuerza de bruñido (F), desde el portaherramientas del torno hasta la pieza que se va a mejorar. Varios autores han fabricado una serie de cabezales en los que se varia la forma en la que se mide la fuerza, comenzando por el uso de resortes de compresión como el que utilizó Buldum en el año 2017 [1] hasta el uso de sonicadores como el usado por Teimouri en el 2018 [2] para asistir con el proceso de aplastamiento de la superficie.

La investigación se desarrolló en 4 etapas, en la primera etapa se definieron los factores más influyentes dentro del proceso de bruñido y de acuerdo a la experiencia y los cálculos matemáticos usados por otros autores se establecieron unos valores que se utilizaron para realizar un diseño de experimentos que permitió relacionar las variables para el bruñido de piezas de acero fabricadas en SAE 12L14. Posteriormente, se realizó un modelo CAD para simular el proceso y se realizó un análisis por elementos finitos cuyos resultados se compararon con los resultados teóricos obtenidos en la primera etapa. Luego, se construyó un mandril de bruñido procurando que su fabricación fuese lo más sencilla posible y para finalizar, se realizó una validación experimental de los parámetros obtenidos teóricamente que se comparó con los datos obtenidos mediante simulación y se evaluó la calidad del modelo CAD y la simulación para futuros experimentos con otros materiales.

Para el desarrollo de esta investigación, se seleccionó el acero SAE 12L14, teniendo en cuenta que la característica más relevante de este material es que cuenta con un porcentaje de maquinabilidad del 160% (tomando como base 100% el acero SAE1212), esto quiere decir que presenta un gran ventaja dado que su tiempo de mecanizado es menor y por lo tanto más económico, sin embargo, dada su composición química que incluye Plomo (Pb) y Azufre (S), tiende a fallar prematuramente cuando se somete a elevadas temperaturas, esto quiere decir, que no se aconseja realizar tratamientos térmicos ni procedimientos de soldadura ya que generan fallas en el material. Dadas estas características, se considera que el material es óptimo para realizar el proceso de bruñido con esfera teniendo en cuenta que utilizando este proceso se puede llegar a mejorar la

dureza superficial del material a través de la deformación plástica superficial y también se aumentara la resistencia a la fatiga y a la corrosión de las piezas, sin embargo, en este documento no se estudiara el alcance de estas mejoras.

1. Marco Teórico

El bruñido con esfera es un proceso de manufactura que se ha venido desarrollando desde la década de 1970, en la actualidad varios autores han desarrollado metodologías de simulación y desarrollos matemáticos [3] que permiten predecir los valores de rugosidad final e incluso los valores de tensiones residuales en las piezas que se someten al proceso.

A continuación, se hace un recuento de algunas investigaciones que han sido relevantes para este proyecto y que permitirán contextualizar al lector de los factores más influyentes dentro del proceso de bruñido, así como las metodologías utilizadas por otros autores para comparar resultados teóricos con resultados prácticos y los métodos de caracterización utilizados por los mismos para validar la efectividad del proceso.

1.1 Estado del arte

1.1.1 Nacional

En el panorama nacional se ha encontrado poca información referente al bruñido con esfera y su uso como mejora de superficies; en el año 2018, Coba-Salcedo [4] realizó un estudio sobre la influencia de la deformación plástica a una superficie torneada fabricada de acero SAE 1045, en su investigación, el autor desarrolla una herramienta con un rodillo de 3 mm de espesor el cual se encarga de realizar la deformación plástica sobre la superficie de la probeta, la probeta tiene de 53 mm de diámetro exterior, y se divide 9 secciones, 8 para experimentación 1 una rectificada para hacer la comparación de las rugosidades; también realiza un diseño de experimentos 2^3que el que varía el avance y la fuerza de bruñido.

Las conclusiones del autor son:

- En todas las aplicaciones hubo mejora superficial, sin embargo, la mejor se obtuvo a una velocidad de 0.055 mm/rev.
- Los mejores resultados se obtuvieron cuando se utiliza una fuerza de bruñido baja.

El mismo año, Columbie [5] realizó 9 experimentos en los que utilizo distintas variables de entrada como la fuerza de bruñido (500 N-2000 N), la velocidad de bruñido (27 RPM – 110 RPM) y el avance (0.075 mm/rev – 0.25 mm/rev) para evaluar el comportamiento de la variable dureza (HV) en una probeta de acero SAE 1045, también utilizan microscopia óptica para analizar el endurecimiento por deformación a través del deslizamiento de los granos.

Las conclusiones de los autores son:

- La capacidad de endurecimiento del material aumenta conforme aumentan los valores de fuerza, velocidad y avance de bruñido.
- Los resultados muestran que la estructura cristalina disminuyo después de realizar la compresión dinámica de las muestras.

1.1.2 Internacional.

En el campo internacional, se encontró que el bruñido por esfera o ball burnishing como su traducción en inglés, es un proceso de post-mecanizado que se utiliza desde la década de 1970 para realizar mejoras de superficie, las investigaciones de los autores se enfocan en estudiar la rugosidad superficial del material, la microdureza, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión a las piezas que son sometidas a este procedimiento.

A continuación, se presentan algunas investigaciones que servirán de referencia para el desarrollo de este proyecto.

En el documento "*An investigation of ball burnishing process on CNC lathe using finite element analysis"* Stalin John [6] realiza una operación de bruñido en un torno CNC y busca comparar los resultados de rugosidad y estrés residual con base en un programa de elementos finitos llamado DEFORM2D.

El autor utiliza un modelo matemático para calcular la fuerza de penetración de la esfera utilizando la ecuación de Hertz, también define una ecuación para definir en avance con respecto a la rugosidad esperada y finalmente establece un modelo flujo de esfuerzos con base en la ecuación de Johnson-Cook.

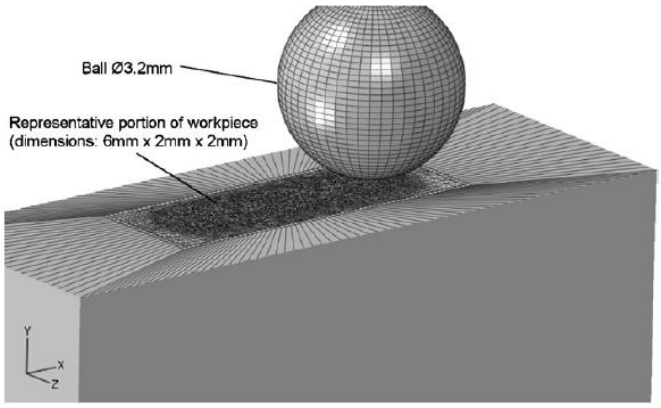
El autor utiliza una esfera de carburo de tungsteno como herramienta de deformación ya que la pieza a trabajar está fabricada en acero para herramientas AISI D3, el autor utiliza diferentes técnicas para realizar la caracterización de las piezas como difracción de rayos X para medir los esfuerzos residuales.

Las conclusiones más importantes de la investigación son:

- La desviación mínima y máxima de rugosidad superficial entre la comparación de los valores experimentales y simulados de rugosidad fue de 3.22% y 8.69% respectivamente.
- La desviación mínima y máxima de esfuerzo residual entre la comparación de los valores experimentales y teóricos fue de 1.23% y 3.57% respectivamente.

En el año 2012 Ballant [7] propuso una técnica para modelado de bruñido por esfera para realizar análisis por elementos finitos. Inicialmente, selecciona una porción de material que represente el comportamiento de la pieza a trabajar como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Modelo geométrico y mallado de la porción de material a análisis junto con la esfera de trabajo.



Consultado [7] P. Balland, L. Tabourot, F. Degre, y V. Moreau, «Mechanics of the burnishing process», Precis. Eng., vol. 37, n.o 1, pp. 129-134, ene. 2013, doi:

Para los parámetros de entrada del análisis, utiliza elementos de tipo tetraedro lagrangiano de 4 nodos para realizar el mallado, y utiliza como material de la esfera un acero (11SMn30) para que esta sea un elemento rígido, en cuanto al modelo establecido por el software, se seleccionó un modelo elastoplástico para trabajar después de la zona de fluencia.

Los aportes más importantes de esta investigación son:

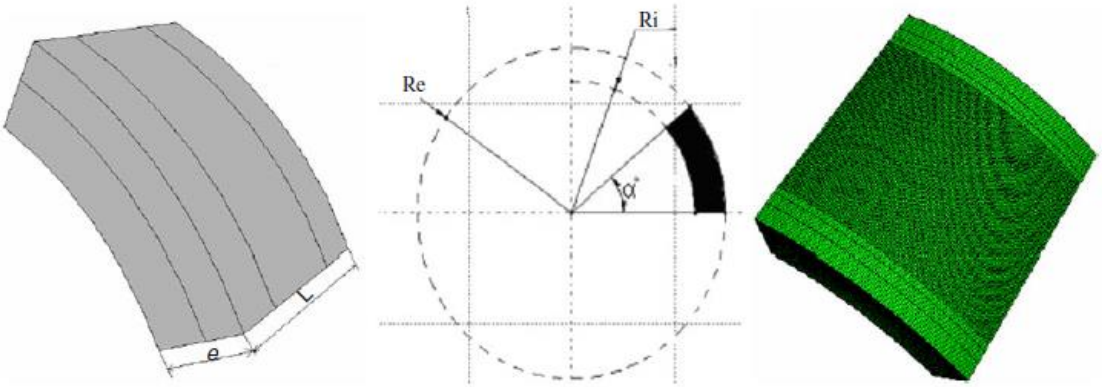
- Definir la técnica de porción característica para realizar los análisis por elementos finitos.
- Establecer el modelo elastoplástico para realizar el análisis por elementos finitos de los experimentos que se van a realizar.

En el 2013, el autor Sayahi et al. en su investigación *"Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments"* [8] realiza una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los obtenidos mediante simulación 2D y 3D con el fin de entender la mecánica del bruñido con esfera y obtener un modelo que permita predecir los esfuerzos residuales después de realizar la operación de bruñido.

El autor realiza en análisis en 3D a una porción característica (Figura 2) de la pieza a trabajar, esta tiene unas dimensiones generales de:

L= 7 mm; a= 50°; e= 2 mm; Rc = 7.5 mm.

Figura 2. Porción característica de material a analizar.



Consultado [8] M. Sayahi, S. Sghaier, y H. Belhadjsalah, «Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments», Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 67, n.o 5-8, pp. 1665-1673, jul. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-

Las conclusiones más representativas del autor fueron:

- Utilizando la misma fuerza de bruñido y el mismo avance, se obtiene que una esfera de mayor tamaño es más efectiva en el proceso de bruñido.
- El autor tiene en cuenta varias revoluciones de la pieza a trabajar hasta que logra la estabilización de la presión de bruñido.

En el año 2018, en su trabajo *"Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel",* Saldana- Robles et al. [9] Realiza un diseño de experimentos 3^3 con replica para definir los parámetros más influyentes en el bruñido del acero SAE 1045, la variable de respuesta fue la rugosidad Ra, luego de las pruebas experimentales se realizó un ANOVA con los resultados obtenidos y se encontró que los

factores que más influyen en la rugosidad son la fuerza de bruñido, el avance de bruñido, y la interacción del avance con la fuerza.

Adicional a estos resultados, el autor refiere que el bruñido con esfera disminuye hasta 12 veces la susceptibilidad a la corrosión respecto a la pieza torneada, estos datos se toman de acuerdo a la corriente promedio de corrosión y el potencial de corrosión.

Las conclusiones más importantes del autor son:

- La rugosidad Ra tuvo una mejora de 83% respecto a la superficie torneada.
- La dureza superficial aumento un 14% aproximadamente.
- El análisis estadístico mostro que la velocidad de bruñido no influye en la rugosidad final.
- Las estadísticas indican que solamente la fuerza de bruñido afecta la dureza superficial de la pieza.

En la investigación realizada en el 2018, BULDUM [1] realiza un estudio de la rugosidad y la microdureza superficial de una aleación de magnesio en la que se usó el bruñido con esfera, en este trabajo, el autor desarrolla un diseño experimental tipo Taguchi en el que involucra distintas variables de entrada: N° de pasadas (2), Fuerza de bruñido (3), Velocidad de bruñido (3) y avance de bruñido (3). Como resultado del diseño de experimentos solo se realizaron 18 corridas con las siguientes conclusiones:

- La fuerza y el avance son factores determinantes en la mejora de la rugosidad.
- El número de pasadas también mejora la rugosidad, sin embargo, causa un deterioro en la dureza superficial.
- El avance causa una disminución de rugosidad y aumento de dureza.

Por su parte el autor Randjelovic et al. [10] en su investigación trabaja en el desarrollo de un modelo matemático apoyado con FEM en el que pretende alcanzar una rugosidad específica a partir de la profundidad de penetración de la herramienta de bruñido en una superficie que ha sido previamente mecanizada con un proceso de fresado. El autor refiere que muchos investigadores han trabajado en el desarrollo de parámetros estandarizados para la utilización del bruñido con esfera, sin embargo explica que existen muchas variables que impiden llegar a valores definitivos ya que existe un proceso previo de mecanizado en el que el punto de partida para realizar el proceso no es siempre el mismo, además, también es enfático en decir que las máquinas y las herramientas que se utilizan difieren en cada una de las consultas realizadas.

Dentro de las conclusiones más importantes del autor se pueden resaltar las siguientes:

- La importancia de la indentación inicial para llegar a alcanzar una rugosidad específica para iniciar el procedimiento de bruñido.
- La rugosidad mínima Ra se obtiene mientras la profundidad de penetración de la esfera se acerque más a la altura de pico Rp.

Por su parte, en su investigación, Travieso [11] desarrollo una herramienta para la el uso del bruñido con esfera en la mejora del acabado superficial de moldes de inyección, esta herramienta consiste en un bastidor de tipo hidrostático que cuenta con un manómetro que permite controlar la presión de bruñido sobre las piezas, en este trabajo el autor evalúa el uso de la herramienta sobre piezas de aluminio y acero previamente mecanizadas en una maquina CNC, el autor propone un número adimensional de bruñido el cual es calculado a través de un modelo físico y en el que se involucran la geometría de las piezas, la geometría de la esfera, la velocidad de deformación, y el módulo de elasticidad del material a bruñir entre otros. Las superficies de las probetas que son utilizadas para los experimentos son: planas, convexas y cóncavas.

Los resultados más representativos del autor son:

- Se presenta un fenómeno que el autor denomina autoendurecimiento que cambia en función a la velocidad de la deformación superficial, cabe aclarar, que este valor es inherente a cada material y para el experimento solo se presenta en el aluminio.
- El ancho de la capa afectada por el bruñido es de aproximadamente 20 µm.
- Se aumenta la microdureza en un 4% en superficies planas y hasta un 17% en superficies convexas, esto contribuye a mejorar el coeficiente de fricción de las superficies tratadas y aumentar su resistencia al desgaste.

En el año 2021, Attabi et al [12], estudian las mejoras que se pueden alcanzar utilizando el proceso de bruñido con esfera en implantes ortopédicos fabricados en acero inoxidable 316L respecto a la microdureza y resistencia al desgaste. Finalizada la investigación, encontraron que el proceso de bruñido aumenta la microdureza de la superficie en un 38% y reduce el desgaste en un 65%.

Las conclusiones más importantes de los autores son:

- El factor de número de pasada presenta el mayor aumento de microdureza en la superficie.

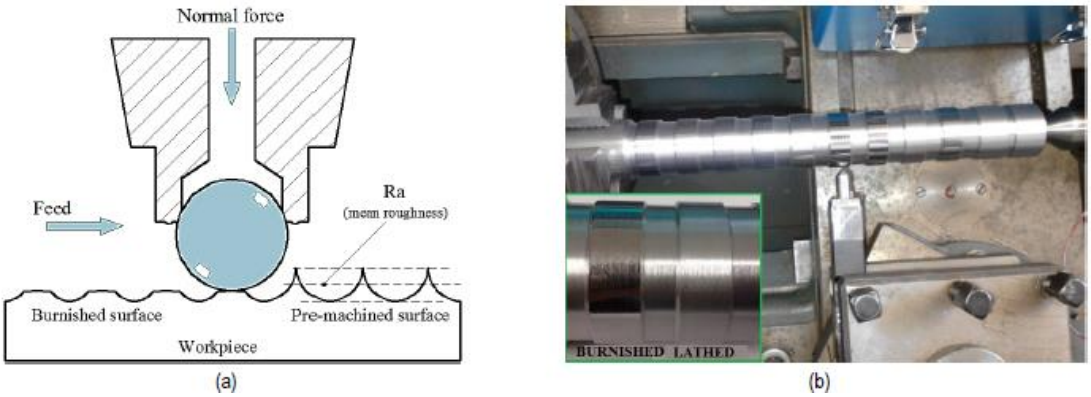
- El proceso de bruñido con esfera disminuyo el coeficiente de fricción de la superficie en un 8.57%.
- No se presentó un cambio en las fases del acero inoxidable 316L, pero si se presentó un refinamiento de grano en la superficie.

1.2 Proceso de bruñido.

1.2.1 Introducción.

El proceso de bruñido con esfera o Ball Burnishing (por su traducción en inglés) consiste en aplanar los picos de las irregularidades superficiales de una pieza utilizando una esfera de material duro como se muestra en la figura 3, esto causa que se generen deformaciones plásticas en la superficie y se logren mejoras físicas y mecánicas de las piezas.

Figura 3. Proceso de bruñido con esfera a) Esquema; b) Proceso aplicado en una operación de torneado.



Consultado [12] A. S. Robles, J. A. D. D. L. Peña, A. D. J. B. García, E. A. Gómez, H. P. Mora, y N. S. Robles, «Ball burnishing process: state of the art of a technology in development», DYNA, vol. 92, n.o 1, pp. 28-33, ene. 2017, doi: http://dx.doi.org/10.6036/7

El proceso de bruñido es usado para mejorar el acabado superficial de piezas que han sido previamente mecanizadas logrando una disminución de rugosidad de una forma rápida y económica, si lo comparamos con los procesos actuales de mejora superficial como el rectificado o el electropulido el bruñido genera menos residuos y si lo comparamos con procesos de endurecimiento como un tratamiento térmico el bruñido consume menos energía. El proceso induce esfuerzos residuales compresivos en la superficie de las piezas de trabajo, esto causa que se aumente la resistencia al desgaste y la fatiga, y también se

mejora la resistencia a la corrosión, por esta razón, actualmente es utilizado para la fabricación de piezas de la industria automotriz, aeronáutica, aeroespacial, entre otras.

El elemento deformante que se utiliza es una esfera que usualmente está fabricada en un material duro (carburo de tungsteno, nitruro de titanio o acero endurecido), esto permite que las fuerzas de bruñido sean bajas y la fricción entre elementos sea menor. Los diámetros de esfera utilizados usualmente rondan entre 3 y 12 mm, este elemento es muy importante dado que varios parámetros de bruñido dependen del diámetro de la esfera que se vaya a utilizar para realizar el proceso, ya que el objetivo es alcanzar una penetración determinada y al aumentar el diámetro de la esfera, el área de contacto entre elementos será mayor y la fuerza de bruñido (F) aumentara. Así mismo sucede con el avance, se puede alcanzar una rugosidad deseada (inherentes al cilindrado) en un menor tiempo, aumentando la velocidad de avance (f) cuando la esfera es de un diámetro más grande.

1.2.2 Fuerza

La fuerza de bruñido es el parámetro más importante dentro del proceso de acuerdo a los resultados obtenidos por los autores consultados ya que este relaciona la profundidad de penetración de la esfera respecto de la superficie a trabajar.

Para definir teóricamente la interacción de contacto de dos superficies que se tocan pero que no presentan fricción entre ellas se utiliza la ecuación de contacto de Hertz [13], esta permite calcular variables como: el área de contacto entre superficies, los esfuerzos de Von Mises, y la profundidad de indentación entre dos elementos que pueden ser: esfera y plano, esfera-esfera, cilindro-cilindro o cilindro y plano.

Pikurs et al [14] empieza su investigación definiendo el contacto entre una esfera y un cilindro, esta interacción es representada por la ecuación (1), con esta se puede calcular la altura de indentación (u), Sin embargo, para calcular este valor, se necesitan los valores de E_1 y E_2 que son los módulos de elasticidad de los materiales en contacto y v_1 y v_2 que son las relaciones de Poisson de los elementos que se encuentran en contacto ecuación (2)

$$u = \left(\frac{2F^2}{E.^2R}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

Ecuación 1 Altura de indentación entre una esfera y un plano.

Donde:

u = Altura de indentación.

F = Fuerza para indentación.

$E.$= Factor de módulo de elasticidad.

R = Radio de esfera.

$$\frac{1}{E.} = \frac{1}{2}\left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}\right) \quad (2)$$

Ecuación 2 Relación de propiedades mecánicas de los materiales en contacto.

v_1 = Relación de Poisson de elemento 1.

v_2 = Relación de Poisson de elemento 2.

E_1 = Modulo de elasticidad de elemento 1.

E_2 = Modulo de elasticidad de elemento 1.

1.2.3 Avance

El avance (f) es otro parámetro importante dentro del proceso de bruñido ya que de este depende la distancia y altura entre crestas resultantes posterior al pasó de la esfera sobre la superficie. Al ser un proceso similar al cilindrado en una operación de torneado, y al tratarse de una esfera con un radio determinado (R), se puede hacer un símil con las ecuaciones que se utilizan durante dicho proceso, para este caso, la ecuación de rugosidad superficial teórica (3) relaciona la rugosidad de la pieza con el avance.

$$h(\mu m) = \frac{f^2 * 1000}{8 * R} \quad (3)$$

Ecuación 3 Ecuación de rugosidad superficial teórica.

Donde:

$h(\mu m)$= Altura

f= Avance

R= Radio de la herramienta

Es importante aclarar que el objetivo del bruñido es disminuir la rugosidad superficial, por esta razón, todas las variables implicadas en el proceso se deben establecer en función a un valor de rugosidad requerido. Sin embargo, y para tener un referente en esta investigación, los valores de avance utilizados por otros autores oscilan entre 0.01 y 0.8 mm/rev. Este rango tan amplio, se atribuye en gran medida a: el diámetro de la esfera, el acabado superficial de la pieza previo al bruñido y el tipo de material a bruñir.

1.2.4 Velocidad.

La velocidad de bruñido (n) tiene diferentes resultados frente a la rugosidad final, algunos autores refieren que mientras mayor sea la velocidad de bruñido menor será la rugosidad final de la pieza [6] , sin embargo, es importante tener en cuenta que dado que se trata de dos elementos que giran recíprocamente, al utilizar valores muy altos de velocidad se podría generar un aumento de temperatura significativo en los materiales. Este parámetro define el tiempo de proceso, por esta razón es un factor determinante a la hora de evaluar los costos de operación.

Según Saldaña-Robles [15] el 70% de las investigaciones utiliza valores de velocidad menores a 53 m/min, sin embargo, en su investigación "*Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel"* concluye que para el acero SAE 1045 la velocidad de bruñido no significó un factor representativo comparado con la Fuerza de bruñido (F) y el avance (f) .

Para definir los valores óptimos de velocidad es importante tener en cuenta: el material de la pieza a bruñir, el diámetro y material de la esfera y si se utiliza algún tipo de lubricación para realizar el proceso.

1.2.5 Número de pasadas.

El número de pasadas (N) es otro factor influyente dentro del proceso de bruñido, este busca mejorar una superficie que ya fue bruñida previamente. De acuerdo a la información recolectada por Saldaña-Robles [15] el número de pasadas óptimo para el bruñido es entre 2 y 3, sin embargo, hay que ser muy cauteloso con este valor ya que luego de un proceso de bruñido se generan una serie de esfuerzos residuales debido a la deformación de la superficie, esto quiere decir que un nuevo proceso de bruñido podría llegar a causar "peeling" o descamación de la superficie de la pieza por el efecto del endurecimiento superficial.

1.3 Estado superficial.

1.3.1 Rugosidad

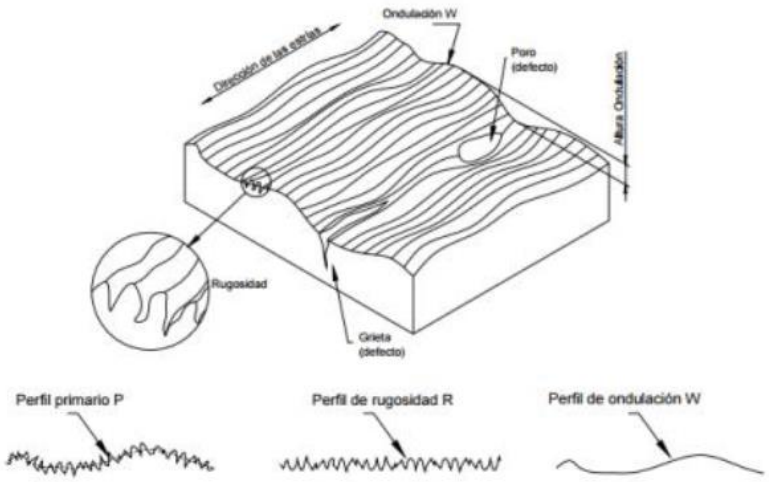
La rugosidad de una pieza está definida por el proceso de manufactura mediante el que fue fabricada y se define de acuerdo al trabajo que la pieza vaya a realizar durante su vida útil. Esta característica es importante ya que factores como la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión de una pieza dependen de su acabado superficial.

La definición de rugosidad es el conjunto de irregularidades que presenta la superficie de una pieza fabricada mediante algún proceso de manufactura como fundición, laminado, mecanizado o rectificado, cuando es un proceso de mecanizado, esta depende de los

parámetros de corte y herramienta utilizados para su fabricación. En el sistema internacional (SI) la unidad de medida para la rugosidad es el micrómetro (1 µm=0.001 mm).

La superficie de una pieza está compuesta por un perfil primario denominado en la figura 4 como P, este es la combinación del perfil de rugosidad R y el perfil de ondulación W, este último tiene forma de onda y está definido por errores de ajuste inherentes a la máquina que se utilizó para realizar el proceso de acabado, por otra parte, el perfil R son las imperfecciones correspondientes a los parámetros y herramienta de corte que se usan durante el mecanizado.

Figura 4. Perfiles de una superficie.



Consultado [16] D. Torrejón Magdaleno, «Estudio de la adhesión en la rugosidad del aluminio», 2013, Accedido: dic. 07, 2020. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/17997.

Posteriormente, se define como referencia la línea media que es un sistema en el que se comparan las desviaciones respecto a una línea ideal, en este documento se va a utilizar este sistema para realizar las mediciones de rugosidad.

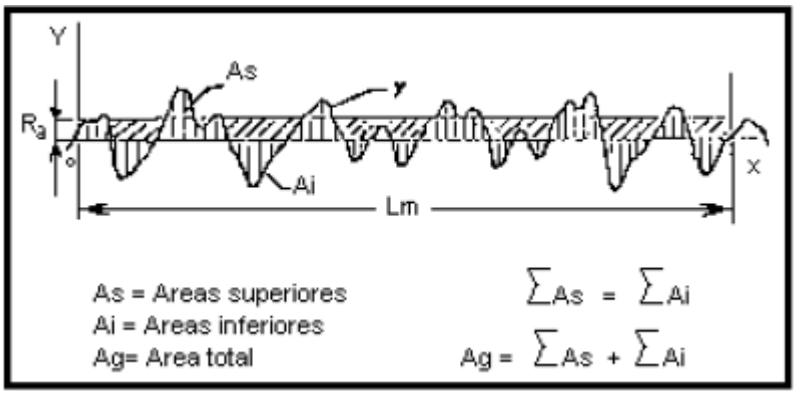
La norma DIN 4768 establece el método de la línea media para calcular los valores de rugosidad sobre una superficie, este se calcula de forma tal en la que se traza una línea en la cual el área de la rugosidad es igual tanto en la parte superior como en la parte inferior de la longitud de muestreo L_m definida.

Para esta investigación se utilizan los parámetros de rugosidad que se pueden medir con base en la medida de la profundidad de la rugosidad, estos parámetros se definen mediante R_x, siendo el subíndice x el método de cálculo que se usa para cuantificar la

rugosidad. El método más utilizado para calcular la rugosidad es R_a que es estandarizado y es el que refiere la norma internacional DIN 4768 para indicar tolerancias dimensionales.

R_a, llamada rugosidad media aritmética (Figura 5), es la media de los valores absolutos de las áreas que se encuentran entre el perfil de rugosidad y la línea media dentro de la línea longitud de medición L_m.

Figura 5. Esquema representativo de Ra.



Consultado [14] GRUPO TECNOLOGÍA MECÁNICA, «RUGOSIDAD SUPERFICIAL». http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf.

La ecuación 4. define el cálculo de R_a:

$$R_a = \frac{1}{L_m}\int_0^{L_m}|y|\,dx \tag{4}$$

Ecuación 4. Ecuación para el cálculo de la rugosidad media aritmética.

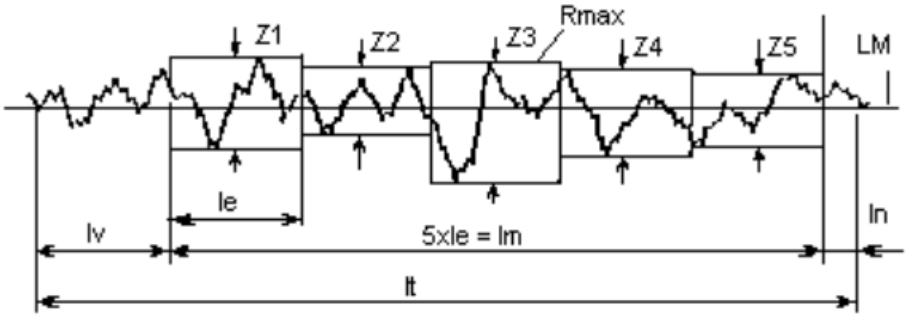
R_a = Rugosidad aritmética.

L_m = Longitud de muestreo.

$|y|$ = Valor absoluto de las ordenadas verticales.

R_z, Rugosidad media, es el promedio de las alturas de pico a valle, La norma DIN 4768 lo define que se debe tomar como base la curva R, este es el promedio de las diferencias (Z_i) entre el pico más alto y el valle más bajo de cinco sucesivas longitudes de muestreo (L_e) Figura 6.

Figura 6. Esquema representativo de Rz.



Consultado [14] Grupo tecnología mecánica, «Rugosidad superficial». http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf.

Igual que R_a el valor de R_z también está definido por una ecuación matemática:

$$R_z = \frac{1}{5}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5) \quad (5)$$

Ecuación 5. Ecuación para el cálculo de la rugosidad media.

R_z = Rugosidad media.

z_i = Promedio de las diferencias.

La norma ISO 4288-1996 define un filtro para que las medidas de rugosidad no se vean afectadas por las ondulaciones, este se denomina sección de corte (λm) y equivale a una porción de la longitud de muestreo (Lm). La tabla 1 relaciona los valores de R_a con una longitud de muestreo (Lm) con el fin de evitar errores durante la medición.

Secciones de corte recomendadas (ISO 4288-1996)				
Perfiles periódicos	**Perfiles no periódicos**		**Sección de corte**	**Longitud de muestra / longitud a evaluar**
Distancia de espaciamiento RSm (mm)	Rz (µm)	Rz (µm)	λm (mm)	λm (mm) / L
> 0,013 -0,04	To 0,1	To 0,02	0,08	0,08/0,4
> 0,04-0,13	> 0,1-0,5	> 0,02-0,1	0,25	0,25/1,25
> 0,13-0,4	> 0,5-10	> 0,1-2	0,8	0,8/4
> 0,4-1,3	> 10-50	> 2-10	2,5	2,5/12,5
> 1,3 - 4,0	> 50	> 10	8	8/40

Tabla 1. Valores recomendados de sección de corte y lm para diferentes valores de rugosidad según la norma ISO 4288-1996.

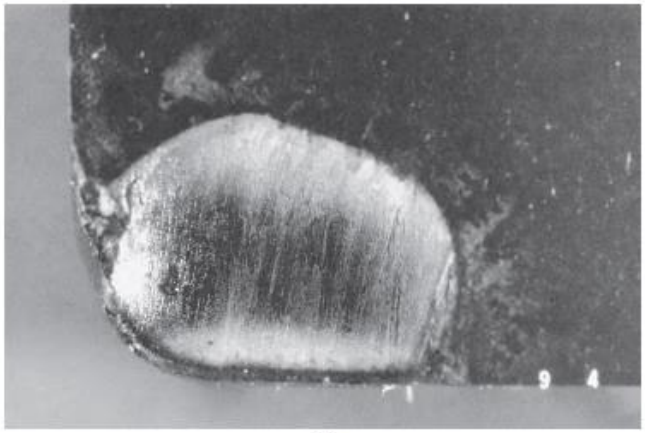
Estos son los valores de rugosidad que se van a utilizar en este documento ya que estos son los que puede entregar el instrumento de medición que se va a utilizar, sin embargo, según la norma ISO 4288-1996, existen más valores de rugosidad que pueden caracterizar la superficie de una pieza, se invita al lector a que haga una lectura más profunda del tema.

1.4 Técnicas de caracterización

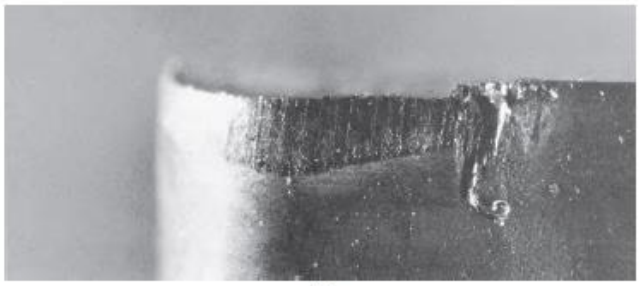
1.4.1 Microscopía óptica

La microscópica óptica es una de las técnicas de caracterización usada para observar la heterogeneidad superficial de una pieza, como se muestra en la figura 7. En esta técnica se pueden evidenciar los defectos de fabricación, delaminaciones, grietas o porosidades que no se puede observar con la técnica de micrografía. Usualmente se utiliza una magnificación entre 7X hasta 45X [17].

Figura 7. Ejemplo del uso de un microscopio estereoscópico para observar el cráter (a) y el flanco (b) desgastado de un inserto de carburo cementado para mecanizado.



(a)



(b)

Consultado [18] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2020.

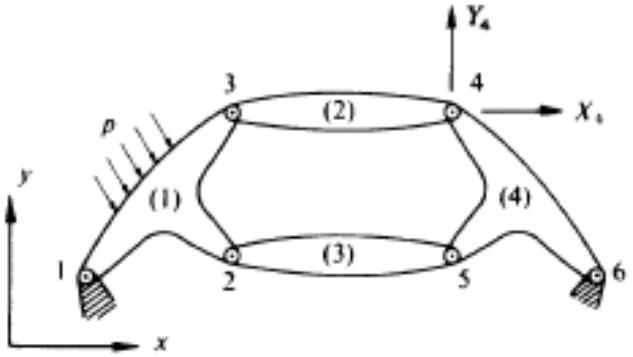
1.5 Simulación por elementos finitos.

1.5.1 Generalidades.

El método de elementos finitos consiste en tomar un cuerpo y dividirlo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, cuando el resultado de estas divisiones da como resultado un número finito de componentes bien definidos se dice que es un problema “discreto”, sin embargo, hay ocasiones en las que las subdivisiones siguen indefinidamente y el número de elementos tiende a ser infinito, a estos problemas se les conoce con el nombre “continuos”.

Para definir un problema discreto, se analizará una estructura plana en la que los elementos están conectados entre sí mediante articulaciones (figura 8).

Figura 8. Estructura típica formada por elementos interconectados.



Consultado [19] O. C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*. Reverté, 2010.

Como se puede ver en la figura 8, el elemento (1) está sometido a una presión externa P, esta presión genera reacciones en cada uno de los apoyos o nodos del elemento que están compuestas por unos desplazamientos (a^1) y por una fuerza de reacción (q^1). Como se muestra en la ecuación 6, las fuerzas de reacción y desplazamientos se pueden representar matricialmente de la siguiente manera:

$$q^1 = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ q_3^1 \end{Bmatrix} \quad q_1^1 = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix}, \quad etc. \qquad a^1 = \begin{Bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ a_3^1 \end{Bmatrix} \quad a_1^1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}, \quad etc. \quad (6)$$

Ecuación 6. (q^1) Matriz de fuerzas nodales en elemento 1.; (a^1) Matriz de desplazamientos nodales de elemento 1.

Donde:

q^1 = Reacciones en elemento 1.

q_1^1 = Reacciones en el nodo 1 del elemento 1.

U_1= Reacciones en la dirección 1 del nodo 1.

a^1 = Desplazamientos en el elemento 1.

a_1^1 = Desplazamientos en el nodo 1 del elemento 1.

U_1 = Desplazamientos en la dirección 1 del nodo 1.

Como se puede observar en la ecuación 6 cada punto nodal tiene un desplazamiento específico y una fuerza de reacción en un instante de tiempo determinado. Sin embargo, es importante relacionar estos dos parámetros y una forma sencilla de definirlo es asimiento que el elemento presenta un comportamiento elástico-lineal que se puede expresar de la siguiente forma (ecuación 7).

Ecuación 7 Relación de fuerzas inducidas en función de los desplazamientos.

$$q^1 = K^1 a^1 + f_p^1 + f_{\varepsilon_0}^1 \tag{7}$$

Consultado [15] O. C. Zienkiewicz, El método de los elementos finitos. Reverté, 2010.

Donde:

$\boldsymbol{K^1}$ = Matriz de rigidez.

f_x^x = representan las fuerzas nodales necesarias para poner en equilibrio el sistema. Así mismo, se pueden calcular las tensiones o reacciones internas dentro del elemento en función a los desplazamientos de la siguiente manera (ecuación 8).

Ecuación 8 Relación de tensiones internas en función de los desplazamientos.

$$\sigma^1 = S^1 a^1 + \sigma_p^1 + \sigma_{\varepsilon_0}^1 \tag{8}$$

Consultado [15] O. C. Zienkiewicz, El método de los elementos finitos. Reverté, 2010.

Donde:

$\boldsymbol{S^1}$ = Matriz de tensiones.

σ_x^x = son las tensiones resultantes de las cargas externas que actúan sobre el elemento o por tensiones iniciales cuando los nodos están fijos.

Para ambas ecuaciones se define una nueva matriz de valores conocidos que permite calcular las tensiones, reacciones o esfuerzos internos en cualquier punto de la estructura. Análisis tridimensional.

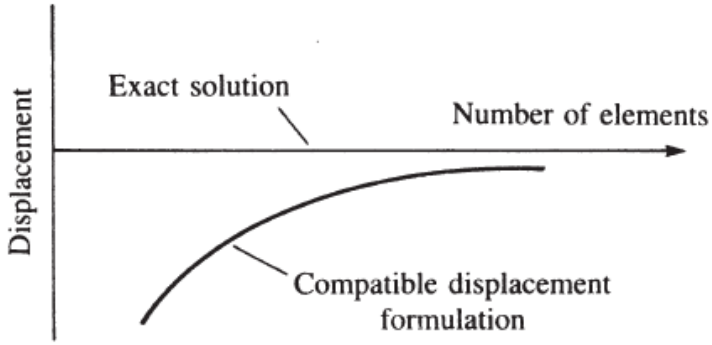
La mayoría de casos prácticos del método de los elementos finitos se aplica en cuerpos tridimensionales, sin embargo, siempre se aconseja desarrollar un modelo bidimensional que represente el problema ya que estos modelos suelen ser más económicos debido al gasto computacional durante su desarrollo. Para entender la razón de este argumento, podemos tomar como ejemplo una región plana cuadrada de malla 10 x 10, esto significa que este elemento tiene 100 nodos, teniendo en cuenta que cada nodo tiene un desplazamiento en dos direcciones, se generan 200 ecuaciones simultáneamente, ahora, suponiendo que evaluamos el mismo elemento de 3 dimensiones con malla cubica de 10 x 10 x 10, quiere decir que este elemento tendrá 1000 nodos y se generaran 3000 ecuaciones dado que se presenta desplazamiento nodal en 3 direcciones.

1.5.2 Cálculo y análisis de resultados.

Como se vio anteriormente, el método de los elementos finitos consiste en desarrollar un gran número de ecuaciones con un gran número de incógnitas mediante el uso de técnicas de métodos numéricos para encontrar una serie de desplazamientos que se relacionan con unas fuerzas externas para definir el comportamiento de un elemento bajo una carga. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, durante el proceso de desarrollo, estas técnicas numéricas usualmente entregan como resultado aproximaciones que no siempre cumplen todas las condiciones de equilibrio y compatibilidad para satisfacer la ecuación de la elasticidad, por esta razón es importante recordar que la técnica de los elementos finitos es una manera práctica de soluciones numéricas aproximadas a un problema.

Durante el cálculo de los resultados, el método de los elementos finitos procura entregar resultados de desplazamientos muy cercanos a los resultados reales, no obstante, es responsabilidad de usuario determinar el tamaño del mallado que define en cuantos elementos nodales se va a realizar la división de la pieza a analizar, ya que (como se ve en la figura 9), de acuerdo a este criterio, se va a obtener una convergencia de la solución más sólida y acertada.

Figura 9. Convergencia de la solución de un elemento finito basado en la fórmula de desplazamiento compatible.



Consultado [20] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*. Cengage Learning, 2011.

Como se puede observar en la figura 9, la curva que define el acercamiento a la solución exacta es de tipo exponencial decreciente, por esta razón se puede llegar a un número de elementos tales que el resultado no tenga mayor variación a medida que estos aumentan. Este criterio es muy importante ya que como se mencionó en el capítulo anterior, a medida que aumentan el número de elementos (tamaño de malla) el número de ecuaciones también va a aumentar exponencialmente y el tiempo que va a tardar el solucionador en resolver el número de desplazamientos nodales va a ser mucho mayor.

Para llevar a cabo una simulación por elementos finitos, previamente se debe desarrollar un modelo CAD similar a la pieza que se va a analizar, posteriormente, el software que utiliza el MEF realiza una serie de cálculos y aproximaciones matemáticas para entregar un resultando en función a los desplazamientos nodales con respecto a su posición inicial, utilizando esta información, el software pueden calcular resultados tales como deformaciones unitarias, esfuerzos de Von Mises, factor de seguridad, entre otros. Sin embargo, es importante tener en cuenta durante la lectura de estos resultados, que existe una serie de aproximaciones tanto en el proceso de modelado CAD como en la solución matricial, que da como resultado un porcentaje de error que debe ser tenido en cuenta durante el análisis de dichos resultados.

1.6 Diseño experimental.

El diseño experimental consiste en definir cuáles y de qué forma se deben realizar determinados ensayos con el fin de obtener datos que al ser analizados estadísticamente permiten determinar cómo influyen todos los factores dentro del desarrollo de un proceso.

En el área de la investigación los métodos estadísticos son muy utilizados ya que estos permiten realizar la comparación entre la información teórica junto con las hipótesis, contra los datos obtenidos mediante la experimentación, posteriormente, estos resultados experimentales inciden sobre las hipótesis de tal forma que se crea una nueva hipótesis que también se valida mediante experimentación creando así un ciclo de obtención de conocimiento.

1.6.1 Etapas en el diseño de experimentos.

Para realizar un diseño de experimentos, es necesario definir cuales pruebas se van a realizar y cuantas repeticiones se van a hacer con el fin de obtener la mayor información posible al menor costo, es importante aclarar, que el investigador debe conocer respecto al tema que va a experimentar para tener un criterio acertado durante la selección de estos parámetros.

En su libro, Gutiérrez et al [21] presenta la siguiente lista para realizar un experimento:

1. **Entender y delimitar el problema u objeto de estudio:** Para realizar esta etapa es necesario estudiar respecto al tema con el fin de establecer el claramente la importancia del problema.
2. **Elegir las variables de respuesta que serán medidas para verificar que esto se haga de manera confiable:** Es necesario que las variables que se van a estudiar logren reflejar gran parte del problema, así mismo, se debe garantizar que los instrumentos de medición que se van a utilizar sean confiables y garanticen repetitividad para tener certeza de los resultados que se obtienen.
3. **Determinar cuáles factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo a la supuesta influencie que tienen sobre la respuesta:** Es necesario utilizar toda la información conocida respecto al problema para escoger los factores influyentes dentro del proceso, esto teniendo en cuenta que el resultado del análisis experimental mostrará cuál de los factores es o son los de mayor influencia.
4. **Seleccionar los niveles de cada factor, así como el del diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento:** En esta etapa se debe definir cuantas repeticiones se harán de cada experimento con el fin de mejorar la precisión de los resultados, sin embargo, hay que tener en cuenta que cada experimento tiene un costo económico y toma un tiempo determinado.
5. **Planear y organizar el trabajo experimental:** Esta parte consiste en organizar y planear en detalle el trabajo experimental con base en el diseño que se va a utilizar.

6. **Realizar el experimento:** Seguir las instrucciones definidas en el paso anterior con el fin de obtener una serie de resultados que permitan realizar un análisis de los datos para entregar un resultado satisfactorio.

1.6.2 Análisis de los resultados.

Posterior a los resultados, se realiza el análisis de los datos con el objetivo de encontrar una relación con la hipótesis planteada, no obstante, es importante tener claro que estos datos son obtenidos de unos datos muéstrales, no poblacionales; para saber si estos datos tienen influencia similar al comportamiento poblacional, hay que recurrir a métodos estadísticos como el ANOVA que permiten establecer esta relación.

1.6.3 Diseño experimental factorial.

Este diseño experimental permite estudiar el efecto individual y de interacción entre varios factores para una o varias respuestas cuando el interés sobre todos los factores es el mismo. Por ejemplo, cuando se utiliza un diseño factorial completa se corren todas las posibles combinaciones entre factores con sus correspondientes niveles a investigar.

La forma más común de notación de este diseño factorial es n^k donde k = N° de factores que se va a estudiar y n= es el número de niveles que se asignan a cada factor, esto quiere decir que si requerimos analizar 2 factores con 2 niveles cada uno, tenemos un experimento $2\ x\ 2 = 2^2 = 4$, esto quiere decir que para analizar los 2 factores se requiere realizar 4 experimentos para obtener datos que pueda utilizar para encontrar las relación entre los mismos y su incidencia dentro del resultado final del problema.

2. Desarrollo Experimental

A continuación, el lector encontrara la metodología utilizada para el desarrollo de esta investigación, dentro de cada capítulo se mostrarán las variables que condujeron a los resultados obtenidos al final del documento y los factores más relevantes para replicar esta investigación en futuros trabajos.

2.1 Selección del diseño experimental

Como se mencionó en el capítulo 1.2, el proceso de bruñido depende de varios factores que inciden directamente en el resultado obtenido, por esta razón, es primordial evaluar la importancia de cada factor dentro del resultado final con el fin de establecer cual presenta mayor relevancia en cuanto a la disminución de rugosidad se refiere, este diseño experimental también permite evaluar aspectos económicos a la hora de realizar el proceso ya que se entran a evaluar variables como el tiempo de proceso.

Para esta investigación se decidió utilizar un intervalo de confianza de 95%. También se evaluarán las variables de acuerdo a resultados obtenidos por otros autores, los resultados teóricos obtenidos mediante la ecuación de contacto de Hertz y la ecuación de altura obtenida mediante la ecuación teórica de acabado:

Factor	Valores	Criterios de selección.
Fuerza de Bruñido (F)	95 N	Con base en el 90%, 65% y 40% de carga máxima de la bola de transferencia y validando estos valores usando la ecuación de Hertz.
	166 N	
	237 N	
Avance de bruñido (f)	0.07 mm/rev.	Se asignan 3 valores procurando que el siguiente valor duplique el valor anterior, siendo el mayor valor igual al avance inicial de mecanizado.
	0.15 mm/rev.	
	0.3 mm/rev	
Velocidad de bruñido (V)	Bajo	Se seleccionan valores aleatorios siendo el más alto igual al valor del mecanizado y el menor considerablemente más bajo para evaluar la diferencia entre los resultados.
	Alto	
Número de pasadas (N)	1 pasada	De acuerdo a los autores consultados se evalúa una segunda pasada de bruñido bajo las mismas condiciones iniciales.
	2 pasadas	

Tabla 2. Lista de variables para el diseño experimental.

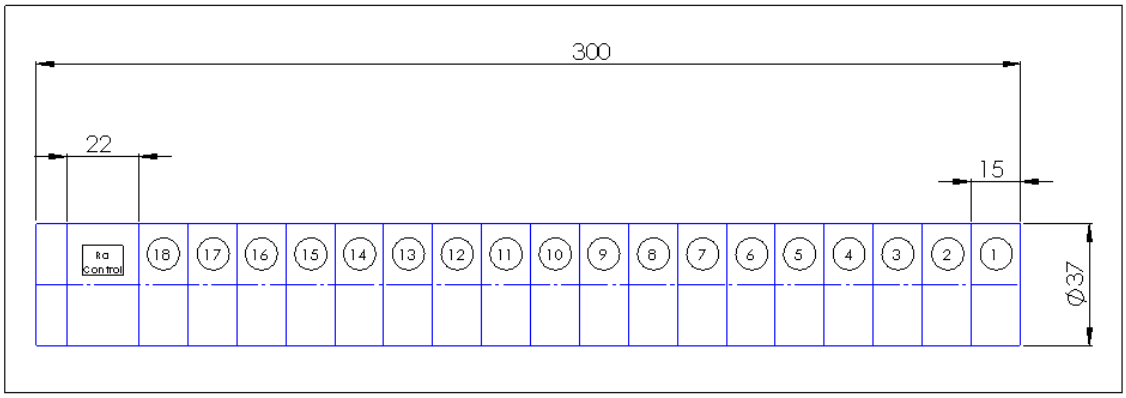
Para llevar a cabo la experimentación, se decide utilizar una barra de acero SAE 12L14 de diámetro inicial 38.1 mm (1 ½" in) de longitud de 300 mm. Posteriormente se realiza un cilindrado bajo las siguientes condiciones de corte:

Parámetro	**Valor**
Profundidad de corte (a_p)	1 mm
Avance por revolución (f_n)	0.3 mm/rev
Velocidad del husillo (*n*)	315 RPM
Inserto	ISKAR IC908 WMNG080408

Tabla 3. Lista de parámetros de corte para barra de prueba.

Como se muestra en la figura 10, cada barra es mecanizada y bruñida procurando que cada muestra experimental tenga una zona de medición de 15 mm. En la parte final se deja una zona mecanizada sin bruñir para realizar las mediciones de rugosidad inicial.

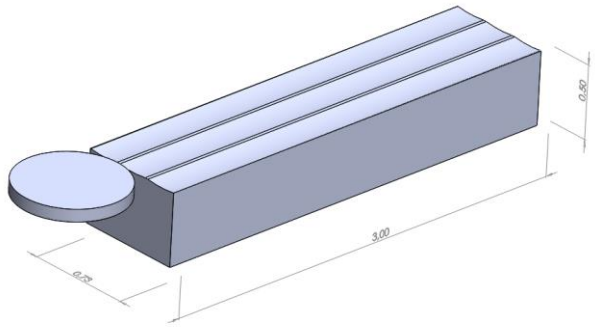
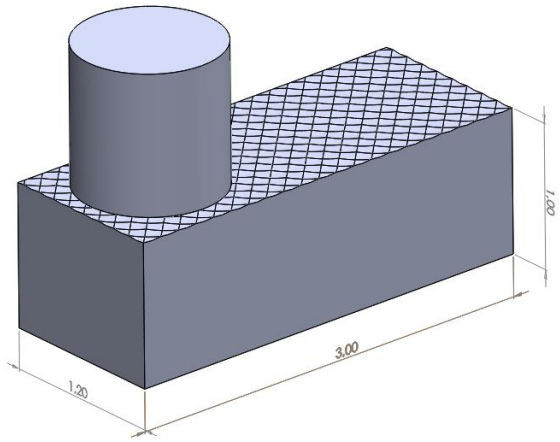
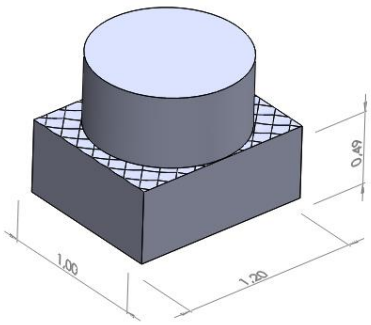
Figura 10. Esquema de distribución de zonas para bruñido de probetas.



Fuente: El autor.

2.2 Modelo CAD

Para llevar a cabo la simulación por elementos finitos, se realizó un proceso de refinamiento de la superficie hasta alcanzar un valor de *Ra* similar al obtenido en la probeta. Inicialmente, se realiza un dibujo en 3 dimensiones en el cual se simulan 2 elementos, el primer elemento es una porción de la esfera de bruñido y el segundo elemento es un desarrollo plano de la superficie, a medida que se avanza en el diseño, se observa que el gasto computacional y las restricciones de licencia requieren que se realicen geometrías más simples y por lo tanto más fáciles de solucionar. En la tabla 4 se presenta la evolución del modelo CAD para el desarrollo de la investigación, es importante aclarar que el tamaño de la esfera no es relevante para esta investigación y no representa un gasto computacional significativo durante la ejecución de la simulación.

Versión.	Modelo.	Descripción.
1		Se realiza el modelado del desarrollo de la superficie ideal de la barra, se toma una porción inicial de 3mm de longitud por 0.73mm de ancho y 0.5mm de espesor.
2		Teniendo en cuenta los documentos consultados, se observa que la superficie desarrollada de la pieza presenta mayor irregularidad, por lo tanto, se decide crear matrices de picos a lo largo de X y Y conservando el radio de la herramienta de corte, se mantiene la longitud de 3mm, se aumenta el ancho a 1.2mm y se aumenta la altura a 1mm de espesor para evitar errores causadores por restricciones.
3		Dada la gran cantidad de elementos generados en el modelo anterior, se decide disminuir el tamaño de la pieza a 1.2mm de largo, 1mm de ancho y 0.49mm de espesor.
4		Posterior a varias simulaciones realizadas,

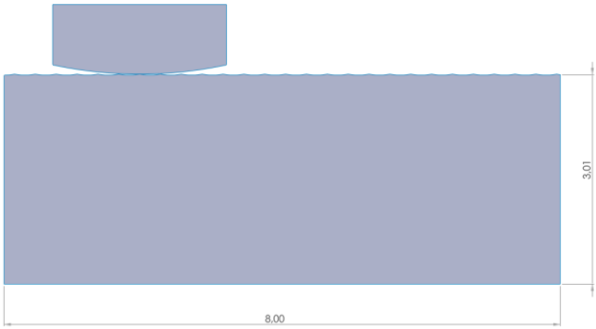
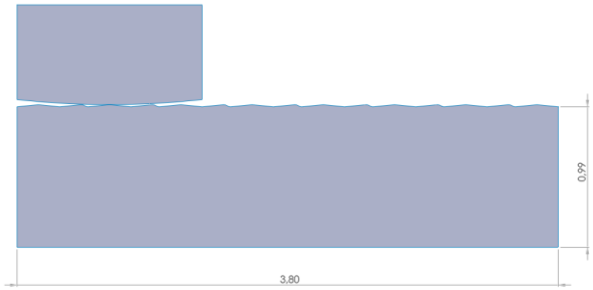
		se observa que el gasto computacional generado por una simulación en 3D es muy alta teniendo en cuenta que la ejecución de un tratamiento toma aproximadamente 50 horas y ocupa un espacio en disco duro de alrededor de 700 Gb, por esta razón, y con base en las metodologías usadas por otros autores como Rodriguez et al [22], se decide realizar un modelo en 2D. Este modelo emula la superficie de la pieza con base en la huella dejada por el radio de la herramienta. Este elemento tiene una longitud de 8mm y un espesor de 3mm.
5		La superficie a simular se evaluó de dos formas: Para la primera, se emulo la superficie ideal dejada por la herramienta de corte y para la segunda se hizo una modificación procurando imitar la rugosidad Ra medida a través del rugosimetro.

Tabla 4. Evolución del modelo CAD para la simulación del proceso de bruñido, Fuente de las imágenes: El Autor.

2.3 Simulación de bruñido por elementos finitos.

A continuación, se presentan en detalle los parámetros que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo la simulación del proceso de bruñido utilizando el software ANSYS WORKBENCH 17.

2.3.1 Tipo de análisis.

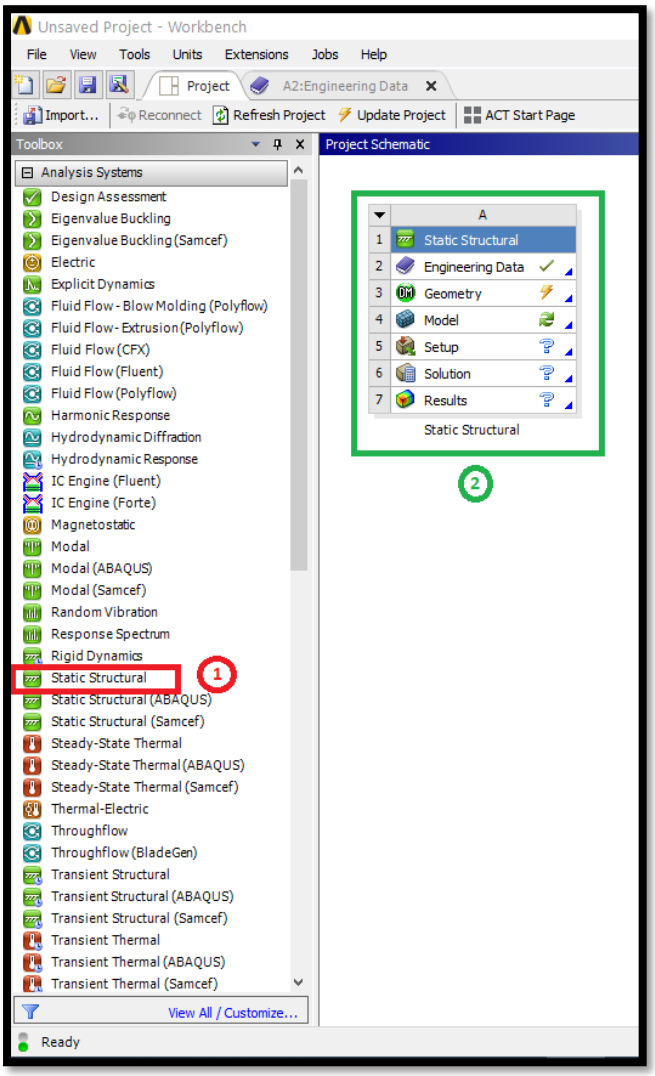
Para el desarrollo de la simulación ANSYS presenta diferentes sistemas de análisis de acuerdo al tipo de simulación que se requiere realizar. Para este caso, se evaluaron 2 opciones de desarrollo, “explicit dynamics” y “static structural” o por su traducción dinámico explicito y estático estructural.

De acuerdo al proveedor de software, el sistema dinámico explicito, se desarrolló con el fin de realizar predicciones de los efectos físicos de corta duración como impactos, colisiones y caídas. Para este experimento se observó que llegar a la solución de los resultados tomaba tiempos de alrededor de 30 horas por cada corrida, y, además, nunca se obtuvo un resultado valido posterior a la finalización de estos análisis.

Posterior al intento de la simulación con el sistema dinámico explicito, se decidió utilizar el sistema estático estructural, esto, dado que se cuenta con mayor experiencia durante la ejecución de este sistema y este también permite evaluar problemas de tipo dinámico haciendo uso de la herramienta “steps” y “substeps” o su traducción pasos y sub-pasos.

Para seleccionar el tipo de análisis (Figura 11) se debe buscar en la columna de la izquierda llamada sistemas de análisis o su traducción “Analysis Systems" y posteriormente hacer doble click o arrastrar la opción al espacio de trabajo, luego de esto, se abrirá un cuadro con las opciones que podemos editar para realizar la simulación.

Figura 11. Procedimiento para la selección del tipo de análisis en ANSYS WORKBENCH.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

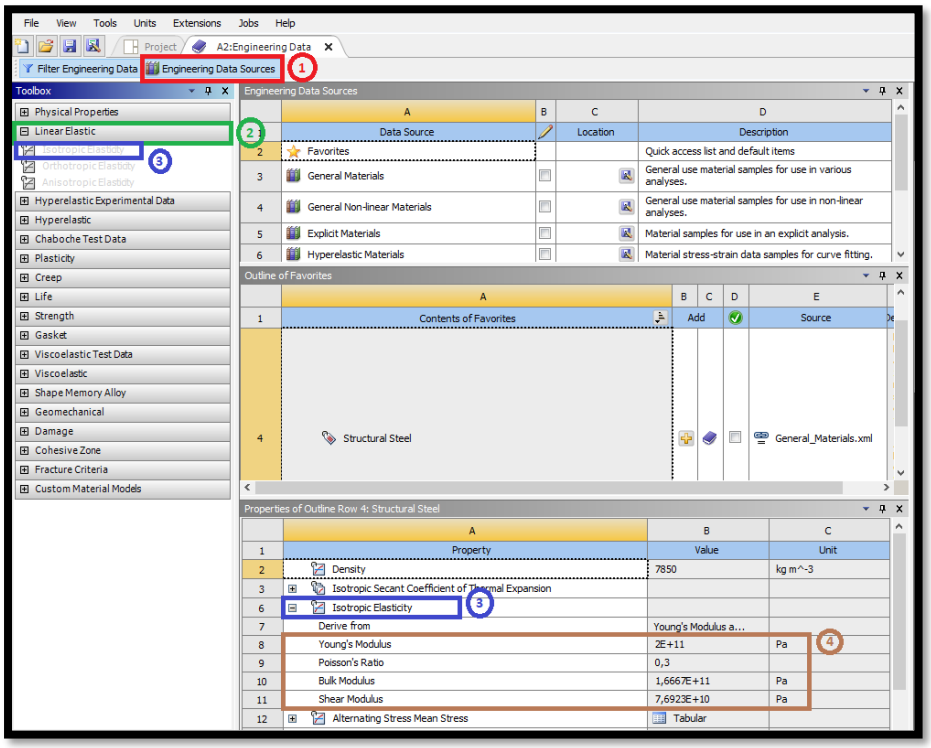
2.3.2 Datos de ingeniería o “engineering data”.

Para determinar el comportamiento de cada elemento, el software ANSYS cuenta con una biblioteca en donde están definidos los valores de las propiedades mecánicas de los diferentes materiales. Sin embargo, también existe la opción de asignar los valores a un material de acuerdo a la información que suministra por el fabricante, para este caso se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. En la pestaña “Outline of Schematic A”: Engineering data” o su traducción: “esquema de la sección A: Datos de ingeniería”, (Figura 12) editar el material existente o hacer click en “add material” o su traducción: “agregar material”.

2. Posteriormente se desplegará la opción “Engineering data sources” o su traducción: “fuentes de datos de ingeniería” (Figura 12 Numeral 1).
3. En la columna “Toolbox” o su traducción “caja de herramientas” (Figura 12 Numeral 2) se desplegarán unas familias de propiedades que se podrán asignar al material de acuerdo a las necesidades del estudio que se vaya a realizar.
4. Seleccionar la familia y en el cuadro “Properties of outline Row 4” o su traducción “propiedades de la fila 4” (Figura 12 Numeral 3) se podrá seleccionar y editar la propiedad que se requiera.

Figura 12. Procedimiento para asignar valores de propiedades mecánicas en ANSYS WORKBENCH 17.2.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

Para esta investigación se creó el material AISI/SAE 52100 para la esfera, y AISI/SAE 12L14 para la pieza de trabajo.

Para calcular los valores de esfuerzo deformación en la barra de acero SAE 12L14, se pidió al proveedor un certificado de trazabilidad del material (este certificado se puede ver en el anexo B). En este certificado se encuentra la composición química del material y las siguientes propiedades mecánicas:

Esfuerzo de Fluencia (S_y) = 457 MPa

Esfuerzo ultimo a la tensión (S_u) = 603 MPa

Elongación (ε_f) = 13%

Dureza = 165 HB

Con esta información se puede construir una gráfica de esfuerzo-deformación utilizando las ecuaciones planteadas por Ramberg y Osgood, estas ecuaciones pretenden hacer una aproximación de los valores de deformación relacionando el esfuerzo de fluencia y esfuerzo ultimo a la tensión del material. En su investigación, Patwardhan et al. [23] presenta la relación de esfuerzo-deformación desarrollada por Ramberg-Osgood:

Ecuación 9: Representación de curva real de esfuerzo-deformación.

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} + \left(\frac{\tilde{\sigma}}{H}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{9}$$

Donde:

$\tilde{\varepsilon}$ = Deformación real para cada valor de esfuerzo.

$\tilde{\sigma}$ = Esfuerzo que resiste el material.

H = Coeficiente de resistencia.

n = Exponente de endurecimiento por deformación.

Para realizar esta aproximación, es importante asumir algunos valores de acuerdo al tipo de material, por ejemplo, se definió que el punto de fluencia del material empezara a partir de 0.2% (0.002) teniendo en cuenta la deformación presentada por un acero SAE 1018 que tiene una cantidad de carbono similar. Habiendo asumido este valor, ya se puede calcular el exponente de endurecimiento por deformación utilizando la siguiente ecuación (10):

Ecuación 10: Ecuación para calcular el exponente de endurecimiento.

$$n = \frac{\log\frac{S_u}{S_y}}{\log\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_p}} \tag{10}$$

Donde:

n = Exponente de endurecimiento por deformación.

S_u = Esfuerzo ultimo a la tensión.

S_y = Esfuerzo de Fluencia.

ε_f = Elongación.

ε_p = Elongación al punto de fluencia = 0.002

Ahora se procede a calcular el valor H que es el coeficiente de resistencia, de acuerdo a Ramberg-Osgood este valor está dado por la siguiente expresión (ecuación 11):

Ecuación 11: Ecuación para calcular el coeficiente de resistencia.

$$H = \frac{S_y}{\varepsilon_p^n} \tag{11}$$

Donde:

H = Coeficiente de resistencia.

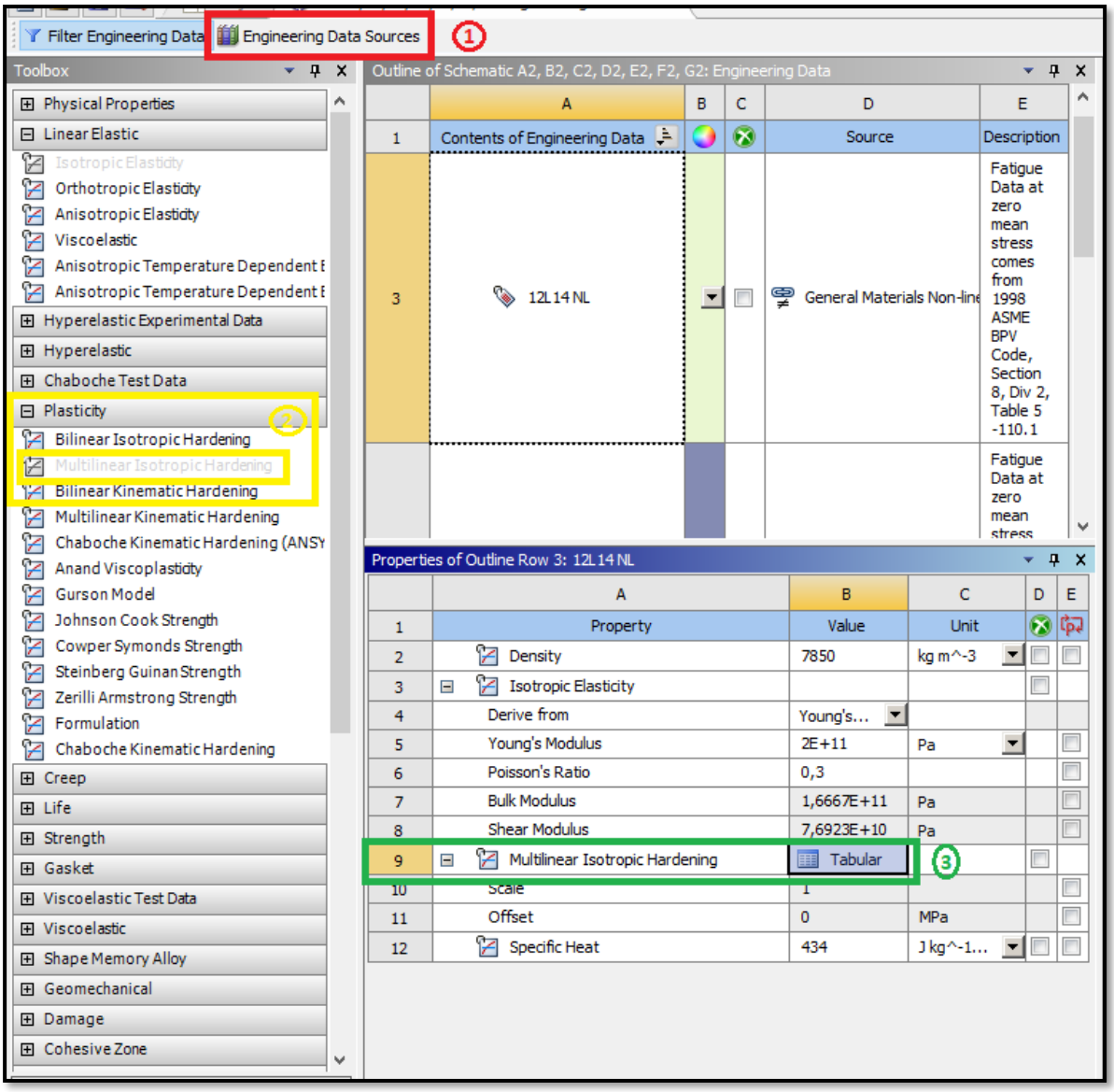
n = Exponente de endurecimiento por deformación.

ε_p = Elongación al punto de fluencia = 0.002

Luego realizar el cálculo de los valores de deformación, se procede a ingresar la tabla con los valores de deformación al software ANSYS (Figura 13), este procedimiento se realizó de la siguiente forma:

1. En la ventana “Engineering data sources” o su traducción “fuentes de datos de ingeniería”, seleccionar el material que se va a editar, para este caso es “12L14”
2. En la columna “Toolbox” o su traducción “caja de herramientas”, seleccionar la familia “Plasticity” o su traducción “plasticidad” y aquí la propiedad “multilinear isotropic hardening” o su traducción “endurecimiento isotrópico multilinear”.
3. En la ventana “Properties of outline Row 3” o su traducción “propiedades de la fila 4” seleccionar el valor tabular y pegar los datos calculados.

Figura 13. Procedimiento para ingresar la curva de esfuerzo-deformación para el acero SAE 12L14.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el Autor.

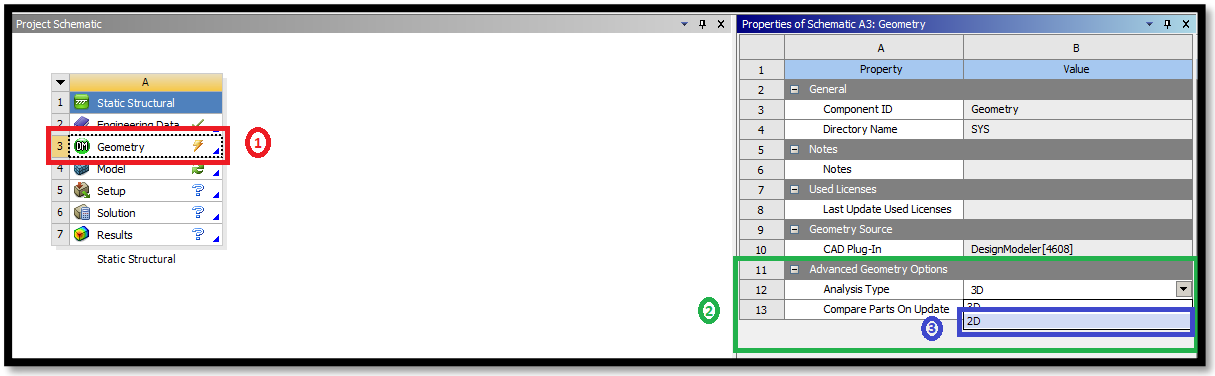
2.3.3 Geometría o “Geometry”.

Como se presentó en el apartado 2.2 se creó un modelo formado por 2 superficies, el software que se utilizó para el modelado fue Solidworks 2019 versión educativa y el módulo que utiliza el software ANSYS para realizar el modelado de elementos se llama “DesignModeler”, este módulo cuenta con una herramienta llamada “import external geometry file” o su traducción “importar archivo de geometría externa”, cuya interfaz

permite al software reconocer piezas desarrolladas en diferentes formatos CAD. Para migrar una pieza al módulo “DesignModeler” se deben seguir los siguientes pasos:

1. En la ventana “Project Schematic” o su traducción “Esquema de proyecto”, seleccionar la opción “Geometry” o su traducción “geometría” y seleccionar la opción 2D en la pestaña “Analysis Type” o su traducción “tipo de análisis”.

Figura 14. Ventana para configuración a un estudio en 2D.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

2. Abrir el Módulo “DesignModeler” haciendo doble click en la opción “Geometry” de la ventana “Project Schematic”.
3. En la ventana del “DesignModeler” seleccionar: File / Import external geometry file y seleccionar el archivo para importar, en este caso es: “RUGOSIDAD4”.
4. Hacer click en el botón “Generate” y esperar que se importe la geometría
5. Cerrar el “DesignModeler”.

2.3.4 Modelo o “Model”.

En esta sección de la simulación es donde se definen las condiciones de frontera y las cargas que se tendrán en cuenta para el desarrollo de la simulación, dentro de este apartado, también se encuentran los resultados entregados por el software luego de dar solución al problema.

A continuación, se presenta con detalle la metodología utilizada para llevar a cabo la simulación del proceso de bruñido:

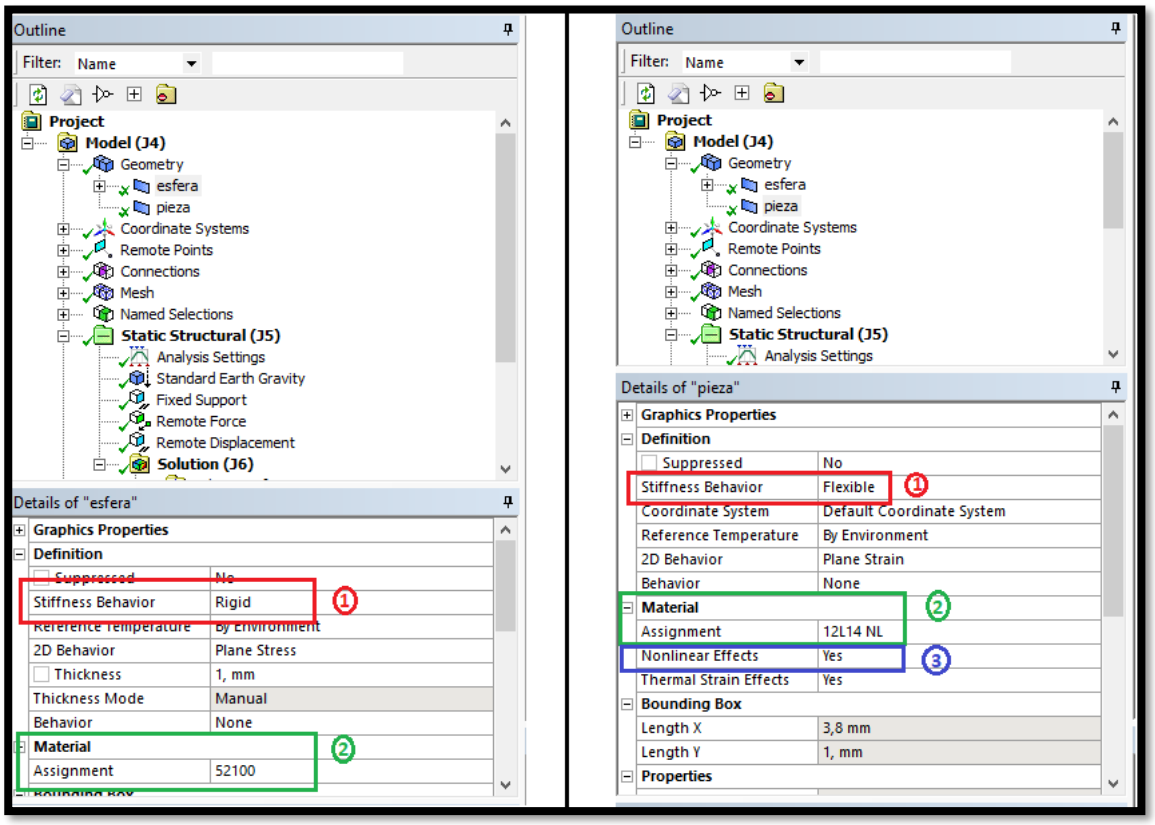
2.3.4.1 Geometria o “Geometry”.

Esta pestaña muestra las piezas como dos elementos diferentes, dentro de esta opción, es donde se define el material de la pieza y el comportamiento que va a ser asumido por el software para el desarrollo del problema.

Para la esfera, se seleccionó un comportamiento rígido y se asignó el material “52100” creado anteriormente.

Para la pieza, se seleccionó un comportamiento Flexible, se asignó el material “12L14 NL” creado anteriormente y en la opción “Nonlinear Effects” o su traduccion “efectos no lineales” se dio la opción “yes” o “si”.

Figura 15. Asignación de comportamiento y tipo de material para (a) esfera, (b) pieza.



(a) (b)

Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

2.3.4.2 Contactos o “Contacts”.

El software Ansys requiere que se establezca el tipo de contancto que habra entre los elemetos de acuerdo al tipo de problemas que se requiera solucionar. Este es un dato muy importante para el desarrollo de esta investigacion, ya que de no determinar correctamente esta condicion de frontera, el resultado del analisis será errado.

Ansys presenta diferentes tipos de contactos de acuerdo al tipo de analisis que se requiera desarrollar (Tabla 5). Estos se dividen en dos grupos de acuerdo al tipo de analisis que se va a desarrollar. Para el caso de un analisis lineal, el software ofrece la opcion de “Bonded” o su traduccion “pegado o vinculado” y “No Separation” o su traduccion “sin separacion”, por otra parte, para analisis de tipo no lineal, el software

presenta tres tipos: “Frictionles”o su traduccion “sin friccion”, “rough” o su traduccion “aspero o rugoso” y “Frictional” o su traduccion “con friccion”.

Tipos de contactos	Propiedades
Pegado o vinculado	No se desliza ni se separa, se pega.
Sin separacion	No hay separación, pero se permite un pequeño deslizamiento sin fricción
Sin fricción	Deslizamiento libre, la separación se produce cuando la presión de contacto es igual a cero
Áspero	Contacto de fricción perfecto, sin deslizamiento, la separación se produce cuando la presión de contacto es igual a cero.
Con friccion	Factor de fricción necesario, el deslizamiento se produce después de la tensión de cizallamiento hasta una determinada magnitud.

Tabla 5. Tabla de tipos de contactos de Ansys Workbench; Consultado: [24] J. Martín, «Quasi-Static Study on the Fluid and Structure Interactions of the Subsurface Safety Valves (SSSV) for Extreme High Pressure and High Temperature (XHPHT) Applications», 2010.

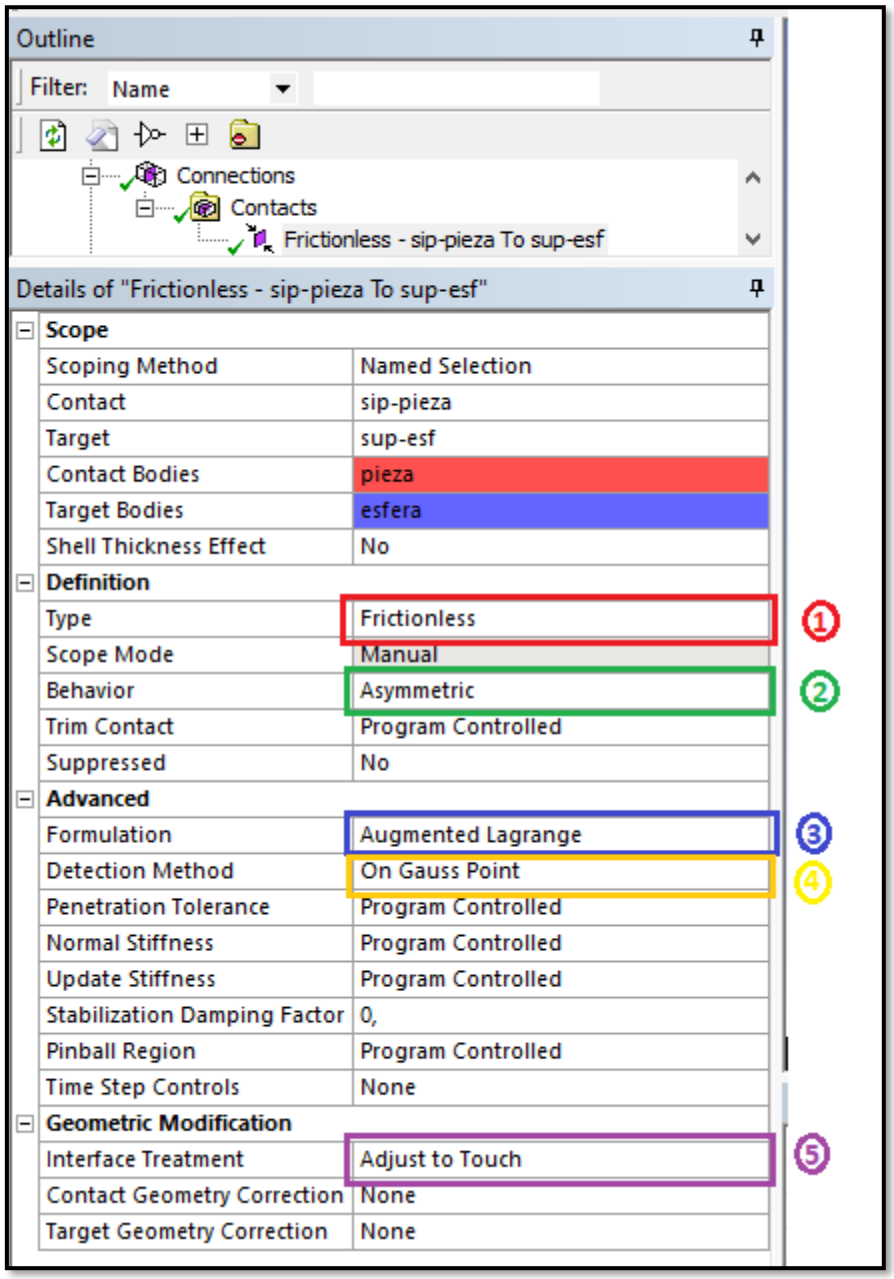
Para el desarrollo de esta investigacion se decidio utilizar el tipo de contacto “frictionless” (Figura 15 Numeral 1), esto, teniendo en cuenta que aunque existe una fuerza de friccion de area eliptica entre la esfera y la pieza, varios autores muestran que este valor no representa un error significativo en los resultados. Aunque el software ofrece la opcion de utilizar un contacto de tipo “Frictional” este requiere informacion especifica para el factor de friccion entre los elementos y llegar a la solucion de un problema con este tipo de contacto requiere un mayor gasto computacional.

Adicional, se requirio definir ciertos parametros que ayudan al solver del software a converger a un resultado, para este caso, se definio que el comportamiento de las deformaciones iba a ser Asimetrico (Figura 15 Numeral 2) ya que la superficie de la pieza es irregular y no obedece a ningun patron geometrico.

En las opciones avanzadas del contacto, el software ofrece diferentes opciones de deteccion entre los elementos cuanto hay contacto entre ellos durante la simulacion, el uso de estas opciones junto con la eleccion de la formulacion matricial adecuada ayuda al solver a alcanzar la solucion fisica de un problema.

Para este caso, se decidio optar por la formulacion “Augmented Lagrange” (Figura 15 Numeral 3) junto con el metodo de deteccion “On Gauss Point” (Figura 15 Numeral 4), esta combinacion permitio que el gasto computacional fuera menor y que los resultados concordaran con los obtenidos por otros autores y con el resultado experimental.

Figura 16. Selección de contactos entre elementos.



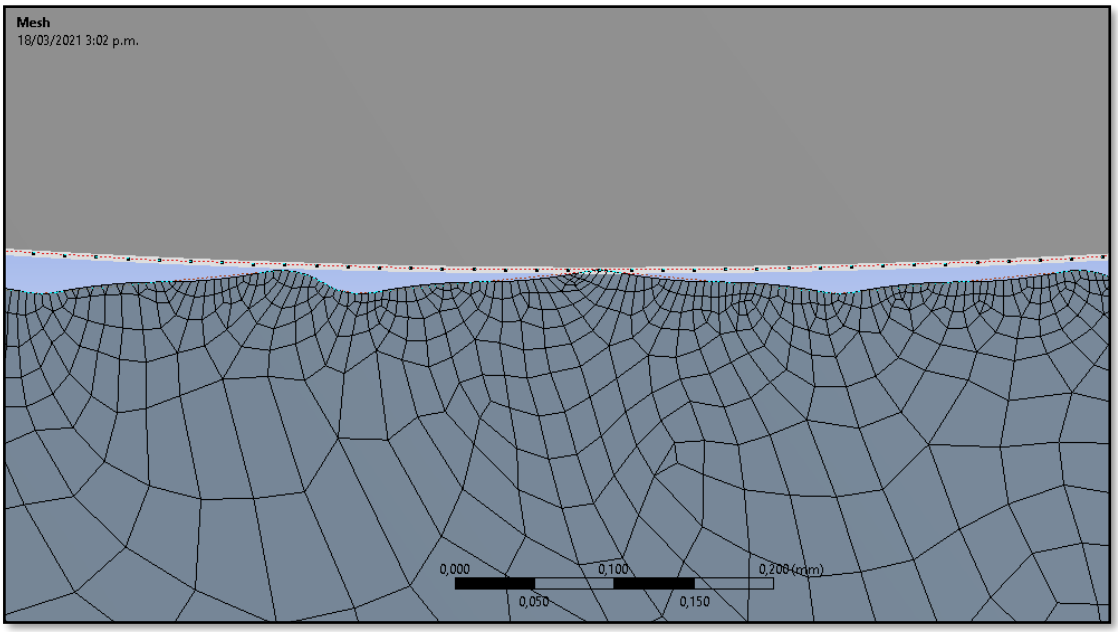
Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

Para finalizar, y dado que el objetivo del bruñido es realizar una modificacion a la superficie de la pieza, en al apartado “Geometric Modifications” o su traduccion “modificaciones de geometrias” se selecciona “adjust to touch” o su traduccion “ajustar al toque” (Figura 15 Numeral 5) en la opcion “interface treatment”, esta opcion, permite que se genere una modificacion de la malla de la superficie de la pieza a medida que la superficie de la esfera se aproxima.

2.3.4.3 Mallado o “mesh”.

Como se explico anteriormente, los software por elementos finitos dividen la geometria de una pieza en un número determinado de elementos que posteriormente es analizando en conjunto. Para el desarrollo de esta investigacion, y dado que se requiere evaluar la rugosidad de una pieza, se determino que el tamaño maximo de malla en la zona de la superficie de la pieza fuera de 0.005 mm o 5 micras, y se fuera extendiendo hacia el centro de la pieza.

Figura 17. Mallado de la pieza usando la opción "Edge sizing" o su traducción “dimensionamiento del borde”.



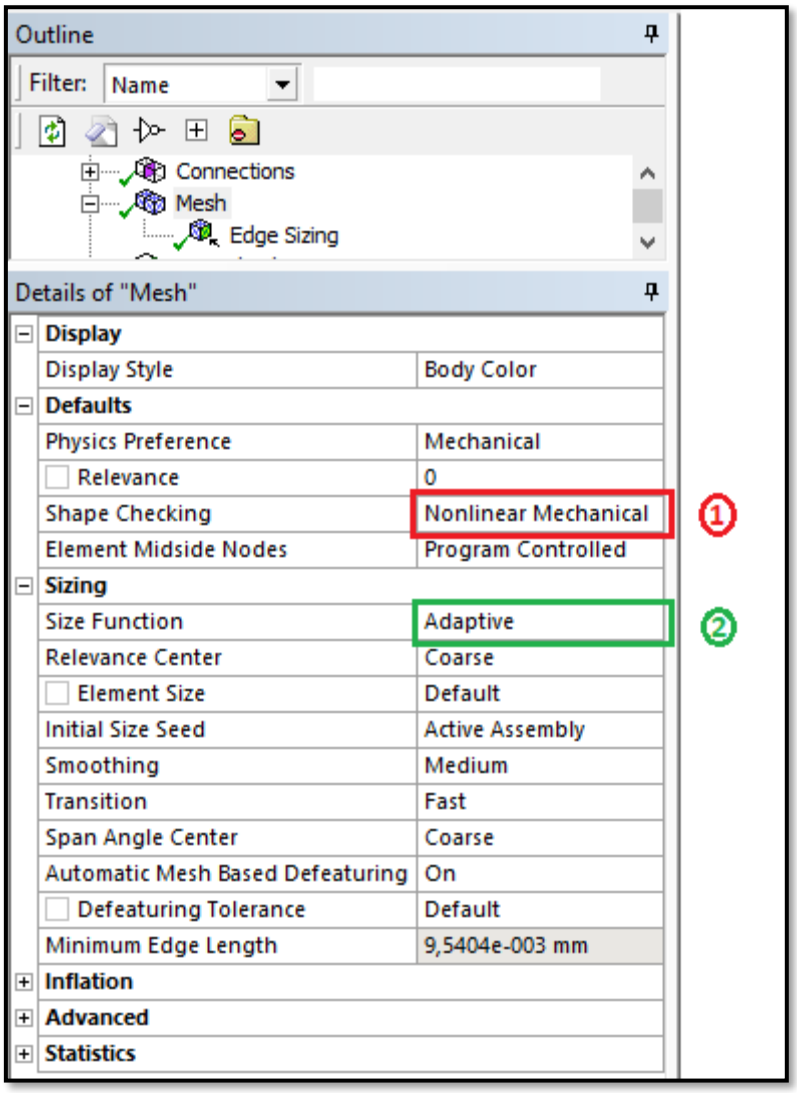
Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

Para definir estas condiciones de mallado, se establecieron las siguientes opciones:

1. En la opcion general de mallado, se selecciono “Nonlinear Mechanical” o su traduccion “mecanico no lineal” (Figura 17 numeral 1) en la opcion “shape checking” o su traduccion “revision de forma” para que el mallado fuera adaptado a un analisis no lineal.

2. En el apendice “size function” o su traduccion “funcion de tamaño” (Figura 17 numeral 2) se seleccionó la opcion “adaptative” con el fin de que la malla no cambiara la geometria de la pieza ya que en las otras opciones el software procura mejorar la superficie para simplificar el analisis del problema.

Figura. 18 Opciones generales para el mallado.

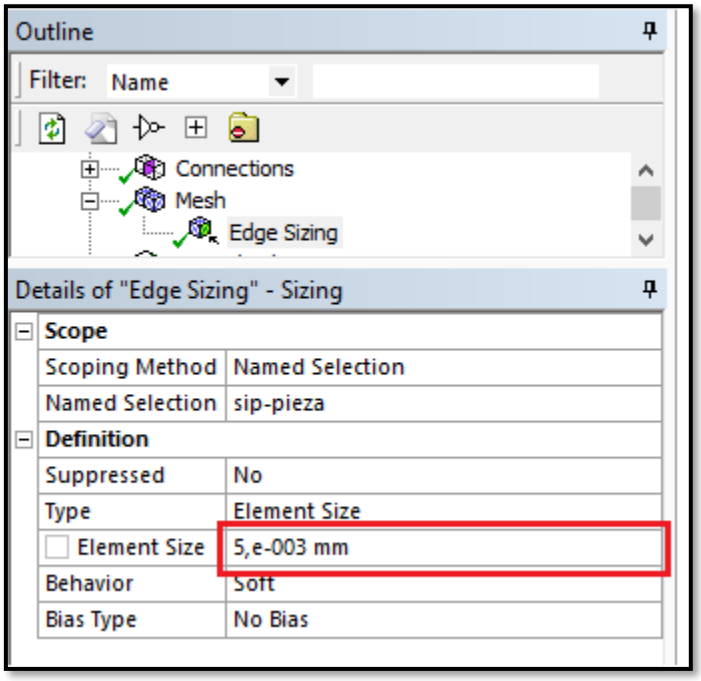


Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

3. Crear el mallado de superficie: Para crear el mallado de una zona especifica, se debe hacer click derecho sobre la opcion de “mesh” y seleccionar: insert / sizing.

4. Para este caso, se selecciono la superficie de la pieza y dado que es un elemento en 2D el software asume que es uan arista y la nombra como “Edge sizing”, en el apartado “element size” (Figura 18) de esta opcion es donde se define el tamaño maximo de elemento de malla que se desea utilizar.

Figura 19. Selección de tamaño de malla.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

Los criterios para definir el tamaño de malla utilizado en este proyecto fueron 2: el primero fue la restricción de elementos que permite solucionar la versión del software que, ya que es una versión académica, y el segundo, fue que, a mayor número de elementos, mayor iba a ser el gasto computacional del software para solucionar el problema.

2.3.4.4 Configuracion del analisis.

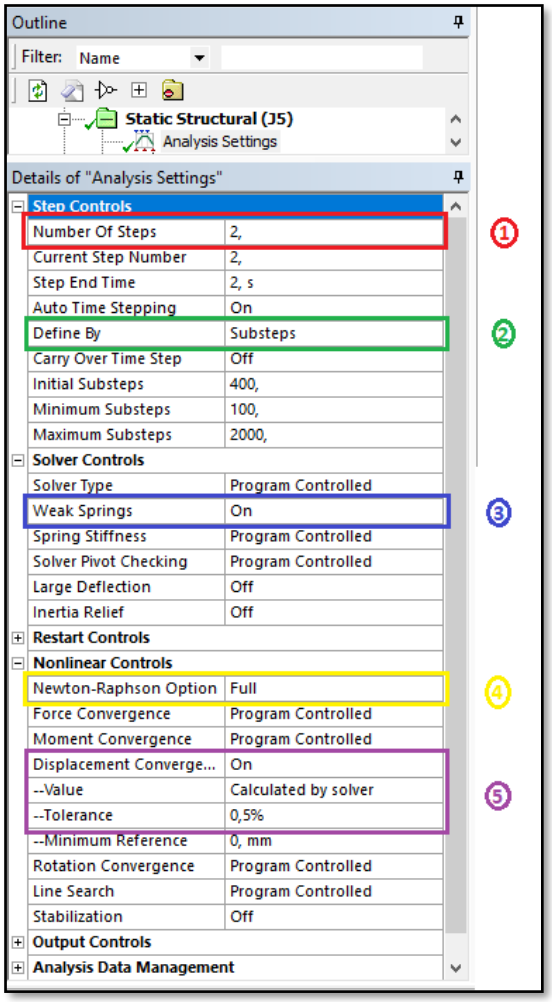
Para llevar a acabo el analisis por elementos finitos, fue necesario definir al software el orden en el que se iban a llevar a cabo los eventos (indentacion, bruñido) para que de esta manera se puediera configurar el analisis con base en estos eventos. De la misma forma, se seleccionaron ciertas funciones que ayudaron a que el solver lograra converger a un valor que fue similar a los valores obtenidos mediante experimentacion.

Incialmente se definio cada uno de los eventos en “steps”, esta funcion permitio dividir el analisis en diferentes partes ya que se trato de una simulacion de tipo dinamico dado que cambio el movimiento con respecto al tiempo. El software permite dividir cada “step” en “substeps”, esta opcion permitio establecer un número minimo de divisiones para que el software lograra converger al resultado.

En el apartado de “solver controls” o “control del solucionador” se activo la opcion “weak springs” o su traduccion “muelles debiles” teniendo en cuenta que el analisis requeria un desplazamiento de multiples nodos, esta opcion permite que el solver cree una serie de amortiguadores suaves que ayudan a que la diferencia entre los valores que ingresan a las matrices no sean muy grandes permitiendo asi una solucion mas rapida del problema, cabe aclarar, que para este caso, fue necesaria activar esta opcion ya que de no ser asi, se hubiesen tenido que realizar una mayor cantidad de “substeps” y esto habria tomado un mayor costo computacional.

Para finalizar, en la opcion “Nonlinear controls” o su traduccion “controles no lineales”, se activo la opcion de “Full” o “completo” en el apartado “Newton Raphson Option” y se dado que el objetivo del resultado es medir los desplazamientos superficiales, se activo la opcion de “Displacement Convergence” y se asigno una tolerancia de 0.5% para la convergencia del resultado.

Figura 20. Configuración de análisis para bruñido 2D.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

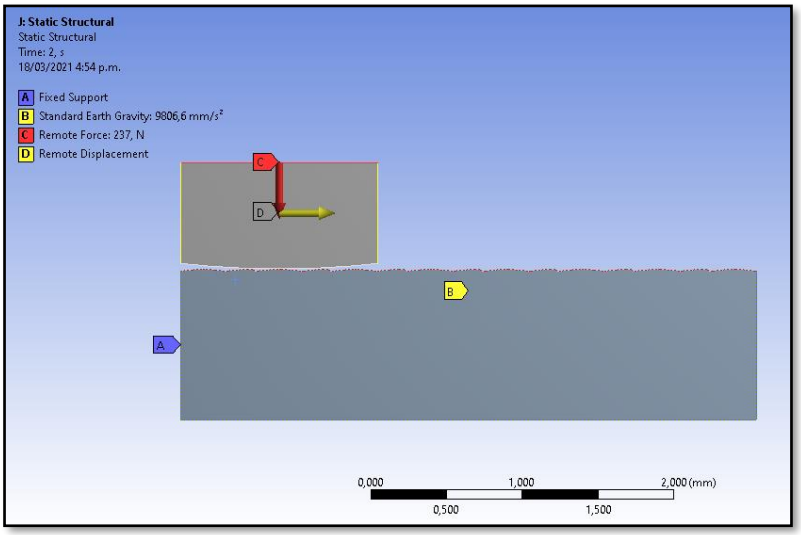
2.3.4.5 Condiciones de frontera.

Se denominan condiciones de frontera a las cargas y sujeciones que se definen al modelo para llevar a cabo el analisis.

Para este proyecto, la opcion “steps” o “pasos” permitio asignar valores variables a las condiciones de frontera de acuerdo a la simulacion que se desarrollo. En la figura 19 se muestran las conficiones de frontera que se asignaron al modelo para llevar a cabo la simulacion del proceso de bruñido, estas estan distribuidas asi:

A) Soporte fijo o “Fixed Support”: esta condicion se asignó a las aristas de contorno lineales (verticales y horizontal inferior) de la pieza. Esta sujecion se asigna cuando se requiere que los elementos seleccionados permanezcan inmoviles a lo largo del tiempo.
B) Gravedad estadar de la tierra o “Standard Earth Gravity”: Esta carga permite simular la fuerza de gravedad durante la ejecucion del analisis.
C) Fuerza remota o “Remote Force”: Esta carga se aplicó en la parte superior de la esfera ya que ésta simula la fuerza de bruñido. Se debe utilizar la opcion “remote” ya que la esfera es un elemento que tiene un comportamiento rigido.
D) Desplazamiento remoto o “Remote Displacement”: Esta sujecion es la que se encarga de realizar el desaplazamiento de la esfera sobre la pieza de trabajo. Dimilar al anterior, se debe utilizar la opcion “remote” para que la pieza con comportamiento rigido obedezca al desplazamiento.

Figura 21. Condiciones de frontera para la simulación del bruñido.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

2.4 Diseño y fabricación de mandril.

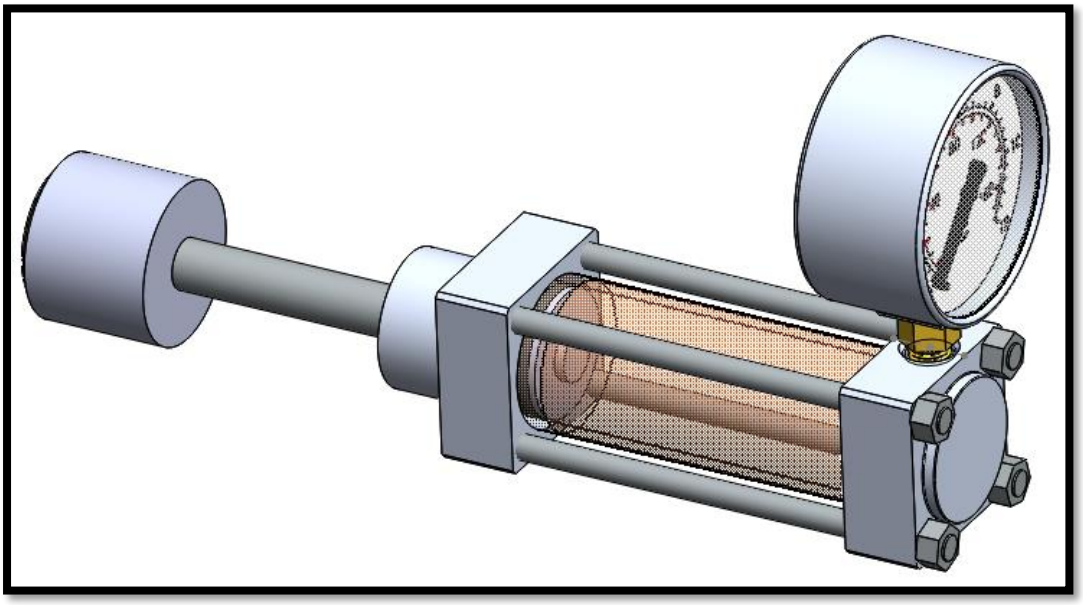
De acuerdo a la bibliografía consultada, existen varias formas de desarrollar un mandril que permita llevar a cabo el proceso de bruñido, el aspecto más importante a tener en cuenta es lograr medir la fuerza de bruñido y que estructuralmente este elemento resista la reacción causada por ducha fuerza.

Como se ha comentado anteriormente, se pretende promover el uso del bruñido con esfera como un proceso de mejora de superficie que se pueda replicar en una empresa que cuente con máquinas herramientas como un torno y un taladro; además, se procuró utilizar elementos que se fabrican en serie y se consiguen comercialmente para realizar el ensamble del mandril, esto, teniendo en cuenta que se busca fabricar un mandril que permita realizar la operación de bruñido a un bajo costo de fabricación. Cabe aclarar, que en caso de que se requiera un mandril para uso continuo, se tendría que utilizar una esfera de un material cerámico con el fin de bruñir materiales de mayor dureza y prolongar la integridad de la superficie de la esfera.

Para definir el diseño del mandril se evaluaron 3 opciones de accionamiento para determinar la fuerza de bruñido, las opciones fueron:

Accionamiento hidráulico: Similar a la realizada por varios autores. Este mandril está compuesto por una recamara llena de aceite hidráulico, un manómetro que mide la presión dentro de la recamara y en la punta del vástago un elemento que sostiene el conjunto de la esfera. Dado que el fluido de trabajo es aceite, y junto a un manómetro con amortiguador y con recamara de glicerina la estabilidad de la lectura durante el bruñido es buena.

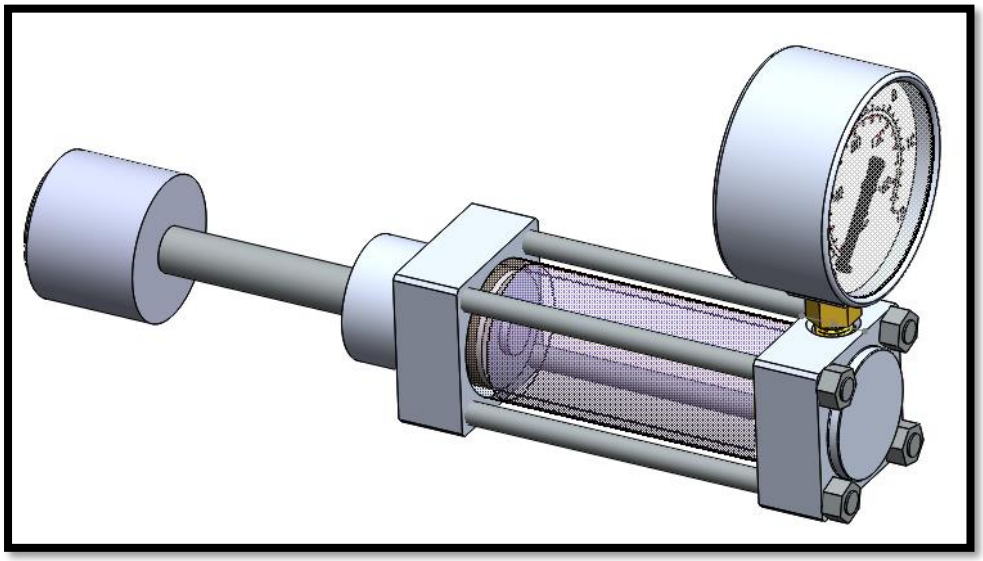
Figura 22. Diseño de mandril hidráulico.



Fuente: El autor.

Accionamiento neumático: Similar al anterior. Este mandril está compuesto por una recamara llena de aire, un manómetro que mide la presión dentro de la recamara y en la punta del vástago un elemento que sostiene el conjunto de la esfera. Dado que el fluido de trabajo es aire, y junto a un manómetro con amortiguador y con recamara de glicerina la estabilidad de la lectura durante el bruñido es deficiente porque hay mucho desplazamiento del vástago dada la compresión del aire y la vibración de la esfera.

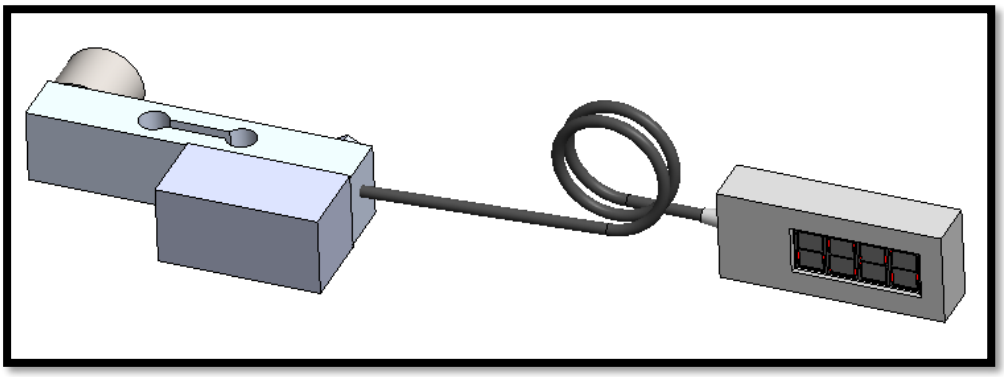
Figura 23. Diseño de mandril neumático.



Fuente: El autor.

Accionamiento electrónico: Este mandril, requiere una celda de carga y una pantalla que permita transformar la diferencia de potencial generada por la deformación en una fuerza. A diferencia de los anteriores, este requiere una fuente de alimentación externa, no obstante, y como lo han demostrado otros autores, al ser un elemento electrónico se puede llegar a mejorar la precisión del bruñido y dado que puede entregar señales de tipo análogo, se puede adaptar a un elemento que permita su uso a través de una máquina de control numérico.

Figura 24. Diseño de mandril electrónico.



Fuente: El autor.

Para ayudar a determinar la opción de desarrollo de mandril, se utilizó el método de despliegue de la función de calidad teniendo en cuenta factores importantes: repetitividad, facilidad del mantenimiento y la rapidez durante su ensamble.

2.5 Equipos de fabricación y medición.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron diferentes equipos como: instrumentos de medición, herramientas metalmecánicas y equipos de cómputo que permitieron llegar a los resultados obtenidos al finalizar cada etapa de la investigación.

2.5.1 Etapa de fabricación de las probetas.

Para la fabricación de las probetas se utilizó un torno convencional con las siguientes características (Figura 25):

Marca: STANKOIMPORT.

Referencia: 16B16.

Longitud máxima entre puntos: 750mm.

Diámetro máximo de pieza sobre bancada: 320mm.

Potencia: 7.5 KW.

Figura 25. Torno convencional utilizado para la fabricación de las probetas.

Fuente: El autor.

2.5.2 Equipo para medición de rugosidad.

Los micrómetros o micras (µm) son la unidad fundamental con las que se mide la rugosidad de una pieza. Usualmente la rugosidad de una pieza que ha sido producida utilizando un proceso de fabricación de mecanizado por arranque de viruta tiene un valor de rugosidad de entre 0,25 µm y 25 µm.

Para medir el valor de la rugosidad de una superficie se utiliza un instrumento de medición llamado rugosimetro (figura 26), este utiliza un palpador de forma piramidal que se encuentra en la punta de un cantiléver y cuyos desplazamientos son medidos e interpretados por el instrumento de medición para presentar un resultado que generalmente se encuentra en forma de Ra (rugosidad aritmética) o Rz (diferencia máxima entre el pico más alto y el valle más profundo).

Para esta investigación se utilizó un rugosimetro digital referencia TR100 de la marca TIME con las siguientes características:

- El TR100 es fácil de usar y funciona en diversas superficies, no sólo planas, sino también en cilindros exteriores, conos exteriores, ranuras y rebajes.
- Determina ambos parámetros de rugosidad, Ra y Rz dentro de un amplio rango de medición.
- El palpadór piezoeléctrico con punta de diamante asegura una medición muy fiable dentro de las tolerancias que se ajustan a la clase ISO 3.

- Parámetros de rugosidad: Ra (ISO), Rz (DIN).
- Rango de medición: Ra: 0.05 a 10um; Rz: 0.1 a 50 um.
- Longitudes de medición: 0.05", 0.15", 0.2" / 1.25 mm, 4.0 mm, 5.0 mm.
- Longitudes de corte: 0.009", 0.032", 0.09"/ 0.25 mm, 0.8 mm, 2.5 mm.
- Longitud de trazado: 0.24" / 6 mm.
- Velocidad de trazado: 0.039"/segundo, - 1,00mm/segundo.
- Fuente de alimentación: 2 baterías NiMH de 3.6V.
- Dimensiones: 4.9 x 2.87 x 1.023" / 125 x 73 x 26 mm.
- Peso: 7.06oz / 200 g.

Figura 26. Montaje de rugosimetro TR100 marca TIME para realizar las mediciones del acabado superficial de las probetas.

Fuente: El autor.

2.5.3 Microscopio estereoscópico.

Teniendo en cuenta que el bruñido es un proceso de mejora superficial, los efectos de este son perceptibles a simple vista, no obstante, se hizo uso de un microscopio estereoscópico

para observar con mayor detalle la calidad del acabado obtenido y hacer una comparación visual del efecto del bruñido sobre la superficie.

El microscopio utilizado para esta investigación fue el modelo MSZ5000 de la marca KRÜSS, de acuerdo al fabricante es un microscopio estereoscópico con zoom para el examen profesional de productos electrónicos, de ingeniería de precisión, plásticos y médicos. El microscopio se utiliza para la inspección, el ensamblaje, el análisis, la soldadura, el pulido y el acabado de piezas.

Sus principales características son:

- Trabajo muy agradable gracias al gran rango de zoom y a la gran distancia de trabajo.
- Función de zoom para ajustes de aumento continuos de 7x a 45x, ampliable opcionalmente a 14x y 90x.
- Gran profundidad de enfoque.
- Luz incidente y transmitida (según la configuración).
- Robusta carcasa metálica.

En la figura 27 se puede observar el montaje que se realizó para tomar las imágenes correspondientes al acabado superficial de las probetas.

Figura 27. Montaje en el microscopio estereoscópico MSZ 5000 para tomar las imágenes de la superficie de las probetas.

Fuente: El autor.

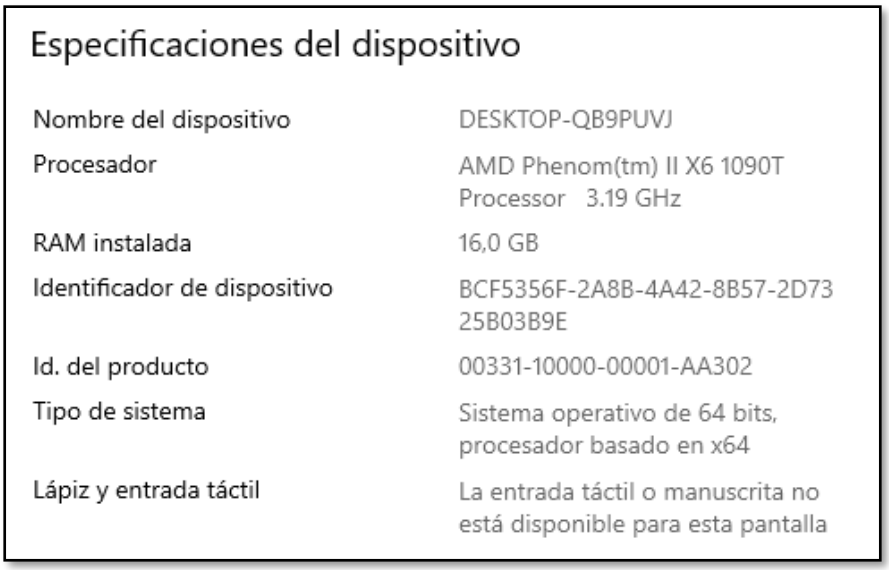
2.5.4 Equipo de cómputo.

Para llevar a cabo el modelado de las piezas se utilizó el software Solidworks 2019 versión académica que se encuentra licenciado por la universidad ECCI. Para desarrollar la simulación por elementos finitos se utilizó el software ANSYS WORKBENCH 17 versión académica, que también se encuentra licenciado por la universidad ECCI, es importante aclarar que esta versión cuenta con un número limitado de elementos para solucionar y por lo tanto no se pueden simular modelos de gran tamaño.

En la figura 28 se presentan las especificaciones del equipo de cómputo que se utilizó para llevar a cabo el modelado y las simulaciones, adicional a estas especificaciones, a continuación, se presentan otras características importantes del hardware.

- Marca: N/A.
- Referencia: N/A.
- Procesador: AMD Phenom II X6 1090T.
- Memoria RAM: 4 x 4Gb @ 667 Mhz.
- Tarjeta gráfica: ATI Radeon R9 270.
- Motherboard: Asrock 970 Extreme3 R2.0.
- Fuente de poder: Thermaltake TR2 600W.
- Disco duro: SSD Corsair 240Gb; HHD Western Digital 1000 Gb.

Figura 28. Especificaciones el equipo de cómputo utilizado para desarrollar la investigación.



Especificaciones del dispositivo

Nombre del dispositivo	DESKTOP-QB9PUVJ
Procesador	AMD Phenom(tm) II X6 1090T Processor 3.19 GHz
RAM instalada	16,0 GB
Identificador de dispositivo	BCF5356F-2A8B-4A42-8B57-2D73 25B03B9E
Id. del producto	00331-10000-00001-AA302
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64
Lápiz y entrada táctil	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

Fuente: Tomado de Windows 10 por el Autor.

3. Resultados y discusión.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos luego de realizar la investigación de la influencia del proceso de bruñido con esfera sobre el acero SAE 12L14, primero se presenta el diseño de experimentos que se utilizó para realizar los trabajos de simulación y experimentación. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos después de la simulación por elementos finitos del proceso de bruñido y finalmente se encuentran los resultados de la ejecución del proceso sobre una pieza cilíndrica, este incluye: el desarrollo del mandril para bruñido que se utilizó para realizar los experimentos y el resultado de las combinaciones de las diferentes variables del proceso.

3.1 Diseño experimental aplicable.

Como se presentó en el capítulo 1 sección 1.6.3, el diseño experimental aplicable fue el diseño experimental factorial debido al número de factores que influyen dentro del proceso y la cantidad de niveles que se van a evaluar. Con el fin de aumentar la confiabilidad de los resultados, se realizó una réplica para comparar los resultados obtenidos posterior al tratamiento de los datos.

La tabla 6 presenta la lista de experimentos que fueron realizados posterior a la aplicación del diseño experimental.

N° EXP	F (N)	f (mm/rev)	V	N° DE PASADA
1	95	0,07	Bajo	1
2	95	0,15	Bajo	1
3	95	0,3	Bajo	1
4	166	0,07	Bajo	1
5	166	0,15	Bajo	1
6	166	0,3	Bajo	1
7	237	0,07	Bajo	1
8	237	0,15	Bajo	1
9	237	0,3	Bajo	1
10	95	0,07	Bajo	2

11	95	0,15	Bajo	2
12	95	0,3	Bajo	2
13	166	0,07	Bajo	2
14	166	0,15	Bajo	2
15	166	0,3	Bajo	2
16	237	0,07	Bajo	2
17	237	0,15	Bajo	2
18	237	0,3	Bajo	2
19	95	0,07	Alto	1
20	95	0,15	Alto	1
21	95	0,3	Alto	1
22	166	0,07	Alto	1
23	166	0,15	Alto	1
24	166	0,3	Alto	1
25	237	0,07	Alto	1
26	237	0,15	Alto	1
27	237	0,3	Alto	1
28	95	0,07	Alto	2
29	95	0,15	Alto	2
30	95	0,3	Alto	2
31	166	0,07	Alto	2
32	166	0,15	Alto	2
33	166	0,3	Alto	2
34	237	0,07	Alto	2
35	237	0,15	Alto	2
36	237	0,3	Alto	2

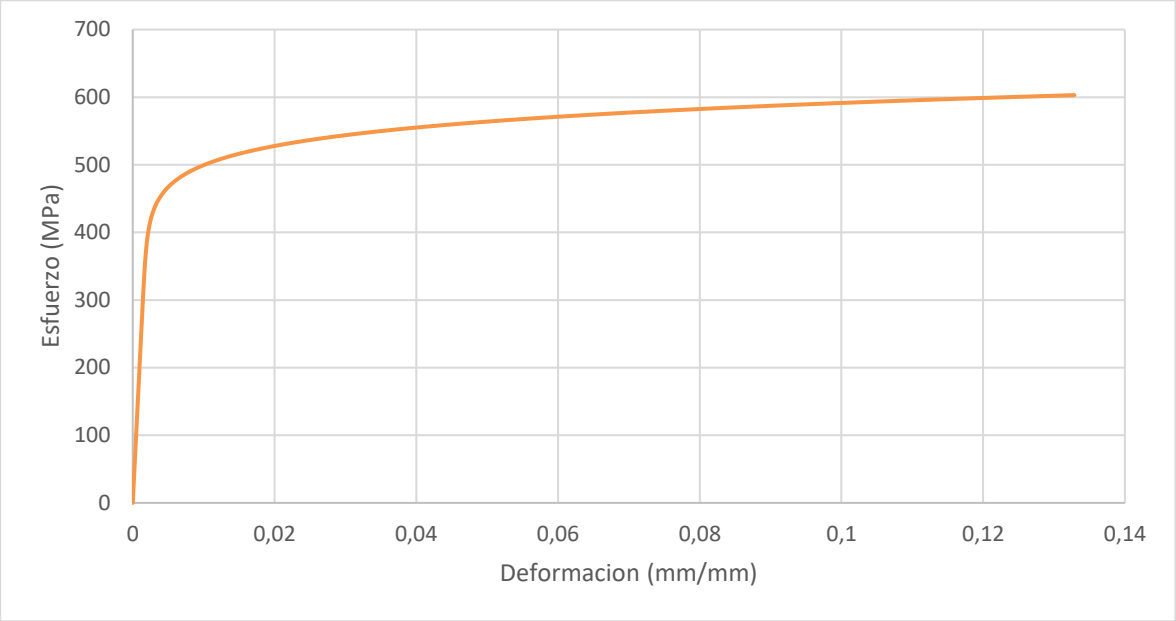
Tabla 6. Tabla de combinación de variables para experimentación de bruñido.

3.2 Simulación por elementos finitos.

Como se presentó en el capítulo 2 Numeral 2.3, se utilizó la ecuación de Ramberg-Osgood para calcular la curva de esfuerzo-deformación que se utilizó durante el proceso de simulación, en la figura 29 se muestra la gráfica de esfuerzo-deformación obtenida utilizando los valores de propiedades mecánicas proporcionados por el fabricante del tramo de acero SAE 12L14 utilizado para el proceso experimental.

La grafica de esfuerzo deformación desarrollada, es similar a la obtenida para el mismo material por Culpepper [25], ya que el punto de fluencia tiene valores similares para esfuerzo y para deformación, eso quiere decir que el comportamiento en la zona plástica es similar.

Figura 29. Grafica de esfuerzo deformación para acero SAE 12L14.

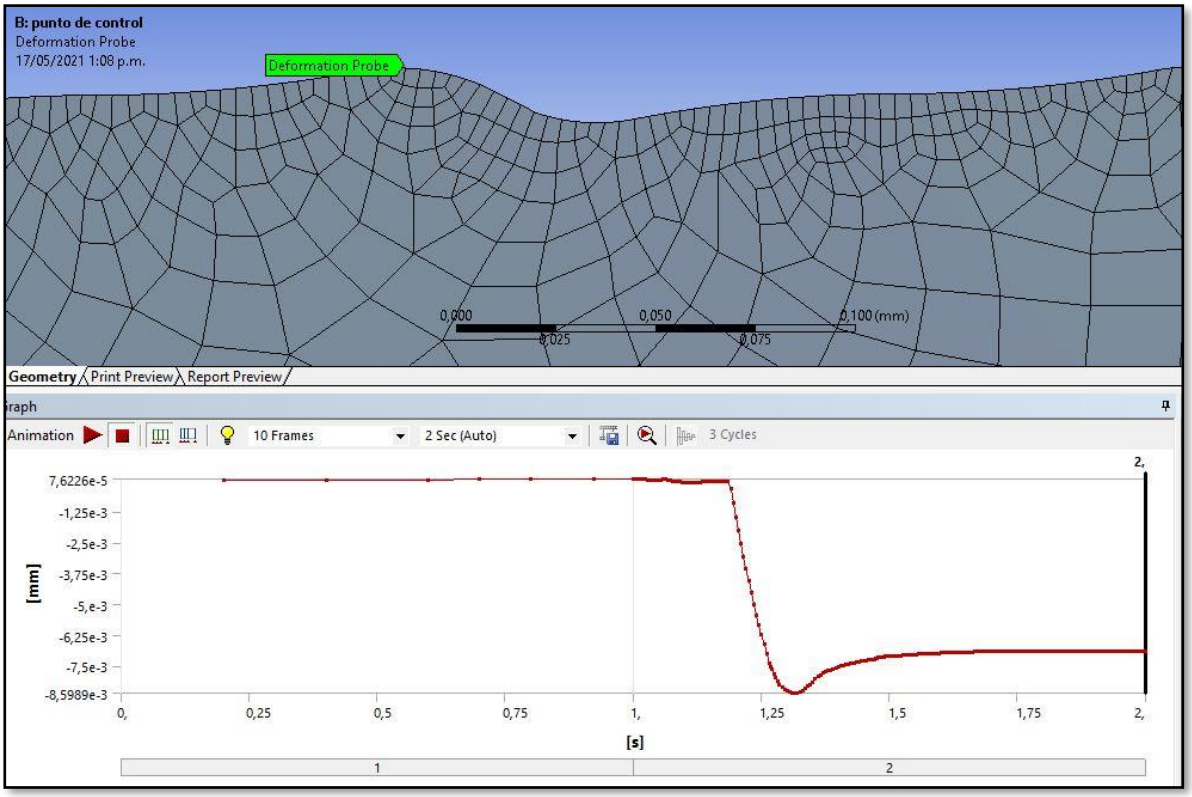


Fuente: El autor.

Para evaluar el resultado de la simulación utilizando la curva propuesta, se seleccionó un punto de control sobre uno de los picos que hacen parte de la rugosidad simulada, en la figura 30 se presenta el resultado de la deformación respecto al tiempo.

De acuerdo a este resultado, se observa un desplazamiento del punto de aproximadamente - 0.016 mm, sin embargo, 0.25 segundos después, se observa que hay una recuperación del material de aproximadamente +0.002 mm, esto quiere decir que la superficie sufrió una deformación causada por el desplazamiento de la esfera pero que bajo la zona bruñida hubo una zona que no alcanzo a llegar al esfuerzo de fluencia y volvió a su posición inicial de acuerdo al comportamiento lineal de la zona elástica.

Figura 30. Grafica de deformación vs tiempo de un punto ubicado en un pico de la superficie.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

Posterior al procedimiento realizado para llevar a cabo la simulación, se definió el tamaño del mallado con base en el número de elementos a solucionar de acuerdo al gasto computacional (tiempo de ejecución por experimento) y en la diferencia de los resultados obtenidos dependiendo del número de los mismos, el tipo de licencia (académica) también incide en el número de elemento a solucionar por simulación.

Para determinar el número de elementos, se realizó un experimento con las siguientes características:

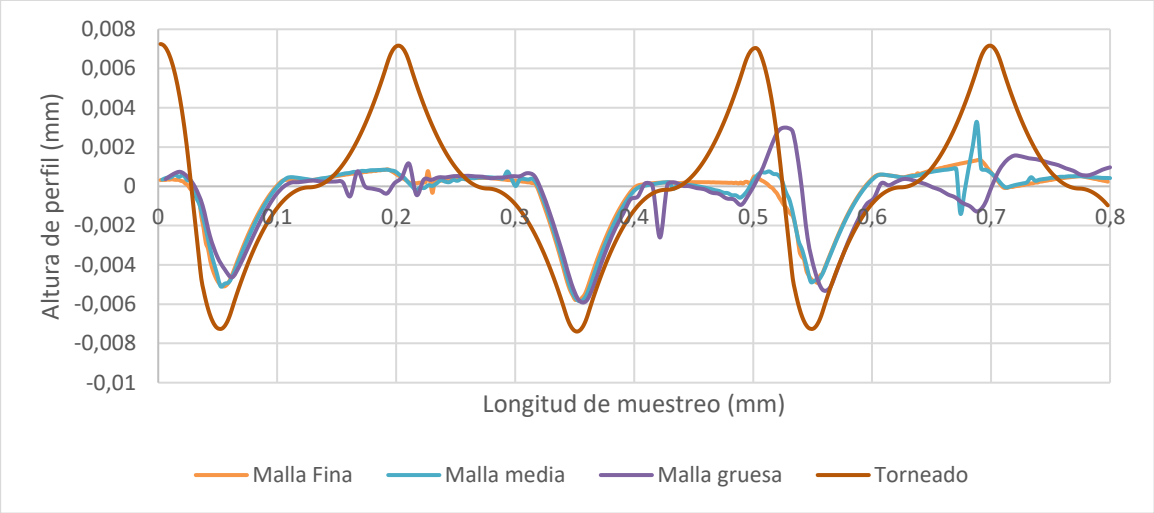
Malla gruesa = tamaño máximo de elemento: 0.016 mm.

Malla media = tamaño máximo de elemento: 0.008 mm.

Malla fina = tamaño máximo de elemento: 0.005 mm.

En la figura 31 se presenta la variación de los resultados de deformación de acuerdo al tamaño del elemento que se utilizó anteriormente

Figura 31. Grafica comparativa de los resultados de deformación de acuerdo al tamaño de mallado.



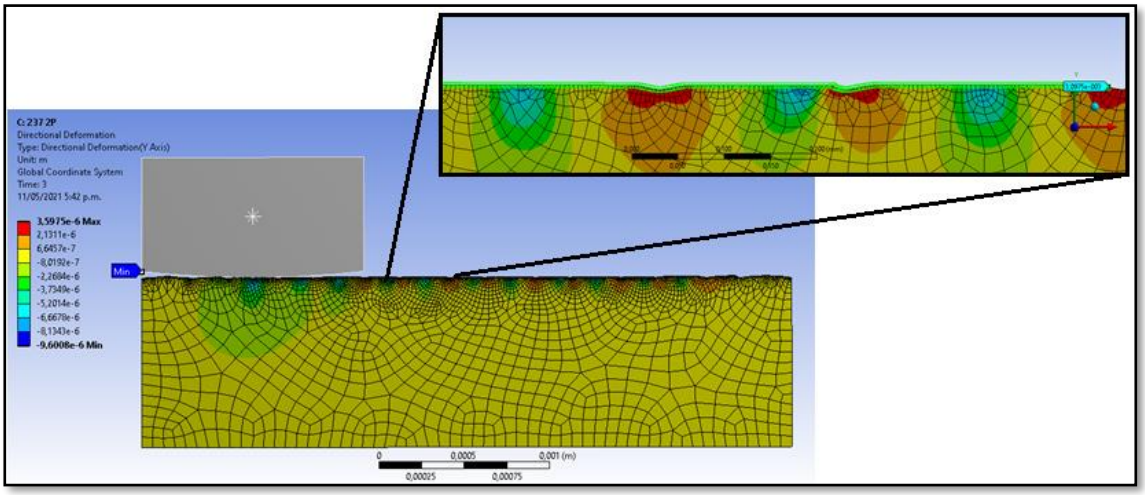
Fuente: El autor.

Como se puede observar en la figura 31, las mayores discontinuidades entre resultados se presentan cuando se utiliza un tipo de mayado grueso, dichos errores presentan una amplia desviación a pesar que la geometría de los 3 picos bruñidos es igual. Sin embargo, dichas desviaciones se tornan menores cuando se usa un mallado más fino.

Teniendo en cuenta que la simulación que se realizó fue en 2D, hubo variables que no se tuvieron en cuenta como el avance (f) y la velocidad (v), ya que, de acuerdo a los resultados obtenidos por otros autores, estos valores son los menos influyentes durante el proceso, además, la variación de velocidad de bruñido generó errores de convergencia durante la simulación y el avance del bruñido es un movimiento en sentido normal al plano, esto quiere decir que es por definición una simulación en 3D.

Los resultados de la investigación se evaluarán con base en la diferencia de deformación, el software permite evaluar las deformaciones direccionales en el eje “Y” y presenta una escala de colores que permite observar la deformación de cada zona, es importante tener en cuenta que la escala pasa de un valor positivo (color rojo) a un valor negativo (color azul), esto se debe a que durante el proceso de bruñido se genera un aplastamiento de los picos de rugosidad y se genera un desplazamiento de material que llena los valles que están a los lados. En la figura 32 se presenta el resultado de deformación direccional en “Y” que entrega el software.

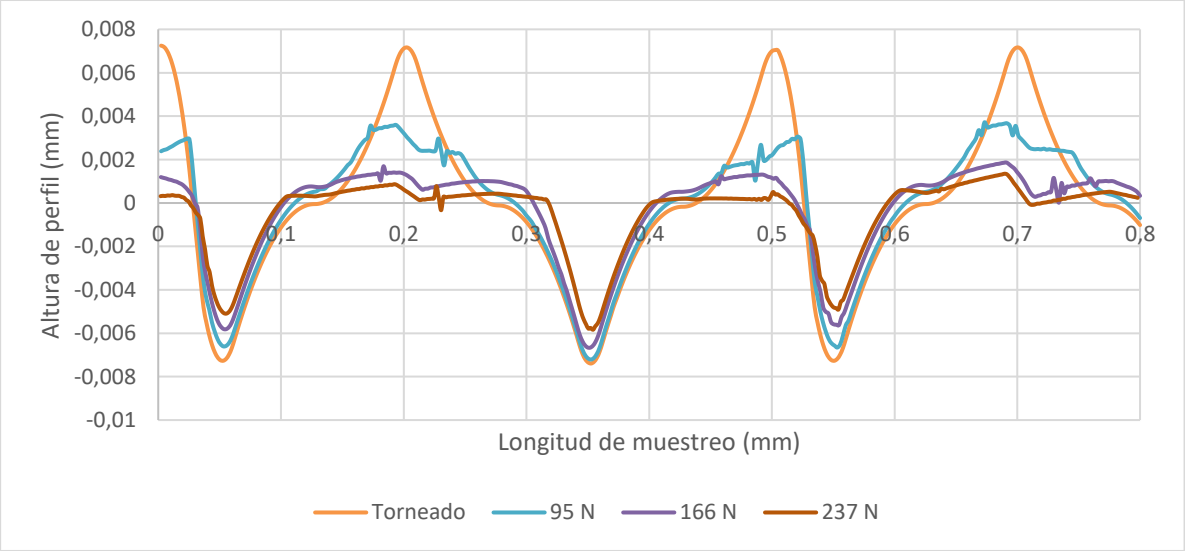
Figura 32. Trazado de deformaciones en el eje “Y” de una sección superficie de bruñido con Lm=0.8 mm.



Fuente: Tomado de ANSYS WORKBENCH, editado por el autor.

Luego de la ejecución de la simulación, se realiza una gráfica comparativa de los perfiles de rugosidad antes y después del proceso de bruñido, en la figura 33 se presenta la gráfica comparativa de los efectos de los diferentes valores de fuerza de bruñido sobre la superficie de la pieza.

Figura 33. Resultado de deformación en "Y" para 1 pasada con diferentes fuerzas de bruñido.



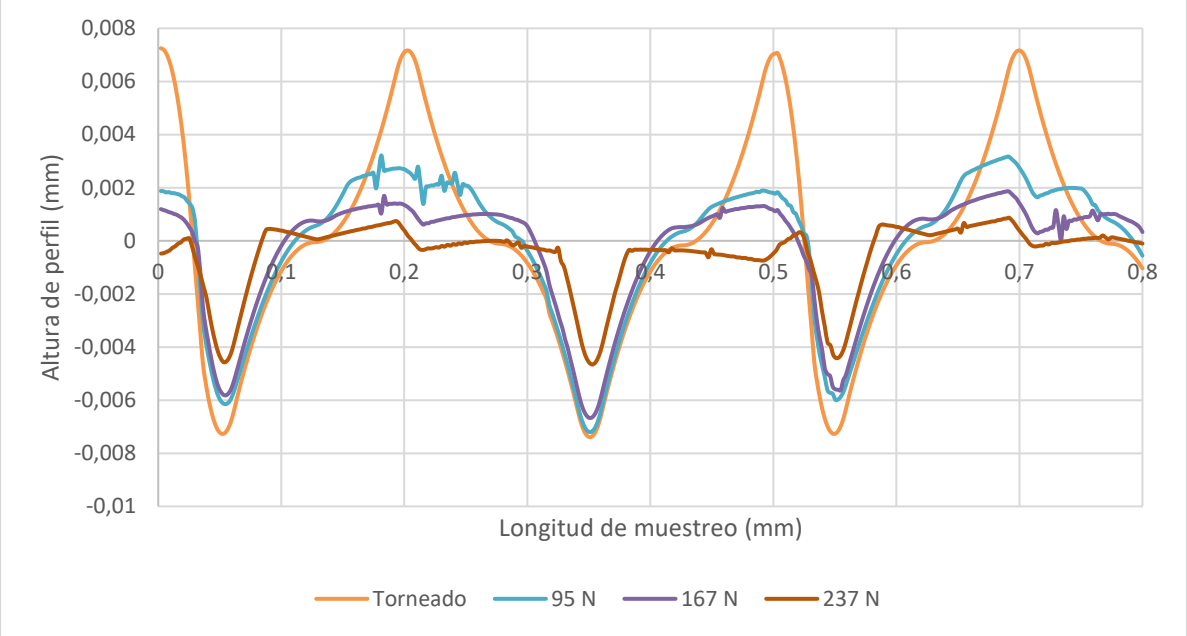
Fuente: El autor.

Los resultados obtenidos en la figura 33, muestran que la fuerza de 95N logra disminuir el pico casi hasta la mitad de su altura inicial y que la materia que se aplana se desplaza

hacia la base de la imperfección, Así mismo, presenta una mayor mejora a medida que la fuerza aumenta, pero dicha mejora presenta una tendencia logarítmica siendo menor la altura de aplastamiento a medida que aumenta la fuerza.

Luego de realizada la gráfica para el efecto del bruñido con una sola pasada, se procede a realizar la simulación del bruñido con 2 pasadas y fuerza constante, en la figura 34 se presentan los efectos de la doble pasada sobre la superficie de la pieza bruñida.

Figura 34. Resultado de deformación en "Y" para 2 pasada con diferentes fuerzas de bruñido.

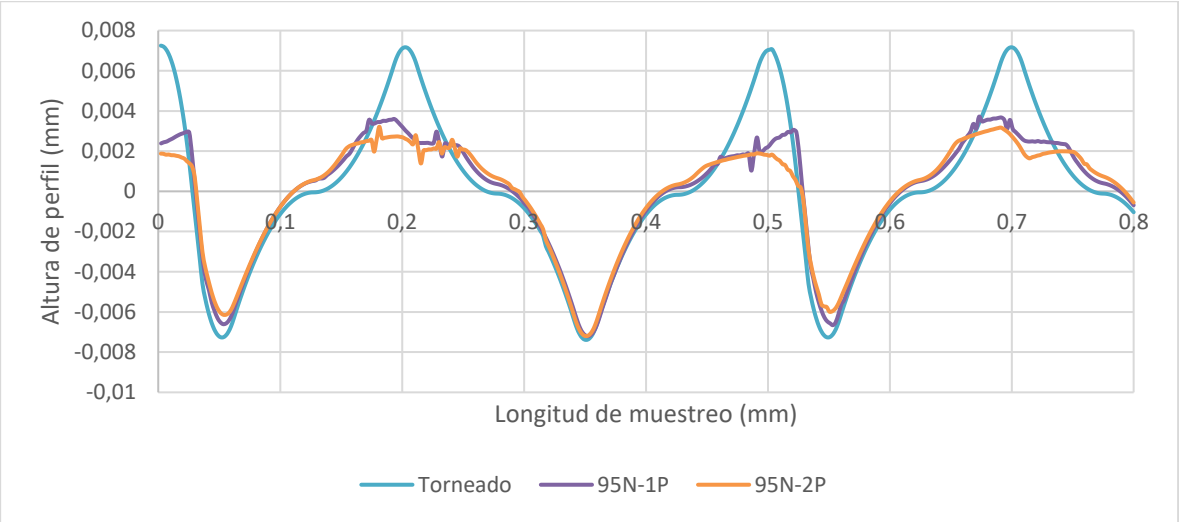


Fuente: El autor.

Como se puede observar en la figura 34, la deformación es directamente proporcional a la fuerza de bruñido esto quiere decir, que a mayor fuerza mayor deformación, sin embargo, se presenta una mayor deformación cuando se realiza una segunda pasada, aunque esta no sea muy representativa en cuanto a la medición de la superficie.

Posteriormente se realiza la comparación de las deformaciones entre las superficies, cuando la operación de bruñido es realizada con 1 pasada y 2 pasadas usando la misma fuerza de bruñido. La figura 35 presenta la comparación entre el perfil superficial sin bruñir y los resultados de perfiles simulados cuando se usa una y dos pasadas para una fuerza de 95 N.

Figura 35. Comparación de deformación para 95 N.

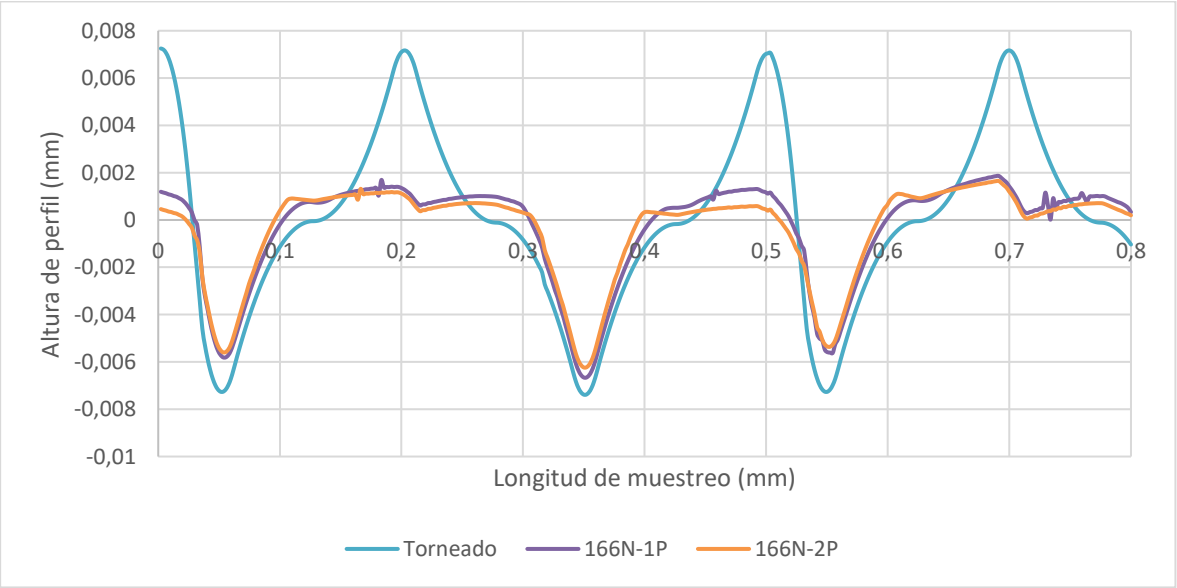


Fuente: El autor.

La figura 35 muestra que los resultados del bruñido para una fuerza de 95N es muy similar para las dos opciones de pasada, presentando una superficie un poco más pareja la de 2 pasadas.

La figura 36 presenta la comparación entre el perfil superficial sin bruñir y los resultados de perfiles simulados cuando se usa una y dos pasadas para una fuerza de 166 N.

Figura 36. Comparación de deformación para 166 N.

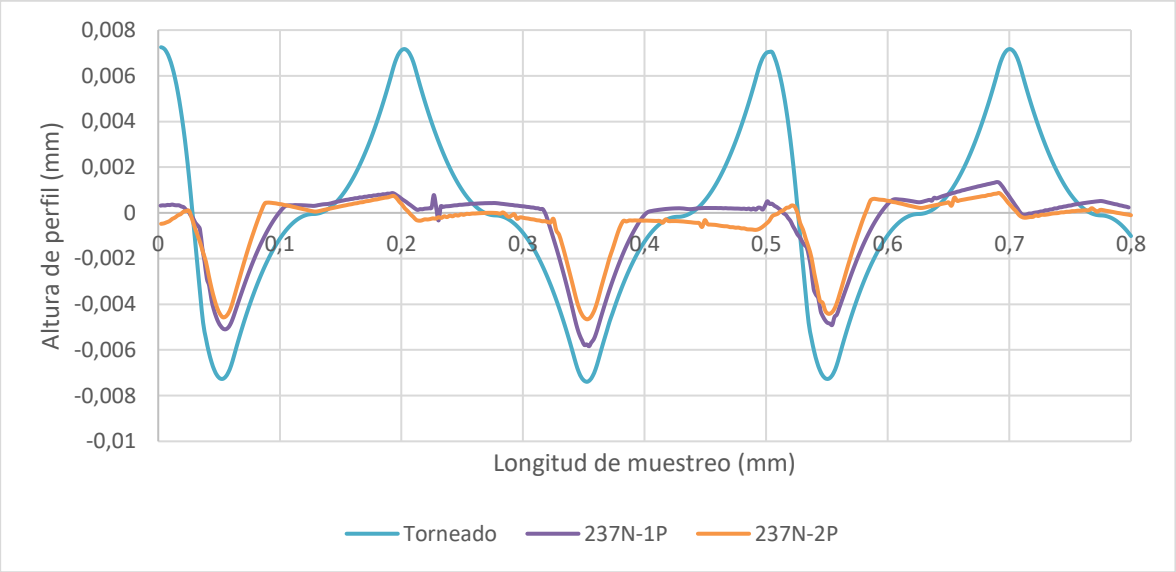


Fuente: El autor.

La figura 36 muestra que los resultados del bruñido para una fuerza de 166N es muy similar para las dos opciones de pasada siendo la de 2 pasadas un poco mejor, en este resultado, se puede observar que la altura del pico pasa de ser máximo de 2 micras y que el desplazamiento del material ya empieza a llenar los puntos más bajos del perfil.

La figura 37 presenta la comparación entre el perfil superficial sin bruñir y los resultados de perfiles simulados cuando se usa una y dos pasadas para una fuerza de 237 N.

Figura 37. Comparación de deformación para 237 N.



Fuente: El autor.

La figura 37 muestra que los resultados del bruñido para una fuerza de 237N es muy similar para las dos opciones de pasada siendo la de 2 pasadas un poco mejor, en este resultado, se puede observar que la altura del pico pasa a ser máximo de 1 micra y que el desplazamiento del material en los puntos más bajos del perfil se rellena aproximadamente 3 micras.

3.3 Especificación del mandril.

Durante la consulta de la información, se encontró que varios autores han desarrollado diferentes tipos de mandriles de acuerdo al tipo de máquina herramienta a utilizar y superficie a trabajar. En su investigación, Teimouri [2], desarrolló un mandril ultrasónico y evaluó su desempeño en un proceso de bruñido en aluminio 6061-T6.

Para determinar el tipo de mandril que se utilizó durante el desarrollo de la investigación, se evaluaron 3 opciones de diseño de mandril, cada uno con diferentes tipos de funcionamiento.

Para definir el tipo de mandril a utilizar, se realizó un diagrama QDF (despliegue de la función de calidad), relacionando los siguientes requerimientos:

Cliente:

- Fácil mantenimiento.
- Pocos elementos.
- Resistente.
- Accionamiento hidráulico.
- Accionamiento neumático.
- Accionamiento electrónico.
- Económico.
- Confiable.

Funcionales:

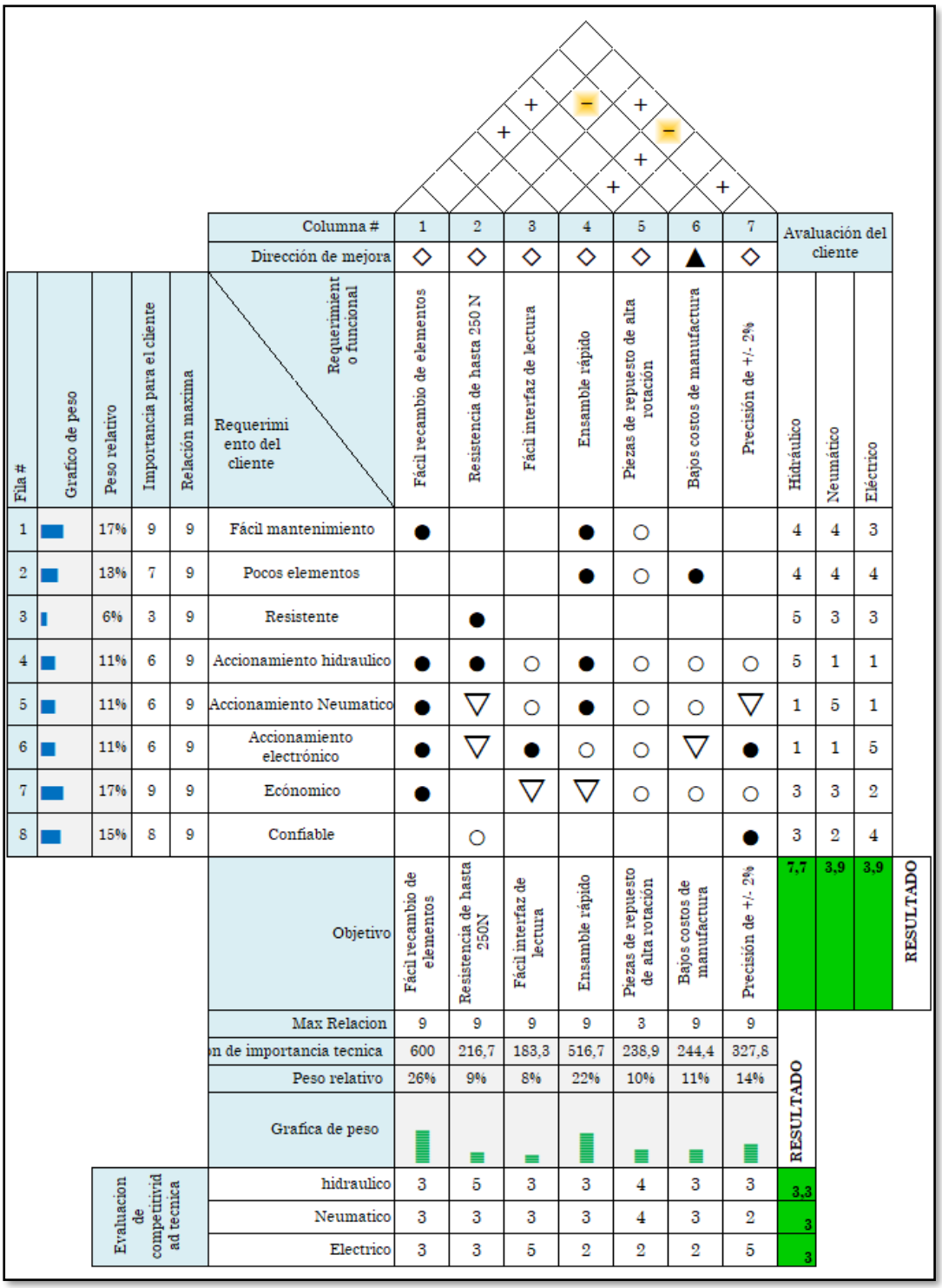
- Fácil recambio de elementos.
- Resistencia de 250 N.
- Fácil interfaz de lectura.
- Rápido ensamble.
- Piezas de repuesto de alta rotación.
- Bajos costos de manufactura.
- Precisión de +/- 2%.

La figura 38 evalúa las tres opciones de fabricación de mandril teniendo en cuenta su tipo de funcionamiento y relacionando los requerimientos de cliente y la competitividad técnica de cada tipo.

Posterior a la realización del despliegue de función de calidad, se observa que el mandril de accionamiento hidráulico cumple con mayor puntaje los requerimientos del cliente y los criterios de competitividad técnica siendo la suma de entre estos criterios igual a 11 puntos. Luego se encuentra que la sumatoria entre los criterios para los mandriles de tipo neumático y eléctrico son de 6.9 puntos para ambos tipos.

La diferencia entre los puntajes radica en que el mandril de tipo hidráulico no es el más débil en ninguno de los criterios de evaluación, pero si es el mejor en otros, mientras que los otros dos tipos de mandril, a pesar de tener la mayor puntuación en algunos criterios, si tiene la puntuación más baja en otros.

Figura 38. Diagrama de función de calidad para la selección del tipo de mandril a utilizar.



Fila #	Grafico de peso	Peso relativo	Importancia para el cliente	Relación maxima	Requerimiento del cliente \ Requerimiento funcional	1 Fácil recambio de elementos	2 Resistencia de hasta 250 N	3 Fácil interfaz de lectura	4 Ensamble rápido	5 Piezas de repuesto de alta rotación	6 Bajos costos de manufactura	7 Precisión de +/- 2%	Avaluación del cliente: Hidráulico	Neumático	Eléctrico
					Dirección de mejora	◇	◇	◇	◇	◇	▲	◇			
1		17%	9	9	Fácil mantenimiento	●			●	○			4	4	3
2		13%	7	9	Pocos elementos				●	○	●		4	4	4
3		6%	3	9	Resistente		●						5	3	3
4		11%	6	9	Accionamiento hidraulico	●	●	○	●	○	○	○	5	1	1
5		11%	6	9	Accionamiento Neumatico	●	▽	○	●	○	○	▽	1	5	1
6		11%	6	9	Accionamiento electrónico	●	▽	●	○	○	▽	●	1	1	5
7		17%	9	9	Ecónomico	●		▽	▽	○	○	○	3	3	2
8		15%	8	9	Confiable		○					●	3	2	4
					Objetivo	Fácil recambio de elementos	Resistencia de hasta 250N	Fácil interfaz de lectura	Ensamble rápido	Piezas de repuesto de alta rotación	Bajos costos de manufactura	Precisión de +/- 2%	7,7	3,9	3,9
					Max Relacion	9	9	9	9	3	9	9			
					n de importancia tecnica	600	216,7	183,3	516,7	238,9	244,4	327,8			
					Peso relativo	26%	9%	8%	22%	10%	11%	14%			
					Grafica de peso										
		Evaluacion de competitividad tecnica			hidraulico	3	5	3	3	4	3	3	3,3		
					Neumatico	3	3	3	3	4	3	2	3		
					Electrico	3	3	5	2	2	2	5	3		

RESULTADO

Fuente: El autor.

3.3.1 Diseño de mandril.

Para la fabricación del mandril se tuvo en cuenta algunos diseños planteados por varios autores y se realizó su adaptación a componentes de alta rotación en el mercado, esto con el fin de que su fabricación fuese rápida, económica y de fácil mantenimiento.

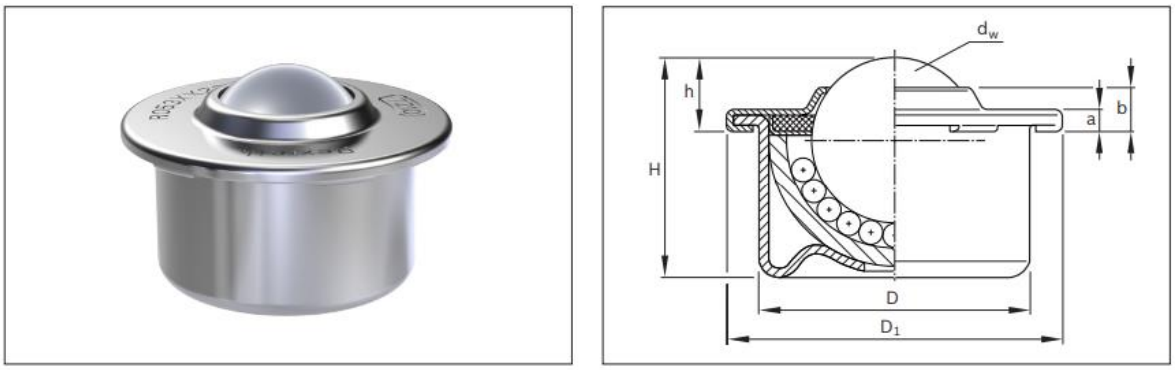
Para la esfera, se observó que autores como Chueca de Brujin, et al, [26], utilizan una serie de esferas pequeñas que soportan la esfera de bruñido con el fin de garantizar la rotación entre la pieza a bruñir y la esfera, este sistema además, ayuda a anular las fuerzas perpendiculares a la fuerza de bruñido que se pudieran presentar por la fricción entre los dos elementos.

Se encontró en el mercado un elemento llamado bolas de transferencia (traducido al inglés como ball transfer unit), esta unidad de rodamiento es utilizada para el transporte de elementos sobre superficies, sin embargo, dado su tipo de fabricación y sus características funcionales la hacen óptima para ser utilizada en el proceso de bruñido.

La figura 39a muestra una bola de transferencia con flanche similar a la que se usaría en el mandril, la figura 39b, muestra el detalle constructivo de una bola de transferencia donde se observa que la esfera más grande es soportada en la parte inferior por otras pequeñas esferas que permiten la libre rotación de la de mayor diámetro.

Figura 39. (a) Imagen de una bola de transferencia con Flanche, (b) corte de una bola de transferencia.

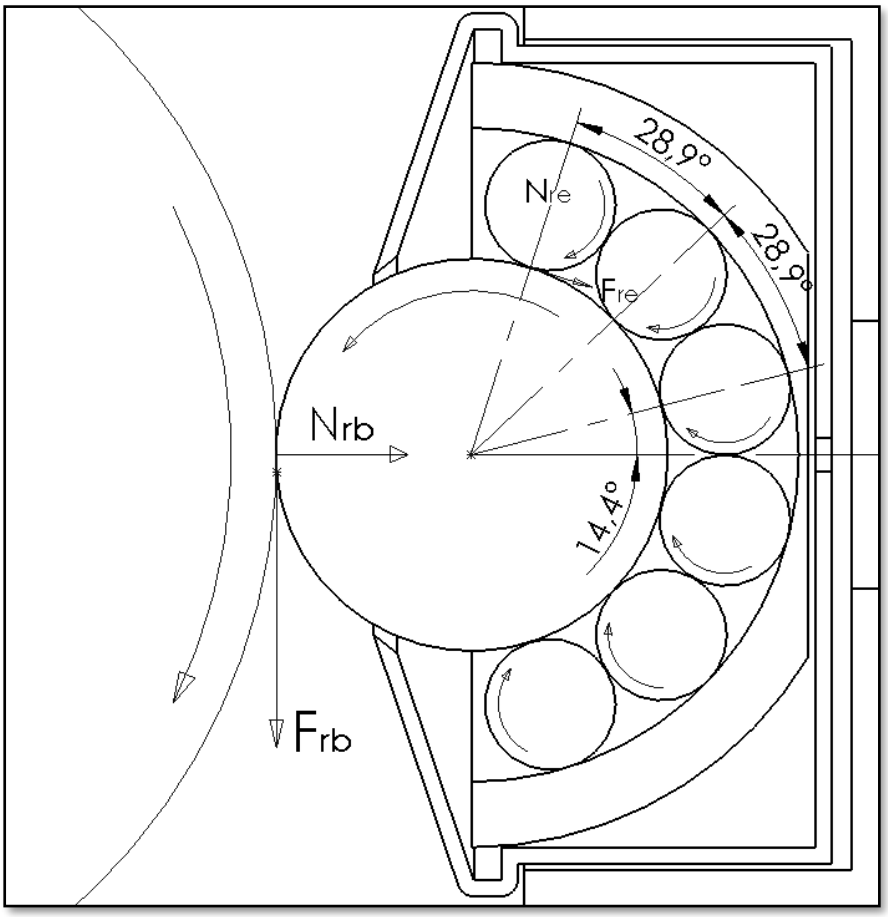
(a) (b)



Fuente: Consultado: https://www.boschrexroth.com/en/xc/myrexroth/media-directory/-/document_library/view_document/29055800?_20_redirect=https%3A%2F%2Fwww.boschrexroth.com%2Fen%2Fweb%2Fxc%2Fmyrexroth%2Fmedia-directory%3Fp_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26

La figura 40, se presenta un diagrama de cuerpo libre (DCL) de la interacción entre la pieza y la esfera cuando se lleva a cabo el proceso de bruñido.

Figura 40. Diagrama de cuerpo libre de la interacción entre la pieza a bruñir y la bola de transferencia.



Fuente: El autor

Dado de que la magnitud de las cargas de bruñido es mucho mayor que las cargas generadas por la masa de las esferas, las reacciones producidas por estas masas se omitirán.

Ecuaciones de equilibrio (12 – 17) para la esfera de bruñido:

$$\sum_{Fx} = 0 \tag{12}$$

$$F = N_{rb} \tag{13}$$

$$\sum_{Fy} = 0 \tag{14}$$

$$F_{rb} = 0 \tag{15}$$

$$\sum_{M} = 0 \tag{16}$$

$$F_{rb} = \frac{M_p}{r_{eb}} \tag{17}$$

Donde:

$\sum_{Fx}$ = Sumatoria de fuerzas en “X”.

F = Fuerza de bruñido.

N_{rb} = Fuerza normal de bruñido.

$\sum_{Fy}$ = Sumatoria de fuerzas en “Y”.

F_{rb} = Fuerza de rozamiento de bruñido.

$\sum_{M}$ = Sumatoria de momentos.

M_p = Momento de pieza.

r_{eb} = Radio de esfera de bruñido.

Como se puede observar en el D.C.L. el fabricante utiliza esferas de 4 mm para soportar la esfera de transferencia, realizando el modelado del conjunto, se concluye que la fuerza de bruñido (*F*) se divide en el número de esferas de soporte que tienen contacto con la esfera de transferencia como se muestra en la ecuación 18:

$$F_{be} = \frac{F}{N° \, esferas \, de \, soporte} \tag{18}$$

Ecuaciones de equilibrio (19 - 24) para las esferas de soporte:

$$\sum_{Fx} = 0 \tag{19}$$

$$F_{be} = N_{be} \tag{20}$$

$$\sum_{Fy} = 0 \tag{21}$$

$$F_{re} = 0 \tag{21}$$

$$\sum_{M} = 0 \tag{23}$$

$$F_{re} = \frac{M_{eb}}{r_{es}} \tag{24}$$

Donde:

$\sum_{Fx}$ = Sumatoria de fuerzas en “X”.

F_{be} = Fuerza de bruñido por cada esfera de soporte.

N_{be} = Fuerza normal de cada esfera.

$\sum_{Fy}$ = Sumatoria de fuerzas en “Y”.

F_{re} = Fuerza de rozamiento por esfera.

$\sum_{M}$ = Sumatoria de momentos.

M_{eb} = Momento esfera de bruñido.

r_{es} = Radio de esfera de soporte.

Como se puede observar en las ecuaciones de equilibrio, las fuerzas producidas sobre el eje “Y” o en sentido vertical, son iguales a cero, esto quiere decir, que se puede asumir que la carga es netamente horizontal y normal a la fuerza de bruñido.

Para la lectura de la fuerza de bruñido (F), se utilizó la ecuación 25 para relacionar la presión del fluido dentro del cilindro hidráulico y la fuerza ejercida por el vástago.

$$P = \frac{F}{A} \tag{25}$$

Donde:

P = Presión.

F = fuerza.

A = Área.

Y conociendo el diámetro interno del cilindro se produjo la tabla 7 que relaciona la presión manométrica con las diferentes fuerzas de bruñido.

Presión manométrica (PSI)	Fuerza de bruñido (N)
22	95
41	166
60	237

Tabla 7. Tabla de relación entre presión manométrica y fuerza de bruñido.

3.3.2 Costos de manufactura.

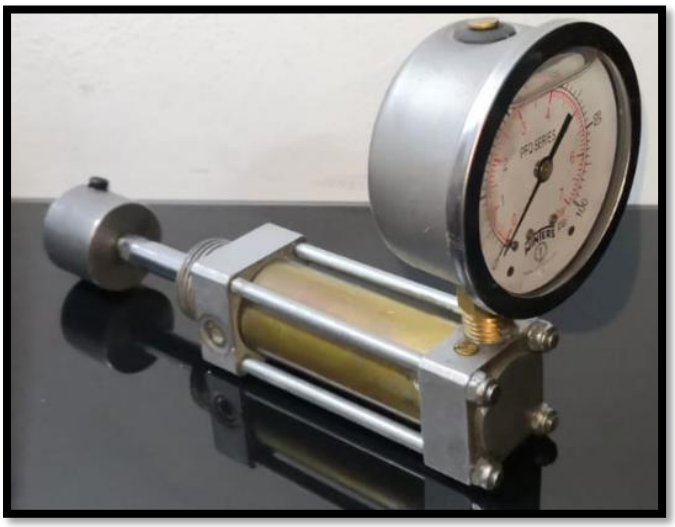
De acuerdo al diagrama de función de calidad, se obtuvo que la opción más viable es el de accionamiento hidráulico por su estabilidad durante el proceso, su bajo mantenimiento, y su fácil fabricación.

Para este proyecto, se utilizó un cilindro neumático remanufacturado, al cual se le realizó un cambio de empaquetadura para usar aceite en su recamara. Para la esfera, se utilizó un elemento llamado unidad de transferencia que es un conjunto de esferas pequeñas encapsuladas dentro de una recamara que perimetralmente da soporte a una esfera más grande, y mediante un acople fabricado en acero se sujetó al vástago del cilindro. Para realizar la lectura de la fuerza de bruñido, se utilizó un manómetro marca Winters con un

rango de medición de 0-100 PSI de caratula de 2 ½” pulgadas de diámetro, con amortiguador y mecanismo sumergido en glicerina para evitar las variaciones lectura durante el proceso. El anexo D, muestra un plano de ensamble en vista explosionada con la lista de elementos utilizados para la fabricación del mandril.

La figura 41 muestra el mandril fabricado y la tabla 8 presenta sus costos de manufactura.

Figura 41. Imagen del mandril de bruñido de accionamiento hidráulico.



Fuente: El autor.

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	COSTO
Cilindro neumático.	1	Es el elemento que se utiliza para convertir la fuerza de bruñido en presión hidráulica. En la punta del vástago se ubica la esfera y en la parte posterior de la camisa un manómetro que permite graduar la presión de bruñido	$ 40 000*
Bola de transferencia.	1	Este elemento es el encargado de realizar el proceso de bruñido, la esfera que se encuentra en la punta entra en contacto con la supervise a mejorar y realiza la deformación plástica (ver anexo C).	$ 12 000
Manómetro 2” con recamara en glicerina.	1	Este elemento permite realizar la lectura de la presión dentro de la recamara del cilindro, se escogió de recamara en	$ 27 000

		glicerina para amortiguar las variaciones presentadas por la esfera y así mejorar la lectura.	
Acople para bola de transferencia	1	Se fabricó un elemento para acoplar la esfera de transferencia a la punta del vástago que tenía una rosca macho de 10mm.	$ 18 000
Adecuación	1	La adecuación incluyo: Cambio de empaquetadura de cilindro neumático para ser utilizada con aceite hidráulico (nitrilo). Realización de rosca de 1/4" NPT para adaptar el manómetro al cilindro.	$ 60 000
		Total	$ 157 000
* El costo de un cilindro neumático nuevo que se puede utilizar para el mismo propósito tiene un costo comercial de $ 110 000 COP más impuestos.			

Tabla 8. Tabla de costos de fabricación de mandril de bruñido de accionamiento hidráulico.

3.4 Resultados experimentales.

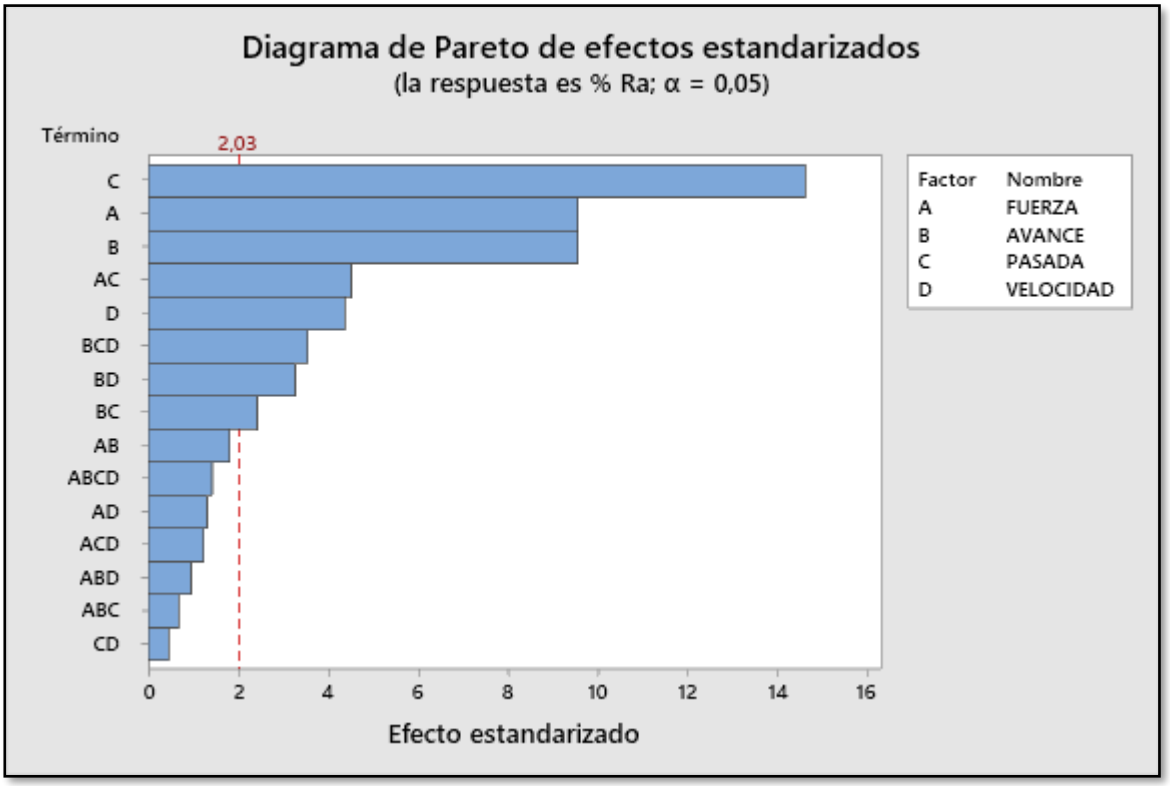
Luego de la realización del procedimiento experimental, se tomaron medidas de rugosidad antes ($R_{torneado}$) y después ($R_{bruñido}$) del proceso, la variable de respuesta que se seleccionó es la mejora de la superficie y se obtuvo mediante la ecuación 12, los valores de rugosidad usados para calcular la mejora son los de la rugosidad aritmética ($R_{a)}$.

$$R_{resultado} = \frac{R_{torneado} - R_{bruñido}}{R_{bruñido}} \; x \; 100 \qquad (25)$$

Una vez definido el valor de mejora de rugosidad, se realiza un análisis de varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos, con el fin de establecer los factores o la combinación de factores que más influyen dentro del proceso de bruñido.

El diagrama de Pareto presentado en la figura 40 muestra que los factores que más influyen en la disminución de la rugosidad son: N° de pasadas (C), Fuerza de bruñido (A), Avance (B).

Figura 42. Diagrama de Pareto para mostrar la influencia de las variables sobre el resultado del bruñido.



Fuente: El autor.

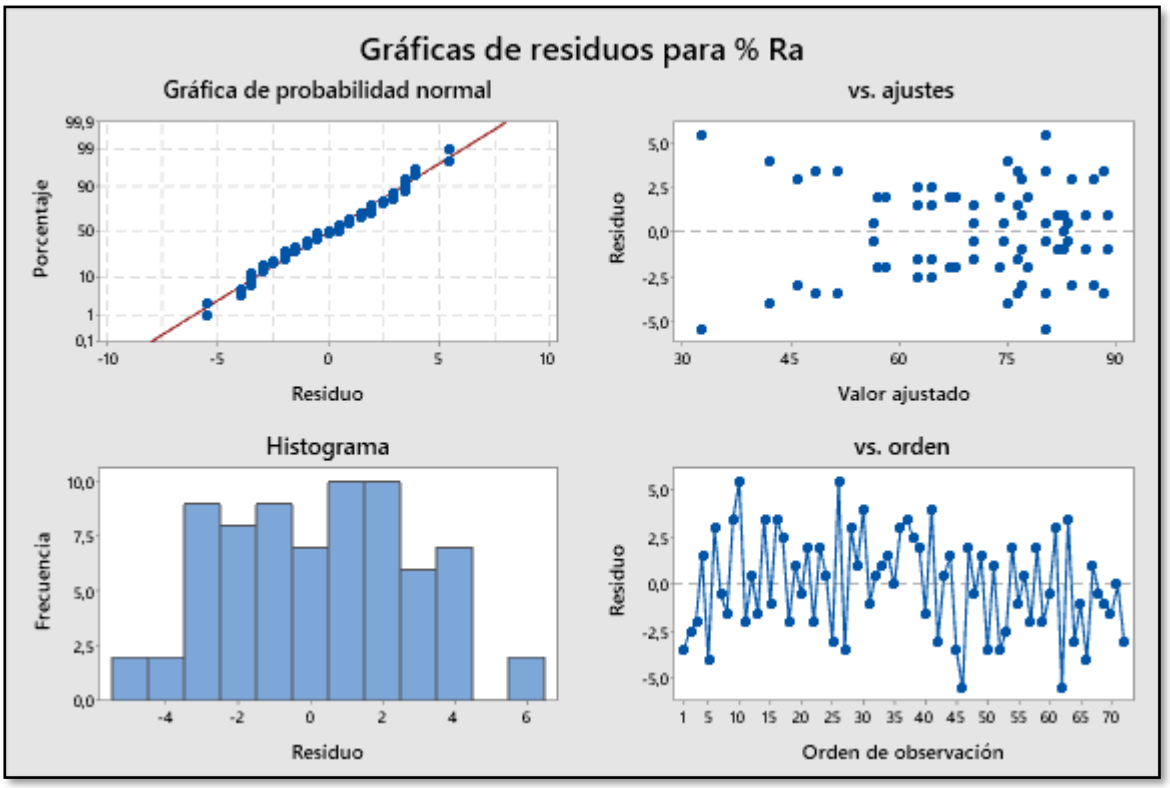
El anexo E presenta la ecuación de regresión la cual resume el modelo de la siguiente forma:

Como se observa en la tabla 9, el valor para el R-cuadrado representa el 96.66% de los datos, en cuanto al R-cuadrado predictivo, se podrá predecir el 86.64% de los resultados cuando se emplee dicha ecuación.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,66288	96,66%	93,41%	86,64%

Tabla 9. Tabla resumen de modelo.

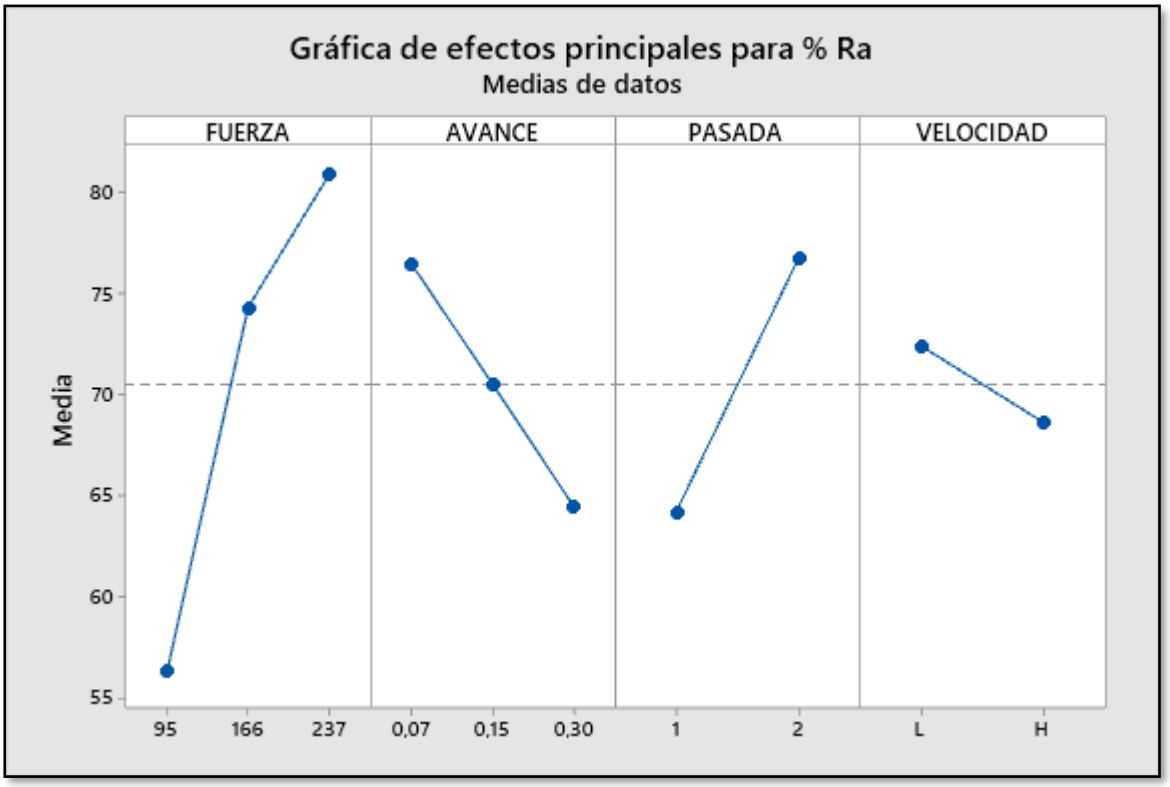
Figura 43. Grafica de resumen de residuos para porcentaje de mejora de Ra.



Fuente El Autor.

La distribución de los resultados experimentales presentados en la tabla de graficas de residuos (figura 43), muestra que el proceso experimental fue realizado correctamente ya que la distribución de los datos presenta una tendencia característica a las gráficas de este tipo. Para la gráfica de probabilidad normal, se encuentran algunos datos alejados del grupo de resultados, sin embargo, estos son cercanos a la línea de tendencia. Para el histograma, se presenta una distribución similar a una gráfica de distribución normal en donde los datos cercanos a cero (0) son más frecuentes y van disminuyendo a medida que se alejan de este punto. Para las gráficas de residuo vs. Ajuste y residuo vs. Orden, se observa una distribución de los datos similar en el área positiva y negativa del residuo sin presentar una marcada agrupación de los datos en ninguna zona de la gráfica.

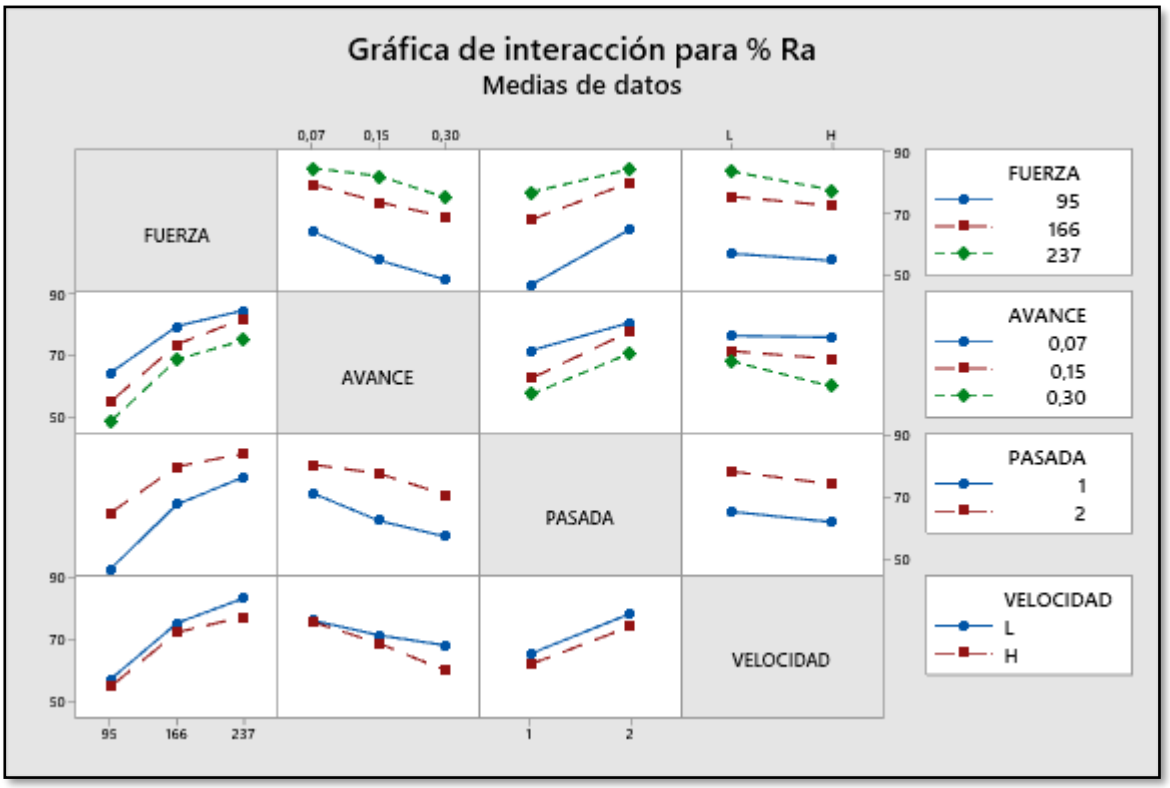
Figura 44. Grafica de efectos principales sobre el resultado de mejora de Ra.



Fuente: El Autor.

La figura 44 presenta la influencia de los factores y sus niveles en el resultado de la mejora de bruñido, aquí se puede observar que la combinación con la que se logran mayores mejoras superficiales fue: Mayor fuerza, menor avance, 2 pasadas y velocidad baja.

Figura 45. Grafica de interacciones entre factores.

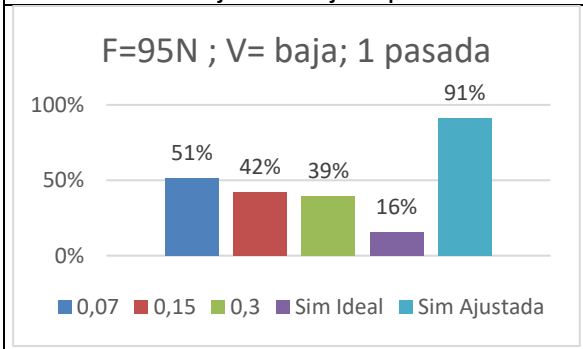
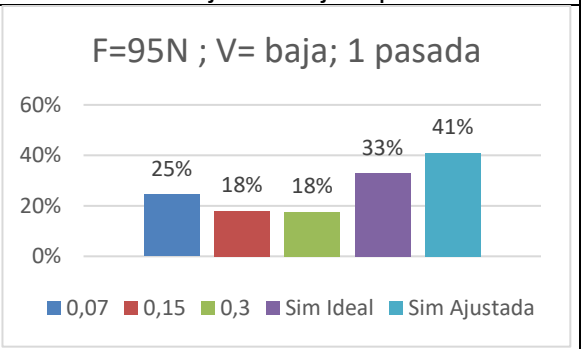
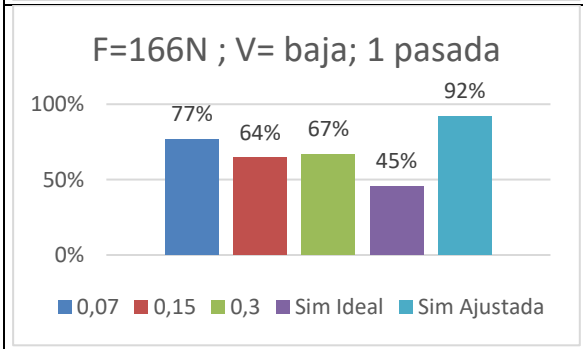
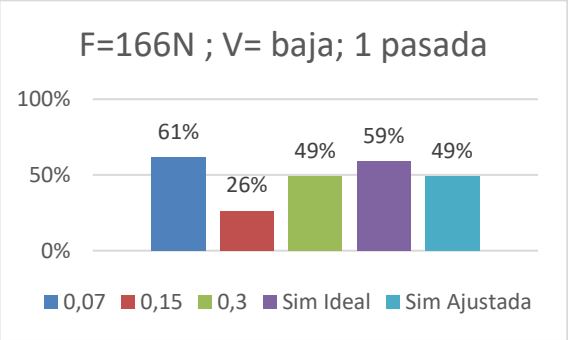
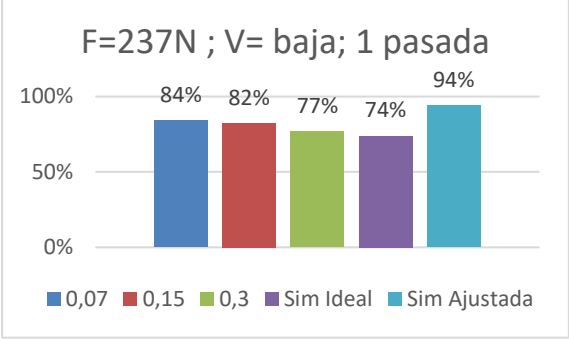
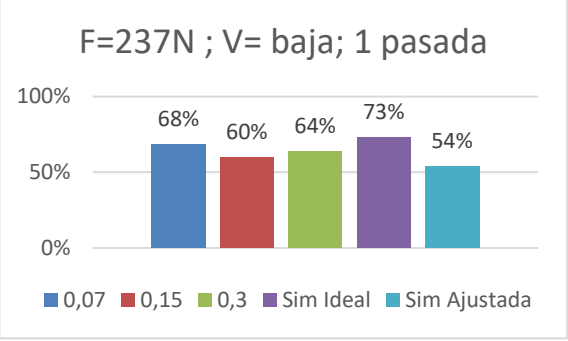
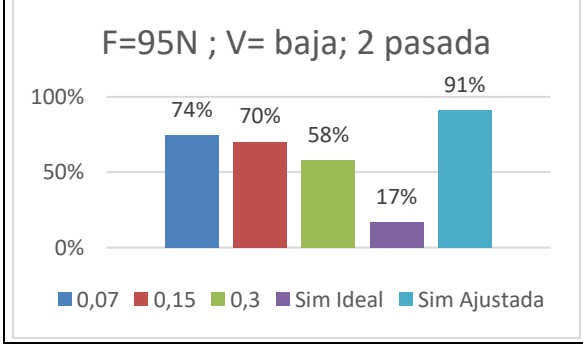
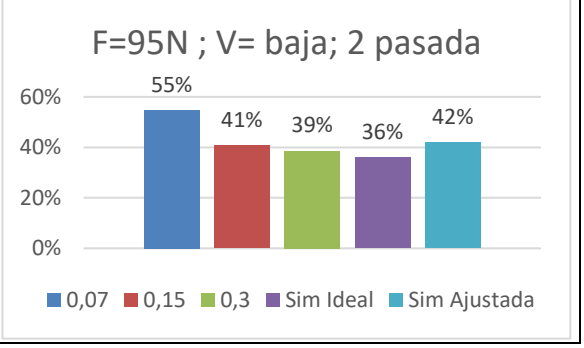


Fuente El Autor.

La figura 45 presenta una interacción marcada entre el avance y la velocidad y la fuerza y la velocidad, sin embargo, la interacción entre la pasada y la velocidad es casi inexistente independiente de los niveles que asignen para estos factores.

3.5 Comparación de resultados.

Posterior a la realización del proceso de simulación y del proceso de experimentación, se realizó una comparación entre las mejoras de rugosidad obtenidas respecto de la disminución de la rugosidad Ra y Rz para cada uno de los casos evacuados, en la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para cada factor:

Porcentaje de mejora para Ra	Porcentaje de mejora para Rz
	
	
	
	

F=166N ; V= baja; 2 pasada
100%
50%
0%
86%
83%
78%
58%
93%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=166N ; V= baja; 2 pasada
100%
50%
0%
61%
73%
61%
67%
54%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=237N ; V= baja; 2 pasada
100%
90%
80%
70%
89%
89%
83%
90%
96%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=237N ; V= baja; 2 pasada
100%
50%
0%
75%
82%
74%
89%
63%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=95N ; V= alta; 1 pasada
100%
50%
0%
63%
46%
33%
15%
92%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=95N ; V= alta; 1 pasada
60%
40%
20%
0%
38%
21%
26%
33%
37%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=166N ; V= alta; 1 pasada
100%
50%
0%
76%
68%
57%
44%
93%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada
F=166N ; V= alta; 1 pasada
100%
50%
0%
59%
55%
42%
59%
50%
0,07 0,15 0,3 Sim Ideal Sim Ajustada

Tabla 10. Tabla de comparación de resultados para mejoras de Ra y Rz entre los métodos experimentales y simulados.

Para ambos casos, las mejoras entre resultados utilizando una o dos pasadas son mucho más significativas a medida que aumenta la fuerza de bruñido.

Para los resultados de mejora de Ra, se observa que la mejora es similar a la obtenida por otros autores y muestra que mayor fuerza y mayor número de pasadas da como resultado

una mayor mejora de Ra, así mismo, un menor avance también presenta una mayor mejora en el resultado de Ra; El avance de 0.3mm/rev da mejores resultados cuando se realiza a menor velocidad de bruñido; a medida que se aumenta la fuerza de bruñido, la brecha entre los resultados de mejora es menor, esto obedece a un comportamiento logarítmico como ya se había observado durante el análisis de la simulación.

El modelo de simulación ideal se acerca más a los resultados experimentales de Ra a medida que aumenta la fuerza de bruñido.

Para los resultados de mejora de Rz, se observa que los resultados de las simulaciones entre los modelos ideales y ajustados son más similares entre sí, esto obedece a que la altura entre dos puntos es más fácil de emular que el área de un perfil, por esta razón los resultados entre dichas simulaciones y los valores obtenidos experimentalmente también son más cercanos entre sí.

A diferencia de la mejora de Ra, los cambios de avance del proceso no presentan una mayor influencia entre los resultados de mejora de Rz.

Los cambios de velocidad de bruñido no son muy influyentes en el resultado cuando se realizan 2 pasadas, esto quiere decir, que se podrían realizar dos pasadas a mayor velocidad dando un resultado similar, pero disminuyendo el tiempo del proceso.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto de investigación, se demostró que el bruñido con esfera es un proceso de mejora superficial que presenta resultados favorables y que su realización es de fácil ejecución (ver anexo F) y por lo tanto es económicamente viable para ser utilizado en las pequeñas y medianas empresas que se dediquen a la fabricación de piezas torneadas.

El diseño experimental seleccionado para la investigación dio como resultado que los factores de fuerza de bruñido (F), N° de pasada (N) y avance (f) son los presentan mayores mejoras superficiales en las piezas sometidas al proceso, estos resultados son similares a los obtenidos por otros autores.

El proceso de bruñido se puede realizar mediante simulación por elementos finitos, para este caso, fue necesario construir la curva esfuerzo-deformación en la zona plástica del material para obtener las deformaciones direccionales en cada uno de los nodos, se observó que los resultados obtenidos mediante simulación dependen directamente de la superficie que se genere durante el modelado; para esta investigación, los resultados de mejora de Rz simulados fueron más cercanos a los resultados experimentales que los resultados de mejora de Ra simulado.

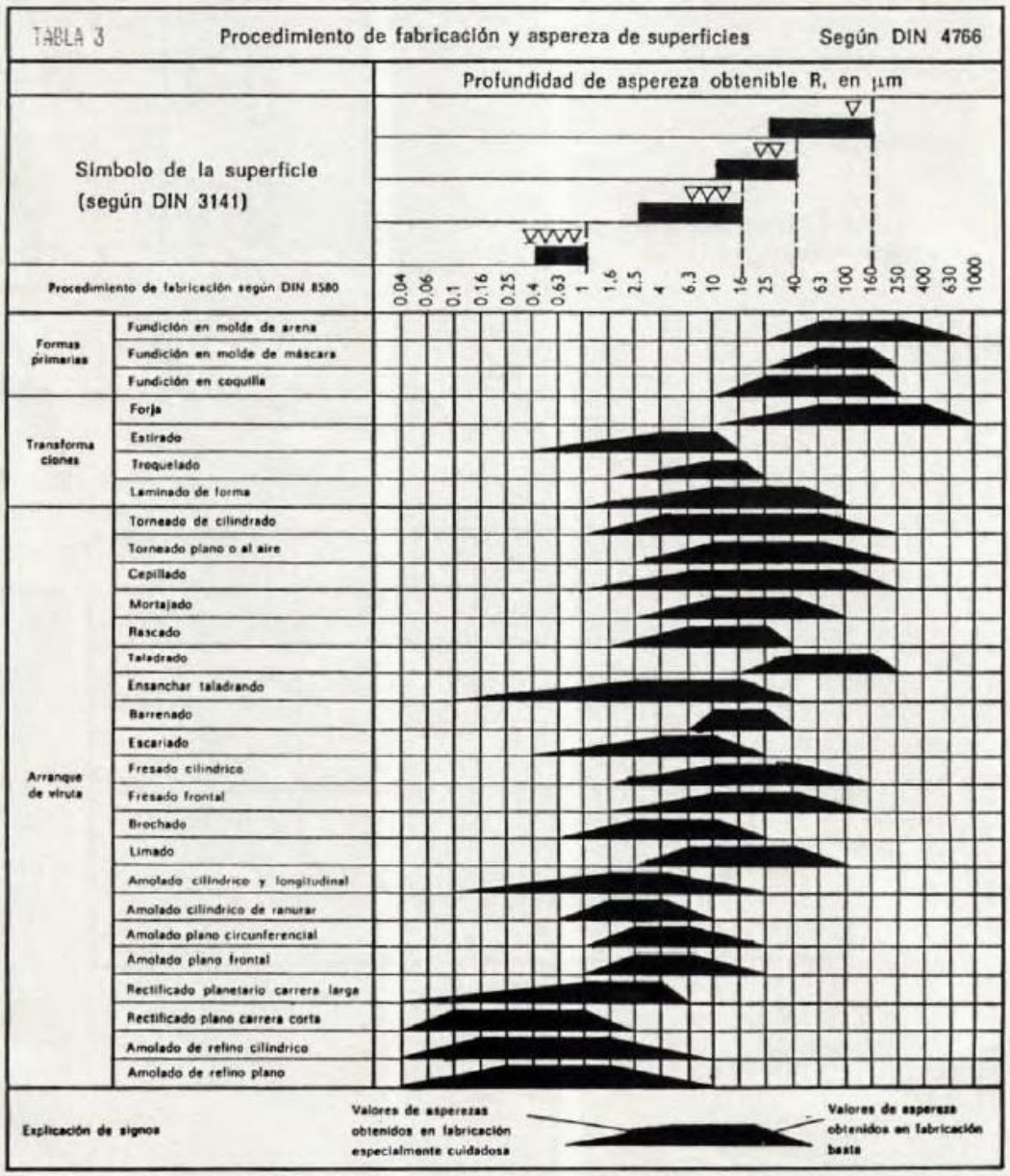
El diseño de mandril propuesto durante la investigación se desarrolló con el objetivo de su replicación, los materiales que se utilizaron para su fabricación son comercialmente asequibles y de alta rotación, mientras que su mecanismo de funcionamiento es simple y permite que la lectura de la presión dentro del cilindro hidráulico sea constante.

Los resultados obtenidos durante el procedimiento experimental mostraron que todos los factores y niveles seleccionados presentan mejoras superficiales visualmente apreciables en la pieza (ver anexo G), obteniendo mejoras de Ra de hasta un 89% y mejoras de Rz de 78%.

4.2 Recomendaciones

- Extender la investigación de las ventajas del bruñido con esfera sobre las piezas fabricadas en acero SAE 12L14 haciendo énfasis en las mejoras de resistencia a la corrosión y la resistencia a la fatiga, esto teniendo en cuenta que, aunque no hacia parte de los objetivos de esta investigación, se realizaron mediciones de dureza HRB y se obtuvieron mejoras de dureza de 3% (ver anexo H).
- La simulación en 3 dimensiones podría llegar a dar resultados más cercanos entre los resultados experimentales y los resultados simulados ya que se podría incluir el factor de avance dentro de este análisis, no obstante, es importante tener en cuenta que se requiere de herramientas computacionales más potentes para que el gasto computacional sea menor.
- La caracterización de la superficie de la pieza a bruñir es muy importante para los resultados de la simulación del proceso de bruñido sean adecuados, por esta razón, se sugiera que para próximas investigaciones se utilicen métodos de caracterización como microscopia de fuerza atómica (AFM) para tener un perfil similar al obtenido en la pieza.

A. Anexo: Rugosidades características según proceso de manufactura.



B.Anexo: Certificado de trazabilidad acero SAE 12L14.

HASÇELİK

HASCELIK SANAYI VE TICARET A.S.

KALİTE BELGESİ / MILL TEST CERTIFICATE

ISO/TS 16949
ISO 9001/2008
ISO 14001
OHSAS 18001

EN 10204 3.1

Müşteri Adı / Customer Name :	ACEFER Y CIA. LTDA. (EXP) (Z)	Tarih / Date Of Issue :	25.12.2017
Ürün Adı / Product Name :	COLD DRAWN ROUND BAR	Kesit / Size(mm) :	038.10X000.00
Stok Adı / Stock Code :	Y038.10X000.00 HOT(12L14)A 00 C0/ASTM A108 L1/SC P1	Kalite / Grade :	12L14
İrsaliye No / Waybill No :	-	Döküm No / Heat No :	546247
Standart / Material Norm :	ASTM A108 L1	Ağırlık / Net-Gross Weight (Kgs) :	818
Sipariş No / Order No :			
Evrak No / Certificate No :	HPR-2017-12-5672	Çelik Yapım Metodu / Steel Making Method :	Elektrik Ark Ocağı/Electric Arc Furnace

KİMYASAL KOMPOZİSYON / CHEMICAL COMPOSITION IN PRODUCT

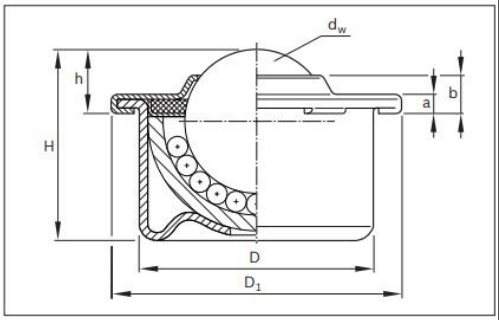
C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%	Al%	N%	Pb%	V%	Ti%	B%	Sn%
0.073	0.006	1.09	0.079	0.314	-	-	-	0.01	-	-	0.279	-	-	-	-

MEKANİK ÖZELLİKLER / MECHANICAL PROPERTIES

Akma N/mm^2 Yield	Çekme N/mm^2 Tensile	Uzama (%) Elongation (%)	Sertlik HB Hardness
457	603	13	165

C. Anexo: Ficha técnica de unidad de transferencia.

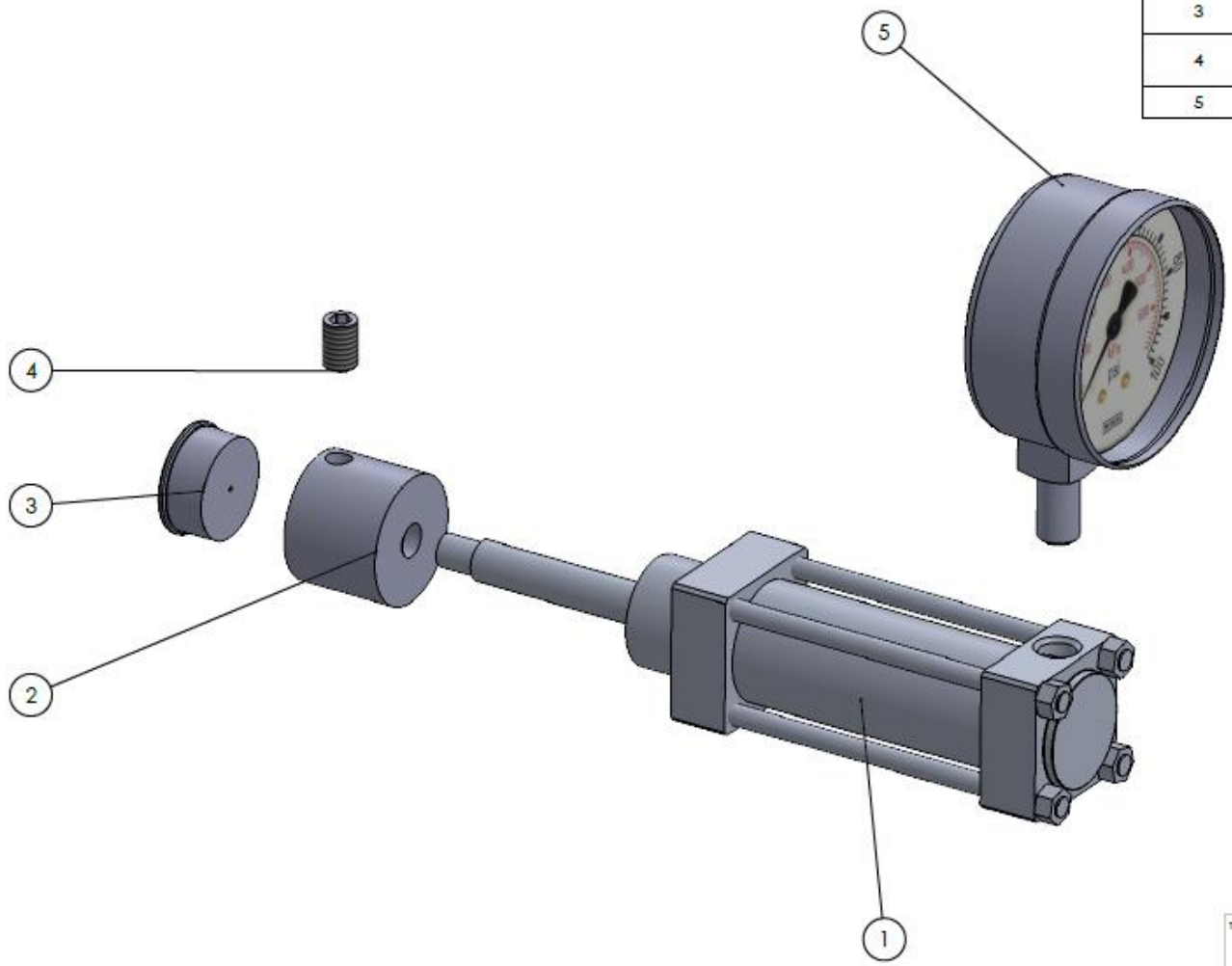
Ball Transfer Units with sheet steel housing R0530 1.., R0530 2.., R0530 6



Version With sheet steel housing. Smallest Ball Transfer Unit. For general applications.	Size	Part number	Load capacities (N)		Dimensions (mm)							Weight (kg)
			dyn. C	stat. C_0	d_w	D	D_1	h	H	a	b	m
R0530 1.. **KU-B.. - MFG** **Cover and housing galvanized.** **Balls made from antifriction bearing steel 1.3505.** **With felt seal**	**8**	R0530 108 10 [1]	130	250	7.938	12.6 ±0.055	17.0	4.8 ±0.15	11.2	1.9	3.2	0.007
	12	R0530 112 10 [1]	250	500	12.000	18.0 ±0.055	23.3	7.4 ±0.15	15.4	2.1	4.4	0.018
	15	R0530 115 10 [1]	500	1 000	15.875	24.0 ±0.065	31.0	9.5 ±0.20	21.5	2.5	6.1	0.038
		R0530 116 10 [1] [2]										
	22	R0530 122 10	1 300	2 500	22.225	36.0 ±0.080	45.0	9.8 ±0.20	29.5	2.9	5.7	0.132
		R0530 123 10 [2]										
	30	R0530 130 10	2 500	5 000	30.162	45.0 ±0.080	55.0	13.8 ±0.30	37.5	3.7	7.9	0.265
		R0530 131 10 [2]										
	45	R0530 145 10	6 000	12 000	44.450	62.0 ±0.095	75.0	19.0 ±0.40	53.7	4.2	10.5	0.720
		R0530 146 10 [2]										

D.Anexo: Plano de ensamble de mandril de bruñido.

N.° DE ELEMENTO	N.° DE PIEZA	CANTIDAD
1	Mandril-Cilindro	1
2	Mandril-acople	1
3	Mandril-bola de transferencia M12	1
4	Mandril-Prisionero M8	1
5	MANOMETRO	1



TÍTULO:
Ensambre de mandril de bruñido

N.° DE DIBUJO
Ensable-Explosionado

A3

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

E. Anexo: Ecuación de regresión del modelo.

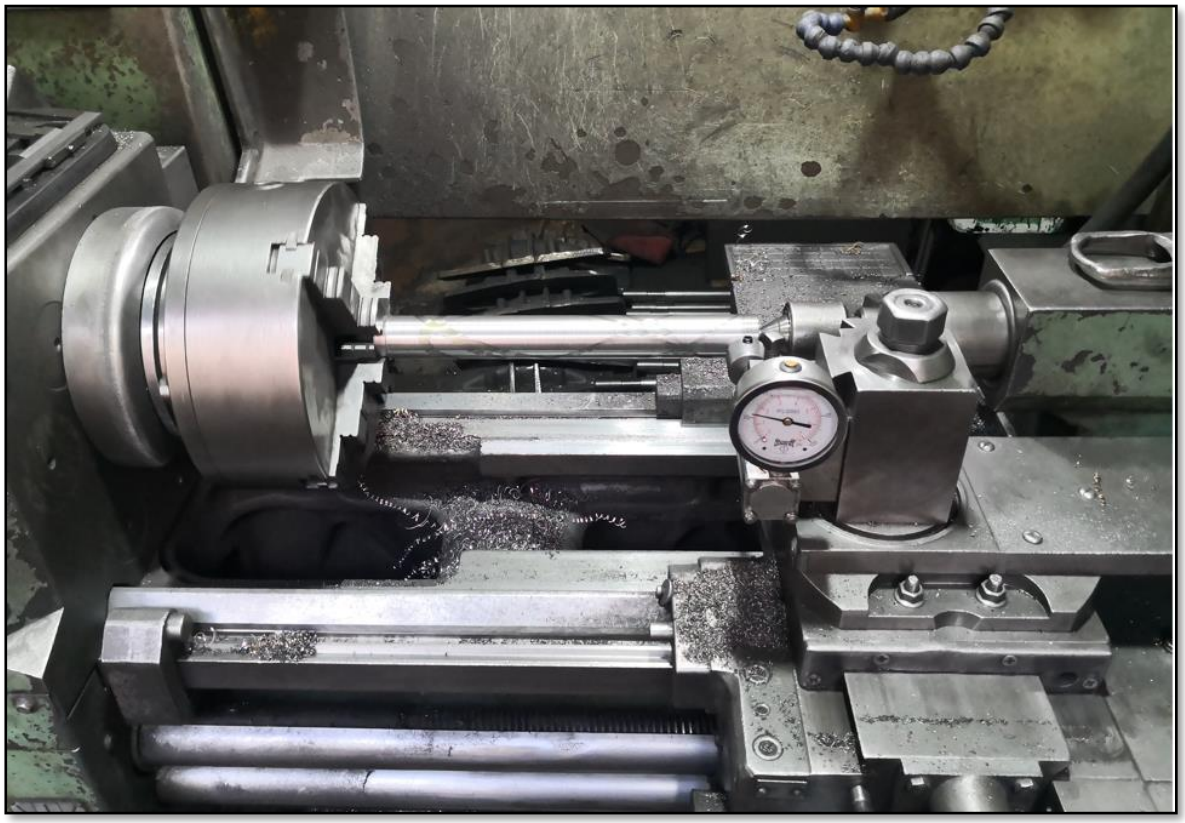
% Ra = 70,500 - 14,250 FUERZA_95 + 3,833 FUERZA_166 + 10,417 FUERZA_237 + 6,000 AVANCE_0,07
+ 0,042 AVANCE_0,15 - 6,042 AVANCE_0,30 - 6,306 PASADA_1 + 6,306 PASADA_2
+ 1,889 VELOCIDAD_L - 1,889 VELOCIDAD_H + 2,375 FUERZA*AVANCE_95 0,07
- 1,042 FUERZA*AVANCE_95 0,15 - 1,333 FUERZA*AVANCE_95 0,30 - 0,458 FUERZA*AVANCE_166 0,07 - 0,375 FUERZA*AVANCE_166 0,15 + 0,833 FUERZA*AVANCE_166 0,30
- 1,917 FUERZA*AVANCE_237 0,07 + 1,417 FUERZA*AVANCE_237 0,15
+ 0,500 FUERZA*AVANCE_237 0,30 - 2,778 FUERZA*PASADA_95 1 + 2,778 FUERZA*PASADA_95 2
+ 0,222 FUERZA*PASADA_166 1 - 0,222 FUERZA*PASADA_166 2 + 2,556 FUERZA*PASADA_237 1
- 2,556 FUERZA*PASADA_237 2 - 0,722 FUERZA*VELOCIDAD_95 L
+ 0,722 FUERZA*VELOCIDAD_95
H - 0,389 FUERZA*VELOCIDAD_166 L + 0,389 FUERZA*VELOCIDAD_166 H
+ 1,111 FUERZA*VELOCIDAD_237 L - 1,111 FUERZA*VELOCIDAD_237 H
+ 1,722 AVANCE*PASADA_0,07 1 - 1,722 AVANCE*PASADA_0,07 2 - 1,319 AVANCE*PASADA_0,15 1
+ 1,319 AVANCE*PASADA_0,15 2 - 0,403 AVANCE*PASADA_0,30 1
+ 0,403 AVANCE*PASADA_0,30 2
- 1,639 AVANCE*VELOCIDAD_0,07 L + 1,639 AVANCE*VELOCIDAD_0,07 H
- 0,597 AVANCE*VELOCIDAD_0,15 L + 0,597 AVANCE*VELOCIDAD_0,15 H
+ 2,236 AVANCE*VELOCIDAD_0,30 L - 2,236 AVANCE*VELOCIDAD_0,30 H
- 0,194 PASADA*VELOCIDAD_1 L + 0,194 PASADA*VELOCIDAD_1 H
+ 0,194 PASADA*VELOCIDAD_2 L
- 0,194 PASADA*VELOCIDAD_2 H - 0,264 FUERZA*AVANCE*PASADA_95 0,07 1
+ 0,264 FUERZA*AVANCE*PASADA_95 0,07 2 - 0,847 FUERZA*AVANCE*PASADA_95 0,15 1
+ 0,847 FUERZA*AVANCE*PASADA_95 0,15 2 + 1,111 FUERZA*AVANCE*PASADA_95 0,30 1
- 1,111 FUERZA*AVANCE*PASADA_95 0,30 2 + 0,986 FUERZA*AVANCE*PASADA_166 0,07 1
- 0,986 FUERZA*AVANCE*PASADA_166 0,07 2 - 0,347 FUERZA*AVANCE*PASADA_166 0,15 1
+ 0,347 FUERZA*AVANCE*PASADA_166 0,15 2 - 0,639 FUERZA*AVANCE*PASADA_166 0,30 1
+ 0,639 FUERZA*AVANCE*PASADA_166 0,30 2 - 0,722 FUERZA*AVANCE*PASADA_237 0,07 1
+ 0,722 FUERZA*AVANCE*PASADA_237 0,07 2 + 1,194 FUERZA*AVANCE*PASADA_237 0,15 1
- 1,194 FUERZA*AVANCE*PASADA_237 0,15 2 - 0,472 FUERZA*AVANCE*PASADA_237 0,30 1
+ 0,472 FUERZA*AVANCE*PASADA_237 0,30 2 - 1,403 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_95 0,07 L
+ 1,403 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_95 0,07 H + 0,431 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_95 0,15 L
- 0,431 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_95 0,15 H + 0,972 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_95 0,30 L
- 0,972 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_95 0,30 H + 1,514 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_166 0,07 L
- 1,514 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_166 0,07 H - 1,153 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_166 0,15 L
+ 1,153 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_166 0,15 H - 0,361 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_166

0,30 L
+ 0,361 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_166 0,30 H - 0,111 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_237
0,07 L
+ 0,111 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_237 0,07 H + 0,722 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_237
0,15 L
- 0,722 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_237 0,15 H - 0,611 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_237 0,30
L
+ 0,611 FUERZA*AVANCE*VELOCIDAD_237 0,30 H - 0,806 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_95 1 L
+ 0,806 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_95 1 H + 0,806 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_95 2 L
- 0,806 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_95 2 H - 0,222 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_166 1 L
+ 0,222 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_166 1 H + 0,222 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_166 2 L
- 0,222 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_166 2 H + 1,028 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_237 1 L
- 1,028 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_237 1 H - 1,028 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_237 2 L
+ 1,028 FUERZA*PASADA*VELOCIDAD_237 2 H - 1,306 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,07 1 L
+ 1,306 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,07 1 H + 1,306 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,07 2 L
- 1,306 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,07 2 H - 1,181 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,15 1 L
+ 1,181 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,15 1 H + 1,181 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,15 2 L
- 1,181 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,15 2 H + 2,486 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,30 1 L
- 2,486 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,30 1 H - 2,486 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,30 2 L
+ 2,486 AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_0,30 2 H
- 1,319 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95
0,07 1 L + 1,319 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,07 1 H
+ 1,319 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,07 2 L
- 1,319 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,07 2 H
- 0,819 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,15 1 L
+ 0,819 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,15 1 H
+ 0,819 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,15 2 L
- 0,819 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,15 2 H
+ 2,139 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,30 1 L
- 2,139 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,30 1 H
- 2,139 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,30 2 L
+ 2,139 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_95 0,30 2 H
+ 0,347 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,07 1 L
- 0,347 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,07 1 H
- 0,347 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,07 2 L
+ 0,347 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,07 2 H
+ 0,097 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,15 1 L
- 0,097 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,15 1 H
- 0,097 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,15 2 L
+ 0,097 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,15 2 H
- 0,444 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,30 1 L
+ 0,444 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,30 1 H
+ 0,444 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,30 2 L
- 0,444 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_166 0,30 2 H
+ 0,972 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,07 1 L
- 0,972 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,07 1 H
- 0,972 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,07 2 L
+ 0,972 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,07 2 H
+ 0,722 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,15 1 L
- 0,722 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,15 1 H
- 0,722 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,15 2 L
+ 0,722 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,15 2 H

- 1,694 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,30 1 L
+ 1,694 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,30 1 H
+ 1,694 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,30 2 L
- 1,694 FUERZA*AVANCE*PASADA*VELOCIDAD_237 0,30 2 H

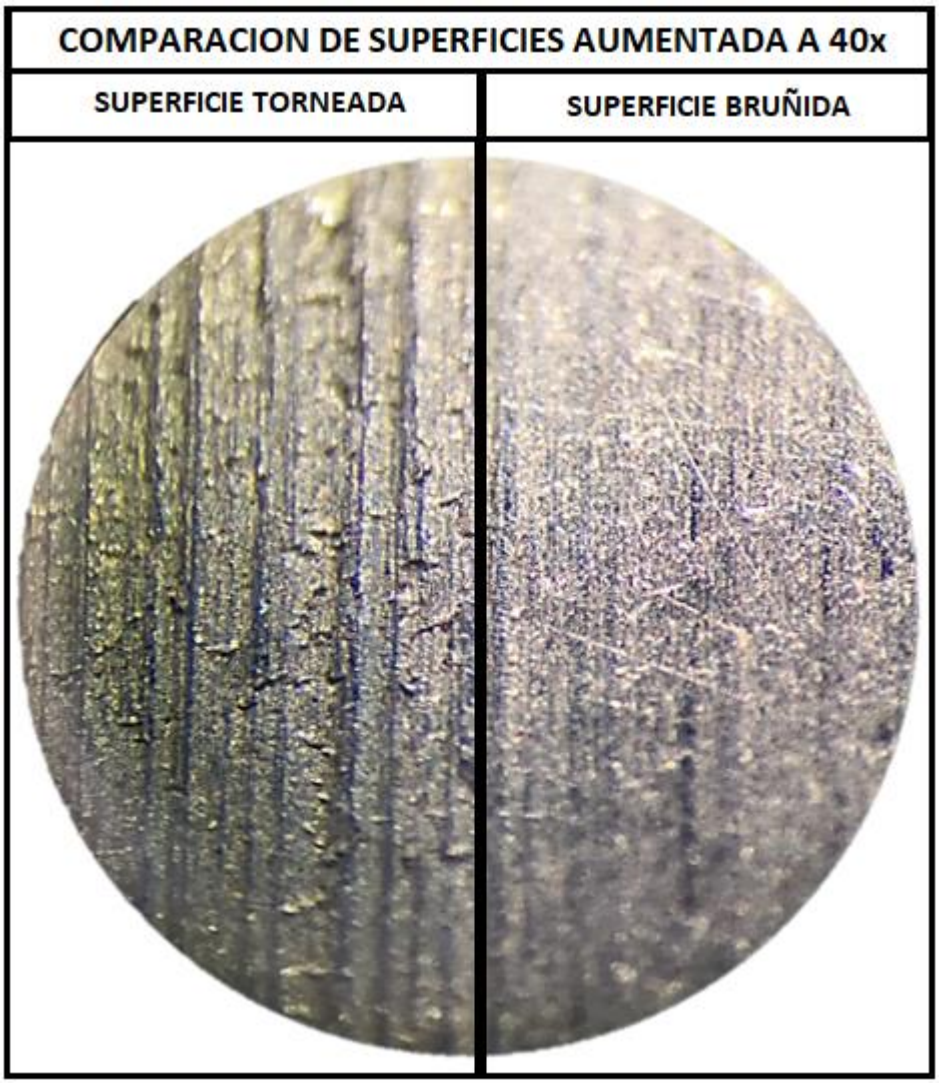
F. Anexo: Ejecución del proceso de bruñido con esfera en un proceso de torneado convencional.

Figura 46. Montaje de una muestra siendo bruñida a 95 N (24 PSI según el manómetro).



Fuente: El autor.

G. Anexo: Comparación visual entre superficie torneada vs. Superficie bruñida.



H. Anexo: Tabla de mejora de dureza HRB.

MEJORA DUREZA BRUÑIDO						
EXPERIMENTO				TORNEADO	BRUÑIDO	
FUERZA	AVANCE	VELOCIDAD	PASADA	DUREZA MEDIA HRB	DUREZA MEDIA HRB	% DE MEJORA
95	0,07	35	1	85,4	86	0,70%
95	0,15	35	1	85,4	85,7	0,35%
95	0,3	35	1	85,4	84,7	-0,83%
166	0,07	35	1	85,4	83,8	-1,91%
166	0,15	35	1	85,4	85,1	-0,35%
166	0,3	35	1	85,4	85,6	0,23%
237	0,07	35	1	85,4	85,6	0,23%
237	0,15	35	1	85,4	86,35	1,10%
237	0,3	35	1	85,4	86,5	1,27%
95	0,07	35	2	85,4	85,3	-0,12%
95	0,15	35	2	85,4	85,1	-0,35%
95	0,3	35	2	85,4	86,15	0,87%
166	0,07	35	2	85,4	85,45	0,06%
166	0,15	35	2	85,4	87,25	2,12%
166	0,3	35	2	85,4	86,55	1,33%
237	0,07	35	2	85,4	85,4	0,00%
237	0,15	35	2	85,4	87,7	2,62%
237	0,3	35	2	85,4	88,3	3,28%

Tabla 11. Tabla de mejoras de dureza HRB realizada a una muestra bruñida a alta velocidad.

Bibliografía.

[1] B. B. Buldum, «INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS AND MICROHARDNESS IN BALL BURNISHING PROCESS OF AZ31B MAGNESIUM ALLOY», *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 6, n.º 1, pp. 152-161, mar. 2018, doi: 10.15317/Scitech.2018.122.

[2] R. Teimouri, S. Amini, y A. B. Bami, «Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6», *Measurement*, vol. 116, pp. 129-139, feb. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.001.

[3] J. A. Travieso Rodriguez, *Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.

[4] M. Coba-Salcedo, J. Rojas, y C. Peñaloza, «Study of the influence of the honing process by plastic deformation on the turning of AISI 1045steel», *Contemp. Eng. Sci.*, vol. 11, pp. 3939-3947, 2018, doi: 10.12988/ces.2018.88424.

[5] T. F. Columbíe, I. R. González, y D. A. Borges, «Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple», vol. 28, n.º 1, p. 7, 2008.

[6] M. R. S. John, A. W. Wilson, A. P. Bhardwaj, A. Abraham, y B. K. Vinayagam, «An investigation of ball burnishing process on CNC lathe using finite element analysis», *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 62, pp. 88-101, mar. 2016, doi: 10.1016/j.simpat.2016.01.004.

[7] P. Balland, L. Tabourot, F. Degre, y V. Moreau, «Mechanics of the burnishing process», *Precis. Eng.*, vol. 37, n.º 1, pp. 129-134, ene. 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2012.07.008.

[8] M. Sayahi, S. Sghaier, y H. Belhadjsalah, «Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, n.º 5-8, pp. 1665-1673, jul. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4599-9.

[9] A. Saldaña-Robles, H. Plascencia-Mora, E. Aguilera-Gómez, A. Saldaña-Robles, A. Marquez-Herrera, y J. A. Diosdado-De la Peña, «Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel», *Surf. Coat. Technol.*, vol. 339, pp. 191-198, abr. 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.013.

[10] S. Randjelovic *et al.*, «Modelling of the ball burnishing process with a high-stiffness tool», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, n.º 9-12, pp. 1509-1518, dic. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7319-4.

[11] «ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL ACABADO SUPERFICIAL DE SUPERFICIES COMPLEJAS APLICANDO UN PROCESO DE DEFORMACION PLASTICA - BRUÑIDO CON BOLA.pdf».

[12] S. Attabi, A. Himour, L. Laouar, y A. Motallebzadeh, «Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment», *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 3255-3267, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.081.

[13] X. Zhu, «Tutorial on Hertz Contact Stress», p. 8.

[14] G. Pikurs, G. Bunga, V. Gutakovskis, y A. Kromanis, «Ball Burnishing as Finish Method of Compressor Shaft Wear Sleeve», p. 5, 2013.

[15] A. S. Robles, J. A. D. D. L. Peña, A. D. J. B. Garcia, E. A. Gomez, H. P. Mora, y N. S. Robles, «BALL BURNISHING PROCESS: STATE OF THE ART OF A

TECHNOLOGY IN DEVELOPMENT», *DYNA*, vol. 92, n.º 1, pp. 28-33, ene. 2017, doi: http://dx.doi.org/10.6036/7916.

[16] D. Torrejón Magdaleno, «Estudio de la adhesión en la rugosidad del aluminio», 2013, Accedido: 7 de diciembre de 2020. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/17997

[17] K. Edlefsen, «BR_Mikroskope_EN_6.0.indd», p. 20.

[18] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2020.

[19] O. C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*. Reverté, 2010.

[20] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*. Cengage Learning, 2011.

[21] H. G. Pulido, R. De la Vara Salazar, P. G. González, C. T. Martínez, y M. del C. T. Pérez, *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill New York, NY, USA:, 2012.

[22] A. Rodríguez, L. N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, y J. Albizuri, «Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique», *Surf. Coat. Technol.*, vol. 206, n.º 11-12, pp. 2817-2824, feb. 2012, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.11.045.

[23] P. S. Patwardhan, R. A. Nalavde, y D. Kujawski, «An Estimation of Ramberg-Osgood Constants for Materials with and without Luder's Strain Using Yield and Ultimate Strengths», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 17, pp. 750-757, ene. 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.100.

[24] J. Martín, «Quasi-Static Study on the Fluid and Structure Interactions of the Subsurface Safety Valves (SSSV) for Extreme High Pressure and High Temperature (XHPHT) Applications», 2010.

[25] M. L. Culpepper, «Design of quasi-kinematic couplings», *Precis. Eng.*, vol. 28, n.º 3, pp. 338-357, jul. 2004, doi: 10.1016/j.precisioneng.2002.12.001.

[26] A. Chueca de Bruijn, G. Gómez-Gras, y M. A. Pérez, «On the effect upon the surface finish and mechanical performance of ball burnishing process on fused filament fabricated parts», *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102133, oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102133.