



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Volumen I

Memoria – Presupuesto

TRABAJO DE FINAL DE GRADO



REDISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UNA HERRAMIENTA DE BRUÑIDO CON BOLA PARA TORNO

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA MECÁNICA

por **Oriol Casadesús Farràs**

y

Manel Madueño Guerrero

Barcelona, 08 de Junio de 2016

Tutor proyecto: Ramón Jerez Mesa y Giovanni Gómez-Gras
Departamento de ENGINYERIA MECÀNICA (DEM)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE MEMORIA.....	9
ÍNDICE FIGURAS	12
ÍNDICE TABLAS	15
RESUM.....	16
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
AGRADECIMIENTOS.....	18
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	19
1.1. Motivación	19
1.2. Objetivo	20
1.2.1. Objetivo general.....	20
1.2.2. Objetivos específicos.....	20
1.3. Cuestiones previas	21
1.4. División del trabajo.....	21
1.5. Introducción teórica.....	22
1.5.1. Técnicas de acabado superficial.....	22
1.5.2. Fatiga	23
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	25
2.1 Proceso de bruñido con bola	25
2.2 Proceso de bruñido con bola asistido por vibraciones	35
2.3 Comparación con otros procesos de acabado	43
CAPÍTULO 3: REDISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE BRUÑIDO CON BOLA.....	49
3.1 Descripción.....	49

3.1.1	Elementos para el bruñido	51
3.1.2	Elementos del sistema vibratorio.....	51
3.1.3	Elementos del sistema de precarga y sujeción	52
3.2	Funcionamiento	53
3.2.1	Bruñido convencional.....	53
3.2.2	Bruñido asistido con vibraciones.....	54
3.3	Rediseño.....	56
3.3.1	Nomenclatura.....	56
3.3.2	Rediseño de la herramienta actual	57
3.4	Prototipo	62
3.5	Adaptación al torno.....	65
CAPÍTULO 4: ESTUDIO EXPERIMENTAL		71
4.1	Hipótesis previas	71
4.2	Preparación	72
4.3	Datos previos.....	73
4.3.1	Rugosidad	73
4.3.2	Dureza	74
4.3.3	Fatiga.....	75
4.4	Parámetros de experimentación.....	79
4.4.1	Diseño factorial	81
4.5	Análisis de los resultados	84
4.5.1	Acabado superficial	84
4.5.2	Dureza	95
4.5.3	Fatiga.....	100
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		106
5.1	Problemática	106
5.1.1	Sistema vibratorio	106

5.1.2	Rediseño de la herramienta	107
5.1.3	Experimentación	109
5.1.4	Toma de datos.....	110
5.2	Conclusiones del proyecto	111
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA.....		114
6.1	Artículos	114
6.2	Tesis.....	115
6.3	Libros.....	115
ÍNDICE PRESUPUESTO		117
PRESUPUESTO		120
Materiales		121
Fabricación		122
Ingeniería y diseño		123
Total		124



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memoria



REDISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UNA HERRAMIENTA DE BRUÑIDO CON BOLA PARA TORNO

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA MECÁNICA

por **Oriol Casadesús Farràs**

y

Manel Madueño Guerrero

Barcelona, 08 de Junio de 2016

Director: Ramón Jerez Y Giovanni Gómez

Departamento de INGENIERIA MECANICA (DEM)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE MEMORIA

ÍNDICE MEMORIA.....	9
ÍNDICE FIGURAS	12
ÍNDICE TABLAS	15
RESUM.....	16
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
AGRADECIMIENTOS.....	18
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	19
1.1. Motivación	19
1.2. Objetivo	20
1.2.1. Objetivo general	20
1.2.2. Objetivos específicos.....	20
1.3. Cuestiones previas	21
1.4. División del trabajo.....	21
1.5. Introducción teórica.....	22
1.5.1. Técnicas de acabado superficial.....	22
1.5.2. Fatiga	23
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	25
2.1. Proceso de bruñido con bola	25
2.2. Proceso de bruñido con bola asistido por vibraciones	35
2.3. Comparación con otros procesos de acabado	43
CAPÍTULO 3: REDISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE BRUÑIDO CON BOLA.....	49
3.1. Descripción	49

3.1.1	Elementos para el bruñido	51
3.1.2	Elementos del sistema vibratorio.....	51
3.1.3	Elementos del sistema de precarga y sujeción	52
3.2	Funcionamiento	53
3.2.1	Bruñido convencional.....	53
3.2.2	Bruñido asistido con vibraciones.....	54
3.3	Rediseño.....	56
3.3.1	Nomenclatura.....	56
3.3.2	Rediseño de la herramienta actual	57
3.4	Prototipo	62
3.5	Adaptación al torno.....	65
CAPÍTULO 4: ESTUDIO EXPERIMENTAL		71
4.1	Hipótesis previas	71
4.2	Preparación	72
4.3	Datos previos.....	73
4.3.1	Rugosidad	73
4.3.2	Dureza	74
4.3.3	Fatiga.....	75
4.4	Parámetros de experimentación.....	79
4.4.1	Diseño factorial	81
4.5	Análisis de los resultados	84
4.5.1	Acabado superficial	84
4.5.2	Dureza	95
4.5.3	Fatiga.....	100
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		106
5.1	Problemática	106
5.1.1	Sistema vibratorio	106

5.1.2	Rediseño de la herramienta	107
5.1.3	Experimentación	109
5.1.4	Toma de datos.....	110
5.2	Conclusiones del proyecto	111
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA.....		114
6.1	Artículos	114
6.2	Tesis.....	115
6.3	Libros.....	115

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Perfil de rugosidad	22
Figura 2. Fallo en un eje por la acción de la fatiga.....	24
Figura 3. Esquemmatización del proceso de bruñido con bola [12]	26
Figura 4. Influencia de la rugosidad superficial inicial a varias fuerzas [4].	28
Figura 5. Esquemmatización del proceso y herramienta para el bruñido con bola y con rodillo	30
Figura 6. Esquemmatización de las diferentes estrategias de bruñido (paralela y perpendicular al mecanizado) [22].....	31
Figura 7. Gráficas comparativas de los resultados obtenidos en función de los parámetros de bruñido[19]	32
Figura 8. Proceso de bruñido de ejes mediante bola cerámica [5].....	33
Figura 9. Descenso del límite elástico del Cu por efecto acusto-plástico y electro-plástico [16].....	36
Figura 10. Sistema 1D con generador ultrasónico [7]	37
Figura 11. Herramienta VAM 2D diseñada por E. Shamoto et al. [24].....	39
Figura 12. Sistema no resonante 2D ideado en Pusan National University	40
Figura 13. Sistema no resonante 2D ideado en North Carolina State University.....	41
Figura 14. Proceso de bruñido con rodillo asistido por láser [26]	42
Figura 15. R_a y HRB después del bruñido para Al 6061 [2]	44
Figura 16. Comparativa tensiones residuales en bruñido con bola (LPB) y granallado [10].....	45
Figura 17. Gráfico comparativo de los valores de R_a , en dirección paralela al fresado (barras blancas) y en la dirección perpendicular al fresado (barras grises) [18]	46
Figura 18. Probeta y zona de bruñido [23]	46
Figura 19. Vista herramienta de bruñido	50
Figura 20. Partes de la herramienta de bruñido.....	50
Figura 21. Conjunto de elementos para el bruñido.....	51
Figura 22. Sistema vibrador de la herramienta	52
Figura 23. Sistema de pretensado y sujeción.....	52
Figura 24. Curva de calibración	54
Figura 25. Sistema de vibración.....	55
Figura 26. Vista seccional del cabezal.....	58
Figura 27. Distancia exterior bola	58
Figura 28. Vástagos fabricados	60
Figura 29. Cabezales ensamblados	61
Figura 30. Vista bolas de rodadura.....	61

Figura 31. <i>Vista de los distintos cabezales</i>	62
Figura 32. <i>Alojamientos cabezales</i>	63
Figura 33. <i>Alojamiento bobina y muelle</i>	63
Figura 34. <i>Vástago</i>	64
Figura 35. <i>Ensamblaje final</i>	64
Figura 36. <i>Portaherramientas disponibles</i>	65
Figura 37. <i>Ejemplo de herramientas comunes de torno</i>	66
Figura 38. <i>Exterior del adaptador</i>	67
Figura 39. <i>Vista seccional del adaptador</i>	67
Figura 40. <i>Diseño en CAD del sistema de sujeción</i>	68
Figura 41. <i>Vista de la sujeción con la restricción de movimiento relativo</i> ..	68
Figura 42. <i>Ensamblaje del conjunto</i>	69
Figura 43. <i>Conjunto montado en el torno</i>	69
Figura 44. <i>Dibujo acotado de la probeta a fatiga utilizada</i>	72
Figura 45. <i>Montaje para medir rugosidad</i>	74
Figura 46. <i>Huella dejada por el durómetro</i>	74
Figura 47. <i>Máquina de fatiga por flexión rotativa GUNT WP 140</i>	76
Figura 48. <i>Tensiones en la probeta</i>	77
Figura 49. <i>Simulación a fatiga</i>	78
Figura 50. <i>Curva S/N sin bruñir</i>	79
Figura 51. <i>División de los experimentos</i>	80
Figura 52. <i>Foto de la probeta dividida por zonas</i>	81
Figura 53. <i>Bruñido sobre el radio de acuerdo</i>	84
Figura 54. <i>Comparativa R_a sin bruñir (SB) y tras bruñir (B)</i>	85
Figura 55. <i>Comparativa R_t sin bruñir (SB) y tras bruñir (B)</i>	85
Figura 56. <i>Porcentaje de mejora del acabado superficial</i>	86
Figura 57. <i>Pareto de efectos estandarizados</i>	88
Figura 59. <i>Prueba de normalidad</i>	89
Figura 60. <i>Combinación de efectos</i>	90
Figura 61. <i>Interacción entre n y F</i>	91
Figura 62. <i>Efectos principales según número de pasadas</i>	91
Figura 63. <i>Efectos principales según fuerza de bruñido</i>	92
Figura 64. <i>Efectos principales según diámetro de la bola</i>	92
Figura 65. <i>Pareto efectos estandarizados Diff R_t</i>	93
Figura 66. <i>Gráfica de residuos</i>	94
Figura 67. <i>Diferencia antes y después del bruñido</i>	94
Figura 68. <i>Gráfica de valores de dureza HV</i>	95
Figura 69. <i>Pareto de efectos estandarizados</i>	96
Figura 70. <i>Gráfica normal de efectos estandarizados para HV</i>	96
Figura 71. <i>Gráficas de residuos</i>	97
Figura 72. <i>Prueba de normalidad en el residuo de HV</i>	97
Figura 73. <i>Gráfica de efectos principales para HV</i>	98
Figura 74. <i>Pareto efectos estandarizados con interacciones</i>	99

Figura 75. <i>Gráfica de interacciones</i>	100
Figura 76. <i>Comparativa de curvas a fatiga</i>	101
Figura 77. <i>Efectos estandarizados para la fatiga</i>	102
Figura 78. <i>Efectos principales en la fatiga</i>	103
Figura 79. <i>Gráfica de interacción NP y F</i>	103
Figura 80. <i>Vista de rotura de dos probetas</i>	104
Figura 81. <i>Montaje para generar vibraciones</i>	107
Figura 82. <i>Rotura del primer cabezal</i>	108
Figura 83. <i>Rotura del segundo modelo de cabezal</i>	108
Figura 84. <i>Contacto entre la bola y la probeta</i>	109
Figura 85. <i>Montaje de las probetas en la máquina de fatiga</i>	110

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. <i>Parámetros de bruñido utilizados por [1]</i>	27
Tabla 2. <i>Codificación de la herramienta de bruñido</i>	57
Tabla 3. <i>Dimensiones de los cabezales diseñados</i>	59
Tabla 4. <i>Muestras de dureza para el acero AISI 304</i>	75
Tabla 5. <i>Parámetros ensayados de rugosidad y dureza</i>	82
Tabla 6. <i>Parámetros de los ensayos de vida a fatiga</i>	82
Tabla 7. <i>Corrección de parámetros</i>	83
Tabla 8. <i>Diseño del experimento a fatiga</i>	83
Tabla 9. <i>Resultados de ciclos de vida a fatiga</i>	100

RESUM

El brunyit amb bola és un procés que presenta una sèrie d'avantatges en el camp de les operacions d'acabat, ja que millora diverses propietats dels materials en una sola operació. En aquest treball s'exploren les possibilitats d'aquest procés a partir del redisseny dels capçals d'una eina existent perquè sigui possible treballar amb boles de diferents mides. A més, s'adapta l'eina al torn per tal de poder treballar sobre superfícies de revolució.

Un cop comprovat el bon funcionament de les modificacions es realitzen diferents experiments sobre provetes cilíndriques per veure com el brunyit amb bola pot millorar la rugositat superficial, la duresa i la vida a fatiga, variant els paràmetres que tenen influència sobre la operació de brunyit.

Com a punt final, a partir dels diversos experiments es realitza un anàlisi estadístic que permet estudiar totes les combinacions possible de factors. Amb l'objectiu de determinar la influència dels diversos paràmetres d'operació sobre el resultat final i veure com interactuen entre ells. D'aquesta manera es poden establir una sèrie de paràmetres òptims que són els recomanats per al correcte funcionament de l'eina i per a l'obtenció dels millors resultats possibles.

RESUMEN

El bruñido con bola es un proceso que presenta una serie de ventajas en el campo de las operaciones de acabado, ya que mejora diferentes propiedades de los materiales en una única operación. En este trabajo se exploran las posibilidades de este proceso a partir del rediseño de los cabezales de una herramienta existente para que sea posible trabajar con bolas de distintas dimensiones. Además, se adapta la herramienta al torno para poder trabajar sobre superficies de revolución.

Una vez comprobado el buen funcionamiento de las modificaciones se realizan distintos experimentos sobre probetas cilíndricas pre-establecidas para ver como el bruñido con bola puede mejorar la rugosidad superficial, la dureza y la vida a fatiga, variando los parámetros que tienen influencia sobre la operación de bruñido.

Como punto final, a partir de los diferentes experimentos se realiza un análisis estadístico que permite estudiar todas las combinaciones posibles de factores, con el objetivo de determinar la influencia de los distintos parámetros de operación sobre el resultado final y ver cómo interactúan entre ellos. De esta forma se pueden establecer una serie de parámetros

óptimos que son los recomendados para el correcto funcionamiento de la herramienta y para la obtención de los mejores resultados posibles.

ABSTRACT

Ball burnishing is a procedure which presents a large number of advantageous in terms of finishing operations due to some characteristics of the materials may be improved in only one operation. In this document, the different possibilities of this procedure are deeply analyzed.

This study is based on the redesign of the head of an existent tool so as to make possible work with balls of different sizes. In addition, the tool is adapted to the lathe in order to work on surfaces of revolution. Once the correct operation of all the modifications is verified, a significant number of experiments are made, with pre-established test pieces, with the aim of seeing how the ball burnishing may improve the surface roughness, hardness and fatigue life. With the purpose of giving more reliability to the study, the most influential parameters in the burnishing operation are varied.

In the last section of the project, a statistical analysis is made based on all the results obtained in the previous experiments. As a result of this study, all the possible combinations of the factors may be established and deeply explained. Consequently, the influence of every operation parameter on the final results and how all the parameters interact between them can be detailed in this document. Finally, the optimal parameters may be announced taking into account the complete statistical analysis. These parameters are the recommended so as to obtain the correct operation of the tool and to obtain the most reliable result.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dar nuestro agradecimiento a nuestros tutores Giovanni y Ramón por su ayuda durante toda la realización del proyecto. Sin sus consejos no habríamos llegado hasta el final.

A Toni Travieso y Jordi Llumà por su paciencia con nosotros y ayudarnos siempre que se lo hemos pedido.

A los maestros del taller mecánico Dani y Sergio por su ayuda en todo el proceso de fabricación y por las muchas horas que hemos pasado en el taller.

Y a todas las personas que han colaborado en este proyecto de una manera u otra.

Muchas gracias a todos.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En el mundo actual existe una constante preocupación por mejorar las cualidades de infinitud de elementos metálicos utilizados en distintos campos de aplicación, con el objetivo fundamental de optimizar su buen funcionamiento, así como prolongar su vida útil. Muchas son las necesidades que surgen actualmente en ámbitos como la industria naval o la aeronáutica, por citar algunos, entre las cuales se encuentra la mejora de la resistencia de dichos componentes frente a determinadas sollicitaciones consideradas de alto riesgo.

Uno de los mayores factores de riesgo es la fatiga. Hoy en día hay multitud de mecanismos que, pese a trabajar adecuadamente, su tiempo de funcionamiento se ve limitado precisamente por la resistencia a la fatiga de alguno de sus componentes, que terminan provocando roturas de piezas después de cierto tiempo de uso. En muchos campos se trabaja con factores de seguridad extremadamente ajustados, pues no se pueden sobredimensionar componentes debido a limitaciones de tamaño o de peso, por ejemplo. Se trata de sistemas de alta precisión y que requieren de la última tecnología para mejorar su funcionamiento. Estos son los casos en los que resulta de vital importancia reducir al máximo los efectos de la fatiga y, por lo tanto, un campo en donde algunas técnicas de acabado pueden tener un gran recorrido, como podría ser el bruñido con bola.

Otro de los principales objetivos que se presentan en la industria moderna es la optimización de las características superficiales de los metales sometidos a procesos de fabricación, como pueden ser rugosidad o dureza, entre otras.

El acabado superficial tiene una gran relevancia en el caso de los componentes de alta precisión, ya que los ajustes entre los mismos, que vienen directamente relacionados con su rugosidad superficial, son una

parte fundamental para garantizar que su funcionamiento sea el adecuado y minimizar la posibilidad de fallos.

Por lo que se refiere a dureza, ésta juega un papel importante en la mejora de las prestaciones de las piezas fabricadas. Aumentar su valor implica una mayor resistencia de los componentes frente al desgaste, así como la mayor absorción de pequeños impactos puntuales, por lo que se acaba aumentando su vida útil como consecuencia.

Actualmente se encuentran varias técnicas dirigidas a la mejora de las cualidades citadas anteriormente, entre las cuales debemos hacer especial referencia al proceso de bruñido con bola, objeto principal de este proyecto.

Por lo tanto, la experimentación con el bruñido con bola, como parte de un proceso tecnológico capaz de garantizar las características señaladas, resulta ser un proyecto apasionante que puede conducir a la obtención de diversas conclusiones de relevancia para su aplicación real en la industria y, más en concreto, en los procesos de fabricación.

1.2. Objetivo

1.2.1. *Objetivo general*

Estudio y caracterización del proceso de bruñido con bola adaptado para su aplicación en un torno convencional.

1.2.2. *Objetivos específicos*

1. Rediseño de una herramienta de bruñido con bola asistida por vibraciones, optimizando su funcionamiento y diversificando su funcionalidad a partir del diseño de varios cabezales intercambiables, que sirven de alojamiento para bolas de bruñir de diferentes diámetros.
2. Diseño y fabricación de un sistema de adaptación de la herramienta al torno convencional.
3. Fabricación de un prototipo de la herramienta mediante técnica de fabricación aditiva para la verificación de cotas.
4. Fabricación de las piezas para la herramienta, teniendo en cuenta las consideraciones especificadas en la fase de diseño del proyecto.
5. Realización de experimentos para la valoración del efecto producido por el bruñido, mediante el estudio de probetas cilíndricas de acero AISI 304.
6. Estudio de la rugosidad superficial y la dureza sobre las probetas bruñidas, comparando los resultados obtenidos mediante la utilización de distintos parámetros del proceso.
7. Determinación del comportamiento a fatiga sobre el radio de acuerdo de las probetas bruñidas, considerada la sección crítica de éstas.

8. Optimización de los diferentes parámetros de bruñido.

1.3. Cuestiones previas

1. ¿Afectará la utilización de bolas de distinto diámetro al proceso de bruñido, lo cual justifica el rediseño de la herramienta en cuestión?
2. ¿Es factible la utilización de la herramienta de bruñido en un torno convencional para el bruñido de piezas de revolución?
3. ¿Qué influencia tiene el proceso de bruñido sobre las características superficiales de las piezas y, más en concreto, sobre los valores de rugosidad y dureza?
4. ¿Tendrá efecto el proceso de bruñido sobre la vida útil de las piezas solicitadas a esfuerzos que causan fatiga del material?
5. ¿Cuáles son los parámetros óptimos de bruñido para la obtención de buenos resultados en las piezas en las que se realiza dicho proceso?

1.4. División del trabajo

Previamente a la realización del estudio, se ha hecho una división de tareas, ya que el presente trabajo ha sido realizado en grupo de dos personas.

Pese a que a cada uno de los integrantes se le ha asignado un conjunto de tareas a realizar, el conjunto del trabajo en su totalidad se ha desarrollado de manera conjunta.

Mientras que la parte escrita del trabajo se ha dividido en partes iguales, la parte experimental se ha realizado en grupo. Gracias a esto se han podido obtener unos resultados finales más fiables y de forma más rápida, con lo cual se ha reducido el período de experimentación, consiguiendo así acabar el trabajo en el período establecido.

Por lo que a la búsqueda de información se refiere, con el objetivo de establecer el punto de partida del proyecto, se han dividido los temas tratados. Por una parte, Manel Madueño se ha encargado de trabajar la parte de parametrización del bruñido y métodos de vibración; por otra parte, Oriol Casadesús ha realizado la búsqueda de información sobre fatiga de materiales y comparación del bruñido con otras operaciones de acabado.

Ya puestos en el rediseño de la herramienta, Manel Madueño ha realizado el diseño de las piezas integrantes, mientras que Oriol Casadesús se ha encargado del método de adaptación al torno y del prototipaje en impresión 3D., además de planificar el diseño de los experimentos.

Finalmente, y como ya se ha comentado con anterioridad, la parte experimental se ha realizado conjuntamente para evitar errores. La preparación de probetas, el bruñido, la toma de datos (previos y posteriores al bruñido) se ha trabajado en presencia de ambos integrantes del grupo.

Para el análisis estadístico de los resultados, Oriol Casadesús se ha encargado de la fatiga y la rugosidad y Manel Madueño de la dureza además de explicar la problemática.

Finalmente se han redactado las conclusiones de forma conjunta.

1.5. Introducción teórica

1.5.1. Técnicas de acabado superficial

Después de un proceso de mecanizado, uno de los primeros factores que se deben tener en cuenta es la rugosidad de las superficies trabajadas. La forma más habitual de determinar dicha rugosidad es considerando el parámetro R_a (rugosidad media aritmética). Según la norma ISO 4288:1998, ésta se calcula mediante la suma de los valores de las áreas que quedan por encima y por debajo de una línea media del perfil, y dividiéndola posteriormente entre la longitud de muestreo. En la siguiente figura se muestra el cálculo de éste parámetro:

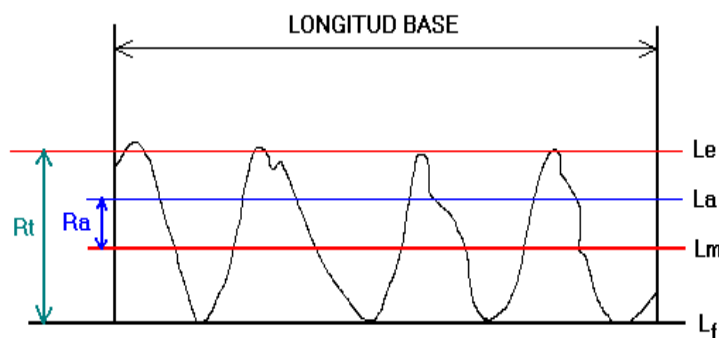


Figura 1. Perfil de rugosidad

Otro de los parámetros evaluados a la hora de determinar la rugosidad de las superficies es la R_t (rugosidad total del perfil en la longitud de evaluación), que representa la altura entre el pico más alto y el valle más profundo.

Una forma sencilla de obtener el valor de dichas rugosidades es mediante la utilización de un rugosímetro o medidor de perfiles. Éste aparato realiza un seguimiento del perfil a estudiar, mediante un palpador que detecta las variaciones de altura presentes en la superficie.

Dependiendo del proceso de mecanizado utilizado se obtendrán rugosidades de magnitudes muy diversas. Es en este momento dónde se puede requerir un proceso de acabado para mejorar la rugosidad y, por otra parte, aumentar o disminuir otras propiedades mecánicas.

Es interesante hacer una breve introducción de varios procesos de acabado superficial, pues van a ser nombrados a lo largo del trabajo. Además del bruñido con bola, existen otras técnicas de acabado muy utilizadas:

- Granallado: Consiste en propulsar un fluido a alta presión acompañado de un material abrasivo, para provocar un chorro que actúa sobre la superficie objeto. De esta manera se puede disminuir la rugosidad de la superficie, así como limpiarla de contaminantes. Inicialmente este proceso se realizaba con arena, pero con el paso de los años se ha substituido por diferentes materiales abrasivos.
- Laser Shock Peening (LSP): Se dirige un láser a una superficie sumergida en agua. La onda de choque produce tensiones residuales de carácter compresivo, lo que mejora la resistencia de las piezas tratadas frente a ciertas sollicitaciones de carácter cíclico y, en consecuencia, frente a la fatiga.
- Pulido: Proceso por el cual se abrillanta una superficie mediante la acción de abrasivos montados en soportes blandos. De esta manera se consigue mejorar la rugosidad de las superficies mecanizadas.
- Lapeado: Consiste en frotar una piedra abrasiva de grano muy fino sobre una superficie, con lo que se consigue eliminar unas micras de material, mejorando la rugosidad de la superficie sin modificar su geometría.

Finalmente, dentro de las técnicas de acabado superficial debemos hacer especial referencia al bruñido con bola, objeto principal de nuestro proyecto. Se trata de un proceso con el que se deforma plásticamente la superficie tratada, reduciendo la diferencia de altura existente entre los picos y valles, mejorando así la rugosidad. Esto se consigue por la acción de una fuerza controlada, transmitida mediante un indentador en forma de bola.

En conclusión, el bruñido con bola se define como un proceso de trabajo en frío en el que se produce deformación plástica aplicando presión a través de una bola de alta dureza sobre una superficie metálica, provocando mejoras en la superficie tratada, tal y como comentan Adel Mahmood Hassan y Ayman Mohammad Maqableh en su estudio *The effects of initial busnishing parameters on non-ferrous components* (2000) [4].

1.5.2. Fatiga

En el campo del comportamiento mecánico de los materiales, se denomina fatiga a la aparición de pequeñas fisuras o grietas sobre los componentes de máquinas sometidos a la acción de sollicitaciones en forma de cargas cíclicas, las cuáles se propagan a través del material, pudiendo ocasionar roturas y, consecuentemente, el fallo de las piezas afectadas.

Tal como se ha explicado anteriormente, la fatiga es un fenómeno de vital importancia en la industria actual, pues es un factor limitante a la hora de diseñar y proyectar componentes, además de un grave peligro para la seguridad.

Uno de los problemas más importantes que se pueden ocasionar es la aparición de pequeñas roturas por la acción de cargas sensiblemente inferiores al límite de rotura que puede tener un material. Por otra parte, la detección de dichas grietas requiere de técnicas de gran complejidad,

puesto que las fisuras se producen en el interior de las piezas y se van propagando hacia la superficie. En la siguiente figura se muestra el fallo de un eje producido por la acción de la fatiga:



Figura 2. *Fallo en un eje por la acción de la fatiga*

El fallo de los componentes de máquinas debido a la acción de cargas dinámicas cíclicas ocurre mucho antes que el que se produce por la acción de cargas estáticas, por lo que condiciona en gran medida el diseño de determinadas piezas, que en algunos casos se acaban sobredimensionando para hacer frente a los efectos de la fatiga.

Llegados a este punto, es importante la definición de técnicas que consigan mejorar la resistencia de los materiales ante este fenómeno, sobre todo, en los casos donde el sobredimensionamiento no es la solución más adecuada, ya sea por temas de espacio o económicos. El bruñido con bola podría utilizarse como técnica para esta finalidad.

Por otra parte, y debido a la propia geometría de una pieza, hay ciertas secciones de ésta que bajo una misma sollicitación presentan tensiones mayores al resto, es decir, se produce una concentración de tensiones debido a determinadas formas geométricas. Muchas son las geometrías que causan una concentración de tensiones, como radios de acuerdo, chaveteros o nervios, por citar algunas.

Es en estas secciones, consideradas críticas, donde se debe prevenir la aparición de grietas que causen la fatiga del material, pues por su propia geometría es por donde es más posible que se produzca la rotura. En muchos casos se pueden evitar los concentradores de tensiones o reducir su efecto, pero en otros casos esto no sería posible, por lo que el bruñido de dichas zonas supondría un gran avance.

CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo del proyecto se referenciarán los diferentes estudios realizados hasta el momento relacionados con los temas tratados a lo largo del trabajo, con el fin de situar el punto de partida del estudio y enfocar los diferentes objetivos que se pretenden conseguir al final de éste.

Son muchas las referencias bibliográficas relacionadas con el tema de estudio, por lo que se ha decidido dividir la búsqueda en tres áreas diferenciadas, que se corresponden con los principales aspectos del presente proyecto:

- Proceso de bruñido con bola.
- Proceso de bruñido con bola asistido por vibraciones.
- Comparación con otros procesos de acabado.

A partir de la clasificación anterior, se han referenciado los estudios en los cuales se obtienen resultados más significativos, con la finalidad de contrastarlos con los obtenidos a lo largo de este trabajo.

2.1 Proceso de bruñido con bola

El bruñido con bola se define como un proceso de deformación plástica que tiene como finalidad eliminar las irregularidades presentes en las superficies de piezas metálicas tras su mecanización. En su definición más estricta, es una técnica que modifica el perfil de rugosidad de una superficie (picos y valles), mediante una bola que se indenta sobre dicha superficie tras la aplicación de una fuerza controlada. En la figura 3 se muestra una esquematización de dicho proceso:

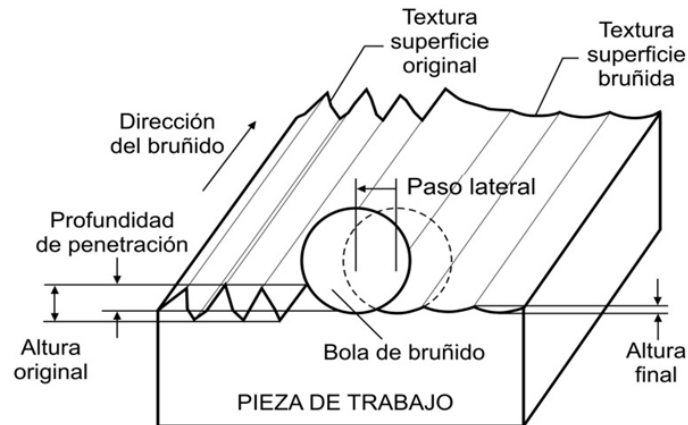


Figura 3. Esquemática del proceso de bruñido con bola [12]

Como se puede observar, la bola avanza longitudinalmente sobre la superficie tratada y, a medida que la va deformando plásticamente, se obtiene un acabado superficial que difiere sustancialmente del que presentaba previamente a esta operación.

Existe una gran variedad de superficies que pueden ser bruñidas utilizando este proceso, como superficies planas, cilíndricas o cónicas, entre otras. No obstante, la variedad de topografías que podrían ser tratadas se reduce en comparación con otros procesos de acabado. Pese a ello, se presentan numerosos beneficios que reflejan la importancia del proceso, tal y como recoge Gómez-Gras en su tesis Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por una vibración (2015) [28]:

- Es un proceso de acabado sin arranque de viruta, lo cual permite mantener las cotas nominales que se obtienen con el proceso de mecanizado.
- Es una operación que se puede automatizar y ejecutar en la misma máquina donde se ha mecanizado, reduciendo el tiempo de procesado.
- Es una operación mediante la cual se pueden generar tres efectos simultáneos sobre la superficie: disminución de la rugosidad, aumento del perfil de durezas y aumento de la magnitud de tensiones residuales compresivas, mejorando la vida a fatiga del material tratado.

Llegados a este punto, se debe hacer referencia a los diferentes parámetros que influyen en los resultados que se consiguen después de realizar un proceso de bruñido, entre los cuales se debe destacar el diámetro de la bola de bruñido, la fuerza de bruñido, el avance de la herramienta y el número de pasadas (definido por el ancho de pasada lateral) o, en su defecto, el tiempo de aplicación del bruñido.

A continuación se resumen las aportaciones fundamentales de la gran diversidad de artículos encontrados en la literatura científica consultada, referentes a los parámetros utilizados en el proceso de bruñido.

En un primer estudio titulado *Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals*, Adel Mahmood Hassan y Aiman Sharef Al-Bsharat (1995) [1] determinan que el número de pasadas y el diámetro de la bola son los dos parámetros fundamentales que definen el resultado final del proceso. En su experimento, emplean una herramienta con un adaptador para utilizar varios diámetros de bola (6 mm, 10 mm y 15 mm), y que presenta un muelle para transmitir un determinado valor de fuerza vertical dependiendo de la compresión de éste. Utilizaron probetas cilíndricas, con diámetro de 25 mm y longitud de 300 mm, que posteriormente se bruñeron en distintas zonas utilizando los parámetros que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. *Parámetros de bruñido utilizados por [1]*

Parámetro	Valor
Avance (mm/rev)	0,03; 0,06; 0,1; 0,13; 0,16; 0,2
Velocidad (m/min)	13,35; 18,24; 32,2; 43,6
Fuerza (kgf)	5; 10; 15; 20; 25; 30; 35
Número de pasadas	1; 2; 3; 4; 5
Diámetro de bola	6; 10; 15
Condiciones de bruñido	Sin lubricar

Después de realizar los experimentos obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La rugosidad superficial se reduce a medida que incrementa el avance, la fuerza y el número de pasadas hasta un cierto límite, a partir del cual vuelve a aumentar.
- La dureza se reduce con el aumento del avance, a la vez que se incrementa con el aumento de la fuerza y el número de pasadas.
- El aumento del diámetro de bola sería beneficioso para la rugosidad; por el contrario, una reducción de diámetro produce mejoras en la dureza.
- Se produce una elongación del grano en la microestructura de la superficie bruñida.

Posteriormente, en su trabajo *Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process*, Adel Mahmood y Sulleman Z.S. Al-Dhi (1999) [3] reafirmaron las conclusiones obtenidas en el estudio anterior, además de hacer referencia a la resistencia al desgaste de las piezas después de bruñir. Concluyeron que la fuerza y el número de pasadas condicionaban la resistencia que ofrecía un material al desgaste después de ser bruñido, aumentando a la vez que lo hacen estos dos parámetros por encima de determinados límites.

Un año más tarde, Adel Mahmood Hassan y Ayman Mohammad Maqableh presentaron su estudio *The effects of initial busnishing parameters on non-*

ferrous components (2000) [4]. En éste, se introduce la importancia de la rugosidad y dureza inicial de las probetas a bruñir y de la aplicación de lubricantes con diferentes propiedades durante el proceso sobre el resultado final. Realizaron sus experimentos utilizando diferentes fuerzas de bruñido, como se resume en la siguiente gráfica:

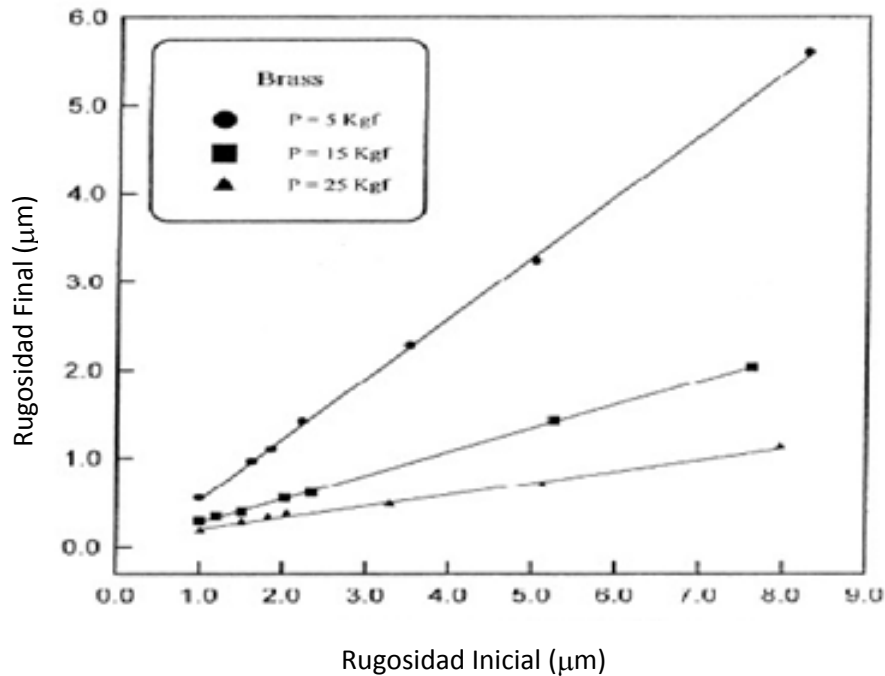


Figura 4. Influencia de la rugosidad superficial inicial a varias fuerzas [4]

Tras realizar varios experimentos, llegaron a las siguientes conclusiones:

- Una mayor rugosidad superficial inicial produce un aumento de la rugosidad superficial final de las piezas bruñidas, pero no tiene ningún efecto sobre su dureza.
- Un aumento en la dureza de la superficie inicial produce una disminución en la reducción de la rugosidad superficial y en el aumento de la dureza.
- Un aumento del diámetro de la bola causará una disminución en la rugosidad de la superficie final, la dureza y la resistencia al desgaste.
- El uso de lubricantes produce una reducción en la rugosidad superficial y un aumento en la dureza, aunque el uso de lubricantes con distinta viscosidad no produce ningún efecto sobre el resultado final.

En el año 2002, Liu Lucas [29] presenta su tesis *Investigation into the use of ball-burnishing of hardened Steel components as a finishing proces*, en la que se hace referencia por primera vez a la fatiga como consecuencia del proceso de bruñido. En esta se recoge el experimento realizado sobre piezas de acero duro, con el que consigue desarrollar un modelo que pueda predecir el comportamiento de las superficies después del bruñido,

utilizando un método basado en elementos finitos. Al final de su tesis concluye que el bruñido con bola obtiene valores de rugosidad mejores a los obtenidos con otros procesos, así como un aumento entre el 31% y el 50% de la resistencia a fatiga de las piezas.

En 2003 se presentó el estudio realizado por Fang-Jung Shiou y Chien-Hua Chen [12] *Freeform Surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process*. En él se muestra el proceso de bruñido con bola como una herramienta muy útil para el acabado de moldes de inyección de plástico, pues estos necesitan de un acabado superficial óptimo para producir piezas en buenas condiciones. En el artículo se hace hincapié no sólo en la versatilidad del proceso, puesto que además de poder adaptarse a un centro de mecanizado CNC convencional puede actuar tanto en superficies planas como libres, sino que también deja muy claro que una de las partes claves es la obtención de los parámetros óptimos del proceso. Trabajando con los parámetros de velocidad, fuerza y avance óptimos la rugosidad mejora de 1 a 0,07 μm , además de la dureza Vickers, que aumenta desde un valor inicial de 338 HV hasta 480 HV.

En este mismo estudio se consiguió determinar un modelo simplificado con el que se pudiese conocer el comportamiento de las fuerzas que se producen durante el bruñido, con el fin de determinar la fuerza óptima que se debe aplicar para producir la deformación de la superficie bruñida. A partir de una serie de hipótesis iniciales con las que simplificar el modelo, consiguieron obtener una expresión para determinar la fuerza de bruñido:

$$F_z = \sigma \cdot A \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo de fluencia que presenta el material de la pieza a bruñir y A el área de contacto entre la bola y la superficie tratada durante el proceso.

En 2006, H. Hamadache et al. [14] presentan su trabajo *Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing*, en el que se reflejan importantes conclusiones en cuanto a la dureza y la rugosidad, después de aplicar un proceso de bruñido. En su experimento emplean una herramienta de bruñido adaptada para torno convencional, la cual se encarga de realizar el bruñido sobre las probetas cilíndricas fabricadas para este propósito. Por otra parte, la herramienta presenta un muelle que se encarga de aplicar la fuerza previamente calibrada, y un sistema capaz de albergar tanto rodillos como bolas para el bruñido. En la figura 5 se puede observar un esquema de la herramienta empleada para el proceso:

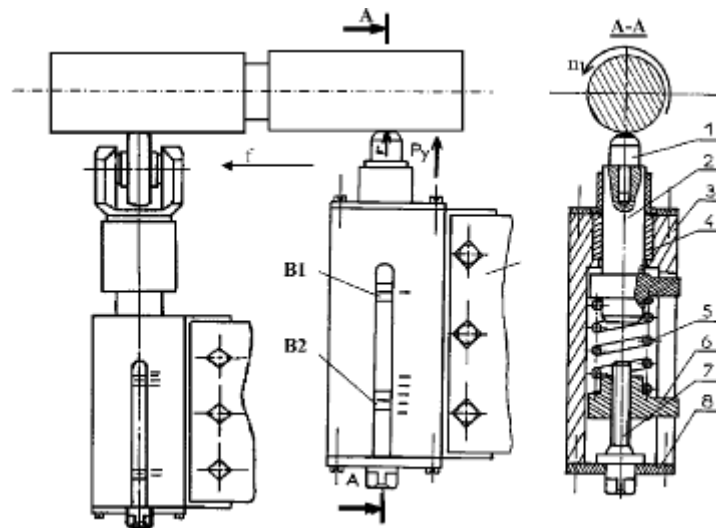


Figura 5. Esquematación del proceso y herramienta para el bruñido con bola y con rodillo

En cuanto a los parámetros tecnológicos, se utilizaron las combinaciones de éstos en varios intervalos previamente definidos: de 10 a 80 m/min para la velocidad, de 0,05 a 0,1 mm/rev para el avance, de 50 a 200 N para la fuerza y de 1 a 3 pasadas.

Una vez realizados los experimentos, pudieron concluir la importancia del bruñido sobre la rugosidad superficial y la dureza de las piezas fabricadas de acero. Dependiendo del resultado que se quiera obtener, el número de pasadas y la fuerza de bruñido ofrecen acabados distintos. Por una parte, se debe limitar el número de pasadas a 2 para mejores rugosidades, mientras que para mayores durezas se deben realizar 3 pasadas, con una fuerza asociada de 150 N. Finalmente, concluyen que el efecto que produce un cambio en la velocidad de bruñido o avance resulta insignificante.

Siguiendo con los parámetros para el proceso de bruñido, se ha encontrado literatura relacionada en el trabajo de N.S.M. El-Tayeb et al., [22] titulado *Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of aluminum 6061* (2007), en el que se muestra el efecto de la velocidad, la fuerza, el ancho de pasada y la estrategia de bruñido sobre la rugosidad superficial y las características tribológicas del aluminio. Utiliza una herramienta de bruñido similar a la que presentaban H. Hamadache et al. [14] en su estudio, en la cual se pueden adaptar rodillos de distintas dimensiones (de 1, 2 y 3 mm en este caso).

Centraron su estudio en las diferentes estrategias a la hora de realizar el bruñido, ya sea de forma paralela o perpendicular a la dirección de mecanizado, como se muestra en la siguiente figura:

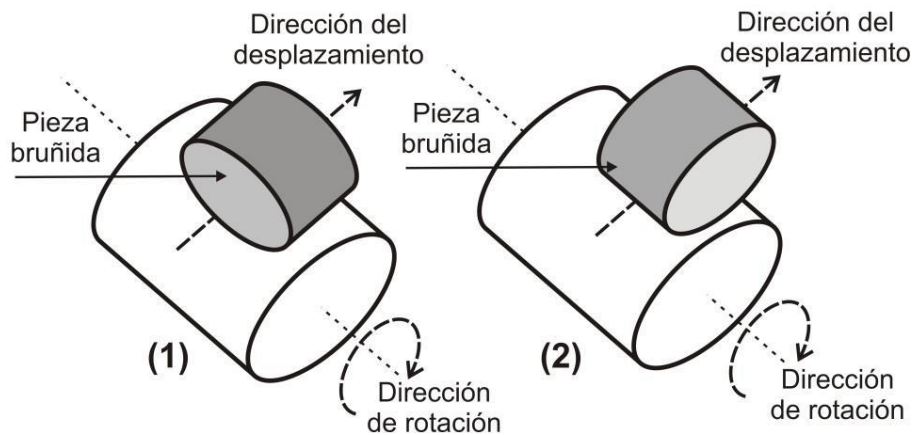


Figura 6. Esquemización de las diferentes estrategias de bruñido (paralela y perpendicular al mecanizado) [22]

Al final del estudio pudieron sacar varias conclusiones:

- El rango de velocidad óptimo para rodillos de 1 mm es de 250 a 420 rpm.
- Los valores de fuerza por encima de 220 N consiguen reducir la rugosidad superficial en un 35%, mientras que por debajo de este valor la superficie se deteriora plásticamente.
- Los rodillos con un valor de ancho inferior consiguen mejores valores de rugosidad (hasta un 40% de mejora).
- En contraposición, un valor de revoluciones bajo (110 rpm) mejora el valor de dureza en un 30%.
- Sin lubricación, el rodillo de 1 mm produce el mejor coeficiente de rozamiento.
- El bruñido en dirección paralela al mecanizado produce un coeficiente de rozamiento sensiblemente inferior al que produce bruñir en dirección perpendicular.

Posteriormente, en el año 2008, C.Y. Seemikeri , P.K. Brahmkankar, S.B. Mahagaonkar [8], en su trabajo *Investigations on Surface integrity of AISI 1045 using LPB tool*, evaluaron el efecto del bruñido con bola sobre diversos aspectos, siendo el más notable la vida a fatiga. En este artículo se concluye que tras varios ensayos no solo aumenta la vida a fatiga, sino que cuanto más se aumenten los parámetros de control, mayor será el número de ciclos que resiste la probeta ensayada. También es interesante la forma en la que en este artículo se define la fuerza de bruñido como parámetro más importante a la hora de obtener mejor acabado superficial; sin embargo, se explica que no hay un único parámetro que predomine sobre el resto, siendo necesaria una combinación de todos ellos para obtener el resultado deseado.

En 2011, M.M. El-Khabeery y M.H. El-Axir [19] presentan su trabajo *Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity*. En éste se estudia el efecto que produce sobre la rugosidad, dureza y tensiones residuales la variación de los siguientes parámetros de bruñido: velocidad, profundidad de penetración y número de pasadas.

Para realizar su experimento, utilizaron probetas de sección rectangular fabricadas de aleación de aluminio 6061, las cuales se mecanizaron mediante un proceso de fresado. Por otra parte, utilizaron una herramienta de bruñido adaptable para fresadora, que bruñe la pieza utilizando un rodillo de 22 mm de diámetro. Los valores para los parámetros del proceso fueron seleccionados tal y como se muestra en las siguientes gráficas:

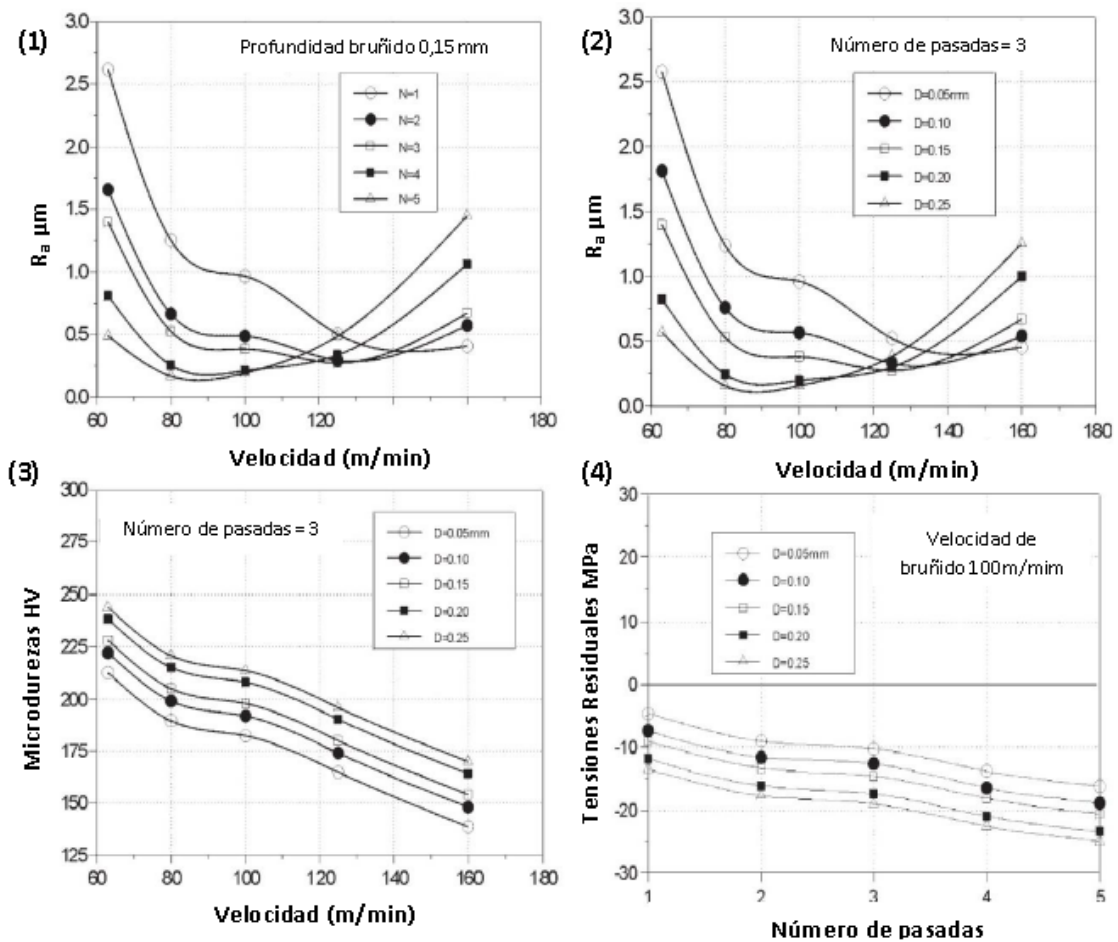


Figura 7. Gráficas comparativas de los resultados obtenidos en función de los parámetros de bruñido [19]

Al final del estudio concluyeron que se podían predecir los valores para los parámetros del proceso de bruñido mediante modelos matemáticos cuantitativos previamente definidos. Por otra parte, proponen un número de pasadas de 3 o 4 para reducir al máximo la rugosidad superficial, mientras que aumentar aún más el número de pasadas al mismo tiempo que la profundidad de penetración favorece la aparición de tensiones residuales de

compresión. Por lo que a la velocidad de bruñido se refiere, se establece un límite de 120 m/min para obtener calidades superficiales óptimas.

También en el año 2011, A. Rodríguez et al. [5] publican su trabajo *Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique* (2011), en el que se presenta la técnica de bruñido con bola como un proceso económico de mejora de superficies de ejes a rotación que han sido fabricados mediante un torneado previo. Gracias al proceso se garantizan superficies de menor rugosidad, así como una mayor dureza y la aparición de tensiones residuales de tipo compresivas, lo que proporciona una mayor resistencia al desgaste y un aumento de la vida útil de la pieza al ser más resistente frente al efecto de la fatiga.

Para realizar su experimento, estos autores utilizaron una herramienta con bola cerámica sujeta mediante un cabezal que garantiza el giro de ésta en cualquier dirección. Un fluido a alta presión permite la transmisión de la fuerza necesaria para garantizar el buen desarrollo del bruñido. En la siguiente figura se muestra una imagen del proceso de bruñido de los ejes:

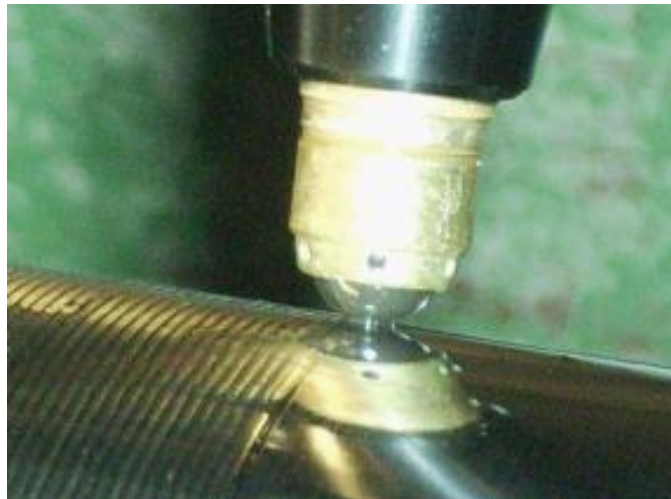


Figura 8. Proceso de bruñido de ejes mediante bola cerámica [5]

Después de bruñir los ejes fabricados de acero AISI 1045, utilizando una bola de 6 mm de diámetro y distintos valores para velocidad, avance y fuerza, pudieron extraer los siguientes resultados y conclusiones:

- La velocidad de bruñido afecta en gran medida la rugosidad superficial y la dureza de las piezas. Es posible utilizar la máxima velocidad que puede ejercer el torno para reducir los tiempos del proceso.
- La presión de bruñido es el parámetro más crítico. Se garantizan altos valores para la dureza a elevadas presiones, mientras que puede causar un deterioro en la rugosidad superficial, causada por la huella dejada por la bola sobre la pieza.
- Es importante determinar el avance óptimo del proceso con la finalidad de reducir los tiempos de bruñido.

- El bruñido produce la aparición de tensiones residuales compresivas hasta 1 mm de profundidad.

Según este estudio, la técnica de bruñido mejora la rugosidad superficial hasta alcanzar las 0,3 μm , además de aumentar la dureza en un 60% en la escala Brinell y causar la aparición de tensiones residuales, lo que resulta favorable frente a los efectos de la fatiga y del desgaste. Esto muestra una gran ventaja del proceso de bruñido frente a otros procesos de acabado, como el pulido.

Finalmente, se debe hacer referencia al trabajo realizado por A. Rodríguez et al. [6] titulado *Influence of ball burnishing process on the hardness and residual stress of Aluminum A92017 convex surfaces* (2012), en el que se vuelve a hacer hincapié en la técnica de bruñido como un proceso de mejora de rugosidad superficial, dureza y generador de tensiones residuales compresivas.

En el estudio se muestra el bruñido con bola como una técnica capaz de mejorar superficies complejas, en su caso superficies convexas sobre probetas de aluminio A92017 de diferentes radios de curvatura (50 y 100 mm). Tomando como parámetros para el bruñido el avance de la herramienta y la estrategia seguida para el proceso, determinaron 8 zonas distintas en la probeta, bruñidas utilizando distintos valores para estos parámetros.

Estos autores pudieron concluir que el bruñido con bola aumenta los valores de dureza en un 17% para este tipo de superficies, además de inducir la aparición de tensiones residuales compresivas que probablemente aumentarían la vida útil a fatiga de la pieza.

Haciendo un resumen de toda la literatura científica relacionada con este apartado, se pueden deducir las siguientes generalidades, compartidas por la mayoría de los autores:

1. La técnica de bruñido es un proceso de mejora de las características superficiales de las piezas que se ha considerado relativamente rápido y económico.
2. La rugosidad superficial mejora después de la aplicación del bruñido, como comentan ampliamente la mayoría de los autores.
3. La dureza superficial también se incrementa después de la técnica del bruñido.
4. Recientes estudios demuestran la aparición de tensiones residuales compresivas, lo cual resulta beneficiosa frente a los efectos causados por la fatiga.
5. Se ha demostrado la existencia de valores óptimos para los distintos parámetros de bruñido, los cuales pueden ser predichos mediante modelos matemáticos.
6. Los parámetros más estudiados son la fuerza de bruñido, el avance, el ancho de pasada y la profundidad de pasada.

2.2 Proceso de bruñido con bola asistido por vibraciones

Después de considerar los principales artículos relacionados con el proceso de bruñido, resulta oportuno analizar aquellos que hacen referencia a los procesos de fabricación asistidos, como fuente de mejora frente a las técnicas convencionales. En la industria actual, la asistencia a los distintos procesos de fabricación existentes viene siendo una práctica habitual frente a la exigente demanda de calidad en las piezas fabricadas.

En una primera aproximación, asistir a un proceso de fabricación consiste en incorporar cualquier tecnología que permita obtener mejores resultados en la pieza final. La introducción de láser, vibraciones o pulsos de corriente son algunas de las técnicas más empleadas en la actualidad.

En nuestro caso, el comportamiento de un material frente a un proceso de bruñido viene definido por la curva tensión-deformación de éste, al ser un proceso de deformación plástica. Cada material posee su propia curva, que puede ser modificada por ciertos procesos, como podría ser la incorporación de vibraciones. A este fenómeno se le conoce bajo el nombre de acusto-plasticidad, como explican Kozlov et al. [16] en su trabajo *On the additivity of acoustoplastic and electorplastic effects* (1994).

El estudio de Kozlov et al. parte de la base que tanto la acusto-plasticidad como la electro-plasticidad producen un descenso de entre el 10% y el 30% del límite elástico de los materiales, por lo que se plantean el efecto que produciría una combinación de ambos. Para ello, utilizaron cables de cobre en los que se les aplicaba un pulso vibratorio en un extremo y se tiraba de ellos desde el otro mediante una máquina de tracción, mientras se les aplicaba pulsos de corriente, produciendo la deformación del material. Al final del estudio concluyeron que la aplicación de ondas vibratorias causaba una mayor deformación del material, aunque el efecto combinado de ambos tipos de ondas generaban peores resultados frente a su aplicación de forma individual. En la gráfica de la siguiente figura se muestra el efecto de la aplicación de dichas ondas sobre el material estudiado:

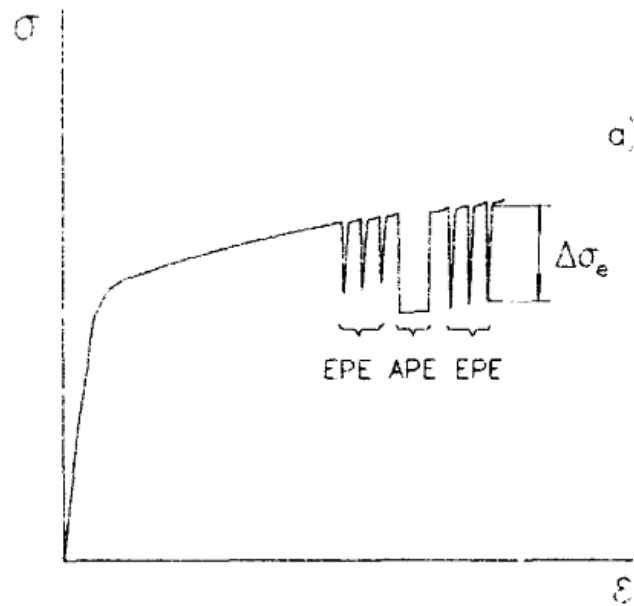


Figura 9. Descenso del límite elástico del Cu por efecto acusto-plástico y electro-plástico [16].

Años más tarde (2011), K.W. Siu et al. [17] presentan el trabajo *New insight on acoustoplasticity – Ultrasonic radiation enhances subgrain formation during deformation*, en el que reafirman las conclusiones obtenidas por Kozlov et al. [16], a las que añadieron que el ablandamiento del material venía dado por la formación de subgranos durante la deformación causada por el efecto acusto-plástico.

Existe un gran abanico de procesos de mecanizado sobre los cuales se ha realizado una asistencia por vibraciones, tal y como comentan D.E. Brehl y T.A. Dow [9] en su trabajo *Review of vibration-assisted machining* (2007). En este artículo se plantea la mejora que produce la combinación de herramientas de mecanizado de precisión con vibraciones controladas, cosa que resulta de gran interés en procedimientos difíciles como la mecanización con materiales frágiles, la creación de geometrías complejas o la producción de componentes de alta precisión en campos como la óptica.

Según estos autores, el mecanizado asistido por vibraciones (VAM por sus siglas en inglés) permite que la herramienta pierda contacto con la viruta y, consecuentemente, las fuerzas durante el mecanizado se reducen, a la vez que la viruta generada es de menor espesor, siempre que se combinen una velocidad de mecanizado y frecuencia y amplitud de vibración adecuadas. Esto produce mejores acabados superficiales, así como mayor precisión en las piezas y un aumento de la vida útil de las herramientas de corte.

Dentro de los sistemas de mecanizado asistidos por vibraciones podemos distinguir tres tipos diferentes, según sean las ondas vibratorias que utilicen en cada caso:

- Sistemas resonantes 1D: utilizan un generador ultrasónico para crear un movimiento lineal de alta frecuencia en la herramienta.

- Sistemas resonantes 2D: la estructura que soporta la herramienta se fabrica de modo que vibre a frecuencias resonantes en dos dimensiones, por lo que describe una trayectoria elíptica.
- Sistemas no resonantes 2D: los actuadores piezoeléctricos se excitan mediante señales de voltaje sinusoidales, utilizando un enlace mecánico para convertir la expansión y la contracción lineal del actuador en un movimiento elíptico de la herramienta.

Los sistemas resonantes 1D son los más utilizados (alrededor de un 80%) cuando se habla de mecanizado asistido por vibraciones, en los que se utiliza un actuador piezoeléctrico para generar un movimiento harmónico de alta frecuencia y de baja amplitud (frecuencias de 20 kHz a 40 kHz, amplitudes de 3 μm a 20 μm).

El sistema VAM de trayectoria vibratoria lineal se debe diseñar con la suficiente rigidez para evitar vibraciones transversales a la línea de actuación de la herramienta, ya que produciría efectos no deseados cuando la herramienta está golpeando la superficie a mecanizar, como un aumento de la rugosidad o un deterioro de la herramienta en cuestión.

En un afán de controlar dichas vibraciones transversales, algunos autores han ideado sistemas con los que éstas se pueden evitar. Por ejemplo, Babitsky et al. [7] en su trabajo *Autoresonant control of non-linear mode in ultrasonic transducer for machining applications* (2004) fabrican un esquema de control auto resonante que utiliza la posición y velocidad del generador ultrasónico para mantener una frecuencia resonante óptima para el proceso utilizado.

A continuación se muestra una imagen de un sistema 1D típico, en el que se distinguen las distintas partes que componen el sistema:

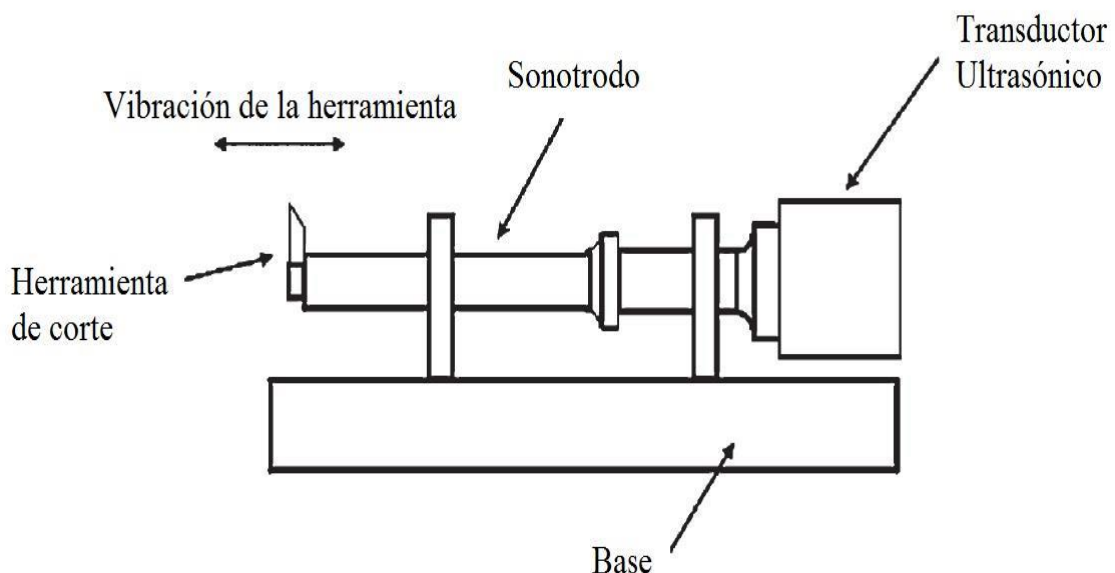


Figura 10. Sistema 1D con generador ultrasónico [7]

Por otro lado se encuentran los sistemas VAM 2D, que como se ha descrito anteriormente crean una trayectoria circular o elíptica en la herramienta, causada por la vibración resonante que se genera en una o dos dimensiones. Un ejemplo es el trabajo desarrollado por E. Brinskmeier y R. Glabe [11] titulado *Elliptical vibration cutting of steel with diamond tools* (1999), en el que presentan una herramienta sencilla capaz de vibrar en dos direcciones. Se trata un sistema ultrasónico en 1D como el que se mostró anteriormente, al cual se desvía el centro de masas de la herramienta, causando una vibración por flexión en el eje Z, generando un movimiento elíptico provocado por una vibración longitudinal y otra transversal, operando a una frecuencia de 20 kHz y una amplitud de 6 μm .

Otro ejemplo es el trabajo de X. Li y D. Zhang [27], titulado *Ultrasonic-elliptical vibration transducer driven by single actuator and its application in precision cutting* (2006), en el que se presenta un sistema en el que se sustituyen el generador y el sonotrodo por un haz en forma de espiral sobre el que se monta la herramienta descentrada. El actuador es un piezoeléctrico en forma de disco, situado en la base del espiral que trabaja a 20 kHz. El diseño del haz permite que la vibración del disco se convierta en una vibración longitudinal que, combinada con la flexión, consigue crear una trayectoria elíptica de la herramienta.

Por último es importante referenciar el trabajo desarrollado por E. Shamoto et al. [24] titulado *Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting* (1999). En éste presentan una herramienta constituida por varios actuadores piezoeléctricos, unidos a las caras laterales de la estructura que soporta la herramienta. Dichos actuadores se activan en pares opuestos, provocando una deflexión en la dirección de la herramienta. La diferencia de fases entre los pares de actuadores amplifica la deflexión en la vibración. La herramienta se monta en el extremo de la estructura vibrante y se mueve en una trayectoria elíptica a frecuencias entre 20 kHz y 40 kHz. En la siguiente figura se muestra un esquema de dicha herramienta:

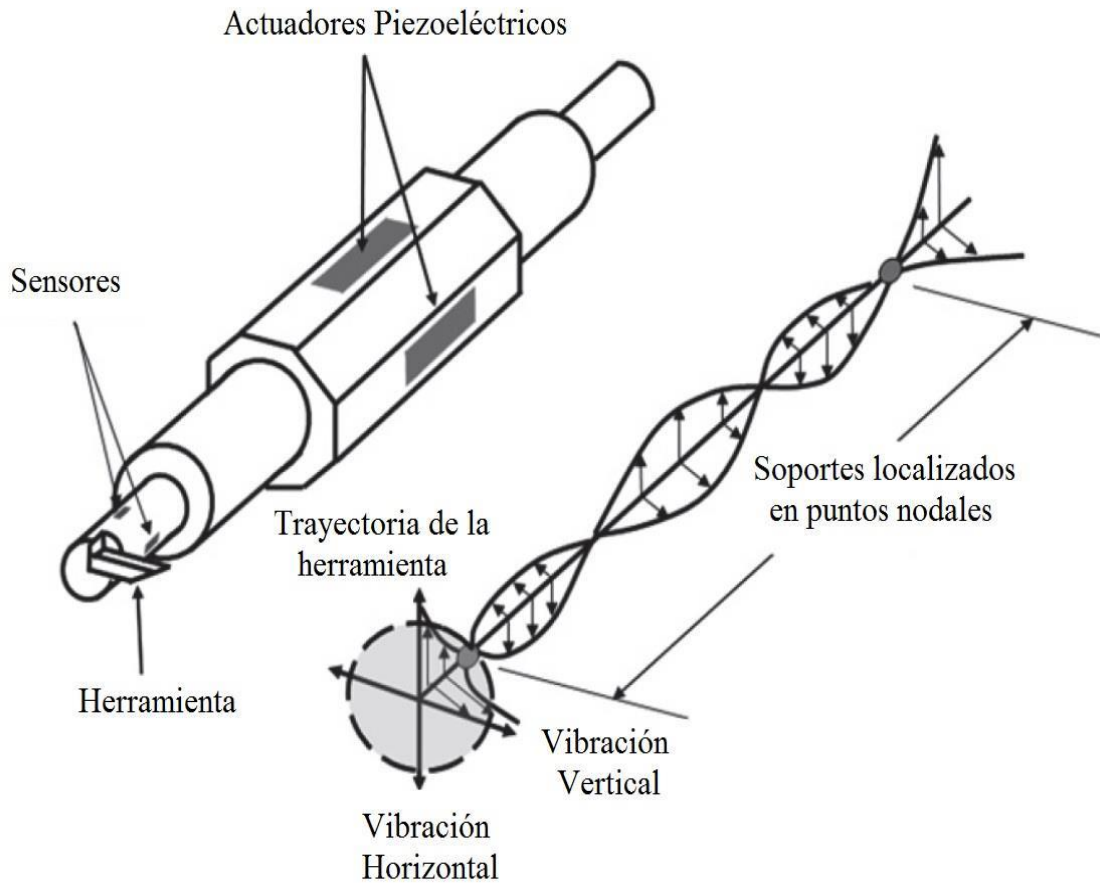


Figura 11. Herramienta VAM 2D diseñada por E. Shamoto et al. [24]

En los sistemas no resonantes 2D los actuadores piezoeléctricos reciben señales de voltaje sinusoidales permitiendo que estos se expandan o contraigan. No obstante, la frecuencia de vibración es menor que la natural de primer orden del sistema. El movimiento lineal del actuador se transmite a una unión mecánica, que a su vez transforma el movimiento en elíptico sobre la herramienta. En la siguiente figura se muestra el sistema descrito, ideado en *Pusan National University*:

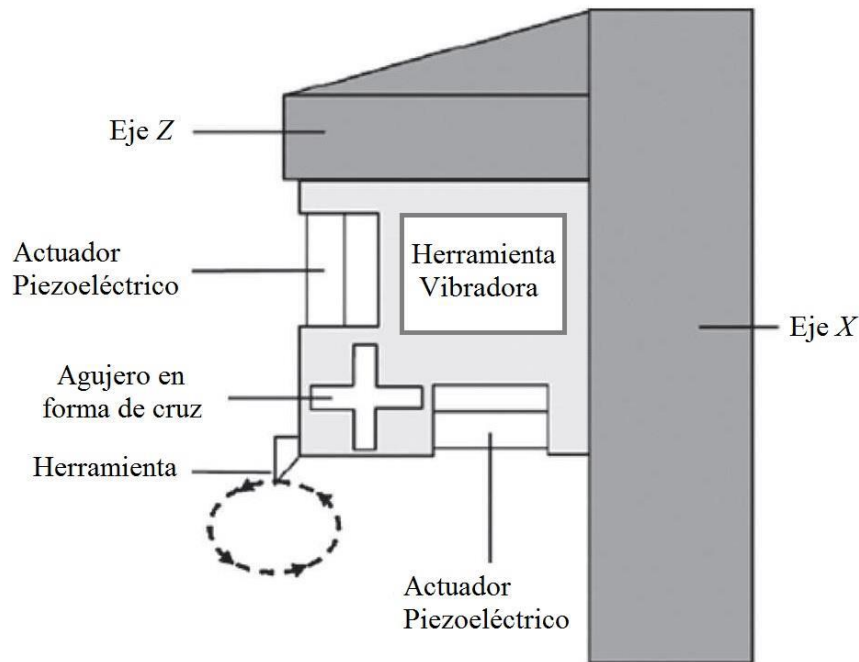


Figura 12. Sistema no resonante 2D ideado en Pusan National University

Como se puede observar en la imagen, el sistema presenta un corte en forma de cruz que facilita la flexión. La herramienta se monta en los extremos opuestos de los actuadores que se activan con diferencia entre fases, produciendo el movimiento elíptico deseado en la salida. Este sistema opera a frecuencia de 1 kHz con amplitud de 5 μm .

Otro ejemplo de sistema no resonante en 2D es el ideado en *North Carolina State University*. En éste también se aplican señales de tensión sinusoidales sobre los actuadores piezoeléctricos. El movimiento lineal se transforma en elíptico mediante el portaherramientas, que actúa como enlace mecánico. La ventaja del sistema es la posibilidad de funcionar dentro de un rango de frecuencias, lo que permite variar el tamaño de la trayectoria mediante un cambio de amplitud o de fase en las señales de voltaje aplicadas. En la siguiente figura se muestra una imagen del sistema descrito:

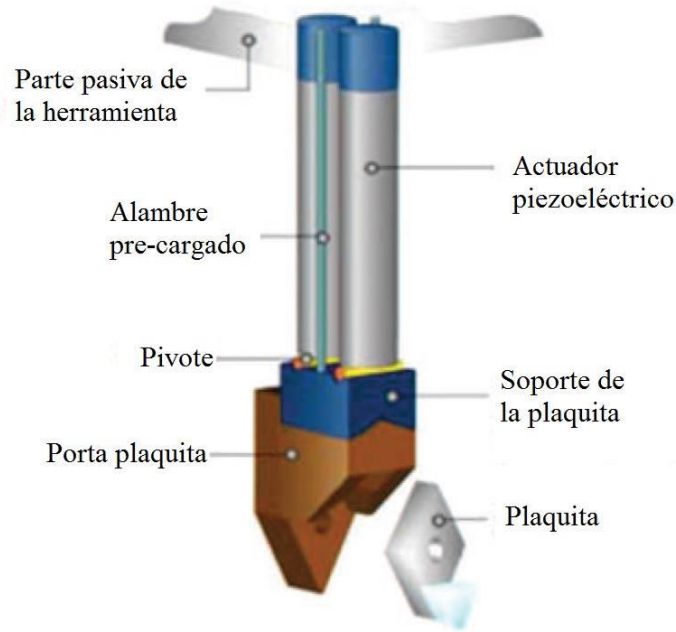


Figura 13. Sistema no resonante 2D ideado en North Carolina State University

Habiendo mencionado los aspectos de mayor interés de los procesos de mecanizado asistidos, el estudio se centrará en el bruñido con bola por ser el objeto principal del proyecto. En una primera referencia se encuentra el trabajo desarrollado por Y. Tian et al. [26], titulado *Laser-assisted burnishing of metals* (2007), en el que se asiste al proceso mediante el uso de láser (LAB, por sus siglas en inglés).

En este artículo se justifica la asistencia del bruñido con bola como proceso para tratar materiales duros sobre los que se requiera una fuerza relativamente alta para bruñir. Se trata de un sistema sencillo, en el que se ablanda temporalmente la superficie por la acción del láser previamente al paso de la herramienta, lo que facilita el proceso reduciendo la fuerza necesaria. La siguiente figura muestra un esquema del proceso utilizado:

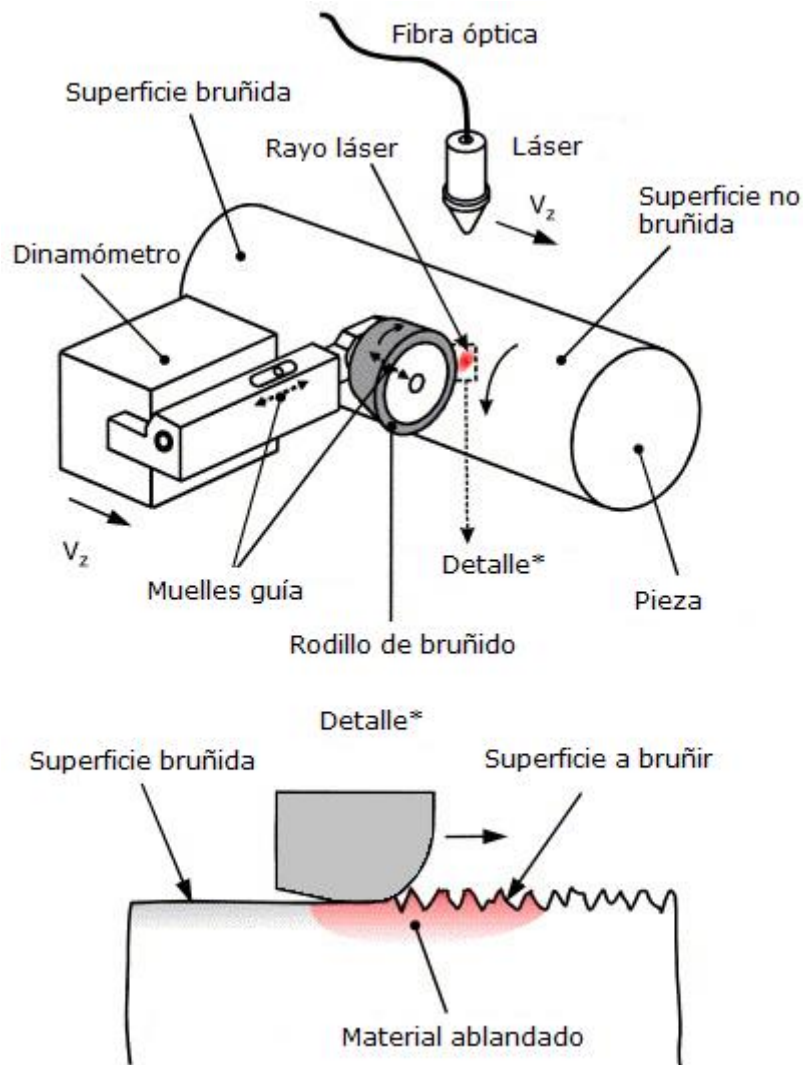


Figura 14. Proceso de bruñido con rodillo asistido por láser [26]

Al final del trabajo se concluye que la fuerza necesaria para obtener mejores resultados se reduce notablemente. Rugosidad, dureza y tensiones residuales compresivas mejoran tras la introducción del láser en comparación con el proceso convencional.

La primera herramienta de bruñido con bola asistida por vibraciones es la diseñada por Gómez-Gras et al. [13] en su trabajo *Study of a ball-burnishing vibration-assisted process* (2014). En éste se presenta una herramienta en la que dos placas vibran por la acción de una bobina excitada, en torno a una frecuencia de 2,4 kHz. Solidaria a estas placas va acoplada una bola de 10 mm, que es la encargada de realizar el proceso.

Más adelante Gómez-Gras presenta su tesis *Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por una vibración* (2015) [28], en el que se utiliza la herramienta descrita para evidenciar el efecto de la asistencia por vibraciones sobre el proceso de bruñido con bola. Concluye que mejora sustancialmente la rugosidad superficial, obteniendo los mismos valores con 1 pasada que con 5 pasadas utilizando el proceso convencional. También se

obtienen buenos resultados en cuanto a los perfiles de dureza y de tensiones residuales compresivas.

La misma herramienta fue utilizada por J.A. Travieso et al. [15] en el trabajo *Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations on G10380 steel specimens* (2015), en el que se utilizan probetas de acero para realizar los experimentos. Obtuvieron los mismos resultados descritos por Gómez-Gras para el caso del aluminio.

Para finalizar este apartado del capítulo del estado del arte, se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

1. Existen distintos tipos de tecnologías utilizadas a la hora de asistir a los diferentes procesos de mecanizado, como son los pulsos de corriente o el láser. No obstante, la asistencia por vibraciones ultrasónicas es el más utilizado.
2. Dentro del mecanizado asistido por vibraciones podemos distinguir tres tipos de sistemas: el resonante 1D, el resonante 2D y el no resonante 2D.
3. De entre los distintos procesos de mecanizado, la asistencia sobre técnicas de corte es más habitual que en procesos de acabado.
4. La primera herramienta de bruñido asistida por vibraciones fue la diseñada por Gómez-Gras. Sus estudios demuestran la mejora que producen dichas vibraciones sobre la rugosidad superficial, la dureza y las tensiones residuales compresivas.

2.3 Comparación con otros procesos de acabado

Como se ha explicado en la introducción, actualmente hay diversas técnicas de acabado que tienen muchas similitudes con el bruñido en cuanto al resultado alcanzado. Siendo muy diferentes los métodos de aplicación y las propias características tecnológicas de los procesos, la mayoría de técnicas de acabado persiguen objetivos similares. Este trabajo se centra en analizar el efecto sobre la vida a fatiga, la rugosidad superficial y la dureza de probetas de acero AISI 304, mecanizadas y posteriormente bruñidas. Por lo tanto, antes de abordar la parte experimental, resulta conveniente presentar los resultados que se pueden obtener en diversos procedimientos y establecer una comparación entre ellos. Resulta oportuno destacar que es especialmente complejo establecer comparaciones de carácter global entre procesos o incluso entre un mismo proceso, puesto que los resultados obtenidos dependen de varios factores como el material, la temperatura y los parámetros de operación, entre otros.

Por ejemplo, en el trabajo realizado por Adel Mahmood [2] *The effect of ball and Roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous materials* (1997) se enfoca el proceso de bruñido como una alternativa de trabajo en frío mucho más económica que los otros procesos que persiguen los mismos objetivos. En este artículo se comparan los

efectos obtenidos en un proceso de bruñido con bola y otro con rodillo, actuando sobre probetas de aluminio y de latón. Utilizando parámetros de operación lo más optimizados posible y trabajando en un torno sobre probetas de forma cilíndrica. Se analizan los resultados en función de la fuerza de bruñido aplicada y el número de pasadas, obteniéndose valores similares, lo cual demuestra que la elección de los parámetros de bruñido es un punto clave en el proceso, pudiendo variar los resultados en gran medida.

Se llega a la conclusión que los dos procesos son válidos tanto para disminuir la rugosidad superficial como para aumentar la dureza del material. Sin embargo, con el proceso de bruñido con bola se obtienen mejores resultados.

En la figura que se presenta a continuación se pueden observar las gráficas de rugosidad y dureza en el caso del aluminio 6061 :

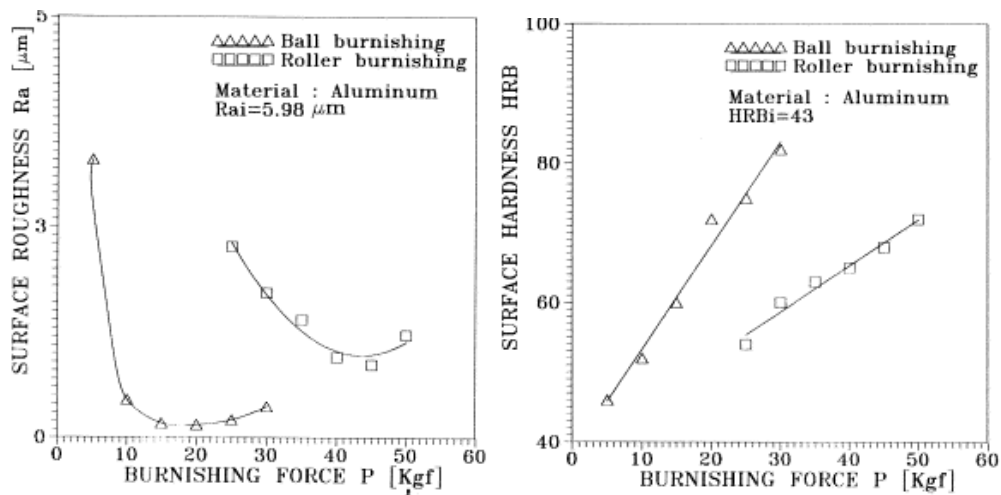


Figura 15. R_a y HRB después del bruñido para Al 6061 [2]

Cuando se habla del comportamiento a fatiga se llega a conclusiones muy favorables al bruñido con bola. En el trabajo de Prevéy et al. [10] *Improved Damage Tolerance in Titanium Alloy Fan Blades With Low Plasticity Burnishing* (2002) se aplica el proceso de bruñido sobre las aspas de un rotor de un motor o de un compresor, hechas de una aleación de Titanio. El objetivo era estudiar cómo se comportaban las aspas bajo el efecto de impacto de objetos, que pueden desencadenar el inicio de una fisura, pudiendo provocar la rotura total. Una vez testeado el comportamiento tras el bruñido, se confirmó que las tensiones residuales eran mucho mayores en capas inferiores del material que las inducidas por un proceso de granallado (a pesar de que en las capas más superficiales los valores son parecidos). En la siguiente figura se muestra una gráfica en la que puede observarse una comparativa entre ambos procesos:

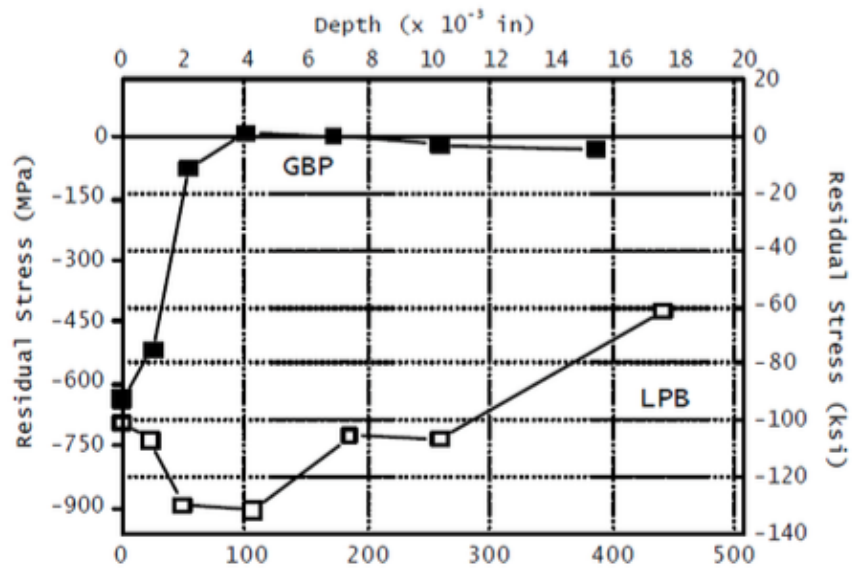


Figura 16. Comparativa tensiones residuales en bruñido con bola (LPB) y granallado [10]

En el artículo de Nalla,R et. Al. [21] titulado *On the influence of mechanical surface treatments –deep Rolling and laser shock peening- on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperature* (2003) se establece una comparación entre el comportamiento a fatiga de materiales después de ser sometidos a un proceso de bruñido y otro de *Laser Shock Peening* (LSP). Los resultados son claramente favorables al bruñido estableciéndose un límite de fatiga mayor que en LSP, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas. La efectividad del bruñido se atribuye a un mayor grado de trabajo en frío, así como el proceso también provoca una disminución significativa de la rugosidad superficial. En este estudio también se explica que a medida que aumenta la temperatura los efectos de la resistencia a fatiga disminuyen. Sin embargo, es a temperatura ambiente donde estos procesos tienen su mayor efectividad.

En el estudio de Michael J.Shepard, et al. [18] titulado *Effects on Surface treatment on fretting fatigue performance of Ti-6Al-4V* (2003) se introduce una comparación entre el Bruñido con bola, el granallado y el electro-pulido como procesos para mejorar la vida útil, disminuyendo el desgaste por corrosión y, por consiguiente, aumentando las tensiones residuales compresivas. Se experimenta sobre probetas de una aleación de Titanio (Ti-6Al-4V) teniendo en cuenta que es un material muy utilizado en la industria aeronáutica. La experimentación se llevó a cabo a temperaturas de trabajo elevadas para simular lo más fidedignamente posible las condiciones reales de funcionamiento. Los resultados arrojaron claramente las ventajas del bruñido con bola frente a los otros procesos, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

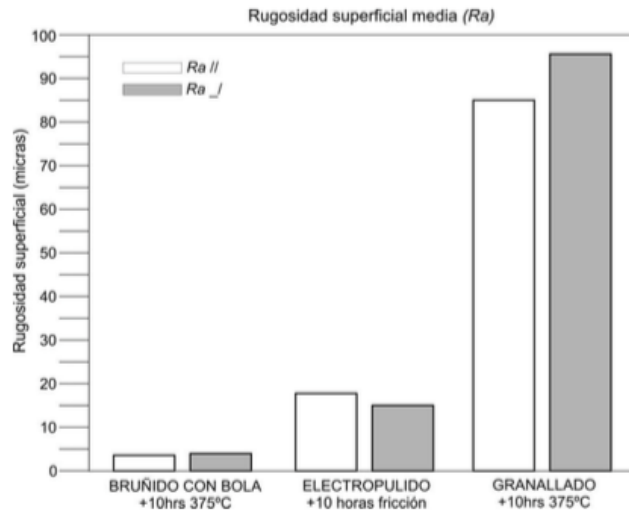


Figura 17. Gráfico comparativo de los valores de R_a . en dirección paralela al fresado (barras blancas) y en la dirección perpendicular al fresado (barras grises) [18]

Por su lado, en el artículo *Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of médium carbón AISI 1045 steel* (2005) de R.Aviles, J.Albizuri, A.Rodríguez, L.N López de Lacalle [23], se explica cómo entre todos los procesos que producen tensiones residuales compresivas el granallado (SP) y el *Laser Shock Peening* (LSP) son los que más se asemejan al proceso de bruñido con bola.

En este artículo se aplica el bruñido sobre probetas a fatiga según la norma DIN-5013. En la figura puede observarse una imagen de dichas probetas:

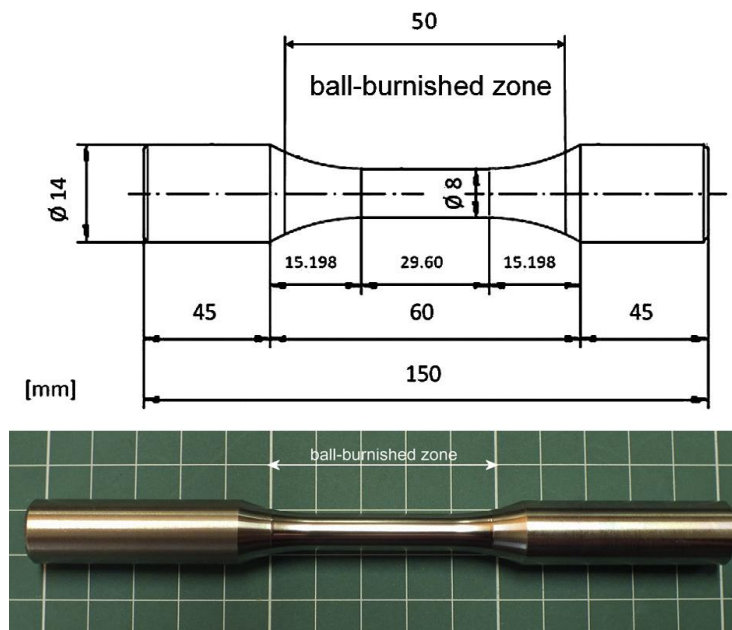


Figura 18. Probeta y zona de bruñido [23]

Las probetas son de acero AISI 1045, lo que demuestra la variedad de materiales sobre los que se ha aplicado el bruñido con bola, incluyendo algunos muy duros como las aleaciones de Titanio, y otros más blandos como puede ser el aluminio.

Una vez analizado el proceso del bruñido, queda demostrado que el límite a fatiga mejora en un 21,25%, el tamaño de grano en la zona superficial ha disminuido un 50% y la dureza superficial ha aumentado entre un 20-25%. Al realizar una comparación entre este ensayo y el resto de procesos que han sido enumerados, es posible realizar las siguientes afirmaciones en función de las ventajas obtenidas:

- Acabado Superficial: La R_a en el bruñido con bola es sustancialmente menor que en SP y LSP.
- Vida a fatiga: El proceso de bruñido está en un término medio entre SP (no mejora la vida a fatiga) y LSP (la mejora mucho).

Una vez hecha la comparación únicamente basada en los resultados numéricos, se consideran también los factores económicos. El LSP, por ejemplo, requiere de maquinaria especializada de coste elevado y dimensiones considerables, ya que se trata de un proceso altamente tecnológico. Lo mismo sucede con el proceso de granallado, para el cual es necesaria una maquinaria costosa y de gran tamaño.

El tamaño y el grado de especificación de estos equipos contrastan enormemente con las dimensiones de una herramienta de bruñido con bola, que se puede adaptar a una máquina CNC convencional. Por otra parte, la geometría es el principal obstáculo a la hora de sustituir los procesos convencionales por el bruñido, puesto que dadas las características actuales de las herramientas de bruñido con bola su uso está relativamente delimitado por la geometría de la pieza de trabajo, cosa que no sucede con el granallado o el LSP.

Haciendo un resumen de lo analizado con anterioridad, se pueden extraer diferentes conclusiones:

1. En el proceso de bruñido pueden ser destacadas tres ventajas fundamentales (mejora la rugosidad superficial, aumenta la vida a fatiga y aumenta la dureza), las cuales no se presentan simultáneas en ningún otro proceso.
2. Las condiciones de ensayo (temperatura, parámetros de operación, etc.) son muy determinantes a la hora de obtener resultados óptimos y de esta manera poder compararlos entre ellos.
3. La geometría de las piezas a trabajar es uno de los inconvenientes del bruñido con bola, presentando limitaciones producto de la propia forma de la herramienta. Esta limitación no aparece en procesos como el granallado o el *Laser Shock Peening*.
4. La adaptación de una herramienta de bruñido con bola a maquinaria (CNC o no) es otra ventaja significativa en el balance económico, ya que como se ha dicho anteriormente, para los otros procesos es necesaria la compra de maquinaria especializada.

CAPÍTULO 3:

REDISEÑO DE UNA

HERRAMIENTA DE

BRUÑIDO CON BOLA

3.1 Descripción

Para realizar el estudio descrito en el presente trabajo, se ha tomado como referencia la herramienta diseñada por Gómez-Gras [27] en su tesis doctoral *Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por una vibración* (2015). En la siguiente figura se muestra una imagen de dicha herramienta de bruñido:



Figura 18. *Vista herramienta de bruñido*

La herramienta presentada se divide en tres bloques bien diferenciados, cada uno de los cuales desempeña una función en el proceso de bruñido: elementos para el bruñido, elementos del sistema vibratorio y elementos de precarga y sujeción. En la siguiente figura se pueden observar los distintos bloques que componen la herramienta:

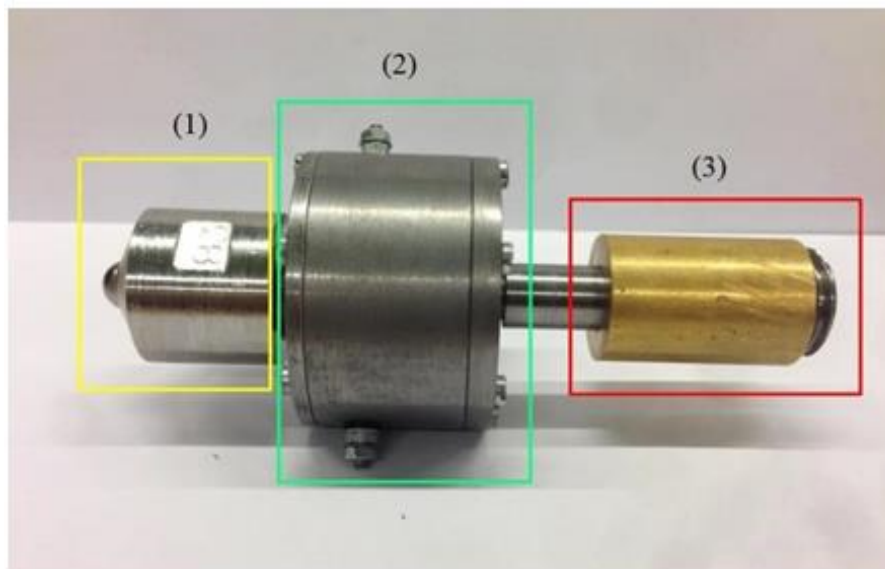


Figura 19. *Partes de la herramienta de bruñido*

A continuación se detallan los elementos que componen cada uno de los bloques de la herramienta y sus principales características.

3.1.1 Elementos para el bruñido

El proceso de bruñido se realiza mediante el contacto entre la superficie de la pieza de trabajo y una bola de acero al cromo endurecido (100Cr6) presente en este bloque. La herramienta actual ha sido diseñada para trabajar con bolas de diámetro 10 mm, alojadas dentro de un cabezal que presenta la geometría adecuada para garantizar el contacto entre bola y superficie.

Por otra parte, el cabezal va roscado a un vástago central, el cual se une solidariamente con una placa circular en el extremo opuesto. Dicho eje presenta un surco que actúa como pista de rodamiento, diseñado para garantizar que la bola de bruñir gire libremente durante todo el proceso. Esto se consigue colocando 7 bolas de 3 mm de diámetro en el surco, compuestas del mismo material que la bola principal.

En todo momento se debe garantizar la lubricación de todos los elementos de bruñido con el fin de obtener mejores resultados y menor desgaste, por lo que se utiliza grasa de molibdeno.



Figura 20. Conjunto de elementos para el bruñido

3.1.2 Elementos del sistema vibratorio

La asistencia con vibraciones en el proceso de bruñido es una de las principales ventajas que presenta esta herramienta.

En este caso, se trata de un sistema formado por una bobina electromagnética y dos placas circulares. El campo electromagnético que genera la bobina al ser excitada produce una deflexión en ambas placas, efecto que se transmite a la punta de la herramienta con el fin de asistir al proceso de bruñido.

Las dos placas van unidas a una carcasa que actúa de alojamiento de la bobina, a la vez que le ofrece protección.



Figura 21. Sistema vibrador de la herramienta

3.1.3 Elementos del sistema de precarga y sujeción

El último bloque de la herramienta lo configuran los elementos de precarga y de sujeción de la misma. El pretensado de la herramienta se consigue mediante la introducción de un muelle de características conocidas. Aplicando un valor de desplazamiento sobre dicho muelle mediante el roscado del guía se consigue precargar la herramienta con la fuerza de trabajo deseada.

Por otra parte, el muelle se coloca en el interior de un pequeño alojamiento, fabricado con latón CW617N (según la norma EN-12165) para minimizar el rozamiento existente entre las piezas que componen la herramienta. A su vez, dicho alojamiento sirve de sujeción a la herramienta para ser montada en un cono ISO o sobre un adaptador especial. De esta manera se consigue una transmisión de fuerza íntegra sobre la bola de bruñido.



Figura 22. Sistema de pretensado y sujeción

3.2 Funcionamiento

Como ya se ha comentado con anterioridad, la capacidad de esta herramienta para trabajar asistida por vibraciones abre la posibilidad de experimentar con esta técnica aplicada sobre el bruñido convencional, lo que la convierte en un prototipo atractivo para realizar dichos estudios.

No obstante, es posible bruñir con la herramienta sin necesidad de excitar la bobina, y por tanto, sin la presencia de las vibraciones, lo que la convierte en una herramienta de bruñido convencional.

A continuación se exponen con más detalle los dos modelos de trabajo con dicha herramienta.

3.2.1 Bruñido convencional

Como se ha explicado en el capítulo anterior, el bruñido con bola convencional consiste en deformar plásticamente la superficie de una pieza de trabajo a partir de la fuerza que ejerce una bola sobre dicha superficie.

En la herramienta que se presenta en este trabajo, la fuerza de bruñido que se aplica durante todo el proceso viene dada por la compresión del muelle, además de una pequeña magnitud adicional causada por el avance de la herramienta sobre las irregularidades de la pieza tratada.

Por lo tanto, se puede controlar en todo momento la fuerza que se aplica en el proceso, a partir de predeterminedar la compresión del muelle, que viene a su vez definida por la Ley de Hooke:

$$F_{muelle} = k \cdot \Delta x \quad (2)$$

Donde k se corresponde con la constante del muelle de precarga, que en este caso tiene un valor de 15,22 N/mm, y Δx con el desplazamiento del muelle en el momento que se comprime, por lo que es posible deducir que un aumento de la compresión del muelle consigue fuerzas de bruñido más elevadas. El uso de un muelle de constante elástica más elevada también permitiría un aumento de la fuerza a la hora de bruñir.

Por lo tanto, se puede determinar la fuerza de bruñido mediante la siguiente expresión:

$$F_m = k \cdot x_1 + F_0 \quad (3)$$

Donde x_1 representa el desplazamiento total del muelle y F_0 se corresponde con la precarga que presenta el muelle.

Antes de empezar a trabajar con la herramienta se ha obtenido la correspondiente curva de calibración, es decir, la ecuación que permite traducir la fuerza deseada en desplazamientos sobre el muelle. De esta forma, controlando el número de vueltas aplicadas sobre la rosca se puede establecer la fuerza aplicada sobre el proceso.

En la siguiente gráfica se muestra la curva de calibración que se ha obtenido para esta herramienta:

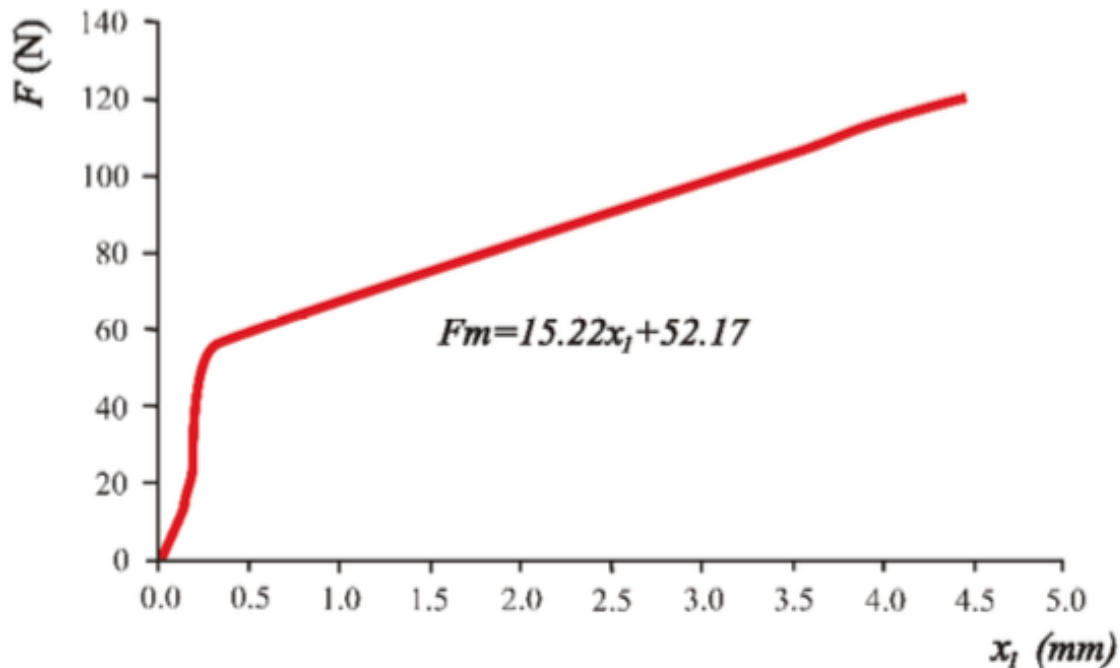


Figura 23. Curva de calibración

En resumen, el bruñido convencional utilizando la presente herramienta se reduce a una serie de pasos sencillos:

- Precarga del muelle mediante el roscado del vástago conectado a dicho muelle.
- Montaje de la herramienta en la máquina en la que se vaya a trabajar. En el caso de fresadoras, se debe utilizar un cono ISO para el correcto acoplamiento, mientras que si se utiliza un torno se requiere un adaptador especial.
- Desplazamiento de la herramienta hacia la pieza de trabajo hasta la medida necesaria para conseguir la fuerza deseada.

3.2.2 Bruñido asistido con vibraciones

El otro método de trabajo utilizando la herramienta descrita es el bruñido con bola asistido por vibraciones. Se trata de un método innovador, que pretende aumentar la fuerza durante el proceso mediante la aplicación de vibraciones controladas.

En el caso de estudio, las vibraciones con las que se asiste a la herramienta vienen dadas a través de una bobina electromagnética, que se encarga de transformar la corriente alterna en un campo magnético variable.

La idea con la que se ha diseñado el sistema vibratorio es la deflexión de placas circulares por la acción de una fuerza, en este caso magnética. Como se ha comentado en apartados anteriores, el sistema de vibración está formado por dos placas circulares de igual espesor. Ambas placas van

unidas a un cuerpo cilíndrico, el cual actúa como alojamiento de la bobina, tal y como se muestra en la siguiente figura:

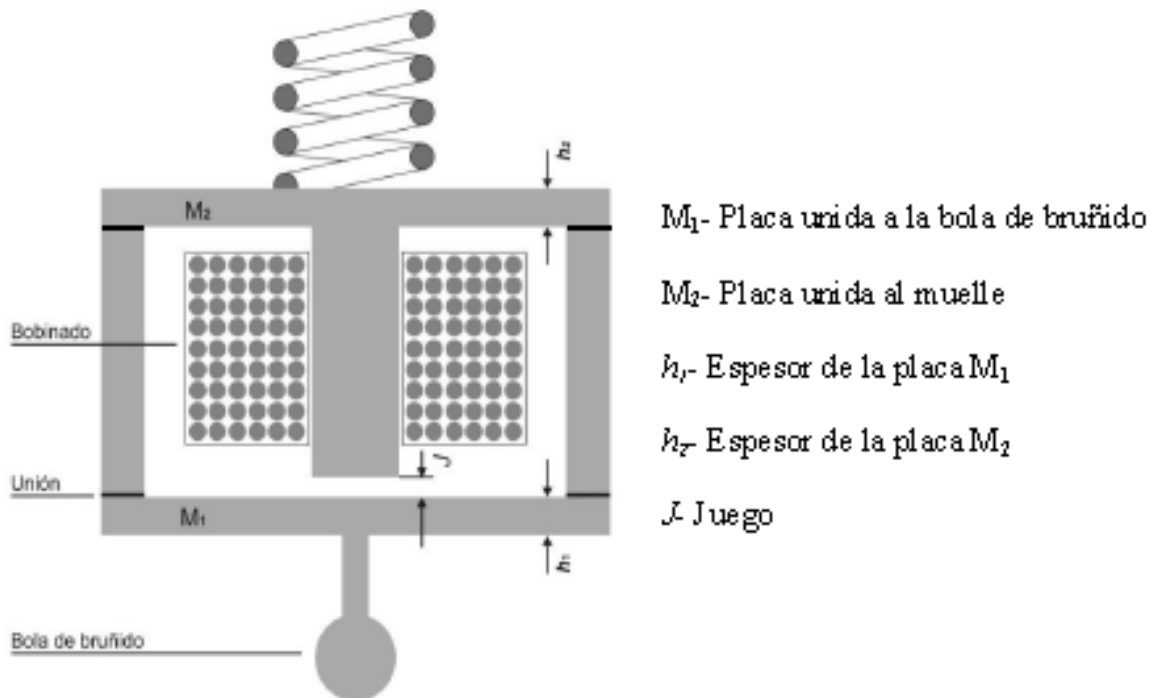


Figura 24. Sistema de vibración

El modo de funcionamiento de este sistema vibratorio es muy sencillo. Utilizando una fuente de corriente exterior se consigue excitar la bobina electromagnética de la herramienta, de características controladas, creando un campo magnético en el interior de ésta. La fuerza creada por dicho campo produce una deflexión de las placas circulares cuando éstas entran en la frecuencia de resonancia, lo que produce la vibración de la herramienta.

Para que la herramienta produzca los efectos deseados, ésta debe alcanzar la frecuencia de resonancia. En estudios anteriores, se determinó que dicha frecuencia se encontraba alrededor de los 2,4 kHz, lo que producía una deflexión de las placas de 2,2 μm en régimen de onda completa. Una vez alcanzado dicho valor de frecuencia las placas, que tienen 2 mm de espesor, entran en resonancia y, consecuentemente, la punta de la herramienta vibra asistiendo al proceso de bruñido.

La presencia de vibraciones en el proceso de bruñido permite un incremento de fuerza frente al bruñido convencional, además de disipar un porcentaje de energía capaz de liberar con más facilidad las dislocaciones presentes en las capas más externas del material tratado.

La asistencia al proceso de bruñido produce un valor de fuerza adicional que, si lo añadimos a la fuerza generada en el proceso convencional, obtenemos el valor de fuerza total aplicado durante el proceso. Este valor adicional viene definido por la suma de la fuerza sinusoidal variable en el tiempo, producida por las vibraciones F_v y las vibraciones producidas en el

entorno durante el bruñido de la pieza η . Tomando estos valores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$F_{total} = F_v(t) + \eta + F_m \quad (4)$$

La fuerza producida por las vibraciones también es producto de la constante del muelle de la herramienta. Se obtiene la siguiente expresión para esta fuerza:

$$F_v = k \cdot (x_1 + x_2) \quad (5)$$

Donde el valor de x_2 se corresponde con la variación media sobre la longitud de la herramienta en el momento en el que se activa la bobina, mientras que x_3 se corresponde las pequeñas oscilaciones que se producen en la herramienta producto de la vibración en cada instante de tiempo. Por lo tanto, podemos definir la fuerza total de vibración como:

$$F_{total} = F_v(t) + \eta + F_m = k \cdot [(x_1 + x_2 + x_3(t))] + F_0 + \eta \quad (6)$$

3.3 Rediseño

Uno de los principales objetivos de este proyecto es el rediseño de la herramienta actual de bruñido asistida por vibraciones.

Con el propósito de determinar la influencia del diámetro de la bola de bruñir en los resultados, se ha decidido diseñar y fabricar una herramienta de cabezales intercambiables, que faciliten la utilización de indentadores de distinto diámetro y, consecuentemente, determinar la repercusión de este nuevo parámetro de estudio.

En una primera aproximación, y utilizando la información de la biografía publicada, se encuentra que los valores para los distintos diámetros de bola experimentados oscilan entre los 4 mm y los 20 mm, por lo que se ha decidido diseñar una herramienta capaz de albergar bolas de diámetros 4 mm, 6 mm, 8 mm, 12 mm, 14 mm y 18 mm, a las que se debe añadir la de 10 mm que utiliza la herramienta actualmente.

Otro de los objetivos del rediseño es la fabricación de un soporte especial, con el que sea posible sujetar la herramienta para ser utilizada en un torno convencional, ampliando así el número de máquinas sobre las que operar con la herramienta de partida.

3.3.1 Nomenclatura

Antes de seguir con la explicación del rediseño, se ha ideado un pequeño código para identificar de forma sencilla los parámetros con los que se experimentará posteriormente.

En este código se recogen los principales parámetros utilizados durante el bruñido, entre los que encontramos el diámetro de bola, la fuerza de

bruñido y la presencia o ausencia de vibraciones durante el proceso. Dicho código se define de la siguiente forma:

∅bola + F + W

En la siguiente tabla se explica cada uno de los parámetros utilizados en la anterior codificación:

Tabla 2. *Codificación de la herramienta de bruñido*

Código	Explicación	Valor
∅ bola (mm)	Diámetro bola de bruñido	6, 8, 10, 12, 14, 18
F (N)	Fuerza de bruñido	60-140
W	Condiciones de trabajo	V (vibraciones), C (convencional)

3.3.2 Rediseño de la herramienta actual

La primera idea de rediseño es la fabricación de una serie de cabezales con distintos diámetros de boquilla, en los que albergar cada una de las bolas seleccionadas, por lo que se diseñará un cabezal para cada una de las bolas.

A la hora de diseñar dichos cabezales se debe cumplir que, como mínimo, un tercio del volumen de la bola en cuestión sobresalga hacia el exterior del alojamiento, para conseguir el rodamiento libre sobre la superficie de trabajo, a la vez que se evita que la bola se salga completamente del cabezal durante el proceso de bruñido. Para ello, y considerando la geometría del cabezal actual, se han determinado los distintos diámetros para los alojamientos, tanto de la parte superior como inferior del agujero de la boquilla donde se sitúa la bola. En la siguiente figura se muestra una vista de sección en la que se observa la geometría de los cabezales:

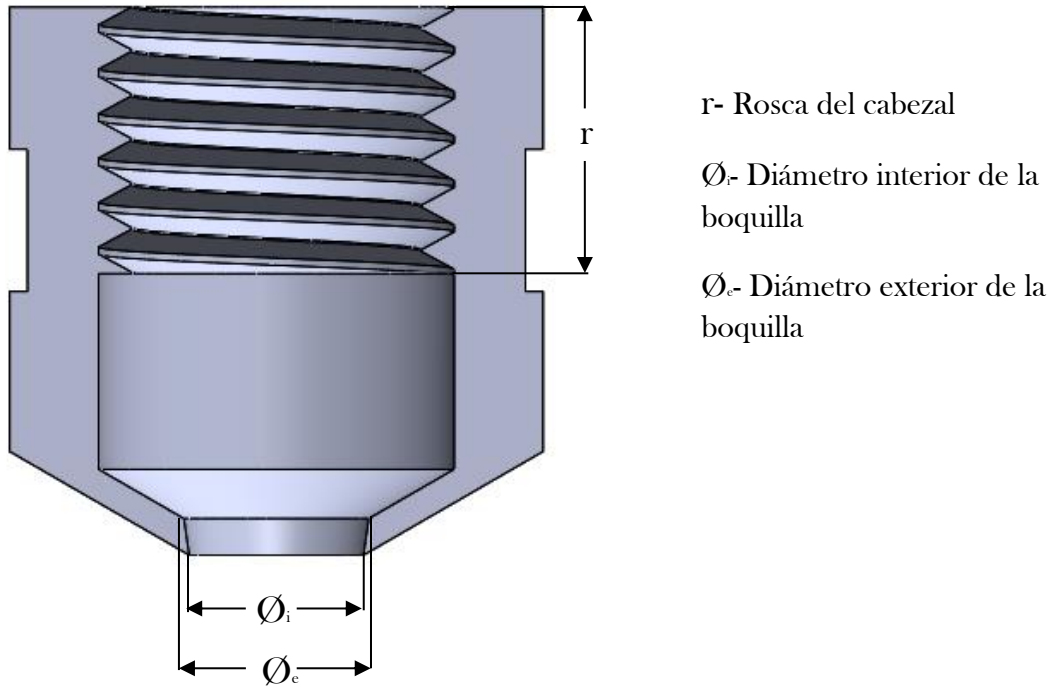


Figura 25. *Vista Seccional del cabezal*

Observando la disposición de la bola de 10 mm en la herramienta actual se puede observar la altura existente entre el punto más externo de dicha bola y el extremo de la boquilla, para calcular posteriormente el volumen de bola en la parte exterior y comprobar si cumple con las condiciones citadas anteriormente. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente dicha distancia:

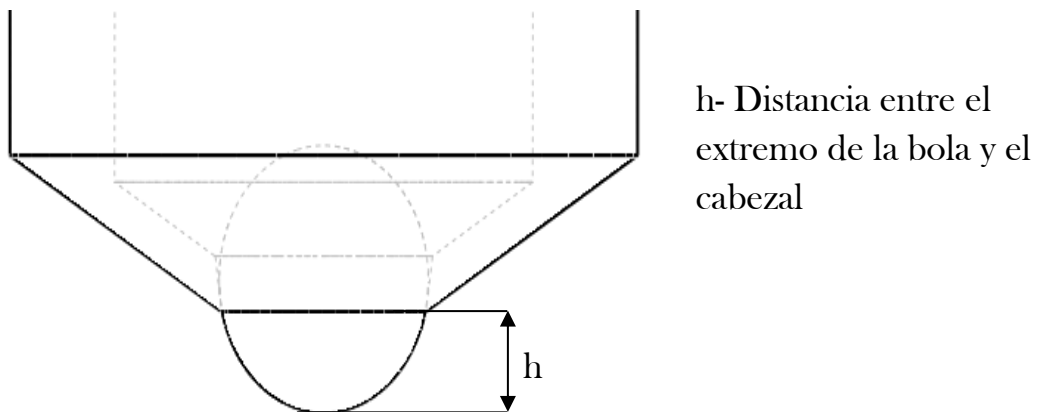


Figura 26. *Distancia exterior bola*

Se calcula el volumen total de la bola como el volumen de una esfera completa:

$$V_t = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot \varnothing_e^3 \quad (7)$$

Conociendo el valor del diámetro exterior del cabezal de 10mm y la distancia h comentada anteriormente, se puede calcular el volumen de una porción esférica como:

$$V_e = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (3 \cdot a^2 + h^2) \quad (8)$$

Donde a se corresponde con la mitad del diámetro exterior del boquete.

A continuación se establece la relación existente entre ambos valores de volumen, obteniendo aproximadamente un 35% y, por lo tanto, entra dentro de los límites del diseño.

Por otro lado, para calcular el diámetro de la parte interior del agujero se debe observar el ángulo creado por la diferencia de los diámetros interior y exterior en el cabezal actual. Una vez determinado dicho ángulo, se considerará el mismo para el resto de cabezales, obteniendo de esta forma el valor de los diámetros interiores.

Para acabar con el diseño de los boquetes en los cabezales, se establecen relaciones de proporcionalidad entre toda la serie de cabezales, y se obtiene el valor de los diámetros de la boquilla para cada uno de ellos. En la siguiente tabla se muestran las dimensiones mencionadas anteriormente:

Tabla 3. Dimensiones de los cabezales diseñados

Ø bola (mm)	V _t (mm ³)	h (mm)	V _e (mm ³)	a (mm)	Ø _e (mm)	Ø _i (mm)
4	33,51	1,60	11,84	1,96	3,92	4,16
6	113,10	2,41	39,96	2,94	5,88	6,24
8	268,08	3,21	94,71	3,92	7,84	8,32
10	523,60	4,01	184,99	4,90	9,80	10,40
12	904,78	4,81	319,66	5,88	11,76	12,48
14	1436,76	5,61	507,61	6,86	13,72	14,56
18	3053,63	7,22	1078,85	8,82	17,64	18,72

En cuanto a la rosca del cabezal, se mantiene el mismo perfil que presenta la herramienta actual, mientras que la longitud se selecciona en función del recorrido que deba hacer el cabezal hasta ejercer presión sobre la bola de bruñido. La métrica se determina en función del vástago sobre el que va sujeto cada uno de los cabezales.

Además del diseño de los cabezales, se debe hacer un rediseño del vástago inferior de la herramienta sobre el cual van montados. El principal objetivo es obtener un sistema de sujeción de los cabezales de fácil

intercambiabilidad, por lo que la idea de fabricar un vástago para cada cabezal quedó descartada. Se decidió diseñar 3 vástagos distintos en los que es posible montar toda la serie de cabezales, por lo que estos deberán ser diseñados de acuerdo a las dimensiones de dichos vástagos, como ya se ha comentado:

- Vástago pequeño, para los cabezales de 4 mm y 6 mm.
- Vástago mediano, para los cabezales de 8 mm, 10 mm y 12 mm.
- Vástago grande, para los cabezales de 14 mm y 18 mm.

Utilizando esta serie de vástagos se pueden utilizar los distintos cabezales y bolas, simplemente roscando el cabezal deseado. A continuación se muestra una figura de los tres vástagos fabricados y de los distintos cabezales:



Figura 27. *Vástagos fabricados*



Figura 28. *Cabezales ensamblados*

En todo momento la unión de los cabezales con los distintos vástagos debe asegurar el contacto óptimo entre la bola de bruñido y las bolas que actúan como pista de rodamiento, además de permitir un pequeño juego que asegure el rodamiento libre de la bola. Para ello, se han utilizado bolas de 2 mm y 3 mm para el canal de rodadura, dependiendo del diámetro de bola utilizado. En la figura se destaca la posición de la pista de rodadura con respecto al indentador:

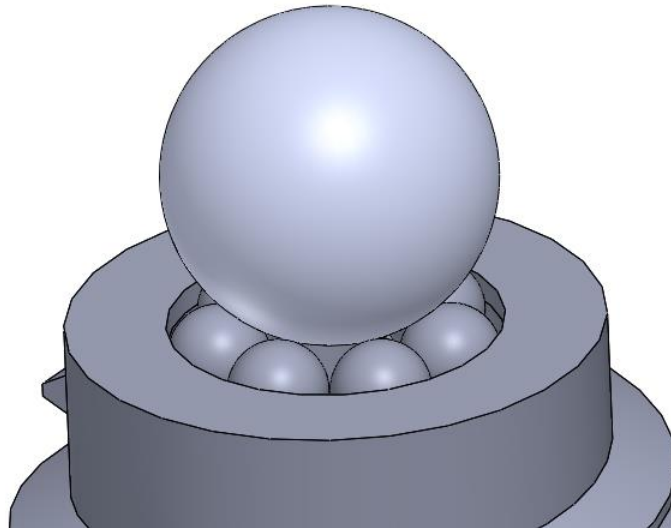


Figura 29. *Vista bolas de rodadura*

3.4 Prototipo

Una vez completado el rediseño y como paso previo a la fabricación de todos los componentes es preciso obtener un prototipo no funcional que sirva para comprobar el montaje de la herramienta y la adaptación de los diferentes cambios. Tiene que ser realizado mediante un proceso rápido, puesto que si se detectan errores de diseño se puedan solucionar antes de la fabricación real. Además, debe ser económico, teniendo en cuenta su utilidad.

El método elegido ha sido la impresión 3D mediante FDM (Modelado por Deposición Fundida). Dado que es un proceso extremadamente versátil que permite la obtención de todas las geometrías necesarias. El material del prototipo es plástico, en este caso se ha elegido el PLA. [anexo1.5]

Por lo tanto, se procede a la impresión de las distintas partes por separado y se ensamblan posteriormente para comprobar que los ajustes y las diferentes piezas funcionan según lo planteado.

El proceso se inicia inmediatamente después del rediseño mediante software CAD. El primer paso es obtener los archivos en formato .stl, de manera que la geometría queda definida por un mapa de puntos.

El siguiente paso se realiza con la ayuda de un software que permite dividir la pieza en capas, de manera que con la unión de todas las capas se obtiene el sólido completo. Es en este paso donde se definen todos los parámetros de impresión que van a determinar la calidad final del prototipo. En este caso, a pesar de que no será un ensamble funcional, sí que servirá para comprobar geometrías y encajes entre las diferentes piezas, por lo tanto es necesaria una calidad bastante elevada.

Una vez definidos todos los parámetros, se genera un 'G-CODE' que es el que se debe cargar en la máquina de impresión.

Se imprime pieza a pieza la herramienta de bruñido. En la figura 31 se pueden apreciar todos los cabezales:

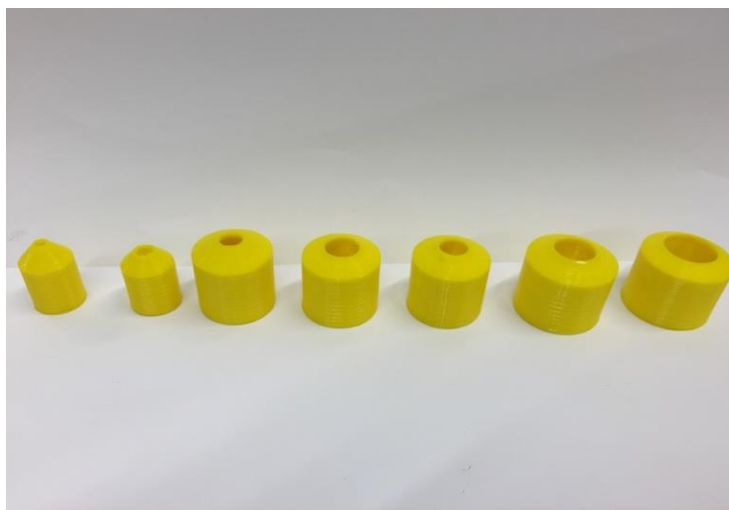


Figura 30. Vista de los distintos cabezales

Una vez validada la calidad en cada uno de los cabezales, se imprimen los 3 vástagos que permitirán adaptar todos los cabezales, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 31. Alojamiento cabezales

Finalmente, y como se muestra en las siguientes figuras, se imprime el vástago además del alojamiento de la bobina y el alojamiento del muelle:



Figura 33. Alojamiento bobina y muelle

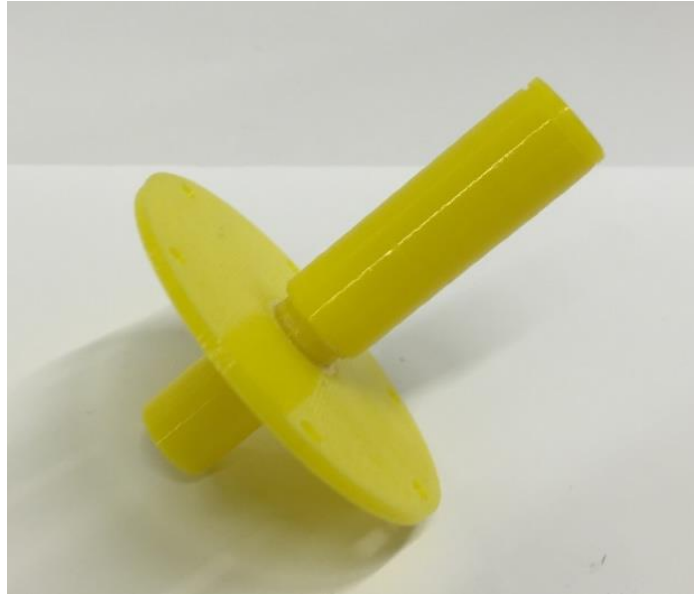


Figura 32. *Vástago*

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, hay elementos como las roscas que no han sido imprimidas, dada su dificultad en este tipo de proceso. Como la misión del prototipo es solo geométrica, se ha considerado que las roscas eran prescindibles.

Una vez se han obtenido todas las piezas es posible visualizar el modelo final:

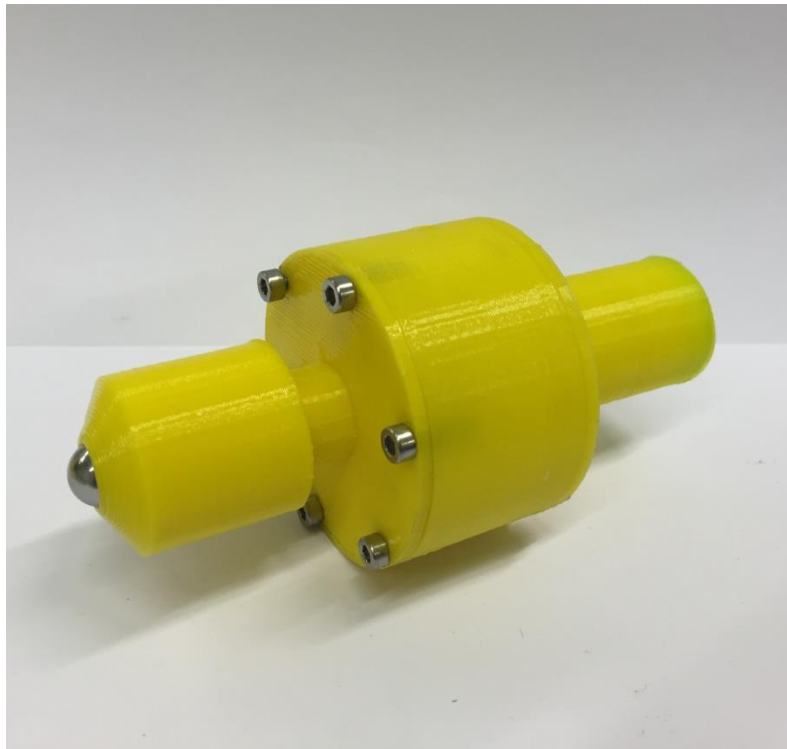


Figura 33. *Ensamblaje final*

3.5 Adaptación al torno

Entre los objetivos de este proyecto se encuentra la adaptación al torno de la herramienta base, la cual fue diseñada para ser utilizada en una fresadora vertical. Por lo tanto, se cuenta con una herramienta concebida para ser montada en un cono ISO y ser utilizada en una máquina vertical. Como era necesario su uso en un torno horizontal, fue necesario diseñar un sistema de adaptación, que cumpliera con todas las condiciones necesarias para la experimentación.

El principal problema que se planteaba era el voladizo de la herramienta en relación con su esbeltez, teniendo en cuenta que la mayoría del peso se concentra en la parte central donde se encuentra la bobina, siendo la geometría de la zona de sujeción el punto más crítico, ya que la herramienta podría pandearse cuando está trabajando en posición horizontal. Además, debía garantizarse una sujeción que impidiera el movimiento relativo en cualquier dirección.

En primer lugar se deben tener en cuenta el sistema con el que se sujetan las herramientas en el torno. El portaherramientas cumple la función de mantenerse sujeto al carro del torno y a la vez permitir el uso de distintos tipos de herramientas. En la siguiente figura se muestra la geometría de los portaherramientas disponibles para un torno convencional.



Figura 34. *Portaherramientas disponibles*

La mayoría de herramientas para torno (ya sean integrales o con plaquita) tiene forma hexaédricas, son prismas de 4 caras. Por lo tanto se sujetan

sobre un porta herramientas con esa misma forma tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.



Figura 35. Ejemplo de herramientas comunes de torno

Dado que la modificación sobre la herramienta de bruñir debe ser mínima, se descarta utilizar un portaherramientas de forma cuadrada, puesto que disminuye la sujeción y, dada la sección del cilindro de sujeción de la herramienta, no hay suficiente superficie de agarre.

Finalmente, se ha optado por hacer un diseño que se pueda utilizar en un portaherramientas de forma trapezoidal, puesto que tiene unas ventajas claras:

- Permite utilizar un adaptador cilíndrico, puesto que va a tener dos puntos de contacto tangentes al cilindro que van a restringir el movimiento en dirección horizontal.
- Se pueden acoplar herramientas con una sección más ancha. De esta manera no está tan limitada la superficie del adaptador, y permite hacer un conjunto más rígido.

A continuación es necesario seleccionar la forma y tamaño del adaptador. Al tratarse de un prototipo, no se selecciona ninguno existente en el mercado, y se decide fabricar uno especial que aporte todo lo necesario para la sujeción de la herramienta.

Como ya se ha comentado, la forma exterior debe ser cilíndrica, ya que es la sección que permite mayor versatilidad a la hora de encajar con la forma trapezoidal del portaherramientas, es de fácil fabricación (solo se necesita barra cilíndrica del diámetro requerido) y además permite tener más cantidad de material en una área más reducida. Como la herramienta tiene

un diámetro bastante grande, la sujeción debe tener un grueso que garantice la rigidez, pero que a la vez quepa dentro del portaherramientas.

Además, se ha elegido fijar la herramienta con unos tornillos prisioneros que quedaran enrasados y que no coincidirán con los tres tornillos de fijación del portaherramientas. Por lo tanto, será necesario hacer un planeado al cilindro que debe permitir roscar los prisioneros, y que también dará una superficie plana ideal para asentar los tornillos fijadores del portaherramientas

En la figura 38 y 39 se muestra el diseño final del soporte, tanto de la vista 3D del exterior como un corte seccional para ver la forma interior del mismo:

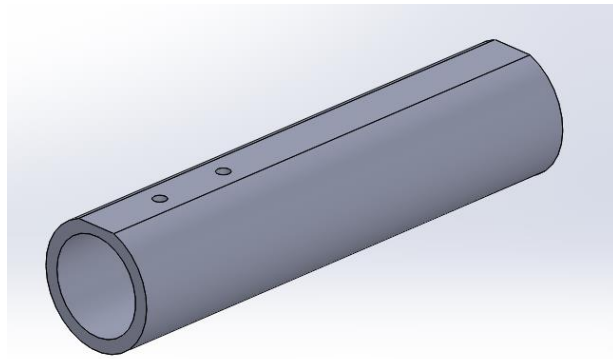


Figura 36. Exterior del adaptador

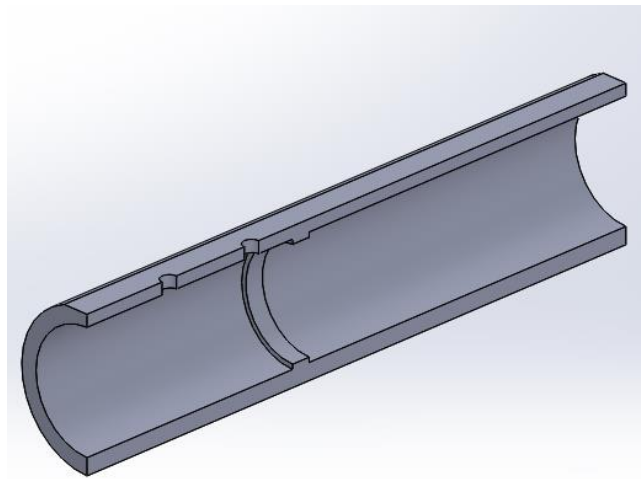


Figura 37. Vista seccional del adaptador

Como se puede ver en la figura 38, el conjunto encaja perfectamente, permitiendo el ajuste de la precarga con el agujero posterior. Además, la forma cilíndrica permite una rápida fabricación a partir de una barra estándar del diámetro requerido.

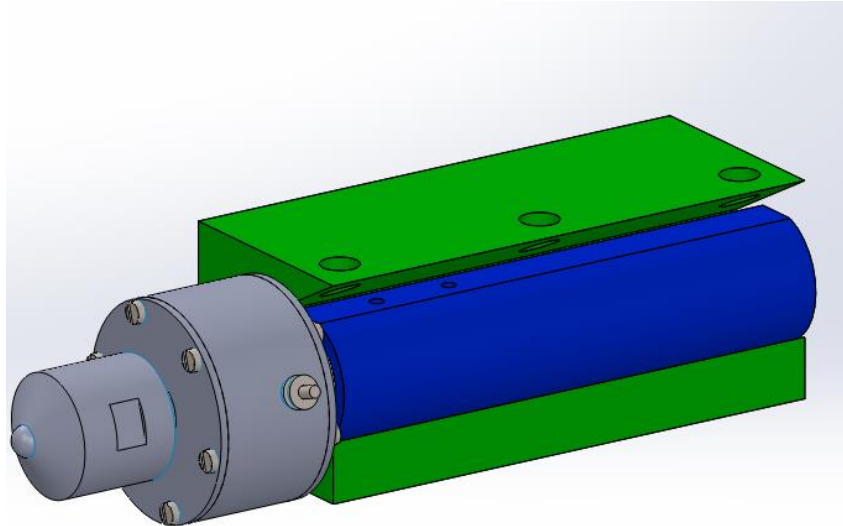


Figura 38. *Diseño en CAD del sistema de sujeción*

Como se puede ver en la figura 39, se delimita el movimiento relativo en el eje X con los puntos de contacto entre el portaherramientas y el acople. A su vez, los tornillos de fijación del portaherramientas sobre la superficie plana van a impedir el desplazamiento en Y y Z del conjunto.

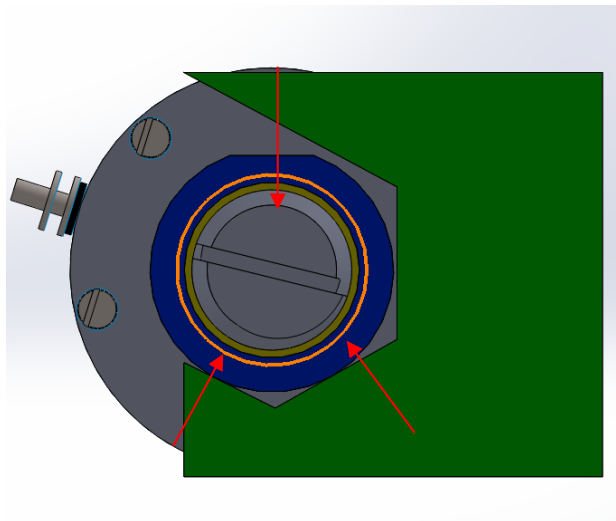


Figura 39. *Vista de la sujeción con la restricción de movimiento relativo*

En el volumen III se puede observar el plano 13 donde se especifican las medidas del adaptador, así como todos los datos necesarios para su fabricación.

Cabe destacar que el adaptador se ha ideado pensando en el utillaje utilizado en el torno que se tenía disponible. Como no deja de ser un prototipo, si se cambiara de torno (lo cual podría implicar la disposición de utillajes diferentes) se deberían hacer las adaptaciones precisas para su correcto funcionamiento.



Figura 40. *Ensamblaje del conjunto*

Una vez fabricado todo lo necesario se puede ver como la sujeción en el torno es la adecuada, permitiendo así el bruñido en piezas de revolución.

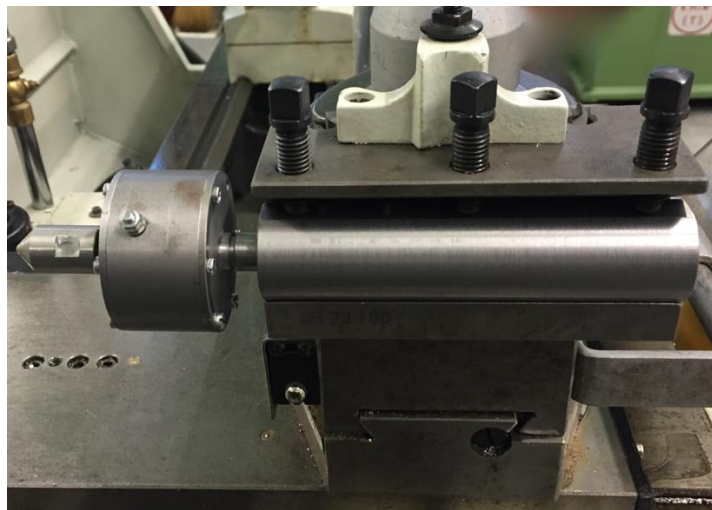


Figura 41. *Conjunto montado en el torno*

CAPÍTULO 4:

ESTUDIO

EXPERIMENTAL

4.1 Hipótesis previas

Antes de realizar los experimentos, se han planteado unas hipótesis en consonancia con la literatura consultada a lo largo de la preparación de los mismos. La idea de los experimentos no es solo confirmar las bondades del bruñido con bola, sino que también se quiere experimentar con diversos parámetros para encontrar condiciones de trabajo óptimas.

Por lo tanto se realizan las siguientes hipótesis:

- La rugosidad superficial debe disminuir tras el proceso de bruñido.
- El número de ciclos de vida a fatiga debe aumentar tras el bruñido.
- La dureza debe aumentar tras el bruñido, puesto que se produce trabajo en frío.
- El parámetro de máxima influencia en el proceso de bruñido es la fuerza, seguido del número de pasadas.
- Con la bola de diámetro 10 mm se deben obtener los mejores resultados, siendo los obtenidos con bola de 6 mm menos relevantes respecto a la rugosidad y los alcanzados con la bola de 14 mm menos significativos respecto a la dureza.

4.2 Preparación

Como ya se ha explicado, para el análisis experimental se han utilizado probetas cilíndricas con un radio de acuerdo en concreto. Estas probetas son comúnmente utilizadas para realizar ensayos de fatiga, pero se han utilizado también para medir rugosidades y HV.

En la siguiente figura se puede ver el modelo de probeta utilizado con las dimensiones más importantes (la geometría de las probetas viene determinada por la máquina de fatiga en la que se van a ensayar, véase el manual de la máquina en el anexo 5):

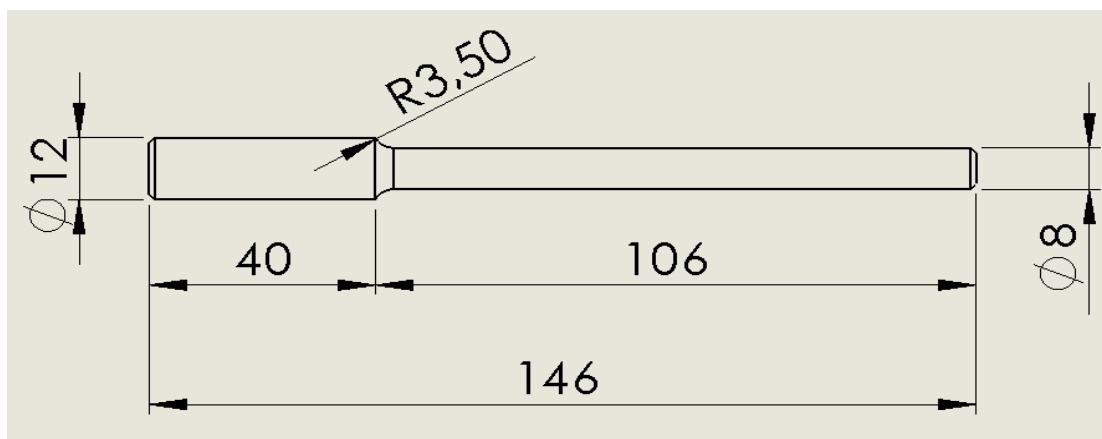


Figura 42. Dibujo acotado de la probeta a fatiga utilizada

Para obtener las probetas con las dimensiones deseadas se ha partido de una barra de diámetro 12 mm y longitud 6000 mm. A partir de este semiproducto se realizan una serie de operaciones sucesivas:

1. Cortar las barras mediante una sierra hidráulica en tramos de 150 mm. En este proceso no se tienen en cuenta acabados superficiales, pues la sierra no los puede garantizar.
2. Después, en un torno automático, se realizan varias operaciones. Primero se refrentan los dos extremos de la barra para que tengan la misma planitud. Además, se aprovechan estas operaciones para realizar un pequeño chaflán en cada extremo. De esta manera se eliminan los cantos vivos, necesario para acoplar la probeta en las diferentes máquinas que serán utilizadas posteriormente.
3. Tras el primer refrentado, se mide la probeta y se repite la operación hasta obtener la cota predeterminada. Gracias a la exactitud del torno, es posible obtener todas las probetas con una excelente precisión.
4. La última parte es usar un torno CNC, que mediante un programa concreto cilindrará la pieza hasta obtener las dimensiones finales, con el radio de acuerdo especificado.

En total se han fabricado 144 probetas, todas fabricadas siguiendo las mismas operaciones. Las probetas serán distribuidas de la siguiente forma en el estudio experimental:

- 78 probetas para el estudio de vida a fatiga.
- 13 probetas para el estudio de rugosidad (cada probeta está dividida en 4 zonas).
- 13 probetas para el estudio de dureza (cada probeta está dividida en 4 zonas).
- 40 probetas para estudios y ensayos previos que servirán para calibrar la herramienta.

La hoja de ruta tecnológica de fabricación de las probetas está disponible en el anexo 2.

4.3 Datos previos

Como preparación previa, y teniendo en cuenta que se va a realizar un estudio comparativo, se realiza una medición de los valores de rugosidad R_a y R_t obtenidas tras el mecanizado previo en todas las probetas utilizadas, además de la dureza y la obtención de una curva de vida a fatiga para probetas de este tipo sin bruñir.

A continuación se expone como se obtienen los datos de cada parámetro analizado, de manera que quedan explicadas las singularidades que puede tener cada proceso. Estos procesos de obtención de datos son los mismos, tanto antes del bruñido como una vez estén las probetas bruñidas

4.3.1 Rugosidad

Para obtener resultados de R_a y R_t fiables se van a realizar 10 mediciones en cada probeta, de las cuales se van a obtener las rugosidades medias para cada una de las zonas de las probetas. Se debe controlar el error dado que se están midiendo probetas cilíndricas.

Para hacer las mediciones de dureza se utiliza un rugosímetro de mano Mitutoyo SJ-201, como se puede ver en la siguiente figura:



Figura 43. Montaje para medir rugosidad

4.3.2 Dureza

Como se ha comentado anteriormente, la realización de un estudio comparativo requiere la obtención de una serie de datos previos al proceso experimental con los que realizar dicha comparación. Es por este motivo que se requiere la obtención de una muestra de durezas de las probetas que han sido mecanizadas, previa al proceso de bruñido. Con estos valores de referencia, se podrá realizar un estudio de la mejora que supone el bruñido para esta propiedad del acero utilizado.

Para ello, se utilizará un durómetro Buehler 5114, que proporciona valores de dureza en la escala Vickers. Este tipo de dureza se mide utilizando un indentador en forma piramidal, con el que se obtiene una huella en forma romboidal. En la siguiente figura se muestra la huella dejada por el indentador:

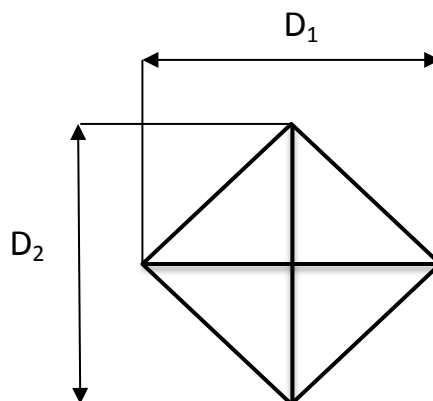


Figura 44. Huella dejada por el durómetro

La huella dejada por el indentador permite la obtención del valor de dureza del material a partir de la medición de las diagonales señaladas en la figura anterior. Utilizando la siguiente expresión se obtiene el valor de fuerza en HV:

$$HV = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d} = \frac{0,18909 \cdot P}{d} \quad (9)$$

Donde P se corresponde con la carga aplicada por el durómetro, d la diagonal media y α el valor del ángulo de la punta del indentador de diamante, que en este caso es de 136° .

En el estudio presentado se han tomado muestras utilizando una precarga de 500 gramos, aplicada durante 10 segundos sobre la probeta. Además, la dureza previa al bruñido se ha obtenido a partir de la media de 10 muestras tomadas en varias probetas antes de bruñir.

Otro factor a tener en cuenta a la hora de realizar dicho ensayo es la forma de las probetas. La medición de durezas sobre cuerpos cilíndricos requiere la posterior aplicación de un factor de corrección para obtener el valor equivalente sobre una superficie plana. El valor de dicho corrector depende de la diagonal media de la huella y del diámetro de la probeta, y pueden consultarse en la norma UNE-EN ISO 6507-1.

En la siguiente tabla se muestran las medidas de dureza obtenidas para calcular la media de éstas, que se establece como dureza del material (acero AISI 304):

Tabla 4. Muestras de dureza para el acero AISI 304

d_1 (μm)	d_2 (μm)	d (μm)	Dureza (HV)
60,80	61,65	63,24	231,8
60,88	63,91	64,43	223,4
63,11	61,63	64,40	223,5
60,03	62,41	63,24	231,9
60,89	62,73	63,83	227,5
61,24	62,80	64,05	226,0
63,00	62,64	64,86	220,4
62,12	62,54	64,36	223,8
60,93	61,72	63,34	231,1
60,45	63,22	63,86	227,4

4.3.3 Fatiga

Para ver realmente como afecta el bruñido con bola a la fatiga, se deben realizar las curvas tensión / número de ciclos (S/N). Esta curva es distinta para cada material y para cada geometría. Como se va a trabajar con

probetas idénticas se espera que todas las curvas obtenidas tengan un comportamiento similar.

Como se explica en el libro *Fatigue testing and analysis* de Yung-Li Lee et al. (2005) [29], para generar una curva S/N que nos permita ver la vida a fatiga del espécimen estudiado (y dado que se trata de un estudio preliminar) es necesario ensayar de seis a doce probetas.

Para ensayar se dispone de una máquina para ensayo a fatiga por flexión rotativa GUNT WP 140 (véase anexo 4). Esta máquina aplica una fuerza vertical sobre un punto de la probeta, al mismo tiempo que un motor hace girar la probeta de modo constante, de manera que se genera una tensión variable y constante en el tiempo, generada por el momento flector. En la siguiente figura se puede ver la máquina de fatiga.

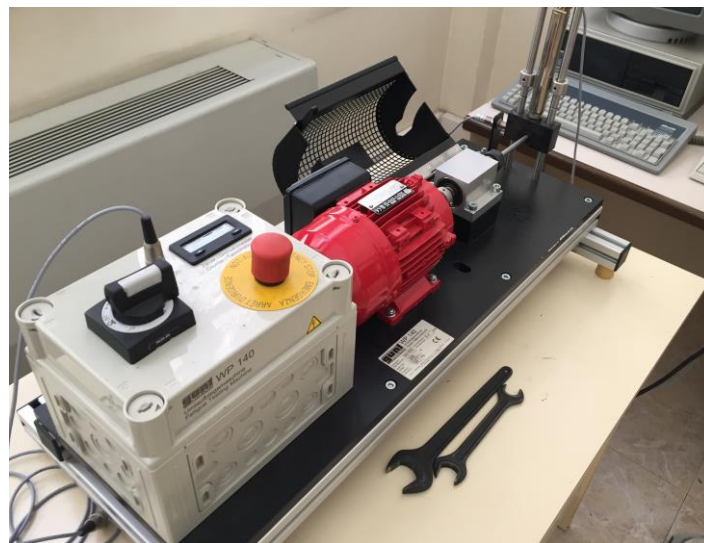


Figura 45. Máquina de fatiga por flexión rotativa GUNT WP 140

Se tiene que aclarar que aunque solo se tiene en cuenta la tensión generada por el momento flector, se admite que hay otras sollicitaciones que producen esfuerzos cortantes, pero al ser de una magnitud muy inferior y que no son determinantes a la hora de influir sobre el número de ciclos a fatiga se pueden despreciar.

Con las recomendaciones de la máquina, se establece un rango de fuerzas para ensayar de 180 N, 190 N, 200 N, 210 N, 220 N y 230 N. Se especifica el rango de los experimentos en unidades de fuerza, porque son las que se pueden regular en la máquina, mientras que para hacer el cálculo se consideran las tensiones.

Dada la geometría cilíndrica de la probeta la tensión se puede calcular como:

$$\sigma_{Mf} = \frac{32 \cdot M_f}{\pi \cdot d^3} \quad (10)$$

Donde M_f se corresponde con el momento flector y d se corresponde con el diámetro de la probeta.

Tal y como se muestra en el manual de la máquina, el punto de aplicación de la fuerza está 100,5 mm desplazado del concentrador de tensiones, y por lo tanto genera un momento flector de valor igual a la fuerza aplicada por el brazo de palanca.

La geometría de la probeta (pensada para este tipo de ensayos) provoca que el punto de rotura se ubique en el radio de acuerdo, pues en ese punto se origina un concentrador de tensiones (cambio de radio) que, como se ha explicado en el capítulo introductorio, es el punto donde la tensión es mayor. Haciendo un análisis estático preliminar con la ayuda del software "SolidWorks", se puede comprobar que, como cabía esperar, la tensión de mayor magnitud se da en el punto que se ha comentado. A partir del método de elementos finitos, y simulando las condiciones reales de experimentación, se puede hacer una aproximación a lo que va ocurrir durante el ensayo.

Se restringe el movimiento de la probeta a lo largo de la parte superior, tal como la sujeta la máquina de fatiga. La fuerza que aplica la máquina se modela como una fuerza ejercida sobre un punto de la superficie cilíndrica. Se hace un mallado lo más fino posible y se añade un control especial de mallado al radio, puesto que es el punto de mayor interés a la hora de evaluar los resultados.

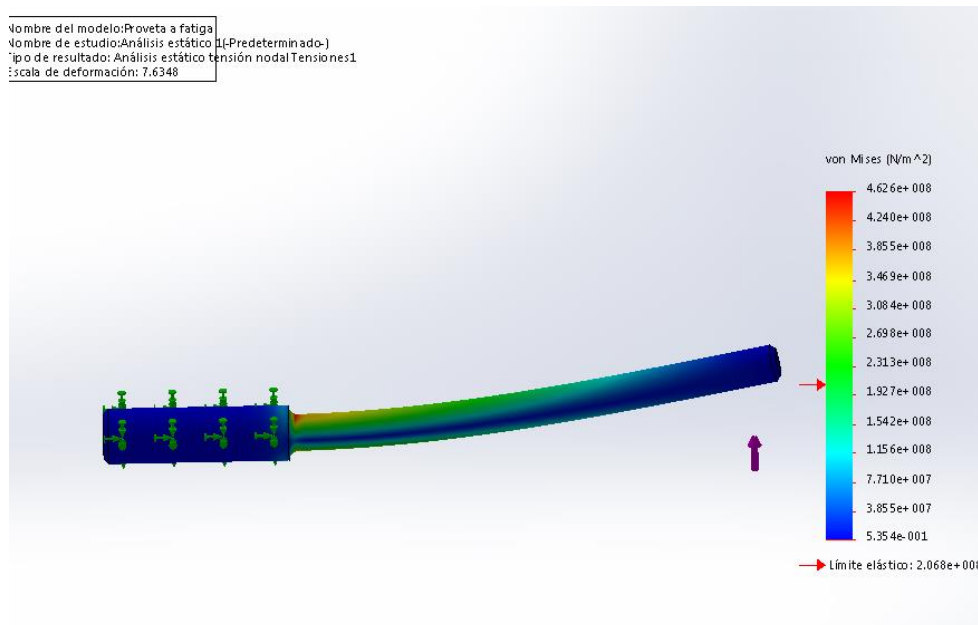


Figura 46. Tensiones en la probeta

Como se puede ver en la figura, las tensiones máximas se producen en el radio de acuerdo.

De manera complementaria se realiza un estudio simplificado del comportamiento a fatiga. Se define el material, donde se carga la curva S/N propia, y entonces se aplica una tensión de amplitud, que en este caso es de una magnitud de 200 N, y se simula el comportamiento. Los resultados

(como se puede apreciar en la siguiente figura) arrojan una vida finita de unos pocos ciclos en la zona más crítica (como ya se había anticipado) y un aumento gradual de la vida, hasta llegar a infinita en la mayoría de puntos de la probeta.

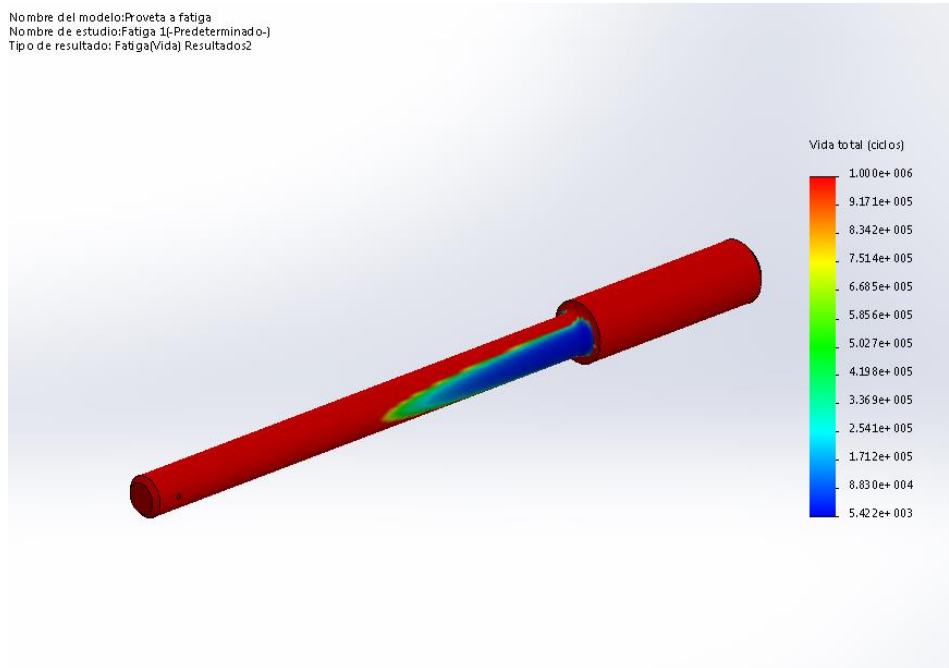


Figura 47. Simulación a fatiga

Esta simulación preliminar sirve para confirmar las hipótesis del punto crítico. A pesar de ser un tema largamente demostrado y explicado en la bibliografía científica, permite obtener una visión gráfica del fenómeno, que en ningún caso pretende sustituir el resto de procedimientos necesarios para validar los resultados obtenidos, y que pasaría por la obtención de un mallado óptimo y un número controlado de simulaciones.

Hasta este momento, los ensayos se siguen realizando con las probetas sin bruñir. Para realizar una obtención de datos más precisa, se conecta la máquina a un equipo Spider-8 para la medición de datos. De este modo se obtendrá el tiempo exacto de uso y la fuerza que se aplica sobre la probeta en tiempo real.

Se realizan las primeras mediciones para determinar la curva S/N, que servirá como primera referencia:

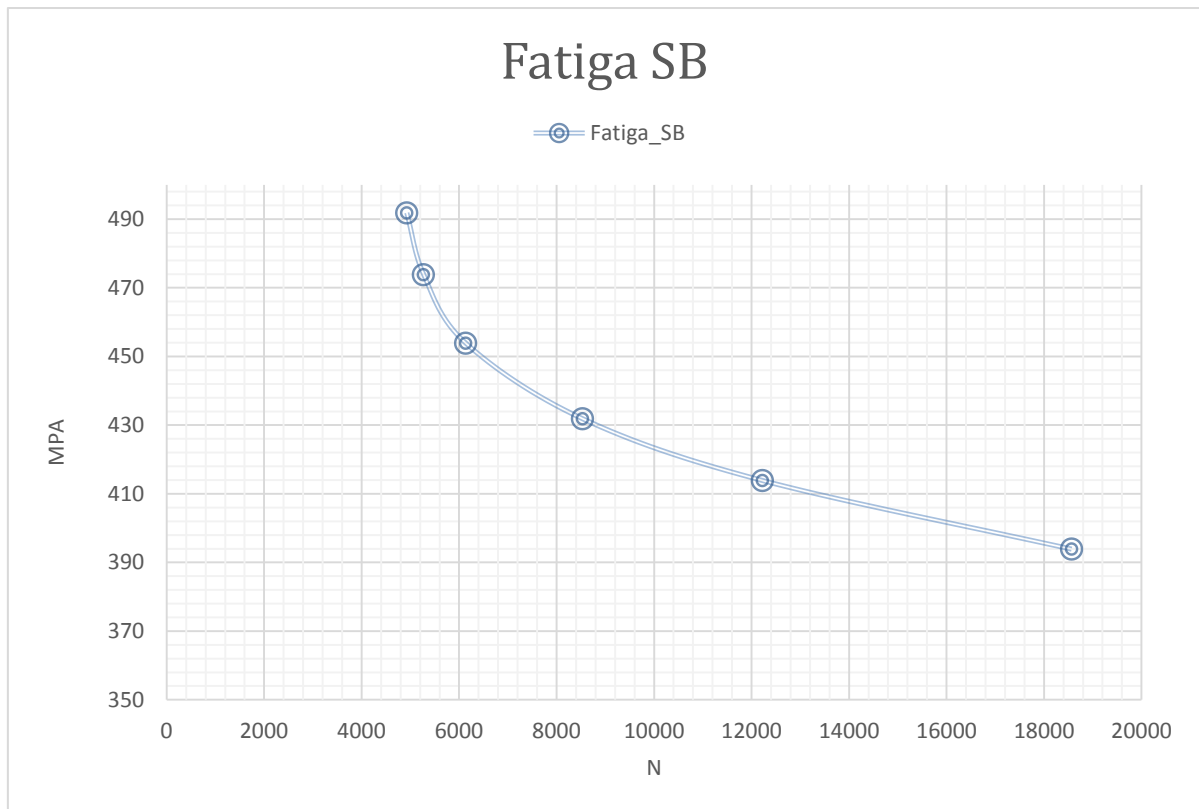


Figura 48. Curva S/N sin bruñir

El experimento se va a realizar mediante el bruñido del radio de la probeta. Se va a trabajar en un rango de valores dentro de los parámetros que se pueden controlar en el proceso de bruñido, de forma que se van a poder obtener distintas curvas que van a permitir una comparación del efecto de los distintos parámetros de bruñido sobre el resultado final.

4.4 Parámetros de experimentación

El siguiente paso es definir los parámetros de experimentación. Se diferenciará entre los ensayos destinados a estudiar fatiga y los ensayos destinados a estudiar dureza y rugosidad.

La herramienta, como ya se ha venido explicando, está preparada para su asistencia mediante vibraciones. Sin embargo, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo y equipamiento, el estudio será realizado únicamente con el método de bruñido con bola convencional, dejando una base experimental que puede ser utilizada en estudios futuros, en los que se reproduzcan los ensayos descritos, utilizando la herramienta asistida por vibraciones.

A continuación se explica de manera gráfica como se han dividido los distintos experimentos:

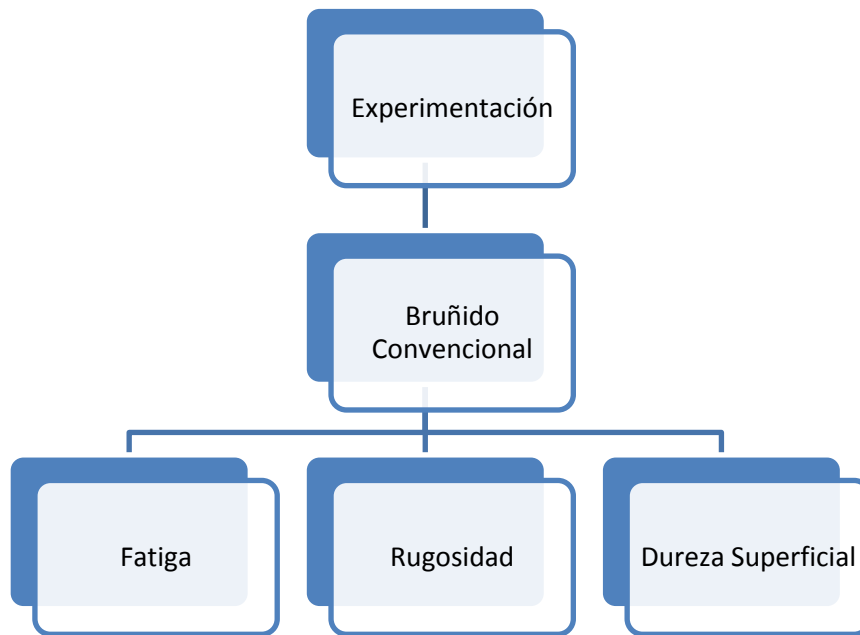


Figura 49. *División de los experimentos*

Se distinguen, en primer lugar, los parámetros o factores de control, que se ensayarán a diferentes niveles para evaluar su incidencia en las variables de respuesta. Dichos parámetros han sido identificados como relevantes en referencias bibliográficas de investigaciones pasadas, y se enumeran a continuación:

- Fuerza de bruñido [N].
- Número de pasadas [adimensional].
- Velocidad de rotación del torno [rpm].
- Avance de la herramienta [mm/rev].
- Diámetro de la bola de bruñido [mm].

Por otro lado, las variables de respuesta son aquellas magnitudes con cuyos valores se evalúa y caracteriza el resultado del proceso aplicado combinando los diferentes factores de estudio a sendos niveles. Los parámetros de respuesta escogidos son:

- Vida a fatiga: Número máximo de ciclos.
- Acabado superficial: Diferencia entre R_a y R_t final e inicial.
- Micro-dureza: Dureza HV en la superficie.

Tanto el acabado superficial como la dureza serán medidas antes y después de aplicar el bruñido, para poder determinar su influencia en el cambio de los valores de las citadas magnitudes, mientras que los resultados de fatiga se emplearán para la elaboración de curvas S-N.

Para hacer las mediciones de las variables indicadas, las probetas de estudio se distribuirán en 5 partes (figura 52). Las 4 primeras son zonas en

idénticas condiciones de acabado, sobre las que se medirá la mejora en la rugosidad superficial y el cambio de la micro-dureza de la superficie. La quinta área significativa es la zona del radio de acuerdo, que por ser concentrador de tensiones, permitirá evaluar la vida a fatiga de las probetas a fatiga en un tiempo razonable.

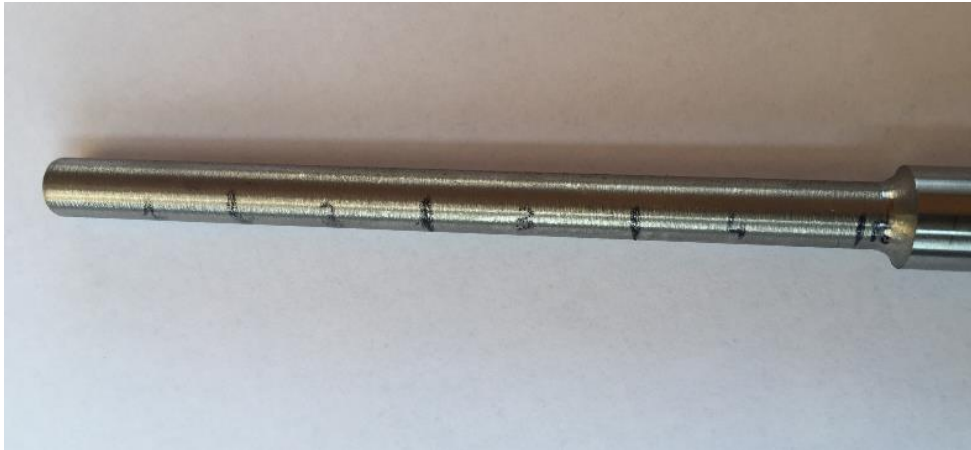


Figura 50. Foto de la probeta dividida por zonas

Vale la pena prestar especial atención al radio de acuerdo de las probetas, de 3,5 mm de radio, que impide por tanto la aplicación del bruñido con los cabezales diseñados, de diámetros considerablemente más altos. En este sentido, el único capaz de bruñir este radio de acuerdo es el de diámetro de bola de 6 mm. Esta restricción elimina la posibilidad de utilizar el diámetro de la bola como una variable de estudio en los ensayos de fatiga, tal y como se mostraba en la figura 49.

4.4.1 Diseño factorial

Para el estudio de las variables indicadas, y con el fin de combinar los diferentes niveles de los factores de estudio, se ha utilizado un diseño factorial completo de 2 niveles con 4 puntos centrales. Esta estrategia de coger sólo 2 niveles, completando la información con el estudio de puntos centrales requiere 2 repeticiones para la evaluación de cada variable. De este modo, se reduce el número final de experimentos con respecto al estudio del problema tomando 3 niveles para cada parámetro. Por otro lado, el estudio estadístico de los resultados permitirá establecer el modo de influencia de los factores en las variables de respuesta.

Para abordar el diseño del experimento, y posteriormente analizar los resultados, se utiliza el software estadístico MiniTab integrado con Microsoft Excel, lo que permite una gestión eficiente de todos los datos.

Después de diseñar la combinación de parámetros para cada corrida del experimento, la consulta bibliográfica ha permitido decidir a qué niveles se ensayarán los parámetros de control. Posteriormente, los valores provenientes de la bibliografía han sido adaptados a los recursos

disponibles, y a las características reales del torno empleado para la ejecución de los experimentos.

A continuación se exponen los valores de los parámetros:

- Ensayos de rugosidad y dureza:

Tabla 5. *Parámetros ensayados de rugosidad y dureza*

	Min	Central	Max
Fuerza (N)	80	95	115
Núm. Pasadas	1	4	7
Velocidad de rotación (rpm)	385	770	1170
Avance (mm/rev)	0,05	0,13	0,22
Diámetro de bola	4	10	14

Este ensayo tiene el objetivo ver cómo afectan los distintos parámetros de bruñido a la rugosidad y a la dureza superficial. Por lo tanto, los parámetros de salida van a ser R_a , R_t y HV. Con estos indicadores se busca el mayor descenso de rugosidad y la dureza máxima.

El diseño de experimento se puede encontrar en el anexo 5

- Ensayo vida a fatiga:

En este caso, se bruñe únicamente el radio de la probeta, sin desplazamiento longitudinal de la herramienta. Por lo tanto, el parámetro de número de pasadas se controla a través del tiempo de aplicación del bruñido, como se muestra en las siguientes expresiones:

$$N_p = n \cdot t \quad (11)$$

$$n = \frac{P_p}{n} \quad (12)$$

Donde N_p se corresponde con el número de pasadas n con la velocidad de rotación del torno y t con el tiempo de bruñido.

En este caso se mantiene la velocidad de rotación constante y se decide trabajar con la velocidad más baja posible, con lo que se consigue controlar mejor el tiempo de bruñido.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros utilizados para el experimento de fatiga:

Tabla 6. *Parámetros de los ensayos de vida a fatiga*

	Min	Central	Max
Fuerza (N)	80	95	115
Núm. Pasadas	1,5	5	9
Velocidad de rotación (rpm)	45	45	45

La siguiente tabla expone la relación entre el número de pasadas y el tiempo siguiendo la relación ya explicada, e incluyendo una corrección con respecto a los puntos iniciales para mejorar la precisión.

Tabla 7. *Corrección de parámetros*

n= 45 rpm			
Número de pasadas	Tiempo (s)	Tiempo real (s)	Número de pasadas real
1	1,33	1,5	1,125
4	5,33	5	3,75
7	9,33	9	6,75

El diseño de experimento es el siguiente:

Tabla 8. *Diseño del experimento a fatiga*

Factorial		Real		Consigna
F (N)	NP	F (N)	NP	
0	0	95	4	I
0	0	95	4	B
1	1	80	7	C
1	-1	80	1	D
0	0	95	4	E
-1	1	115	7	F
1	-1	80	1	G
-1	-1	115	1	H
1	1	80	7	A
-1	1	115	7	J
-1	-1	115	1	K
0	0	95	4	L

La consigna identifica el grupo de 6 probetas que constituyen una gráfica S/N, es decir, que han sido bruñidas utilizando los mismos parámetros.

Agrupando las consignas entre las que tienen las mismas condiciones permitirá obtener la totalidad de curvas S/N.

Para bruñir el radio de la probeta, es necesario girar sobre si mismo el carro del torno, este contiene una goniómetro que permite saber con exactitud los grados que se han girado desde su posición inicial. Es un valor a tener en cuenta pues se tendrán que aplicar la corrección al avance de la herramienta para incidir con la fuerza requerida. Como se puede ver a continuación:

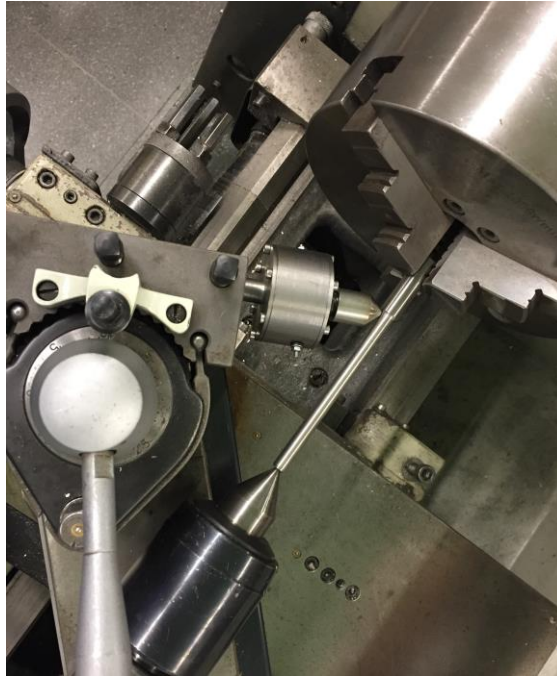


Figura 51. *Bruñido sobre el radio de acuerdo*

4.5 Análisis de los resultados

4.5.1 Acabado superficial

Una vez bruñidas las probetas se procede a analizar los resultados. Lo primero es medir las rugosidades en cada zona bruñida. El objetivo es medir R_a y R_t para obtener un valor final en cada condición y, de este modo, utilizando el análisis del diseño factorial descrito, se determinará de qué manera contribuyen los parámetros a la disminución de dichos valores.

Las figuras 54 y 55 permiten hacer una aproximación previa al cambio de la rugosidad superficial tras bruñir, para luego pasar a un análisis más formal. Como puede verse, tanto la R_a como la R_t disminuyen notablemente tras el bruñido con bola. Como puede verse, no todas las probetas ensayadas presentaban los mismos valores de rugosidad iniciales, por lo que se ha considera importante considerar también este valor para valorar la mejora en la superficie, y no el valor absoluto de la rugosidad final. A la vista de esta figura, una mayor distancia entre puntos alineados de la curva desvela una mayor efectividad del bruñido bajo esas condiciones en lo que a rugosidad final se refiere.

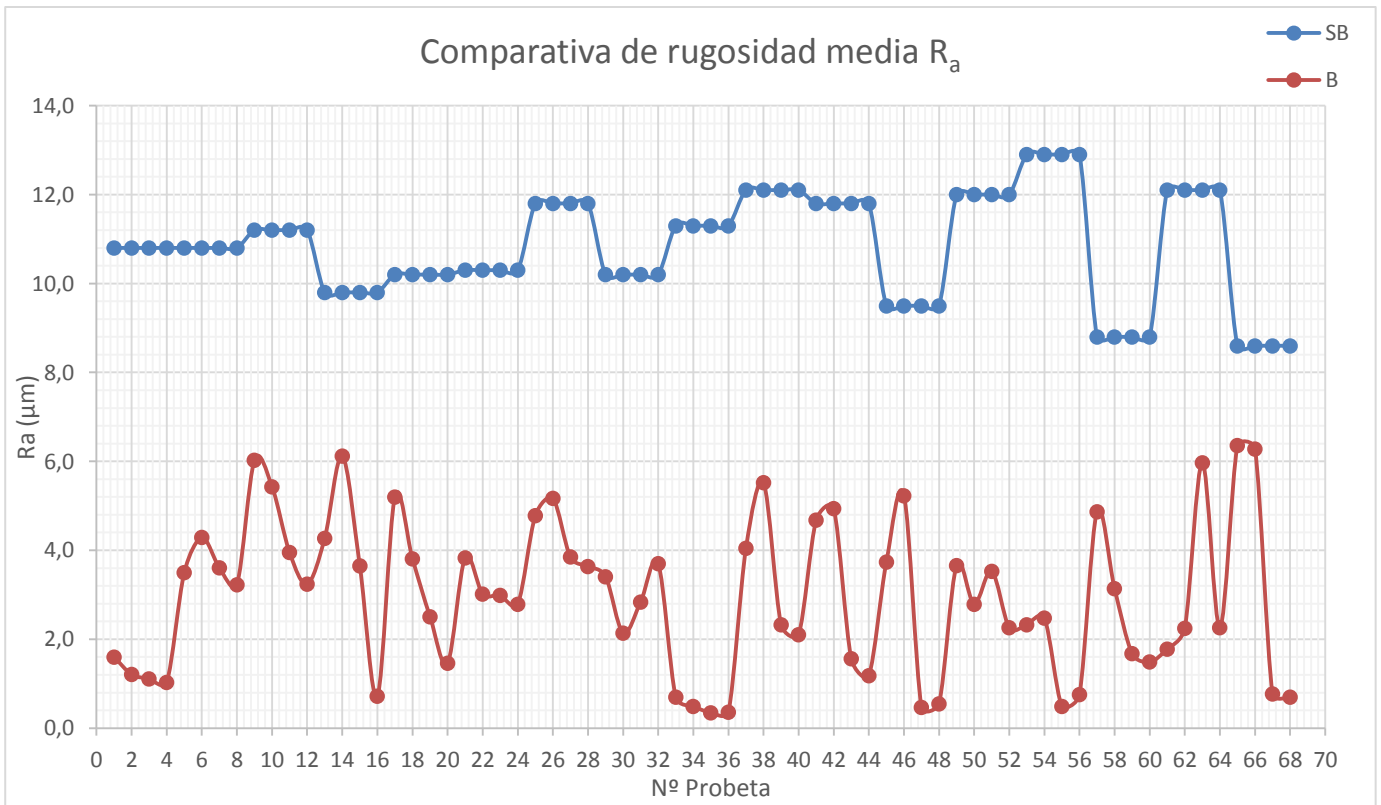


Figura 53. Comparativa R_a sin bruñir (SB) y tras bruñir (B)

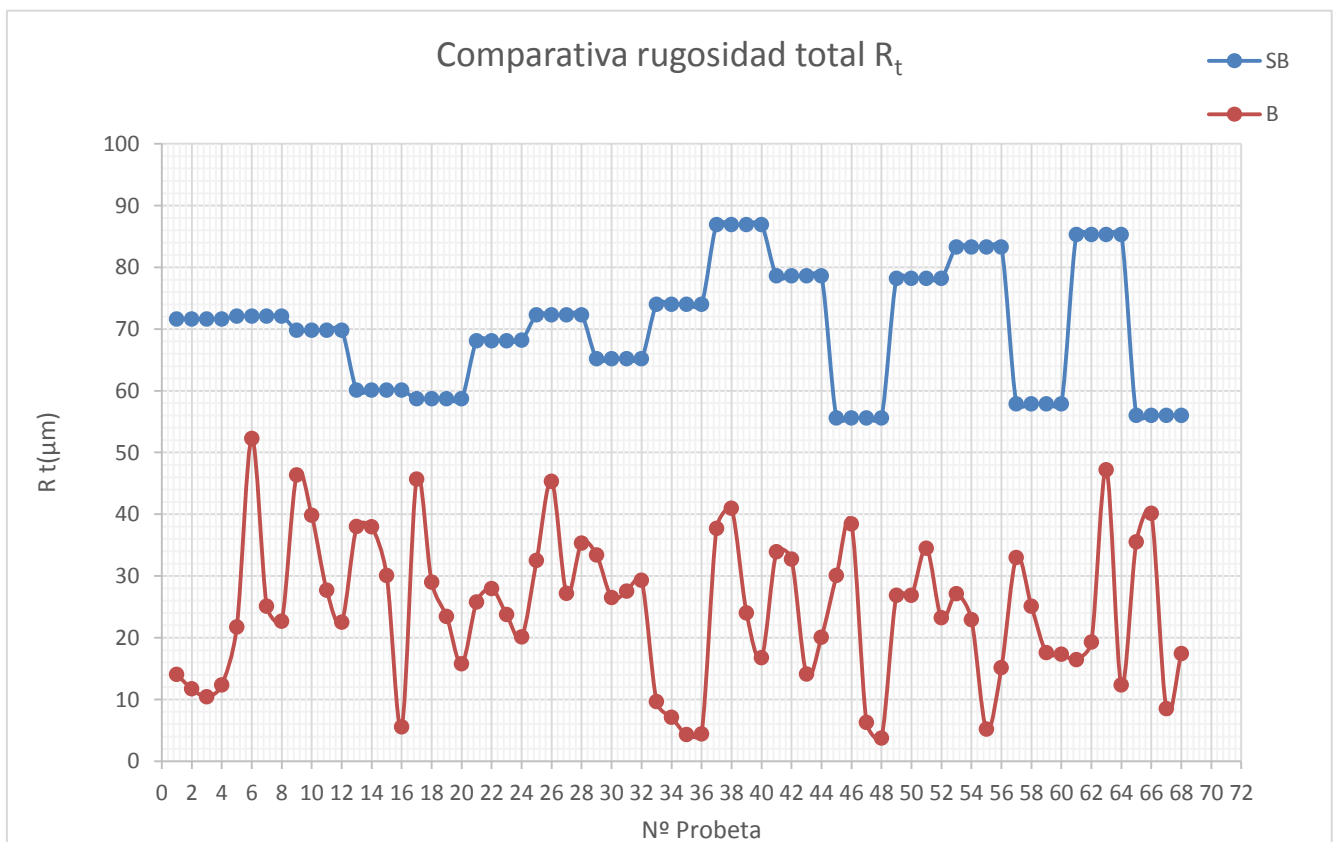


Figura 52. Comparativa R_t sin bruñir (SB) v tras bruñir (B)

También es interesante ver qué porcentaje representa esta mejora. En la siguiente figura se puede apreciar el porcentaje de mejora de la calidad superficial (tanto R_a como R_t) que ha sufrido cada zona después del bruñido.

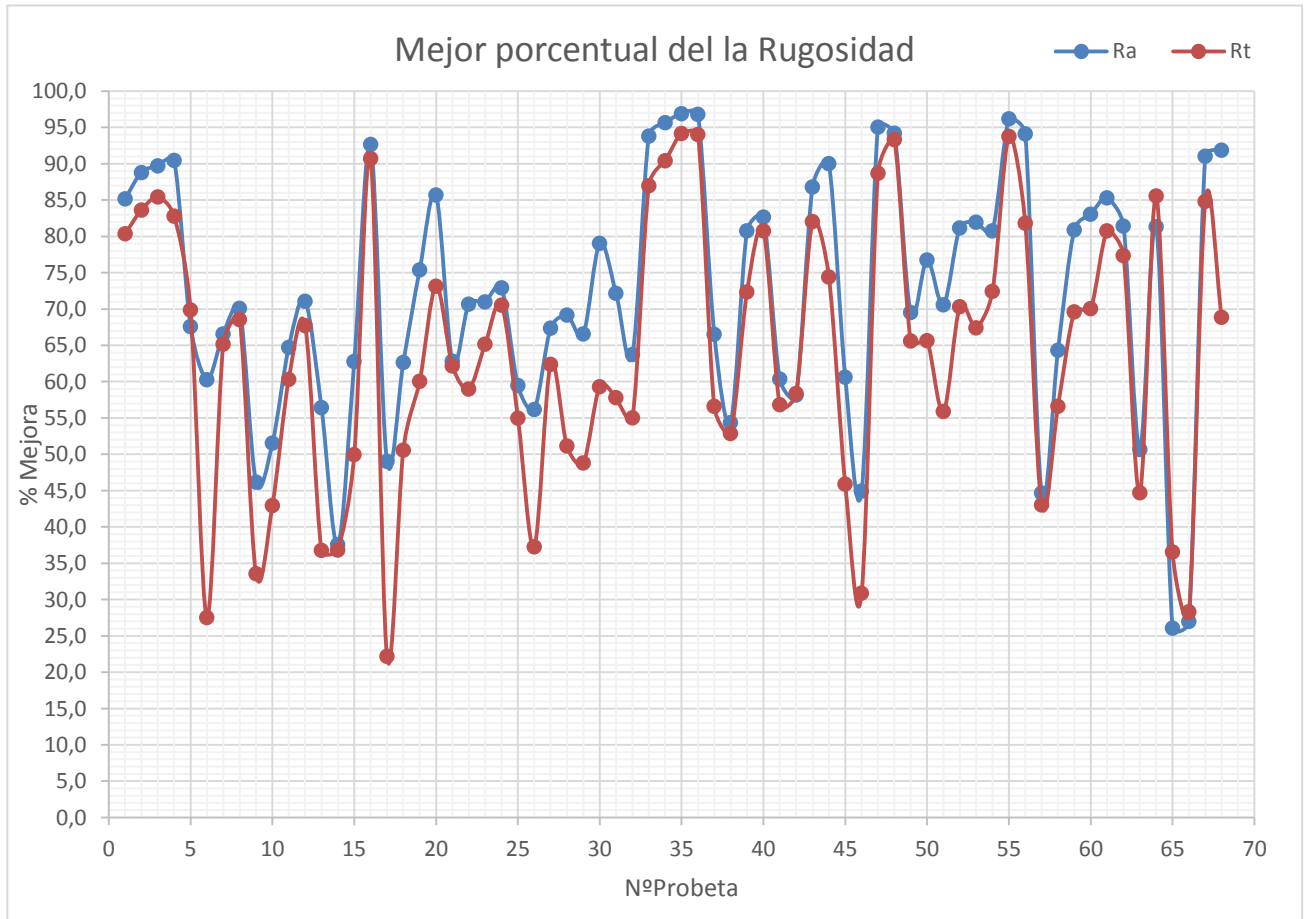


Figura 54. Porcentaje de mejora del acabado superficial

Como se puede ver en el gráfico anterior, R_a y R_t son bastante similares en cuanto a mejora respecto al valor inicial. El máximo de mejora que se ha conseguido ha sido del 96,9% en el mejor punto de R_a y del 94,2% en el caso de la R_t , mientras que se obtenido un 26,0% en el peor punto de R_a y un 22,2 en R_t .

Analizando los resultados se observa que hay una gran diferencia entre los mejores y los peores resultados, confirmando la importancia de escoger los mejores parámetros de operación. No obstante, la media de mejora es del 72,8% para la R_a y de un 64,6% para la R_t , que es elevada en comparación con los puntos mínimos, lo que confirma que en general el proceso es muy favorable a la mejora de la calidad superficial, siendo mínimos los parámetros que ejercen un efecto menos favorable.

Para poner en contexto estos porcentajes de mejora, el mínimo valor de R_a obtenida tras el bruñido es de $0,4 \mu\text{m}$. Esto es una rugosidad N5 propia de un proceso de superacabado o rectificado, lo que justifica que las piezas bruñidas sean aptas para ser utilizadas en situaciones en las que se requieran altas sollicitaciones o que se empleen para regímenes de trabajo exigentes.

El siguiente paso es validar el modelo del experimento planteado (anexo 5) Para ello, se utilizan diagramas de Pareto, que arrojan conclusiones acerca de la significación de cada una de las variables analizadas, y su relación con el resto. En su conjunto, estos gráficos permiten distinguir con claridad aquellos parámetros que han sido relevantes para los resultados, y en qué medida y orden de importancia.

Cabe recordar que el parámetro analizado no es directamente el valor obtenido de rugosidad una vez procesada la probeta, sino que se mide la diferencia entre el valor inicial y el valor final de dicho acabado superficial. Este es el modo más preciso para cuantificar el efecto del bruñido, ya que producto de las variaciones que hayan podido introducirse en la manipulación y mecanizado de las probetas, no todas cuentan con la misma rugosidad antes de ser bruñidas.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Pareto para el diferencial de R_a , en el que se pueden apreciar los parámetros que han tenido influencia en el resultado final:

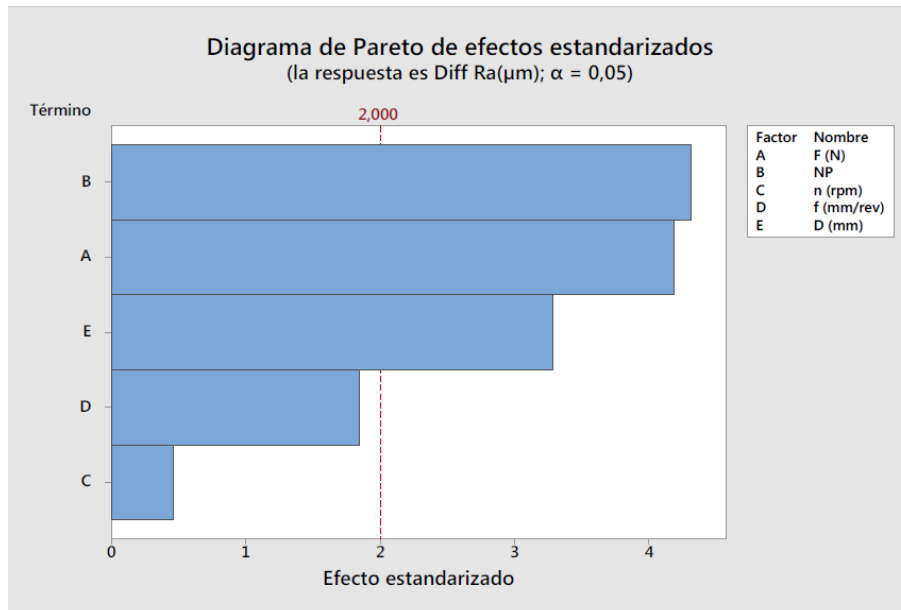


Figura 55. Pareto de efectos estandarizados

Como se puede ver en la figura anterior los parámetros que tienen mayor relevancia son, en orden descendente, el número de pasadas, la fuerza de bruñido y el diámetro de la bola, siendo la velocidad de rotación y el avance no influyentes estadísticamente en el resultado final.

Es un resultado que difiere un poco de lo esperado, ya que en la mayoría de la bibliografía consultada, la fuerza de bruñido es, al parecer, la variable más influyente. Una explicación a este fenómeno podría estar fundamentada en el rango de fuerzas utilizado (de 90 N a 115 N). Posiblemente, ampliando los extremos de fuerza empleados, se apreciaría una mayor influencia de este factor en el resultado final.

En cuanto al avance, cabía esperar evidencia estadística de su influencia efectiva sobre la rugosidad final. Sin embargo, aunque está en el límite, no ha resultado significativo. Esto podría deberse a que con los diámetros de bola usados las pasadas sucesivas se superponen, anulando los efectos de este otro parámetro en estudio. Dicho de otra manera, los picos del perfil a los que podría dar lugar un avance demasiado rápido no están presentes porque se emplean avances suficientemente lentos como para contrarrestar el efecto de la bola.

Para ratificar la validez del modelo, se comprueba la hipótesis de normalidad de los residuos, esto es, la diferencia entre los valores medidos en los experimentos y sus correspondientes teóricos que resultan del modelo final. Para ello, se realiza una prueba de normalidad de Saphiro.- adaptada (figura 56). Como puede verse, el p-valor deducido de la prueba es mayor a un nivel de significación impuesto de 0,05, por lo que se acepta la hipótesis nula de normalidad de residuos a falta de prueba estadística que permita rechazarla.

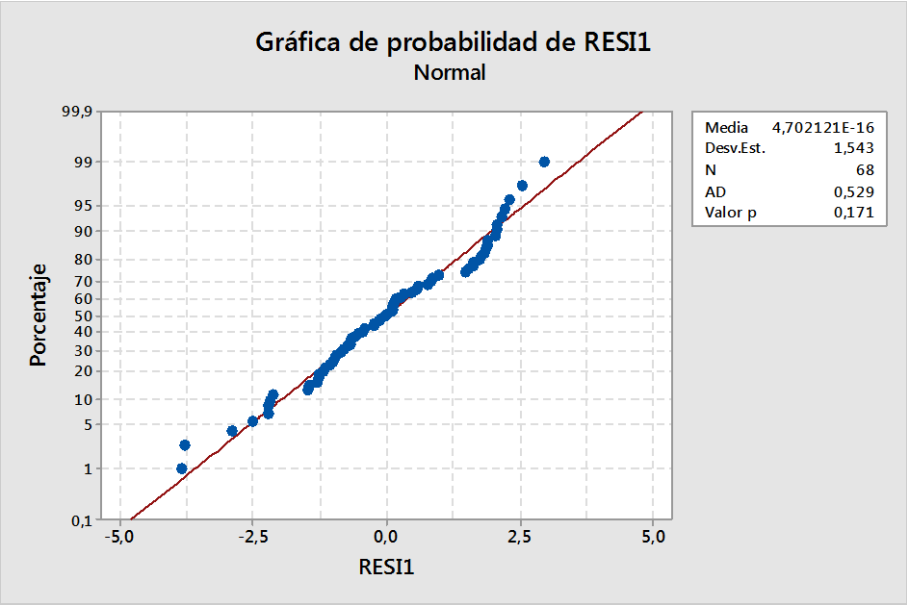


Figura 56. Prueba de normalidad

Es también importante ver cómo afectan las interacciones entre distintos parámetros, es decir, cómo puede el cambio de un nivel a otro de un parámetro cambiar la manera en la que influye el cambio de nivel en otro cualquiera. En este caso, se han verificado las interacciones de segundo orden, como se representa en la figura 57. Así, la única interacción significativa es entre los factores A y C, es decir, entre la fuerza de bruñido y la velocidad de rotación.

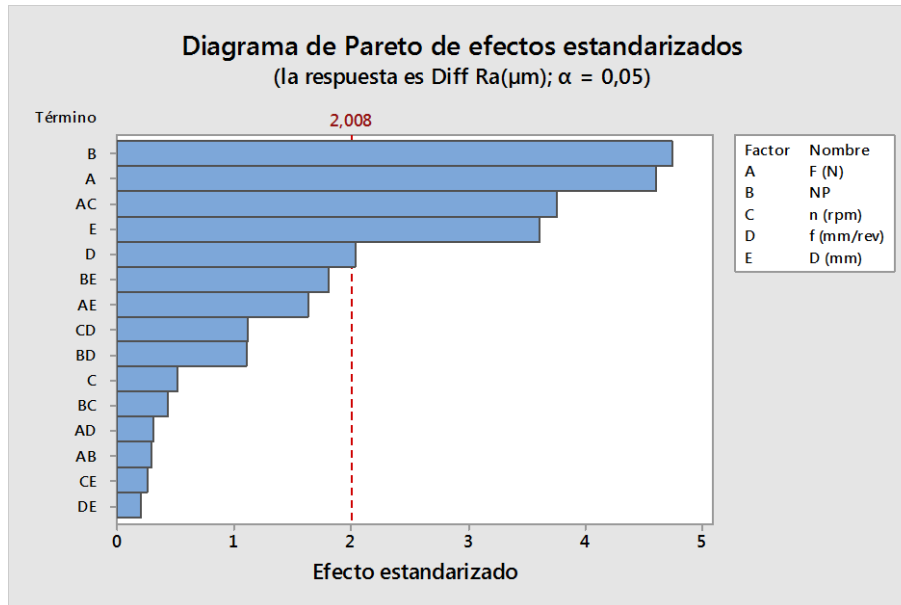


Figura 57. *Combinación de efectos*

Para ver cómo se produce la interacción, se representa en una gráfica individual (figura 58), donde se puede apreciar que a una velocidad de rotación de 385 rpm, un aumento de fuerza tiene efecto despreciable sobre la respuesta. Sin embargo, al aumentar la velocidad de rotación, los efectos de la fuerza se incrementan.

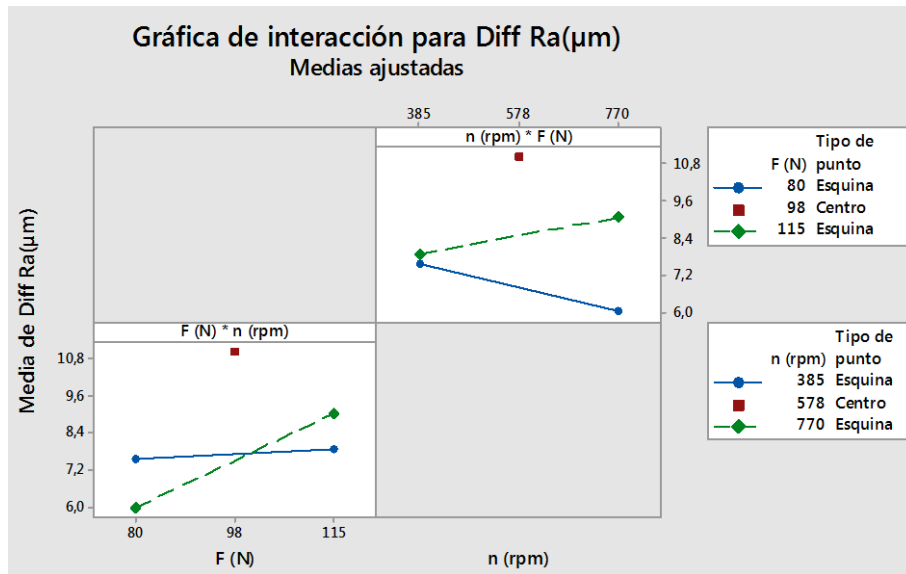


Figura 58. Interacción entre n y F

Por último, se representan las gráficas de efectos principales, donde se definen los parámetros óptimos de operación. En el caso de los 3 factores relevantes en el proceso, el punto central de todos ellos resulta ser el más influyente.

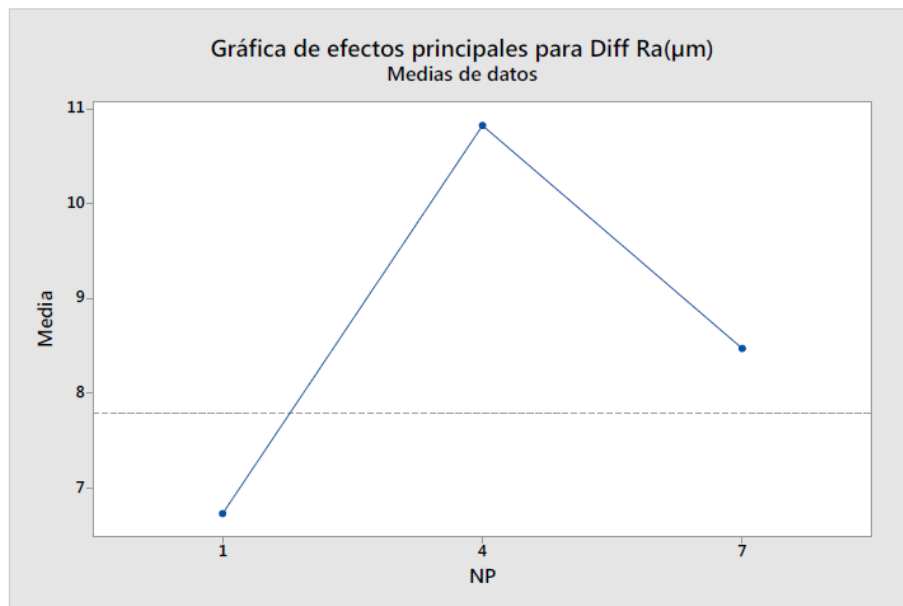


Figura 59. Efectos principales según número de pasadas

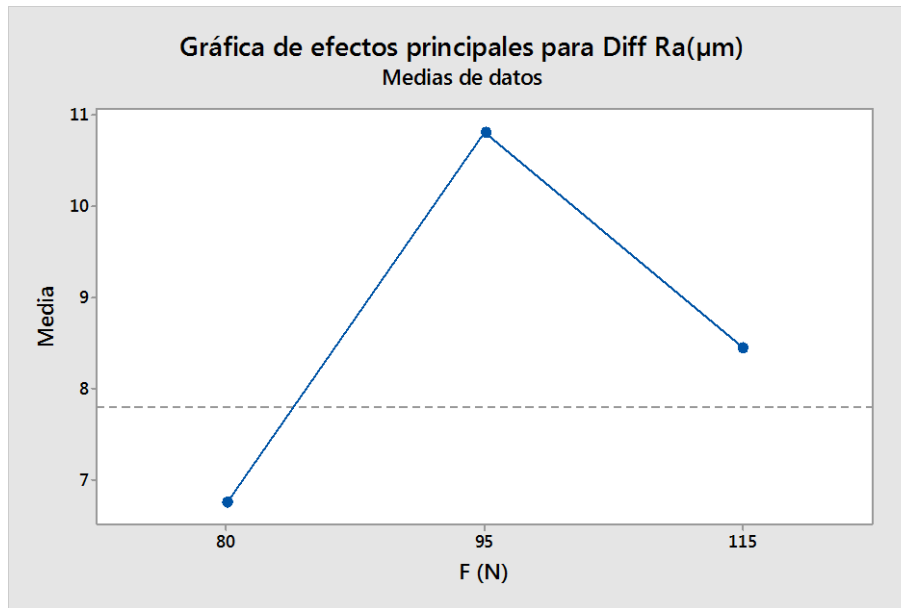


Figura 60. Efectos principales según fuerza de bruñido

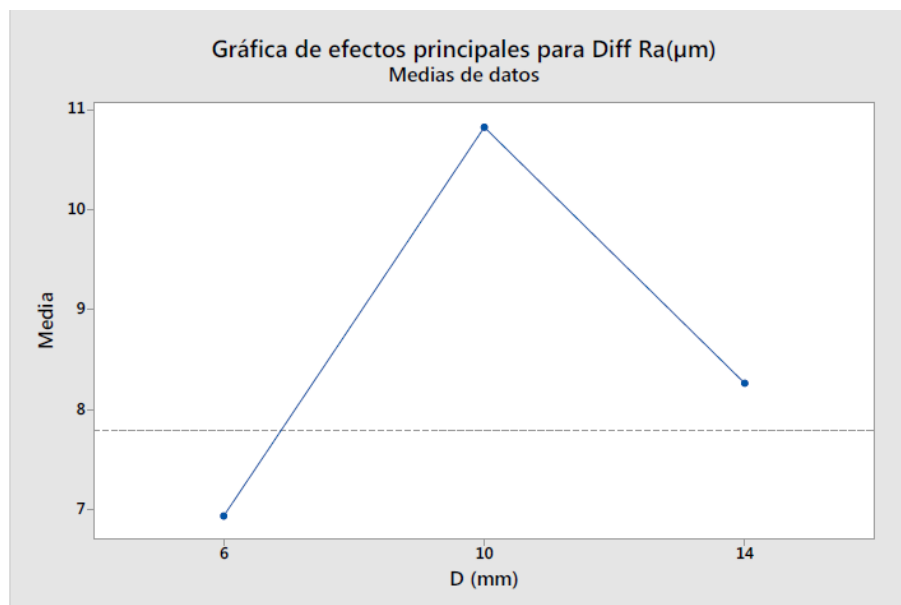


Figura 61. Efectos principales según diámetro de la bola

Como se ha podido ver en las figuras anteriores, siempre se obtiene mejor resultado en el punto central, lo cual tiene una explicación muy clara. Cuando se seleccionaron los distintos parámetros para trabajar se buscó que se pudiera observar no solo las mejoras del proceso de bruñido, sino que también fuera posible ver como el proceso puede empeorar bajo ciertas condiciones. Por bibliografía consultada, se sabía que esas condiciones en el caso de R_a se daban en el límite superior, es decir, en el mayor número de pasadas, mayor fuerza y mayor diámetro de bola. Esto quiere decir que el bruñido mejora la R_a hasta su máximo en el punto central y que a partir de allí empieza a empeorar a un ritmo más lento, cosa que propicia resultados más buenos que los obtenidos en el límite inferior.

Como se puede observar, los parámetros óptimos para obtener mejor R_a después del proceso de bruñido con bola en el torno son los siguientes:

- Diámetro de la bola: 10 mm
- Fuerza de bruñido: 90 N
- Número de pasadas: 4

La rugosidad total R_t tiene un comportamiento similar a la R_a . Sin embargo, como se ha explicado, es un parámetro que acumula muchísimo error (entre 10 i 20%) en su medida, dado que es muy fácil que se produzcan zonas concretas con valores de R_t muy desviados con respecto a la media real de toda la probeta. A continuación se muestra el modelo para dicho parámetro de rugosidad:

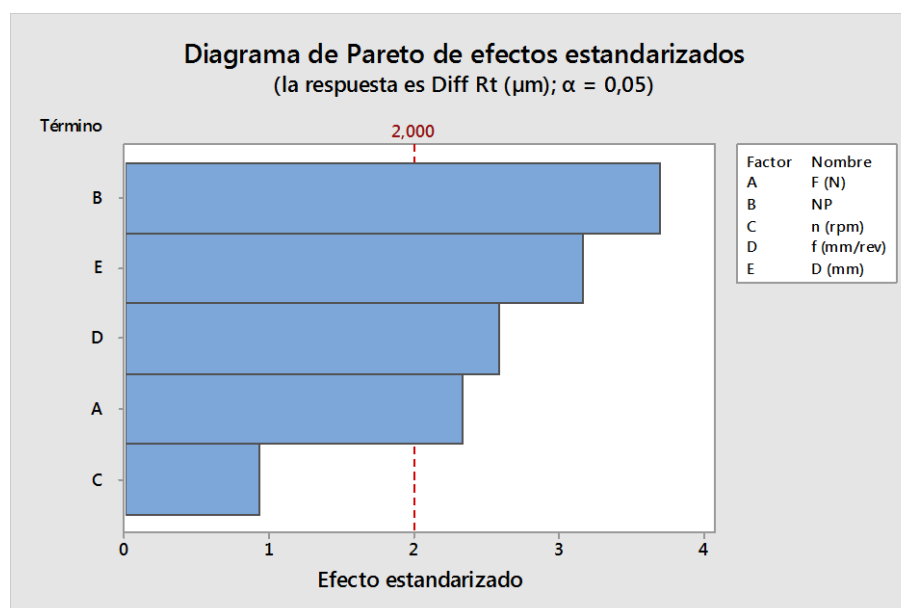


Figura 62. Pareto efectos estandarizados Diff R_t

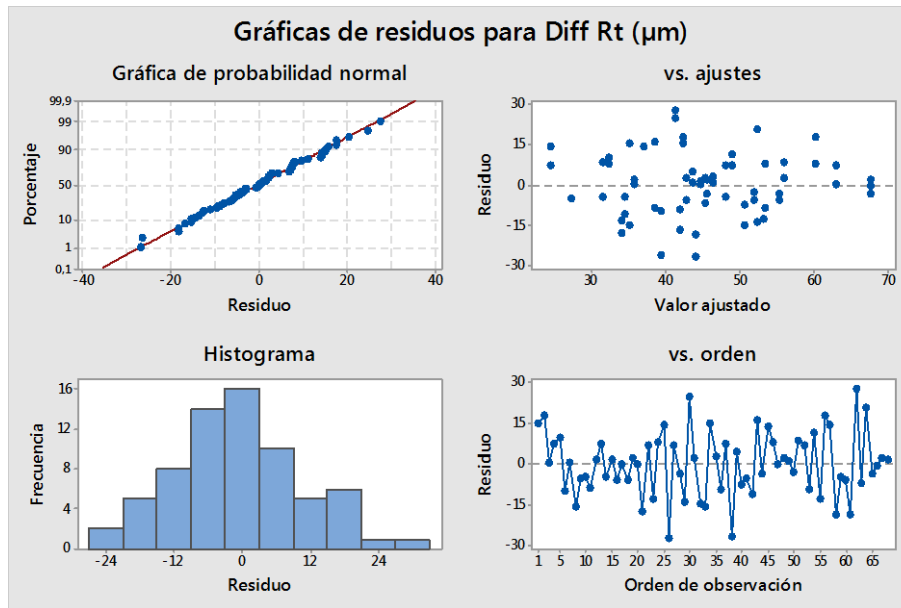


Figura 63. *Gráfica de residuos*

En la anterior gráfica se puede ver como los residuos tienen un histograma que sigue una distribución muy aproximada a la normal, por lo tanto se da el modelo por válido.

Como se puede ver en este caso, el efecto de los parámetros varía con respecto a la R_a pero, en cualquier caso, es posible apreciar una mejoría con en relación a las R_t de partida, lo cual se ha comentado en la figura 55 de comparativa R_t para antes y después del bruñido.

Como consideración final respecto a R_t es un parámetro difícil de controlar después del bruñido, puesto que (sobre todo trabajando con bolas de menor diámetro) es relativamente fácil que se atasque la bola sobre la superficie cilíndrica por unas décimas de segundo y, a pesar de no tener efecto sobre la R_a , puede inducir a medidas de R_t muy elevadas que no corresponden en cualquier caso con la media de toda la zona. Es por esto que se debe tener mucha cura a la hora de hacer mediciones de R_t y si es preciso aumentar el número total de muestras que se toman.

A continuación se puede ver un ejemplo de la diferencia antes y después de bruñir en una probeta:

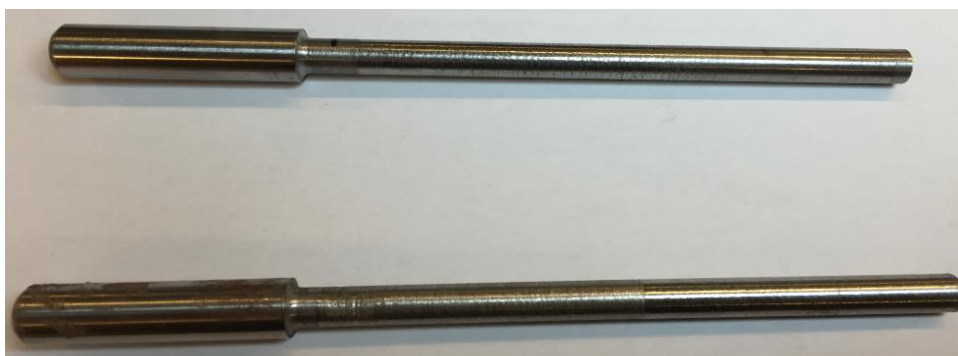


Figura 64. *Diferencia antes y después del bruñido*

4.5.2 Dureza

Para la comprobación de la dureza, se ha realizado un estudio similar al ya descrito para el caso de la rugosidad. El primer paso es la representación de los valores de dureza obtenidos sobre las distintas zonas de las probetas analizadas. Como ya se ha comentado anteriormente, para obtener un resultado fiable se han realizado un total de diez medidas en cada una de las zonas y se ha obtenido el valor medio en cada una de ellas.

En la siguiente gráfica se muestra los valores de dureza obtenidos tras el proceso de bruñido, una vez aplicado el factor de corrección para probetas cilíndricas, como se ha comentado en el apartado de datos previos para la dureza:

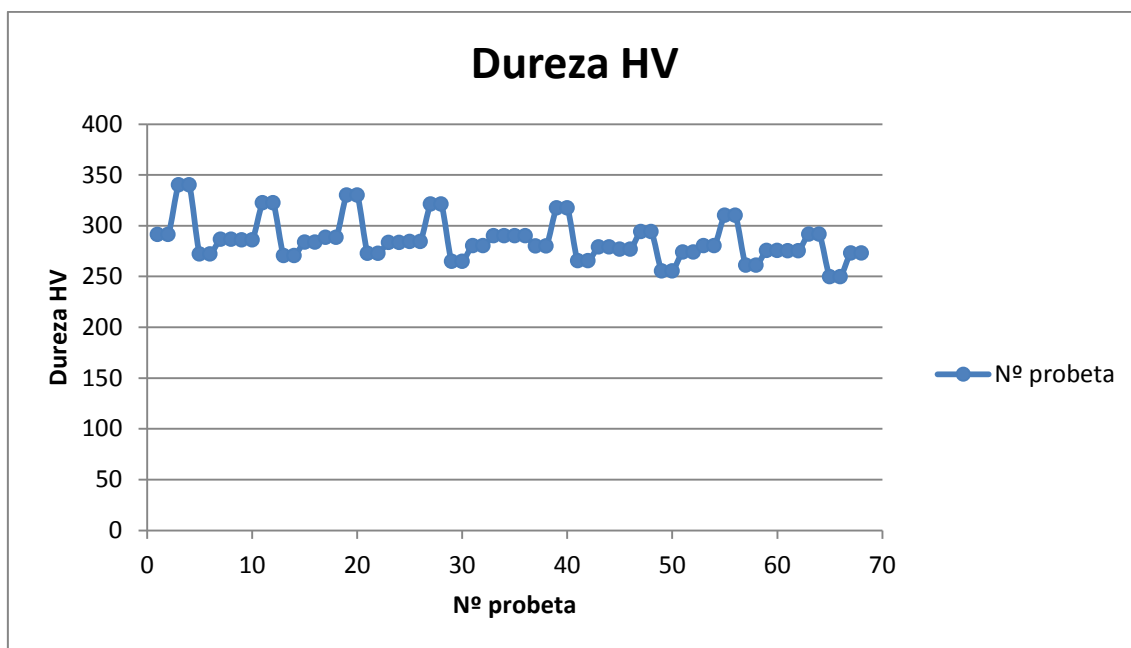


Figura 65. Gráfica de valores de dureza HV

Como se puede observar en la gráfica anterior, todas las mediciones realizadas mejoran los resultados de dureza media obtenidos previamente al bruñido, adoptando valores que difieren entre ellos en dependencia de las características del proceso. A la vista de estos resultados es posible afirmar que el proceso de bruñido con bola es apto para el bruñido de geometrías cilíndricas.

A continuación se analiza el comportamiento de los parámetros utilizados, para observar qué efecto tienen sobre el resultado final:

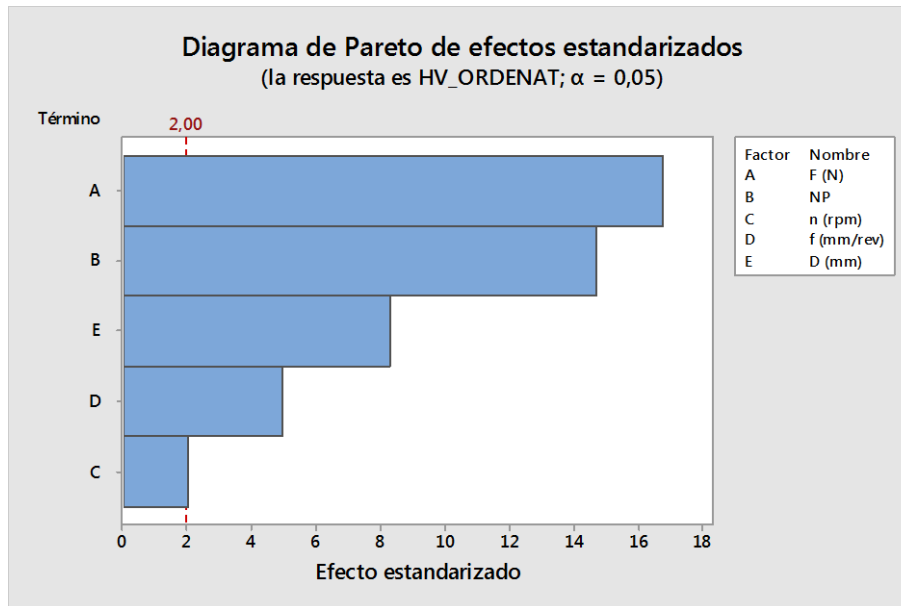


Figura 66. Pareto de efectos estandarizados

Como se puede ver, todos los parámetros afectan al resultado final, aunque la velocidad de rotación se encuentra en el límite de relevancia. Para comprobar la verdadera influencia de este parámetro, se presenta una nueva gráfica de efectos estandarizados en la que se corrobora que la velocidad de rotación no es significativa para este experimento.

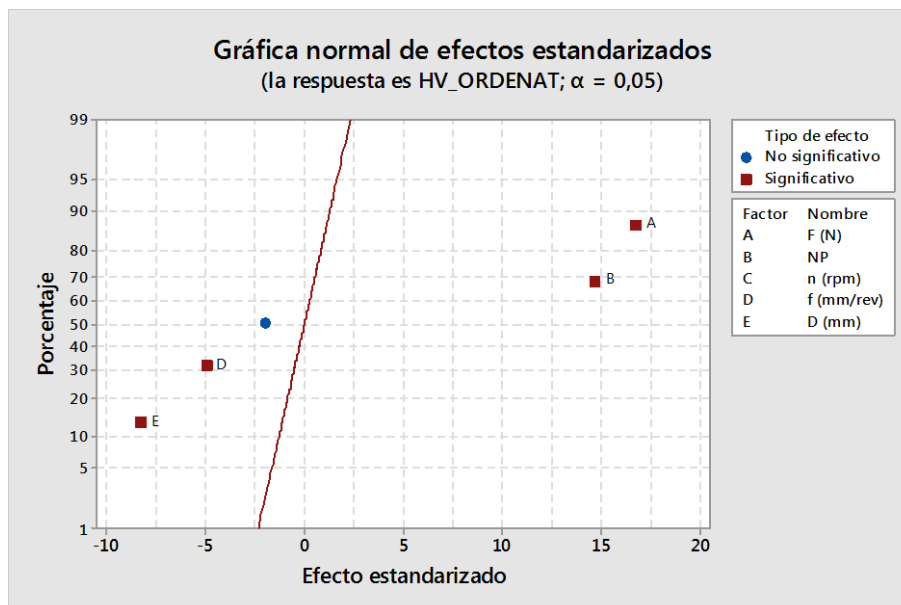


Figura 67. Gráfica normal de efectos estandarizados para HV

Para comprobar la validez del modelo se hace una revisión de los residuos (tal y como se ha hecho en el apartado de rugosidad). Dada que el histograma (figura 68) presenta una forma un tanto alejada de la distribución normal que debería seguir, se procede con una prueba de normalidad (figura 69) Como el p-valor es mayor al nivel de significación

impuesto, se considera el modelo válido, tal como se ha considerado en el apartado 4.5.1.

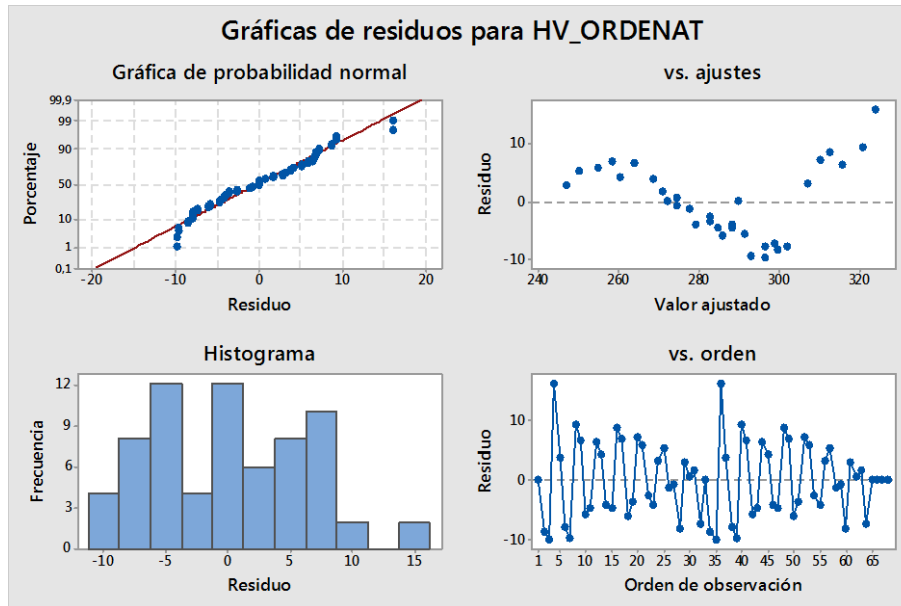


Figura 68. Gráficas de residuos

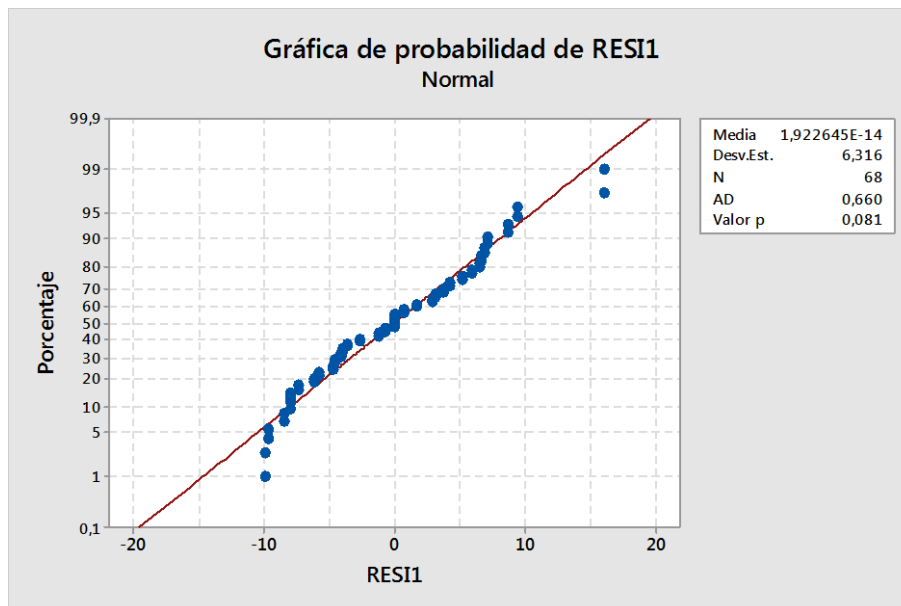


Figura 69. Prueba de normalidad en el residuo de HV

Era de esperar que los parámetros significativos fueran la fuerza, el número de pasadas, el avance y el diámetro de la bola, ya que el incremento de dureza va relacionado con la cantidad de trabajo en frío que se realiza en la probeta, es decir, es directamente dependiente de la fuerza y el tiempo que se actúa sobre la superficie, mientras que es inversamente proporcional al tamaño de la huella que deja la bola. A continuación se puede observar

como el valor de los parámetros afecta al resultado final, a la vez que es posible determinar cuáles son los parámetros óptimos:

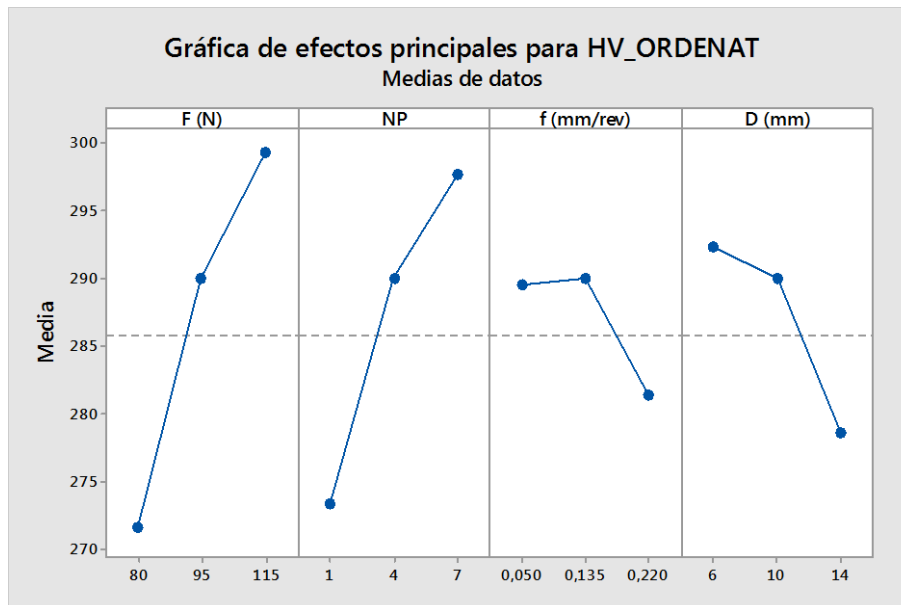


Figura 70. Gráfica de efectos principales para HV

Como se puede apreciar en la figura anterior, hay disparidad de comportamientos entre factores, por lo tanto se van a analizar uno a uno:

- Fuerza (F): A mayor fuerza se produce un trabajo en frío de mayor magnitud y, consecuentemente, aumenta el valor de dureza.
- Número de pasadas (NP): Un mayor número de pasadas implica más tiempo de actuación de la herramienta sobre la probeta y, por lo tanto, los mayores valores de dureza se obtienen en el número de pasadas más alto.
- Avance (f): En este caso, el avance (que implica más tiempo de contacto bola con probeta) no es la condición que obtiene mayor dureza, pues en el punto central es donde los valores de dureza son mayores.
- Diámetro de la bola (D): En este caso la bola con menor diámetro ha producido durezas más altas, como cabía esperar, puesto que es la que, a un mismo valor de fuerza, produce una presión más elevada sobre la superficie al tener menor superficie de contacto.

Por lo tanto, la recomendación de parámetros de bruñido para obtener mejores resultados en la dureza del material son:

- Fuerza (N): 115 N.
- Número de pasadas: 7.

- Avance (mm/rev): 0,13.
- Diámetro de la bola (mm): 6

A continuación se analizan las interacciones entre factores:

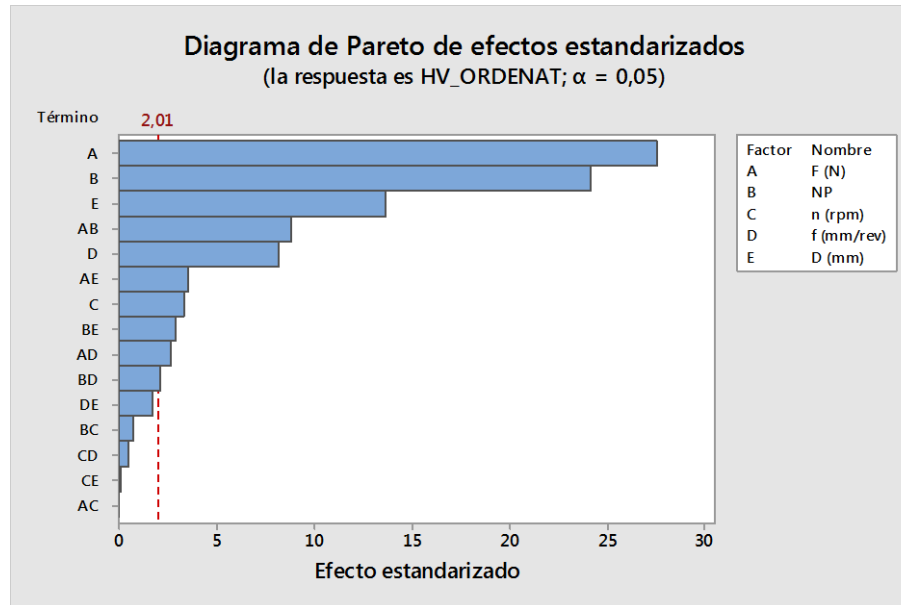


Figura 71. Pareto efectos estandarizados con interacciones

En este caso hay varios parámetros con una clara interacción entre sí:

- AB: Fuerza y número de pasadas.
- AE: Fuerza y diámetro de la bola.
- BE: Número de pasadas y diámetro de la bola.
- AD: Fuerza y avance.

En este caso la interacción es bastante similar en todos los casos. En los diferentes valores de un parámetro el otro parámetro aumenta del mismo modo. El único caso destacable es el número de pasadas frente la fuerza, a una pasada el aumento de fuerza es pequeño con respecto a siete pasadas.

Los otros parámetros presentan una interacción prácticamente paralela, como se puede ver en la figura 75.

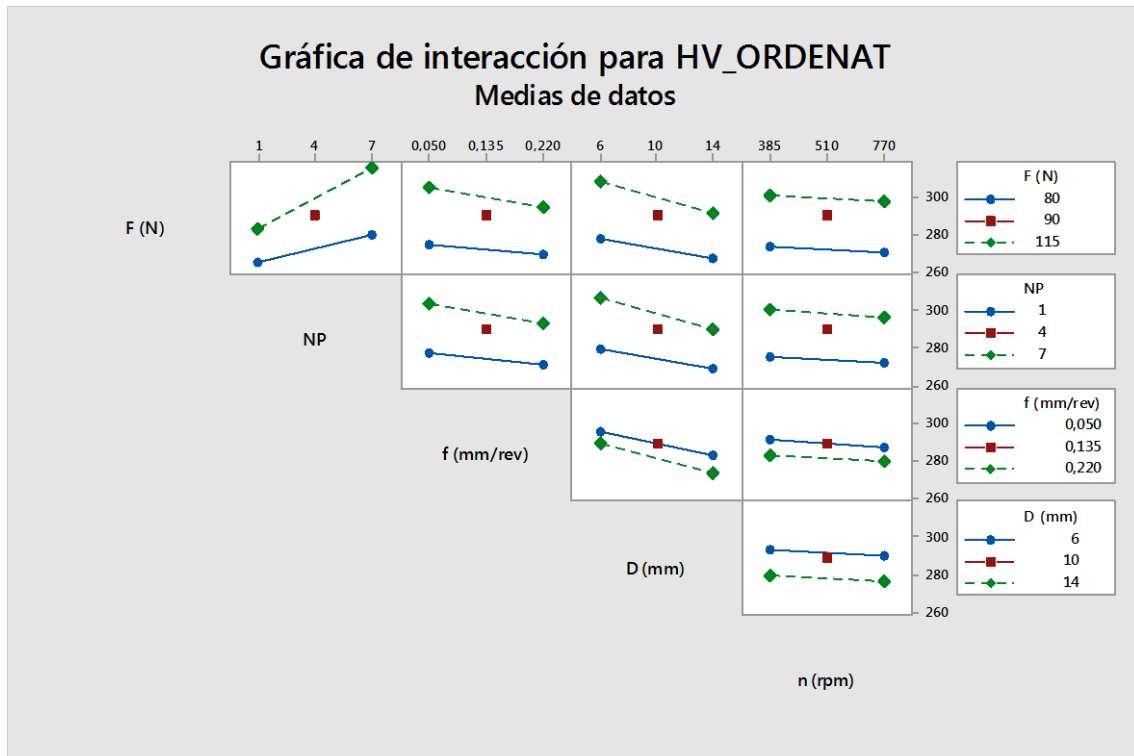


Figura 72. Gráfica de interacciones

4.5.3 Fatiga

Los resultados del comportamiento a fatiga de las piezas ensayadas se expondrán a partir del análisis de las curvas S/N para cada condición de bruñido y, posteriormente, se valorará el diseño factorial desarrollado a partir de la pendiente de dicha curva.

Como se ha explicado en el apartado 4.4, se ha bruñido con una combinación de parámetros que ha permitido realizar un total de cinco curvas S/N de fatiga. Todas las curvas tienen el mismo orden de magnitud que la curva sin bruñir (Figura 50), por lo que se pueden comparar sobre la misma gráfica los resultados.

El número de ciclos de cada condición experimental es el mostrado en la tabla siguiente:

Tabla 9. Resultados de ciclos de vida a fatiga

F y J		Punto Central		D Y G	
Tensión (MPa)	Media Ciclos	Tensión (MPa)	Media Ciclos	Tensión (MPa)	Media Ciclos
460	9348,5	460	6281,5	460	5348,5
440	11146,5	440	11039,5	440	6267
420	15309	420	12152,25	420	8360,5
400	19195,5	400	15316,25	400	12427
380	25114	380	22179,75	380	18877,5
360	31422	360	27008,25	360	23966

A Y C		H y K	
Tensión (MPa)	Media Ciclos	Tensión (MPa)	Media Ciclos
460	6099	460	6014
440	7834	440	8627
420	11608	420	12823
400	16441	400	14734,5
380	19895	380	19100,5
360	24991	360	24435,5

Con estos valores obtenidos es posible obtener la comparación de curvas S/N:

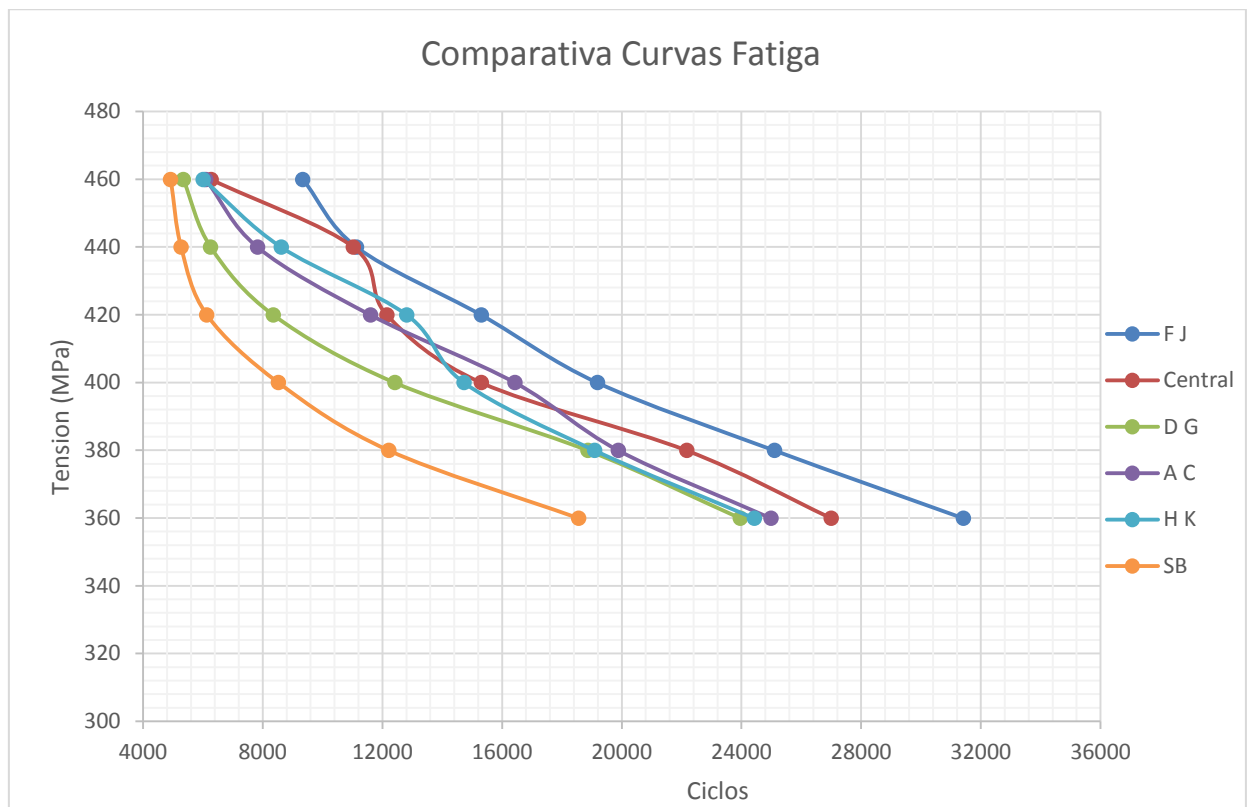


Figura 73. Comparativa de curvas a fatiga

Como se puede ver en la figura anterior hay 3 curvas que claramente se diferencian entre sí. La primera es la que tiene todos los puntos de menor valor en el eje X, es decir, la curva obtenida a partir de las probetas sin bruñir (de color naranja en la gráfica). La siguiente curva (de color verde), obtenida a partir de las probetas bruñidas en la condición D Y G (consultar tabla 8), muestra una mejora del comportamiento a fatiga, mientras que la última curva (de color azul) corresponde a la condición F y J y es la que se encuentra más alejada del origen y que, por tanto, muestra una mejora más notable del comportamiento de vida a fatiga.

De esta gráfica se pueden obtener las siguientes conclusiones a simple vista:

- El proceso de bruñido con bola, incluso en las condiciones más desfavorables en cuanto a la combinación de parámetros, mejora el comportamiento de vida a fatiga de las probetas ensayadas.
- Una selección adecuada de los parámetros ayuda a mejorar claramente la vida a fatiga de las probetas.

Analizando los parámetros seleccionados para cada curva (tabla 8) se puede ver como los mejores resultados se obtienen con la fuerza más elevada y el mayor número de pasadas. Este resultado era predecible, ya que la incidencia de la herramienta con una mayor fuerza durante más tiempo provoca una mayor deformación plástica y, en consecuencia, un aumento de las tensiones residuales compresivas.

A partir de un análisis factorial (explicado en el punto 4.) se determina el efecto que tiene cada parámetro sobre el resultado final, además de las interacciones que existen entre ellos. Como parámetro de salida se selecciona el número de ciclos máximos que resiste cada grupo de probetas, es decir, el número de ciclos a una fuerza de 180 N.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Pareto, en el que se observa la influencia de los distintos parámetros:

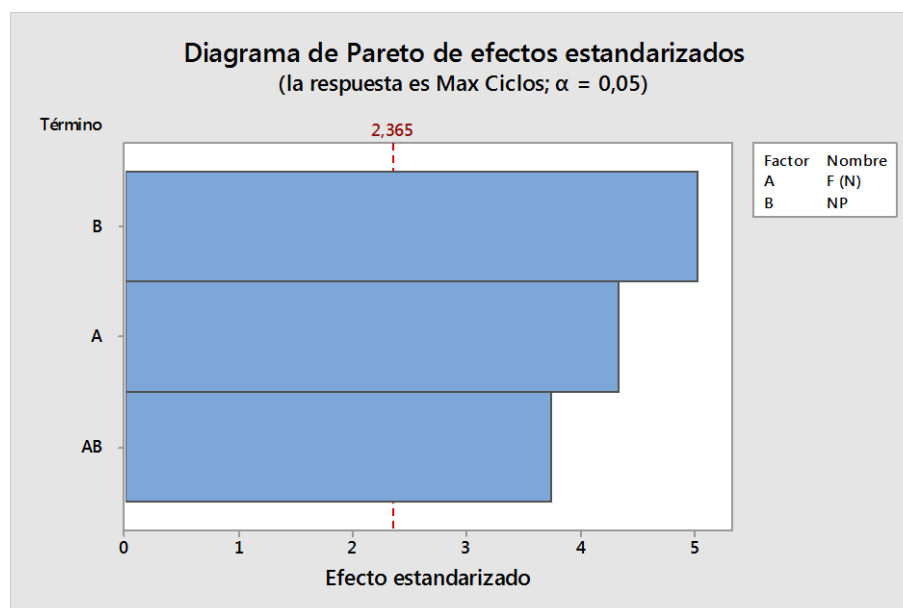


Figura 74. Efectos estandarizados para la fatiga

Como se puede ver en la anterior figura, tanto F como NP tienen una influencia significativa sobre el resultado final.

Como se ve en la figura 74, tanto el valor máximo de fuerza como el número máximo de pasadas son los parámetros que originan mayor número de ciclos de vida a fatiga. Estos resultados encajan perfectamente con lo

que se ha afirmado después de analizar la comparativa de gráficas S/N (figura 73).

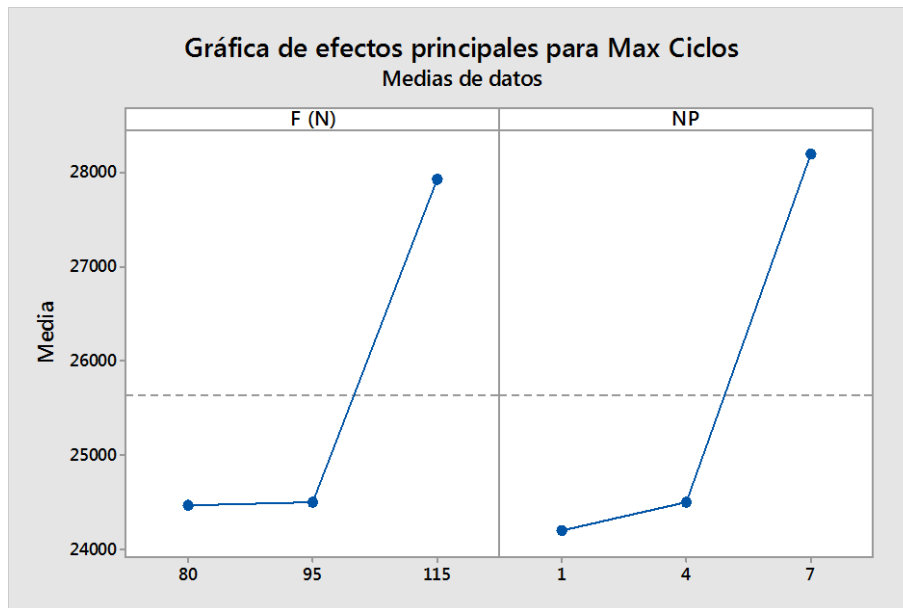


Figura 75. Efectos principales en la fatiga

En la anterior gráfica también se puede observar como el número de ciclos aumenta drásticamente a partir del punto central. Esto se debe a la interacción que hay entre parámetros, como se puede observar en la figura 76. Se confirma lo que indicaba la gráfica de efectos principales, a mayor número de pasadas un aumento de la fuerza produce un aumento de la respuesta.

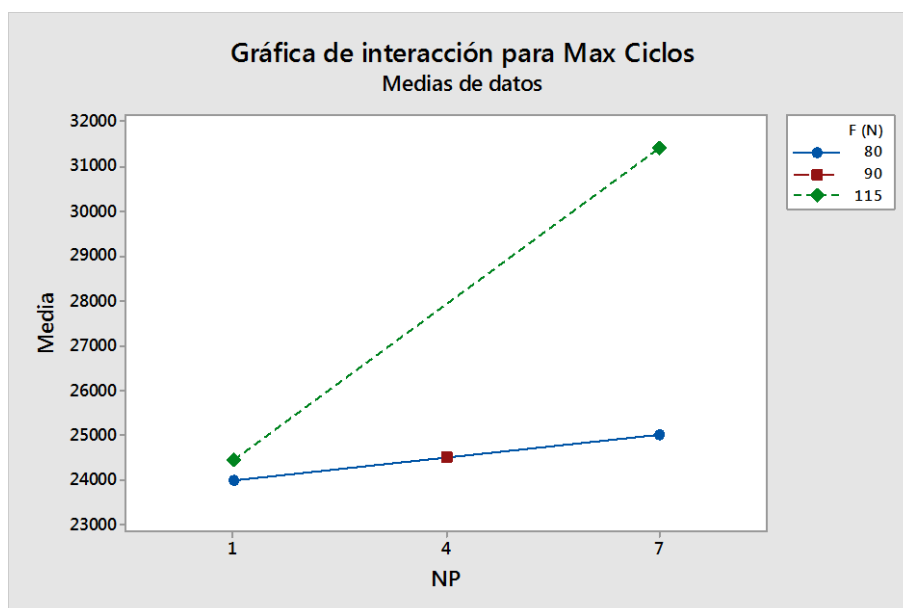


Figura 76. Gráfica de interacción NP y F

Por lo tanto, los parámetros óptimos de bruñido con bola para mejorar la vida a fatiga son los máximos que se puedan fijar, en este caso:

- Fuerza (N): 115.
- Número de pasadas: 7.

Una vez analizados los resultados resulta de gran importancia destacar la gran complejidad de bruñir en un radio tan pequeño. En ocasiones ha sido difícil acertar con precisión el punto exacto en el cual bruñir, cosa que podría haber afectado a los resultados. Se ha podido observar claramente como las probetas que se han trabajado correctamente han roto siempre por un punto posterior a la zona bruñida, mientras que si una probeta no estaba bruñida correctamente, su zona de rotura era en el medio de la zona bruñida o en su parte anterior. Esta apreciación se ha adoptado como indicativo de la calidad del proceso e identificado como factor que puede dar valores discordantes en los resultados.

Se ha podido observar que esto pasaba en combinaciones de número de pasadas más pequeño (1) y fuerza menor (90 N), es decir, las probetas que presentaban baja calidad de bruñido contaban como mínimo con un parámetro de esta magnitud. En las siguientes figuras se puede ver la diferencia entre una probeta bien bruñida y una probeta que presenta alguna deficiencia.



Figura 77. *Vista de rotura de dos probetas*

En la anterior figura se pueden apreciar dos tipos de probetas, una con rotura antes de la zona bruñida y una con rotura posterior. Como se ha comentado el bruñido ha tenido mayor efecto en la de fatiga en la probeta que aun presenta la marca de bruñido.

Esto no quiere decir que las probetas rotas en el medio de la zona bruñida o en su parte anterior estén mal bruñidas, sino que han sido trabajadas con

alguno de sus parámetros que no es el adecuado. Por lo tanto, se confirma lo que se ha planteado al hacer el análisis factorial en este mismo apartado: para mejorar la vida a fatiga se debe usar el máximo de fuerza y de pasadas posible.

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES

5.1 Problemática

Como todo trabajo de investigación, a lo largo de este estudio han surgido una serie de inconveniencias que han ralentizado el proceso en algunas etapas; y en otras, lo han detenido hasta que se han realizado nuevas consideraciones. No obstante, éstos se han podido solucionar a partir de un rediseño de la herramienta, seguido de una nueva planificación de la experimentación a realizar.

5.1.1 Sistema vibratorio

En un primer momento, el trabajo se enfocaba hacia una experimentación separada en dos bloques fundamentales: el bruñido con y sin vibraciones. La herramienta presentada permite el bruñido utilizando dichas condiciones, gracias a su módulo central, por lo que la aplicación de vibraciones planteaba un estudio muy ambicioso en el que se podrían comparar el efecto que éstas causaban sobre las piezas bruñidas frente al bruñido convencional.

No obstante, y pese a los intentos realizados, fue imposible poner en funcionamiento el módulo de vibraciones. La herramienta requiere de un sistema generador de vibraciones capaz de crear una onda con las características necesarias, es decir, con la amplitud y frecuencia adecuadas para que ambas placas vibren en resonancia. Como no se dispone de dicho sistema, ni uno equivalente capaz de generar un efecto similar, se descartó la idea de experimentar con vibraciones y se replanteó el estudio dirigido únicamente a la experimentación con bruñido convencional.

En la siguiente figura se muestra uno de los montajes realizados con el objetivo de generar vibraciones en la herramienta, utilizando un osciloscopio, un amplificador de onda y una resistencia, además de un

palpador para medir la amplitud de onda generada sobre las placas de la herramienta:

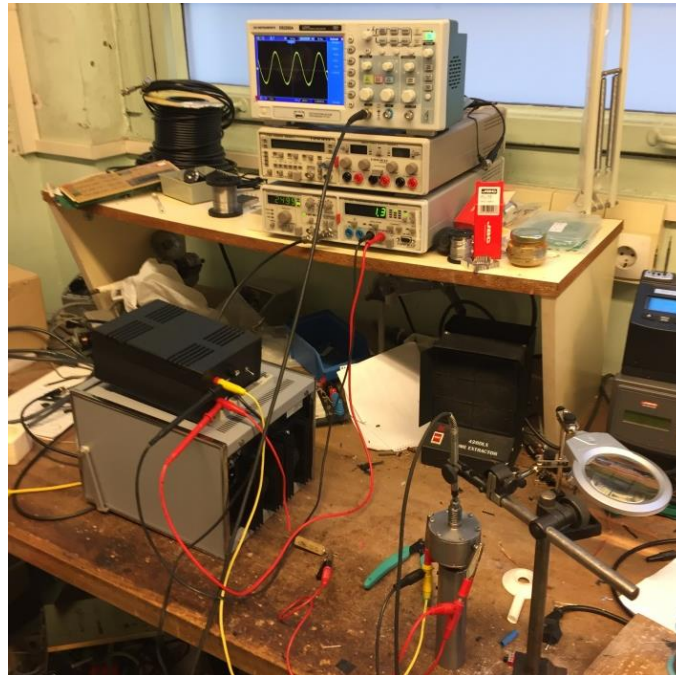


Figura 78. Montaje para generar vibraciones

5.1.2 Rediseño de la herramienta

Una vez introducido el experimento se plantea la fabricación de la herramienta rediseñada. En un principio, se debían fabricar un total de siete cabezales para cada una de las bolas, desde diámetro 4 mm hasta 18 mm.

En la primera etapa del proceso, la fabricación del cabezal de 18 mm quedó descartada, ya que el diámetro de la bola era demasiado grande. Esta restricción geométrica obligaba a realizar transformaciones más importantes en la herramienta, ya que algunos elementos quedaban inutilizados. No siendo imprescindible la utilización de este diámetro de bola para la experimentación, no se procedió a la adaptación necesaria.

Tomada esta decisión, el número de cabezales quedó reducido a seis, de los cuales tres se utilizarían en los experimentos. Los cabezales de 4 mm, 10 mm y 14 mm se utilizarían para bruñir las probetas de estudio.

Las primeras probetas fueron bruñidas con el cabezal de diámetro 4 mm, considerada una condición extrema, ya que la bola era la de menor diámetro de todas, por lo que la pared del cabezal diseñado era de poco espesor. Durante la experimentación, el cabezal de 4 mm se deformó en la parte del agujero, por lo que quedó inservible al salirse la bola. Se optó por un rediseño de éste, utilizando cotas mayores en la parte afectada de la boquilla, aumentando así el espesor de ésta.

Aplicando dicha modificación, se volvió a fabricar el cabezal rediseñado. Se empezó a experimentar con la nueva pieza, hasta que se fracturó por la

mitad debido a los esfuerzos a los que se sometía. Se fabricó un tercer cabezal con las mismas dimensiones para terminar los ensayos.

En la figura siguiente se muestran las boquillas utilizadas, en las que se puede observar las zonas donde se produjo la rotura:

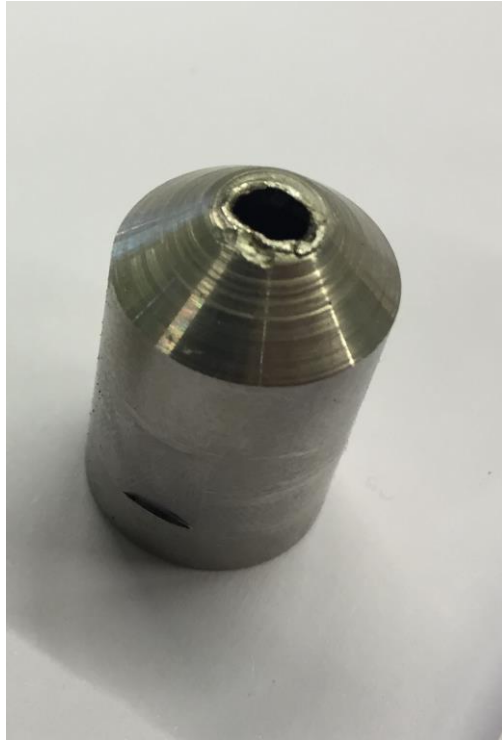


Figura 79. *Rotura del primer cabezal*



Figura 80. *Rotura del segundo modelo de cabezal*

Otro de los problemas durante el bruñido surgió con el canal de rodadura para las bolas de menor diámetro. Las bolas de rodadura para este caso son de diámetro muy pequeño y están sometidas a esfuerzos enormes, por lo que se calientan en exceso, llegando a deformar el mismo canal o pudiendo encallar la bola de bruñido impidiendo su libre giro y, en consecuencia, provocando un arrastre de material que varía los resultados finales. La

solución adoptada fue la refrigeración constante de la zona afectada mediante aire comprimido, además de una buena lubricación de todas las bolas y del canal mediante grasa de molibdeno.

Además de todo lo comentado, el esfuerzo perpendicular al que se somete la herramienta durante el bruñido de probetas cilíndricas en el torno provocó una deformación en el vástago de la placa superior, al ser la zona de menor diámetro, por lo que se fabricó una segunda pieza igual para realizar los experimentos. Para solucionar dicho problema, se debería replantear el diseño de esta parte de la herramienta utilizando un diámetro de vástago superior, lo que comporta un rediseño de las placas vibratorias al cambiar por completo la distribución de esfuerzos a los que se someten.

5.1.3 Experimentación

El bruñido de probetas cilíndricas mediante la adaptación de la herramienta en el torno es un proceso complicado, agravado aún más a causa de la esbeltez de las probetas utilizadas para el experimento, de diámetro 8 mm la parte bruñida.

A la hora de aplicar la fuerza sobre el proceso, esta se transmite desde el muelle hasta la probeta mediante el contacto entre la bola y la superficie de dicha probeta. Este contacto es de tipo puntual, por lo que el control de la fuerza aplicada se ve dificultado, en gran parte por el juego entre las partes deslizantes de la herramienta que permiten su precarga. A todo esto se debe añadir la fuerza de empuje que se crea al girar la probeta a altas revoluciones, además del efecto de la gravedad, ya que la herramienta se utiliza en voladizo.

En la siguiente figura se muestra el contacto existente entre la bola y las probetas bruñidas:

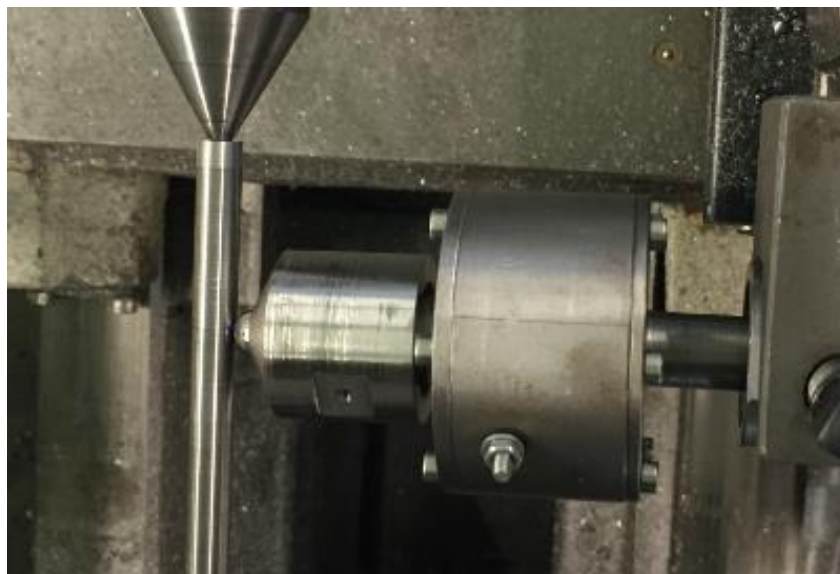


Figura 81. *Contacto entre la bola y la probeta*

Las probetas destinadas al estudio de fatiga se debían mecanizar con un radio de acuerdo inicial de 2 mm. Los problemas surgidos con la bola de 4 mm (con la que se iba a bruñir el radio) condujeron a un nuevo planteamiento del experimento, mecanizando las probetas para ser bruñidas utilizando la bola de 6 mm. Además, se optó por un radio de acuerdo un poco mayor, para facilitar la entrada de la bola durante el bruñido, por lo que se decidió mecanizar las probetas con radio de acuerdo de 3,5 mm.

El aumento del radio de acuerdo comportaba un aumento de la vida a fatiga de las probetas, al reducir el factor de entalla al utilizar un radio mayor. No obstante, el aumento de vida no comportaba un aumento excesivo del tiempo de experimentación, por lo que se adoptó la solución como válida.

5.1.4 Toma de datos

La toma de datos a la hora de sacar los resultados obtenidos en el bruñido de las probetas ha venido marcada por la falta de recursos, que han podido comportar un porcentaje de error durante las mediciones realizadas.

Por una parte, la medida de rugosidades se ha realizado con el rugosímetro Mitutoyo SJ-201, como se ha comentado anteriormente. Se trata de un aparato sencillo, que no presenta la precisión más adecuada para este tipo de estudios. No obstante, adoptando 10 medidas de rugosidad para cada zona y estableciendo la media aritmética se ha reducido dicho error.

La parte que ha supuesto más dificultades es el estudio a fatiga. La máquina disponible presenta un dinamómetro a escala, que permite medir la fuerza que se aplica sobre la probeta durante el experimento. No obstante, y para mejorar la precisión en los resultados, se ha conectado una celda de carga, que permite la obtención de la fuerza exacta que se aplica en todo momento. Además, permite observar el momento en el que se produce una caída de tensión y, por lo tanto, cuando rompe la probeta. En la siguiente figura se muestra el montaje realizado:

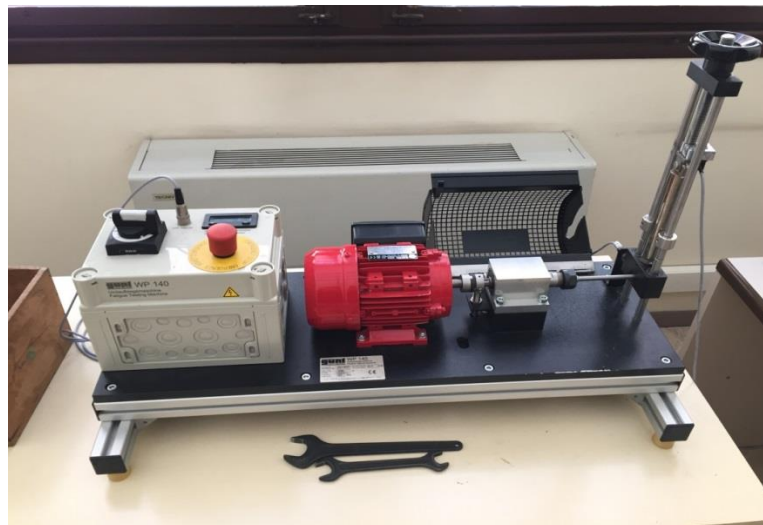


Figura 82. Montaje de las probetas en la máquina de fatiga

5.2 Conclusiones del proyecto

Una vez concluido todo el trabajo, tanto en su parte teórica como en la experimental, se puede concluir de forma general que el proceso de bruñido con bola adaptado para torno produce mejoras en todos los aspectos que se planteaban en las hipótesis iniciales, tanto en rugosidad y dureza como en fatiga, esta última menos estudiada hasta el momento.

El rediseño de la herramienta presentada inicialmente, y su posterior adaptación al torno, han permitido la realización de los experimentos utilizando una amplia variedad de parámetros en el proceso, con el afán de optimizar el proceso de bruñido con bola. Por lo tanto se afirma que el proceso es totalmente adaptable al torno y permite bruñir piezas de revolución sin problemas.

No obstante, y pese al rediseño realizado, la utilización de ciertos parámetros no ha resultado del todo posible. Por una parte, el abanico de diámetros de bola no ha sido tan amplio como se esperaba en un principio. Por la otra, los valores de fuerza no han podido elevarse hasta el punto deseado debido a la flexión experimentada por la herramienta en ciertos puntos y al contacto puntual entre bola y probeta. Aun así, se han podido obtener resultados fiables y satisfactorios, gracias a un rediseño de la parte experimental.

En cuanto al estudio de la rugosidad se puede concluir que un proceso de deformación plástica como lo es el bruñido con bola, resulta muy efectivo a la hora de mejorar dicha característica. No obstante se debe trabajar bajo unos parámetros determinados para favorecer al máximo el proceso.

También la dureza se ve mejorada después del bruñido debido al trabajo de deformación en frío que se aplica sobre la superficie, en este caso los parámetros de bruñido deben ser los más elevados que permita la herramienta utilizada.

Ambas características superficiales se han visto mejoradas tras el proceso de bruñido; sin embargo, la rugosidad es muy restrictiva dada la concreción de parámetros para obtener la mejor posible. Esto hace que en una misma operación se puedan alcanzar los máximos valores en mejora de rugosidad pero solo una parte de la mejora en dureza (se podría obtener más dureza a costa de perder acabado)

A pesar de los buenos resultados obtenidos se ha confirmado que las bolas de diámetros más pequeños (menores de 6 mm) no son aptas para el bruñido, básicamente por dos motivos. Al ser tan pequeñas producen una fuerza muy concentrada, lo que favorece que se claven contra la pieza bruñida y provocar saltos al avanzar longitudinalmente sobre ésta. Esto no solo no mejora la rugosidad superficial sino que la empeora. Además, para trabajar con diámetros de bola tan pequeños es necesario contar con un cabezal de un tamaño muy reducido y al mismo tiempo con una forma muy concreta para favorecer el contacto de la bola, lo que hace que no sea muy resistente y que sea fácil romperlo tras unas cuantas operaciones.

También es adecuado mencionar que las bolas de mayor diámetro (a partir de 10 mm) se han hallado como soluciones muy efectivas, teniendo resultados muy buenos incluso con probetas de un diámetro bastante menor. Esto abre muchas posibilidades dentro del bruñido, siendo posible trabajar con piezas de diámetros más grandes, utilizando todos los tamaños de bola disponibles y por lo tanto justifica la necesidad de contar con distintos cabezales.

La experimentación de las probetas a fatiga tras el bruñido resultaba uno de los temas más atractivos del trabajo, por ser uno de los parámetros menos estudiados según las referencias. Tras el estudio, se puede concluir que el bruñido mejora en gran medida la vida útil a fatiga de las probetas, debido (según referencias bibliográficas) a las tensiones residuales compresivas inducidas sobre las piezas.

Finalmente, y tras realizar un estudio analítico de los resultados, se ha podido realizar una optimización de los parámetros de bruñido según las características que se deseen mejorar. Se puede concluir que existe una combinación de parámetros capaz de incrementar los efectos producidos tras el bruñido. En este caso ha sido muy positivo ver como la mayoría de hipótesis previas se cumplían, incluyendo alguna sorpresa en parámetros que no eran significativos con respecto al resultado final.

Acabado el presente trabajo, se ha podido observar que todavía existen numerosos campos relacionados con el bruñido sobre los cuales indagar. Por este motivo, se puede plantear un listado de posibles aspectos a estudiar en trabajos futuros:

- Realización de un rediseño de la herramienta, reduciendo el efecto de la flexión y, en consecuencia, poder experimentar a valores de fuerza más elevados.
- Diseño de un sistema capaz de alimentar el sistema vibratorio de la herramienta para realizar un estudio comparativo en el que se introduzca el efecto de las vibraciones.
- Experimentación con probetas de materiales distintos del acero utilizado en este trabajo, como podrían ser el titanio o el aluminio.

CAPÍTULO 6:

BIBLIOGRAFÍA

6.1 Artículos

- Adel Mahmood et al. Influence of burnishing proceso on Surface roughness, hardness and microstructure of some non-ferrous metals (1995) [1]
- Adel Mahmood The effect of ball and Roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous materials (1997) [2]
- Adel Mahmood y Sulleman Z.S. Al-Dhi Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process (1999) [3]
- Adel Mahmood Hassan y Ayman Mohammad Maqableh presentaron su estudio The effects of initial busnishing parameters on non-ferrous components (2000) [4]
- A. Rodríguez et al. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique (2011) [5]
- A. Rodríguez et al. Influence of ball burnishing process on the hardness and residual stress of Aluminum A92017 convex surfaces (2012) [6]
- Babitsky et al. Autoresonant control of non-linear mode in ultrasonic transducer for machining applications (2004) [7]
- .Y. Seemikeri , P.K. Brahmkar, S.B. Mahagaonkar, Investigations on Surface integrity of AISI 1045 using LPB tool (2007) [8]
- D.E. Brehl y T.A. Dow Review of vibration-assisted machining (2007) [9]
- De Prevéy et al. Improved Damage Tolerance in Titanium Alloy Fan Blades With Low Plasticity Burnishing (2002) [10]
- E. Brinskmeier y R. Glabe. Elliptical vibration cutting of steel with diamond tools (1999) [11]
- Fang-Jung Shiou y Chien-Hua Chen. Freeform Surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. (2003) [12]
- Gómez-Gras et al. Study of a ball-burnishing vibration-assisted process (2014) [13]
- H. Hamadache et al. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing (2006) [14]
- J.A. Travieso et al. Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations on G10380 steel specimens (2015) [15]
- Kozlov et al. On the additivity of acoustoplastic and electorplastic effects (1994) [16]

- K.W. Siu et al. New insight on acoustoplasticity – Ultrasonic radiation enhances subgrain formation during deformation, (2011) [17]
- Michael J.Shepard, et al. titulado Effects on Surface treatment on fretting fatigue performance of Ti-6Al-4V (2003) [18]
- M.M. El-Khabeery y M.H. El-Axir Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity (2011) [19]
- M. Némat, A. C. Lyons. An Investigation of the Surface Topography of Ball Burnished Mild Steel and Aluminium. (2000) [20]
- Nalla,R et. Al. On the influence of mechanical surfafe treatments –deep Rolling and laser shock peening- on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambiental and elevated temperature (2003) [21]
- N.S.M. El-Tayeb et al., Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of aluminum 6061 (2007) [22]
- R.Aviles et al. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of médium carbón AISI 1045 steel (2005) [23]
- Shamoto et al. Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting (1999) [24]
- T. A. El-Taweel , M. H. El-Axir. Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. (2009) [25]
- Tian et al., Laser-assisted burnishing of metals (2007) [26]
- X. Li y D. Zhang. Ultrasonic-elliptical vibration transducer driven by single actuator and its application in precisión cutting (2006) [27]

6.2 Tesis

- Gómez-Gras, Giovanni. Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por una vibración (2015) [28]
- Liu Lucas. Investigation into the use of ball-burnishing of hardened Steel components as a finishing proces (2013) [29]

6.3 Libros

- Fatigue testing and analysis. Yung-Li Lee et al. (2005) ISBN 0-7506-7719-8 [30]
- Maquinas: Prontuario. N.Larburu.(1989) ISBN: 9788428319683 [31]
- Manual maquina a fatiga GUNT WP 140 [32]



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Presupuesto



REDISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UNA HERRAMIENTA DE BRUÑIDO CON BOLA PARA TORNO

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA MECÁNICA

por **Oriol Casadesús Farràs**

y

Manel Madueño Guerrero

Barcelona, 08 de Junio de 2016

Director: Ramón Jerez Y Giovanni Gómez

Departamento de INGENIERIA MECANICA (DEM)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE PRESUPUESTO

PRESUPUESTO	120
Materiales	121
Fabricación	122
Ingeniería y diseño	123
Total	124

PRESUPUESTO

En este documento del trabajo se recoge el presupuesto económico del proyecto, en el que se recogen todos los recursos y horas dedicados a su ejecución.

El presente estudio económico se divide en tres partes fundamentales, en las que se distinguen tanto los materiales como las horas de diseño y de fabricación de las piezas utilizadas.

Materiales

Concepto	Precio/Unidad (€/ud)	Unidades (ud)	TOTAL (€)
Barra de acero Inox	40,82	1	40,82
Tornillería	0,05	30	1,50
Barra de latón	25,00	0,5	12,50
Bolas de rodadura Ø2 mm	0,20	20	4,00
Bolas de rodadura Ø3 mm	0,20	20	4,00
Bolas de Rodadura Ø4 mm	0,20	20	4,00
Bolas de rodadura Ø6 mm	0,20	10	2,00
Bolas de rodadura Ø10 mm	0,40	10	4,00
Bolas de rodadura Ø14 mm	0,50	10	5,00
Muelle de compresión	3,45	1	3,45
Anillo Seeger	0,10	3	0,30
Grasa de molibdeno	7,94	1	7,94
Plaquita de torno VCMT 110304	3,21	7	22,47
Plaquita torno CNMG 120408	3,21	4	12,84
Broca de puntear 60º	4,00	1	4,00
Hoja de sierra M-42 C	12,00	1	12,00
Barra de acero AISI 304	25,00	4	100,00
Pinza de fresadora Ø12 mm	18,40	2	36,80
Material de conexión electrónica	16,50	1	16,50
Herramientas varias	15,00	1	15,00
Bobina de PLA	15,84	1	15,84
	SUBTOTAL 1 BRUTO	(€)	324,96
	I.V.A	21 %	68,24
	SUBTOTAL 1	(€)	393,20

Fabricación

<i>Pieza</i>	<i>Unidades (ud)</i>	<i>Precio/Hora (€/h)</i>	<i>Horas Mecanizado (h)</i>	<i>Total (€)</i>
Boquilla Ø4 mm	3	35,00	18	630,00
Boquilla Ø6 mm	1	35,00	6	210,00
Boquilla Ø8 mm	1	35,00	6	210,00
Boquilla Ø12 mm	1	35,00	6	210,00
Boquilla Ø14 mm	1	35,00	6	210,00
Tapa superior	2	35,00	6	210,00
Taladros CNC	1	50,00	4	200,00
			<i>SUBTOTAL 2 BRUTO</i>	<i>1880,00</i>
			<i>I.V.A</i>	<i>21 %</i>
			<i>SUBTOTAL 2</i>	<i>2274,80</i>

Ingeniería y diseño

Concepto	Precio/Hora (€/h)	Horas Diseño (h)	Total (€)
Diseño cabezales	25,00	35	875,00
Diseño tapas inferiores	25,00	15	375,00
Adaptación al torno	25,00	5	125,00
Prototipado	25,00	20	500,00
Preparación probetas	25,00	400	10000,00
Puesta a punto herramienta	25,00	600	15000,00
	<i>SUBTOTAL 3 BRUTO</i>	<i>(€)</i>	<i>26875,00</i>
	<i>I.V.A</i>	<i>21 %</i>	<i>5643,75</i>
	<i>SUBTOTAL 3</i>	<i>(€)</i>	<i>32518,75</i>

Total

SUTOTAL 1 BRUTO	(€)	324,96
SUBTOTAL 2 BRUTO	(€)	1880,00
SUBTOTAL 3 BRUTO	(€)	26875,00
<hr/>		
TOTAL BRUTO	(€)	29079,96
I.V.A	21 %	6106,79
TOTAL	(€)	35186,75
