



"En la Universidad de Guanajuato, todos y todas, nos comprometemos a garantizar el derecho de las mujeres a vivir libres de violencia"

Asunto: Notificación de Dictamen de Modalidad de Titulación.

C. POSADA RAMÍREZ JONATHAN URIEL
ESTUDIANTE DE LA LICENCIATURA EN LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
PRESENTE.

Una vez concluido el análisis y discusión sobre la propuesta del proyecto titulado: "**Estudio experimental de la influencia del bruído con bola en las propiedades elasto-plásticas del acero TRIP**", bajo la revisión del Asesor(es): CAPILLA GONZÁLEZ Gustavo, Dr. y SALDAÑA ROBLES Alberto, Dr., el Comité de Obtención de Grado de Licenciatura del H. Consejo Divisional, acordó la siguiente resolución:

Con fundamento en las fracciones primera a cuarta del Artículo 67, el Artículo 68 del Estatuto Académico 2008 y el artículo Noveno Transitorio del Reglamento Académico 2019, el comité acordó **POR UNANIMIDAD DE VOTOS AUTORIZAR SU MODALIDAD DE TITULACIÓN POR TRABAJO DE TESIS** designando el siguiente jurado:

Presidente: GUTIÉRREZ RIVERA Miguel Ernesto, Dr.

Secretario: CAPILLA GONZÁLEZ Gustavo, Dr.

Vocal: MARTÍNEZ RAMÍREZ Israel, Dr.

Se extiende la presente notificación de la resolución el día 30 de julio del 2020.

ATENTAMENTE
"LA VERDAD OS HARÁ LIBRES"

Rocío Lizárraga

DRA. ROCÍO ALFONSINA LIZÁRRAGA MORALES
DIRECTORA SUPLENTE



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
Campus Irapuato - Salamanca
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

c.c.p. DR. CARLOS HUGO GARCÍA CAPULÍN – Secretario Académico de la División de Ingenierías
CAPILLA GONZÁLEZ Gustavo, Dr. y SALDAÑA ROBLES Alberto, Dr.– Asesor(es)
Archivo

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS – CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

Salamanca, Gto., a 09 de junio del 20 21.

**M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-**

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Posada Ramírez Jonathan Uriel del *Programa de Licenciatura en* Ingeniería en Mecatrónica y cuyo número de *NUA* es: 779201 del cual soy director. El título de la tesis es: Estudio experimental de la influencia del bruído con bola en las propiedades elasto-plásticas del acero TRIP.

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

A T E N T A M E N T E



Dr. Gustavo Capilla González
NOMBRE Y FIRMA
**DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO**



Dr. Gustavo Capilla González
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



Dr. Miguel Ernesto Gutiérrez Rivera
NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE



Dr. Israel Martínez Ramírez
NOMBRE Y FIRMA
VOCAL



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

“Estudio experimental de la influencia del
bruñido con bola en las propiedades
elasto-plásticas del acero TRIP”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
Ingeniero en mecatrónica

PRESENTA:

Posada Ramírez Jonathan Uriel

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Capilla González Gustavo
Dr. Saldaña Robles Alberto

SALAMANCA, GUANAJUATO

Junio 2021

Agradecimientos

- A mi alma mater, la Universidad de Guanajuato primero por permitirme formar parte de sus elogiadas filas de alumnos dentro de la DICIS, segundo, por formarme profesional y personalmente con los mejores recursos a nuestro alrededor y tercero por abrirme las puertas a una comunidad extraordinaria, de la cual me siento orgulloso de pertenecer y cómodo me siento de pensar que será el futuro de nuestro país.
- Al honorable jurado Dr. Gutiérrez Rivera Miguel Ernesto, Dr. Capilla González Gustavo y Dr. Martínez Ramírez Israel por su tiempo, observaciones y correcciones que contribuyeron de manera significativa a la mejora del presente trabajo.
- A la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato, por la ayuda social brindada a actividades científicas que desarrollé durante el proyecto "Diseño, manufactura y evaluación de un bruñidor con sistema de adquisición de datos y celda de carga" de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica (CIIC) 2020.
- Al Ing. Espinoza Torres Isaí, alumno de maestría en ingeniería mecánica de la DICIS, por su valioso apoyo en la manufactura de los acoplamientos para el bruñidor, así como en la realización del bruñido en las pruebas experimentales.
- A mis asesores Dr. Capilla González Gustavo y Dr. Saldaña Robles Alberto por su tiempo, dedicación, consejos, enseñanzas y sobre todo por brindarme un modelo a seguir profesionalmente, para guiarme durante todo mi desarrollo.
- A Dios, por poner esta conciencia en este cuerpo que coincidió en este tramo de tiempo con personas tan maravillosas.

Dedicatoria

- A mis padres Posada Bocanegra Juan y Ramírez Rocha Rosa Laura, por ser siempre mi guía, motivarme a ser mejor persona, enseñarme las mejores cosas e inculcarme valores que me hacen apreciar su valiosa existencia. Todo se lo debo a ellos, aún sin esperar nada a cambio me brindan todo lo que pueden. Sí se pudo mamá.
- A mis hermanos Laura Elvia y Juan Carlos, por estar siempre soportarme siendo el menor, ayudándome cuando lo necesité y por nunca dejarme solo. A mi cuñado Peña Almanza Sandro Humberto por tantas oportunidades.
- A mis sobrinos Iker, Zoe y Axel, espero seguir creciendo con ustedes y les prometo que daré lo mejor de mí, para enseñarles a ser buenas personas.
- A García García Goretti Odemaris, agradezco tu tiempo y paciencia durante todo este viaje, por brindarme el apoyo que siempre necesité y por enseñarme a amar. Un paso más para estar juntos.
- A toda mi familia, que siempre me dan algo que aprender.
- Y como vivir en soledad sería como ser un desierto, esto va también a todos mis amigos, sin mencionarlos saben que todos se incluyen en el presente, por brindarme una excelente vida.

Índice general

Agradecimientos	2
Dedicatoria	3
Nomenclatura	6
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	8
1. Introducción	9
1.1. Antecedentes	9
1.2. Objetivo	13
1.3. Justificación	13
2. Proceso de bruñido con bola	14
2.1. Descripción del proceso de bruñido con bola	14
2.2. Superficies de aplicación	15
2.2.1. Superficies planas (placas de material)	15
2.2.2. Superficies cilíndricas	16
2.2.3. Superficies curvilíneas o complejas	17
2.3. Parámetros que influyen en el proceso de bruñido	18
2.4. Tipos de bruñidores	19
2.4.1. Bruñidores mecánicos	19
2.4.2. Bruñidores hidrostáticos	20
2.4.3. Bruñidores asistidos por vibración	20
2.5. Material y diámetro de la bola del bruñidor	21
2.6. Fuerza de bruñido	22
2.7. Velocidad de avance	23
2.8. Profundidad de bruñido en función de la fuerza	24
2.9. Número de pases	25
3. Métodos experimentales	26
3.1. Diseño de experimentos en ingeniería	26
3.2. Parámetros experimentales	27
3.3. Fabricación de probetas	28
3.4. Pruebas de tensión	29
3.5. Pruebas de bruñido con bola	30

3.6. Trayectorias de bruñido	33
4. Análisis de resultados	34
4.1. Estudio estadístico para evaluar el efecto de los parámetros de bruñido sobre las propiedades elasto-plásticas	34
4.2. Resultados de las propiedades elasto-plásticas (esfuerzo de cedencia, esfuerzo último a la tensión, deformación uniforme y % de elongación a la fractura)	41
4.3. Resultados de rugosidad	44
5. Conclusiones	46

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
σ_Y	Esfuerzo de cedencia.
σ_{UT}	Esfuerzo último a la tensión.
E	Módulo de elasticidad.
Fb	Fuerza de bruñido.
F	Fuerza.
V	Velocidad de rotación.
n	Número de pases.
f	Velocidad de avance.
R_a	Rugosidad superficial media.
y	Altura de perfil de rugosidad.
x	Distancia recorrida de longitud.
l	Longitud de evaluación.
A	Fuerza de bruñido en el ANOVA.
B	Velocidad de bruñido en el ANOVA.
AB	Interacción entre factores en el ANOVA.
A^2	Componente cuadrática de la fuerza de bruñido.
B^2	Componente cuadrática de la velocidad de bruñido.
p	Valor estadístico p.
df	Grados de libertad.
f	Valor estadístico f.
$\%El$	Porcentaje de elongación a la fractura.
Eu	Elongación uniforme.

Índice de figuras

1.1.	Aceros avanzados de alta resistencia [3].	10
1.2.	Curvas de esfuerzo-deformación en ingeniería [7].	11
1.3.	Proceso de bruñido con bola [8].	12
2.1.	Bruñido con bola en superficies planas.	16
2.2.	Bruñido en superficie cilíndrica [8].	16
2.3.	a) Superficies esféricas b) Superficies complejas [8].	17
2.4.	Parámetros que contribuyen al mejoramiento de la superficie. (a) [39] (b) [40].	18
2.5.	Bruñidor de rodillo mecánico [47].	19
2.6.	Bruñidor de bola hidrostático [49].	20
2.7.	Herramienta VABB [51].	21
2.8.	Punta de bruñidor con fragmento de diamante utilizada para este proyecto.	22
2.9.	Valores de fuerza [N] más comunes [8].	23
2.10.	Relación de velocidad de bruñido-rugosidad [60].	23
2.11.	Valores utilizados de velocidad de bruñido.	24
3.1.	a) Geometría con base en la norma ASTM E-8 y b) Espécimen cortado por láser.	28
3.2.	Configuración para la prueba de tensión en la máquina Instron [®] 8872.	30
3.3.	Herramienta de bruñido con sistema de adquisición de datos.	31
3.4.	Probeta sujeta en el molde durante el proceso de bruñido.	32
3.5.	Trayectoria de bruñido.	33
3.6.	Probetas con fractura fuera de la zona de bruñido.	33
4.1.	Rugosidad superficial media (R_a) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.	36
4.2.	Esfuerzo de cedencia (σ_Y) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.	37
4.3.	Esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.	39
4.4.	Porcentaje de elongación (%El) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.	40
4.5.	Curvas esfuerzo-deformación de diferentes fuerzas para velocidad de a) 1000 mm/min, b) 2000 mm/min y c) 3000 mm/min.	42
4.6.	%El de todos los especímenes utilizados, agrupados por velocidad de bruñido.	43
4.7.	Patrones de rugosidad con la probeta bruñida con $F=125$ N y $f=3000$ mm/min y la probeta sin tratar.	44
4.8.	Patrones de rugosidad con la probeta bruñida con $F=400$ N y $f=3000$ mm/min y la probeta sin tratar.	45

Índice de tablas

3.1. Diseño experimental empleado.	27
3.2. Dimensiones del diseño de probeta según la norma ASTM E-8.	28
4.1. Tabla del ANOVA para la variable rugosidad (R_a).	35
4.2. Tabla del ANOVA de la variable esfuerzo de cedencia (σ_Y).	36
4.3. Tabla del ANOVA para el esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}).	38
4.4. Tabla del ANOVA para el porcentaje de elongación ($\%El$).	39
4.5. Promedio de los resultados de las propiedades elasto-plásticas.	43

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En los últimos años se ha intensificado la competencia entre los productores de acero para la industria automotriz, en la búsqueda por reducir el consumo de combustible del automóvil preservando la seguridad de los pasajeros. Una solución a esto es el uso de materiales de nueva generación, los cuales brindan una reducción de peso sin sacrificar la resistencia de sus componentes [1]. Dentro de este tipo de materiales se encuentran los aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High Strength Steel, por sus siglas en inglés).

Estos aceros se caracterizan por una resistencia ante impactos mucho mayor que otros aceros convencionales, como lo son los aceros de baja aleación HSLA (High Strength Low Alloy, por sus siglas en inglés). Sin embargo una de sus desventajas es que al ser más resistentes y rígidos presentan una ductilidad y formabilidad limitada, dando lugar a fenómenos de fractura y adelgazamiento excesivo durante los procesos de formado de lámina.

Dentro de estos tipos de aceros AHSS se encuentran los conocidos como: Doble Fase DP (Dual Phase, por sus siglas en inglés), los aceros de Transformación Inducida por Plasticidad TRIP (Transformation Induced Plasticity, por sus siglas en inglés), los aceros de Fase Compleja CP (Complex Phase, por sus siglas en inglés) y los aceros martensíticos MART (Martensitic Steels, por sus siglas en inglés), estos últimos pertenecientes a los aceros de tercera generación. La Figura 1.1 muestra la evolución de los aceros en términos de su elongación y resistencia a la tensión.

Las propiedades de los aceros AHSS se derivan de su microestructura compleja multifase, donde cada grupo tiene una composición diferente [1]. Por mencionar algunos de los principales se tiene:

- Doble fase (DP).

Este grupo se compone de una matriz de ferrita suave y aproximadamente 10 - 40% de partículas de martensita dura o martensita - austenita. Este arreglo permite un esfuerzo último a la tensión en un rango de 500 – 1200 MPa, por lo que el grupo de aceros DP se encuentra dentro de los AHSS. Algunas características de este tipo de acero son:

- La resistencia de los aceros DP se controla por medio de la cantidad de martensita en su microestructura y su ductilidad por el tamaño y distribución de la fase.
- No presentan elongación del límite elástico.

- Tienen una baja razón σ_Y/σ_{UT} , alrededor de 0.5, alto endurecimiento por deformación.
- Transformación inducida por plasticidad (TRIP).
Son los aceros más adecuados para la fabricación de los componentes estructurales de los automóviles. Zackay et al. [2] fueron los primeros en trabajar con este tipo de materiales con los que mediante la austenita retenida en su microestructura se lograba incrementar el endurecimiento por deformación del material al estar sometido a estados de deformación plástica. Las propiedades mecánicas del acero TRIP se derivan de su multifase dispersa compuesta de ferrita en un 50 – 55 % y bainita en un 30 – 35 % en aleaciones. Por ejemplo el acero TRIP 800 MPa contiene aproximadamente 3.5 % de aleaciones. El reto en estos aceros consiste en producirlos con alto contenido de austenita estable en su microestructura [1].

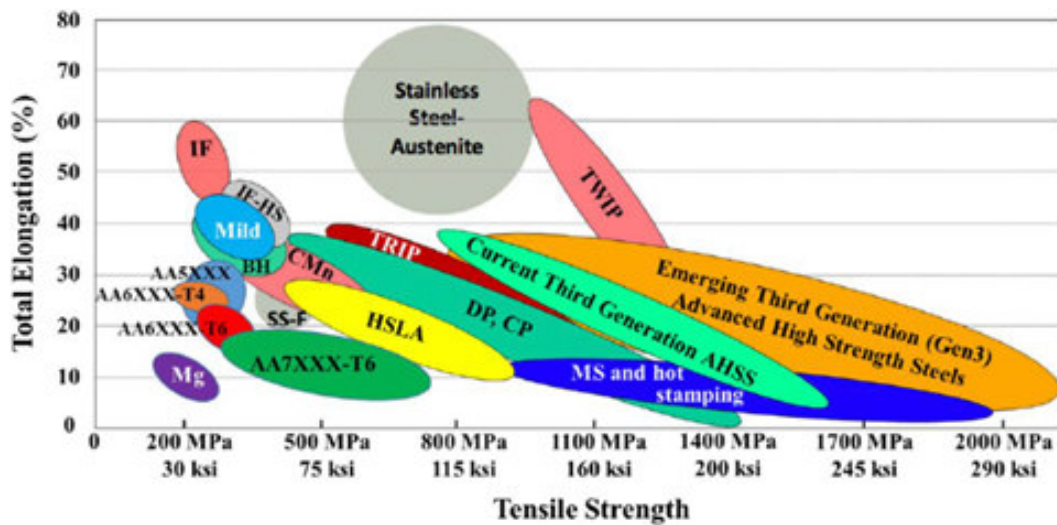


Figura 1.1: Aceros avanzados de alta resistencia [3].

Sin embargo, dos principales problemas surgen cuando los aceros AHSS son utilizados en los procesos de formado de lámina. Primero, el *springback* o recuperación elástica de los materiales, el cual está relacionado por un lado con el nivel de esfuerzos en la etapa final de formado, se incrementa con la resistencia de los materiales. Aunado a esto, las propiedades mecánicas como lo son el módulo de elasticidad (E) y el esfuerzo de cedencia (σ_Y), tienen una gran influencia en la recuperación elástica.

Por otro lado, debido a su alta resistencia, los aceros AHSS presentan una reducción en su formabilidad en referencia a los aceros de baja aleación (HSLA). Esta reducción en su ductilidad tiene influencia en la aparición de grietas, fracturas o adelgazamiento excesivo del material durante el proceso de formado [4–6]. La Figura 1.2 presenta las curvas de esfuerzo-deformación en ingeniería para distintos niveles de aceros DP y TRIP.

Debido a esto, distintos métodos de deformación plástica han sido implementados con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de estos materiales. Uno de estos es el proceso de bruñido con bola, el cual genera micro-deformaciones plásticas sobre la superficie de los materiales.

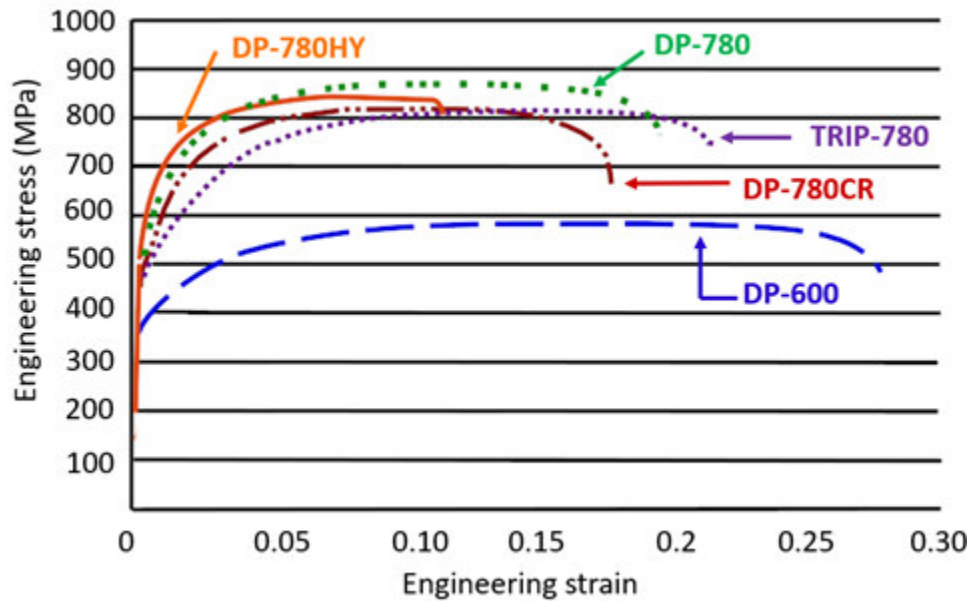


Figura 1.2: Curvas de esfuerzo-deformación en ingeniería [7].

El proceso de bruñido con bola es un proceso de acabado superficial a temperatura ambiente, que consiste en aplicar una fuerza de compresión con una bola rígida sostenida por la herramienta de bruñido. La bola se desliza sobre la superficie del componente, la cual induce micro deformaciones plásticas que resultan en la mejora de diversas propiedades físicas y mecánicas en la superficie de la pieza manufacturada. La herramienta se coloca en máquinas convencionales y de Control Numérico Computarizado (CNC). Debido a esto, el proceso de bruñido con bola es un proceso fácil de implementar, poco costoso, rápido y amigable con el medio ambiente, ya que no es un proceso que genere viruta [8]. En general, debido estas ventajas que ofrece sobre otros procesos de acabado superficial, su aplicación en el acabado de piezas en diversos sectores industriales se ha incrementado en los últimos años.

El proceso consiste en el desplazamiento de material de los picos a los valles de las micro irregularidades de la superficie, provocando una reducción de la rugosidad. Así mismo un incremento de la dureza superficial [9]. Este proceso induce esfuerzos de compresión a cierta profundidad de la superficie, lo cual aumenta la resistencia a la corrosión, al desgaste y a la fatiga; alargando la vida útil de la pieza [10–17]. En la Figura 1.3 se muestra un esquema del proceso de bruñido con bola.

El proceso se ha usado para realizar pruebas en una amplia gama de materiales metálicos en los últimos años. Por mencionar algunos de los estudios más recientes, Swirad et al. [18] realizaron una investigación en la estructura estereométrica de la superficie del material X38CrMoV5-1. Los resultados mostraron una reducción de la rugosidad debido a la micro-deformación plástica del material.

Gharbi et al. [19] investigaron el efecto del bruñido con bola en láminas de aluminio 10150A, usando una herramienta diseñada por los autores. Los resultados revelaron que el proceso permitió mejorar la ductilidad del material para condiciones específicas del proceso de bruñido.

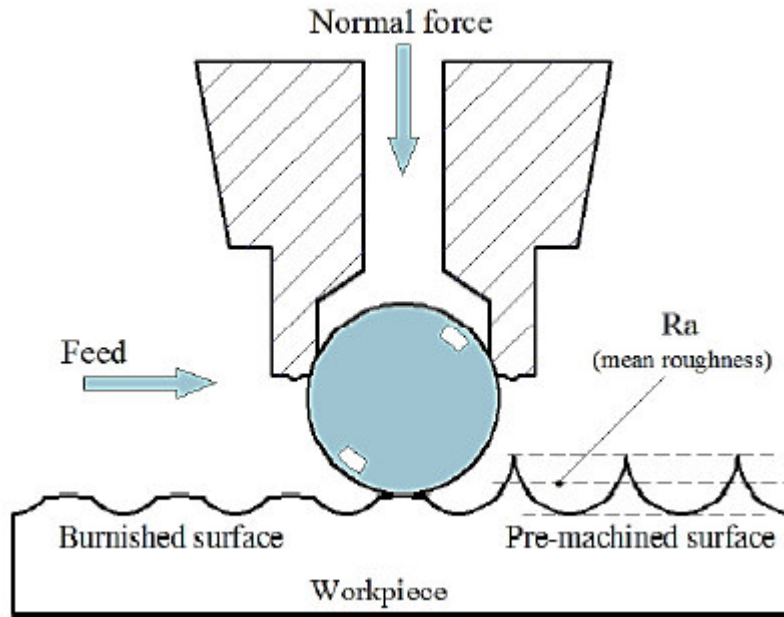


Figura 1.3: Proceso de bruñido con bola [8].

En un estudio realizado por Kovács y Zsolt [20] se muestra la reducción en la rugosidad de la superficie usando la herramienta de bruñido con bola magnética asistida MABB (Magnetic Assisted Ball Burnishing, por sus siglas en inglés). En el estudio se evaluó el efecto del proceso en distintos materiales, tales como: acero C45, acero austenita X6CrNiTi1811, aleación de aluminio AA7075 y un polímero PA6. Los autores concluyen que la herramienta MABB puede bruñir materiales no magnéticos sostenidos en una superficie magnética. Del mismo modo, el proceso de bruñido permite reducir la rugosidad media en la aleación AA7075 con parámetros tales como fuerza de bruñido, avance y velocidad de rotación.

En otros estudios, se han variado los parámetros del proceso que influyen significativamente en las propiedades de los materiales, como lo es la trayectoria de bruñido. Alghazoul et al. [21], propusieron una trayectoria con círculos trocoides en una aleación de aluminio AL6061-O aumentando de manera significativa la dureza de la superficie del material de 67 HV a 112 HV. Recientemente Sánchez et al. [22], describieron el efecto del bruñido con bola en una aleación de aluminio 2050 que fue previamente soldada por fricción (FSW, por sus siglas en inglés). En el estudio se reportó que la fuerza del bruñido es el parámetro más significativo para inducir esfuerzos residuales compresivos en la superficie, alcanzando valores en el rango de -300 MPa a -700 MPa.

De la literatura revisada, se observa que el bruñido con bola se ha aplicado a una amplia gama de materiales metálicos, permitiendo mejorar diversas propiedades que alargan la vida útil de las piezas mecánicas. Sin embargo, en la literatura revisada a la fecha, el proceso no ha sido implementado en aceros de alta resistencia o AHSS, específicamente en láminas de acero TRIP. Con base en lo antes mencionado y en la creciente demanda de los aceros AHSS en la industria automotriz, analizar la influencia del proceso de bruñido con bola en este tipo de materiales resulta en un área de oportunidad para mejorar sus propiedades mecánicas como lo son la ductilidad, la rugosidad, los esfuerzos residuales, entre otras.

1.2. Objetivo

En la presente propuesta, se plantea el estudio experimental para evaluar el efecto del proceso de bruñido con bola en las propiedades elasto-plásticas de un Acero Avanzado de Alta Resistencia (AHSS) del tipo Transformación Inducida por Plasticidad (TRIP), el cual es utilizado ampliamente en la industria automotriz para la manufactura de componentes estructurales. El objetivo es analizar la influencia de dos parámetros clave del proceso de bruñido con bola: 1) la fuerza de bruñido, la cual determina el grado de micro deformación plástica que produce el proceso en la superficie de la pieza y 2) la velocidad de avance del bruñido, la cual determina la velocidad y el tiempo de manufactura del proceso. Para el estudio, se propuso un diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) del bruñido con bola sobre la superficie de láminas de acero TRIP, implementando para el proceso una herramienta de bruñido novedosa con sistema de adquisición de datos y celda de carga, que permite aplicar y registrar la fuerza dinámica de bruñido con una alta precisión.

Para analizar la influencia del proceso de bruñido con bola, se realizó un análisis comparativo de las propiedades elasto-plásticas determinadas en una prueba de tensión uniaxial para distintas configuraciones del proceso de bruñido. Con base en los resultados, se determinó la combinación óptima de parámetros para mejorar las propiedades del material enfocado a aplicaciones específicas de procesos de formado de láminas.

1.3. Justificación

Los aceros TRIP se utilizan para la fabricación de diversos componentes automotrices debido a su alta resistencia, excelente formabilidad y su gran desempeño en la absorción de energía durante impactos. Generalmente los componentes automotrices son fabricados mediante procesos de conformado como son doblado, embutido profundo y corte. Sin embargo, existen dos principales limitantes cuando los aceros AHSS son utilizados: primero, la gran cantidad de *springback* presente durante el proceso debido al incremento del endurecimiento por deformación del material. Por otro lado, la formabilidad se ve reducida debido a su alta resistencia dando lugar a fracturas en las zonas donde existe una mayor concentración de esfuerzos, como lo son las zonas de doblez. Estos fenómenos en el material están relacionados con los esfuerzos residuales que permanecen en la superficie y hasta cierta profundidad una vez que han sido manufacturados [23]. Debido a esto, el implementar métodos que permitan mejorar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de componentes, resulta de gran interés para la industria.

En este sentido, el proceso de bruñido con bola es un proceso de acabado superficial que ha demostrado ser rápido, de bajo costo, fácil de implementar y que permite mejorar sustancialmente algunas propiedades físicas, mecánicas y químicas en piezas industriales [9]. Dentro de éstas, la ductilidad es una de las propiedades mecánicas que el proceso de bruñido permite mejorar [19], la cual está relacionada con la formabilidad del material. Por lo anterior, el implementar el proceso de bruñido con bola, con los parámetros del proceso adecuados que permitan mejorar las propiedades elasto-plásticas del acero TRIP utilizado en este estudio, resulta de gran interés para la industria automotriz y la academia.

Capítulo 2

Proceso de bruñido con bola

2.1. Descripción del proceso de bruñido con bola

La calidad de la superficie de una pieza industrial es de vital importancia cuando se evalúa la calidad del proceso de maquinado [24], estos componentes están expuestos a grandes esfuerzos y a condiciones extremas como: altas temperaturas, velocidades o fuerzas muy elevadas.

La rugosidad de la superficie de una pieza manufacturada es un parámetro de diseño significativo y que influye en las propiedades mecánicas como la resistencia a la fatiga. Cuando una pieza ha sido manufacturada permanecen micro irregularidades en la superficie que se presentan en forma de crestas y valles de material, que pueden evaluarse a partir de la rugosidad media de la superficie [25].

Para mejorar los parámetros de calidad de la superficie se han estudiado diferentes procesos de acabado superficial, estos procesos se dividen de acuerdo a su forma de tratar la superficie: los de arranque de viruta, que involucran desprendimiento de material como el fresado de super acabado y el tipo de deformación plástica. Este último no desprende material si no que lo deforma ocasionando una redistribución de material en la superficie [26]. Dentro de este último tipo se encuentra el bruñido con bola.

El proceso de bruñido con bola es una técnica de acabado superficial que se basa en utilizar una bola de alta dureza que se desliza sobre la superficie de un componente industrial, aplicando una fuerza suficientemente alta para inducir una deformación plástica. Este proceso provoca un desplazamiento físico de las microirregularidades de la pieza que definen la textura de la superficie [27]. El proceso involucra ciertos parámetros que tienen influencia en la deformación del componente o pieza al que se aplica el proceso. Los niveles de los parámetros dependen de la propiedad que se mejorará de la pieza y el grado de mejora.

De acuerdo a la literatura revisada, el proceso de bruñido con bola contiene variantes para su constitución y realización como: la herramienta en la que se monta, el tipo de sistema que aplica la fuerza sobre la bola y además puede ser adaptado con un sistema de medición para regular la fuerza que se aplica. Dependiendo de la configuración bajo la que se realice el proceso, se incrementan en diferentes magnitudes características de la pieza, por ejemplo: se reduce la rugosidad media en la superficie del material, se aumenta la dureza en varias capas dentro del material; también se inducen o incrementan los esfuerzos de compresión en ocasiones hasta una profundidad de 1 mm [11].

Dado que el proceso es relativamente nuevo en comparación con otros procesos de acabado. En él influyen varios parámetros importantes como son: fuerza aplicada a la superficie, avance de la herramienta, ancho de paso lateral, número de pases, diámetro y material de la bola. El estudio de este proceso y sus beneficios se guía principalmente por diseños experimentales [27].

Uno de los retos actuales de la industria automotriz y aeroespacial es el encontrar materiales más ligeros y resistentes, pero al aumentar su rigidez disminuyen propiedades como la capacidad del material de ser deformado. Dada la complejidad de la geometría de los componentes, es importante que el material tenga la capacidad de ser deformado sin presentar defectos como: desgarre o fractura. Debido a esto, una de las opciones es implementar procesos de acabado superficial.

Existe una gran variedad de materiales y formas que pueden ser trabajados con el bruñido con bola como aleaciones o materiales metálicos, por ejemplo El-Axir et al. [25] utilizaron el proceso de bruñido con bola en una aleación de aluminio 2014 en piezas cilíndricas. En el estudio, se diseñó una herramienta que emplea bolas de acero al carbono-cromo, de los resultados obtenidos se observó una mejora en la dureza de la superficie y la redondez de la pieza.

Travieso et al. [27] utilizaron una herramienta diseñada por Gómez Gras et al. [28], la cual cuenta con una bola endurecida de acero al cromo (100Cr6). Evaluaron el proceso de bruñido en barras cilíndricas de 12 mm de diámetro de acero AISI 1038, donde probaron diferentes combinaciones de carga y número de pases, obteniendo que el proceso de bruñido con bola aumentó considerablemente la resistencia a la fatiga.

También se han estudiado los efectos que se producen en las propiedades mecánicas de las superficies de materiales como Ti-6Al-4V, con variaciones del proceso de bruñido con bola como lo es el proceso de bruñido con bola con vibración ultrasónica asistida (Ultrasonic Vibration-Assisted Ball Burnishing Process, por su traducción del inglés) [29].

De acuerdo con lo anterior, el proceso de bruñido con bola ha sido utilizado cada vez más por su bajo costo y tiempo de implementación en comparación con procesos tradicionales de acabado superficial. Se puede montar en una máquina de CNC, al no ser un proceso de arranque de viruta, es más amigable con el ambiente. Por lo que, su aplicación a materiales metálicos y a una basta variedad de componentes industriales, es un área de oportunidad hoy en día.

2.2. Superficies de aplicación

2.2.1. Superficies planas (placas de material)

Los procesos que se aplican en superficies planas son los más sencillos, debido a que la máquina donde se coloca utiliza un solo plano para su realización. Para este proceso no es necesario montar la herramienta en máquinas costosas o complejas, puede ser en fresadoras convencionales. La superficie plana se seleccionó para el estudio del presente trabajo, la cual se puede ver en la Figura 2.1, donde se utilizó una fresadora para bruñir la superficie de las probetas que se estudiaron.

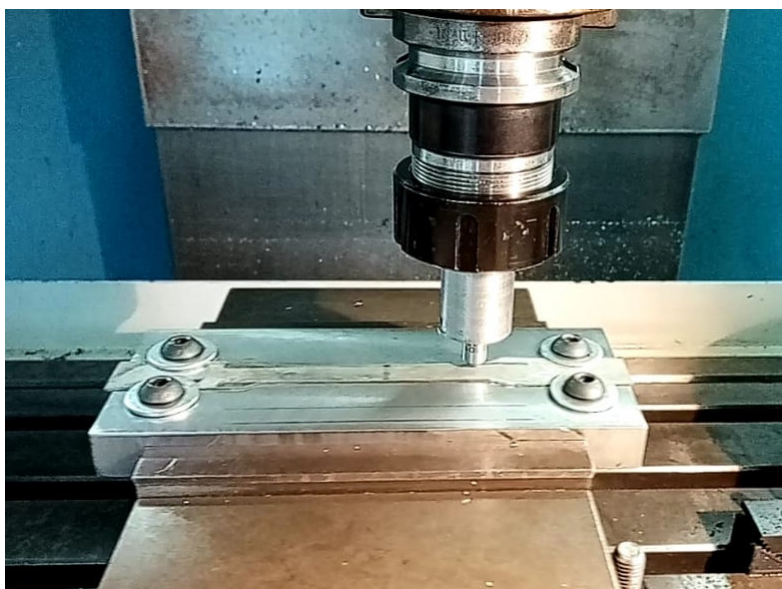


Figura 2.1: Bruñido con bola en superficies planas.

2.2.2. Superficies cilíndricas

El proceso utiliza el bruñidor montado típicamente en tornos convencionales, debido a que son una buena opción al trabajar superficies completamente cilíndricas. La configuración típica es utilizar un bruñidor de un único punto de contacto como se puede observar en la Figura 2.2. Sin embargo, surgen ciertos conflictos cuando se trabajan con piezas con un diámetro pequeño, esto sucede cuando se requiere aplicar una fuerza mayor al valor crítico. Por otro lado, utilizar una fuerza baja puede ser inapropiado y no generar efecto alguno en la pieza. Por lo que, Boozarpoor y Teimouri proponen un bruñidor multicontacto que distribuye uniformemente la presión sobre la superficie cilíndrica y evita el doblamiento del espécimen [30].

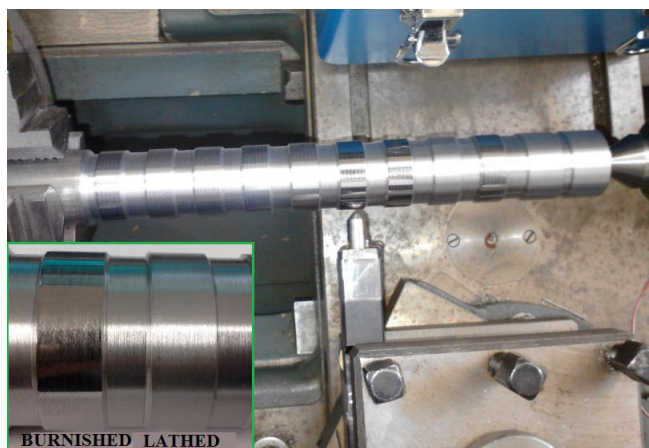


Figura 2.2: Bruñido en superficie cilíndrica [8].

2.2.3. Superficies curvilíneas o complejas

Las piezas con superficies complejas se utilizan frecuentemente en la industria aeroespacial, automotriz, electrónica y la industria de moldes de inyección de plástico. Para la producción de estas superficies es suficiente la aplicación de técnicas de maquinado con tecnologías de fresado de 3 y 5 ejes. Sin embargo, es difícil alcanzar un buen resultado en el acabado de la superficie ya que afectan varios aspectos como las propiedades dinámicas de la máquina, inexactitudes geométricas de la pieza y la selección apropiada del ángulo en el cual se aplica la fuerza [31].

Un estudio más profundo sobre lo anterior lo llevó a cabo Shan et al. [32], el cual concluyó que la deformación y fuerzas generadas durante el proceso de fresado de una pieza con paredes delgadas de acero inoxidable son influenciadas en correlación con la inclinación de la superficie maquinada. Esto fue demostrado utilizando un ángulo de inclinación dentro del rango de los 15° a los 45° , con los cuales se obtienen los valores de fuerzas de corte y deformaciones más bajos. En la Figura 2.3, se puede observar un par de ejemplos de superficies complejas donde se ha aplicado el proceso de bruñido con bola.

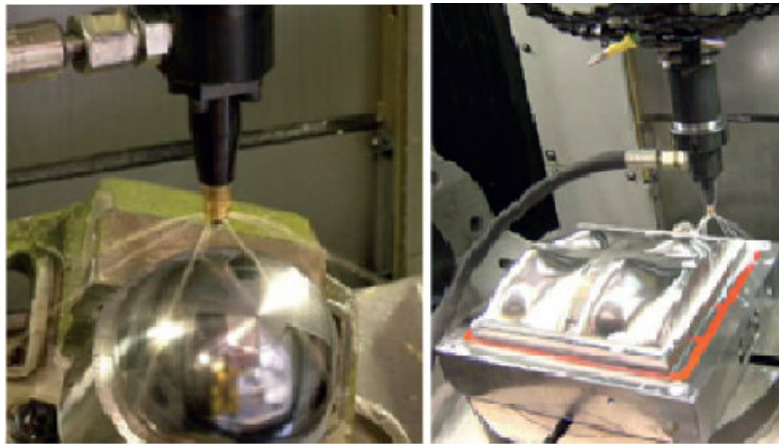


Figura 2.3: a) Superficies esféricas b) Superficies complejas [8].

2.3. Parámetros que influyen en el proceso de bruñido

El proceso de bruñido se conforma de una gran cantidad de parámetros que influyen de manera diferente dependiendo del aspecto que se requiera mejorar o estudiar en el componente industrial. En ocasiones se requiere reducir la rugosidad media de la superficie. En un estudio realizado por Loh et al. [33] basado en un diseño factorial sobre un espécimen de acero AISI 1045, los autores concluyen que el material de la bola, el lubricante, el avance y la profundidad de penetración de la bola tenían un efecto significativo en la calidad de la superficie. Por otro lado, Luca et al. [34] utilizaron los parámetros: fuerza normal de bruñido, avance y velocidad, además de incluir como parámetro la rugosidad media de la pieza antes de ser tratada.

Existen otros estudios que han utilizado diferentes métodos para elegir los parámetros óptimos. Por ejemplo, Ulhe et al. [35] utilizó el método Taguchi con velocidad, avance, profundidad de penetración de la herramienta y número de pases. En otro estudio realizado por Shiou y Chen [36], utilizaron también el método Taguchi utilizando parámetros como material de la bola, velocidad, fuerza y avance obteniendo los parámetros óptimos para un molde de inyección de plástico de acero PDS5. De la literatura revisada, se puede observar que para estudios que tengan como parámetro de salida la rugosidad es necesario obtener la rugosidad media inicial de la superficie que se trate.

En ocasiones se prefiere priorizar la dureza de la superficie y obtener los beneficios que trae consigo como lo son: mayor resistencia a la fatiga y a la corrosión, para lo cual también se han realizado estudios. Por ejemplo, por medio de un diseño factorial Loh et al. [37] concluyeron que parámetros como profundidad de la penetración y el material de la bola, el lubricante y la velocidad de avance tenían una importancia muy significativa en el acabado superficial que deja la herramienta, principalmente en la dureza final. En un estudio realizado por Chomienne et al. [38] en un espécimen de acero inoxidable martensítico arrojó que la fuerza de bruñido es el parámetro más significativo.

En términos generales, la literatura muestra que los parámetros más significativos son: fuerza de bruñido (Fb), velocidad de la herramienta (V), avance de la herramienta (f) y número de pases (n), que realiza la herramienta en la superficie del componente industrial [12]. En la Figura 2.4, se puede observar dos gráficas de los porcentajes de contribución para diversos parámetros de bruñido de un estudio de literatura presentado por Saldaña et al. [8].

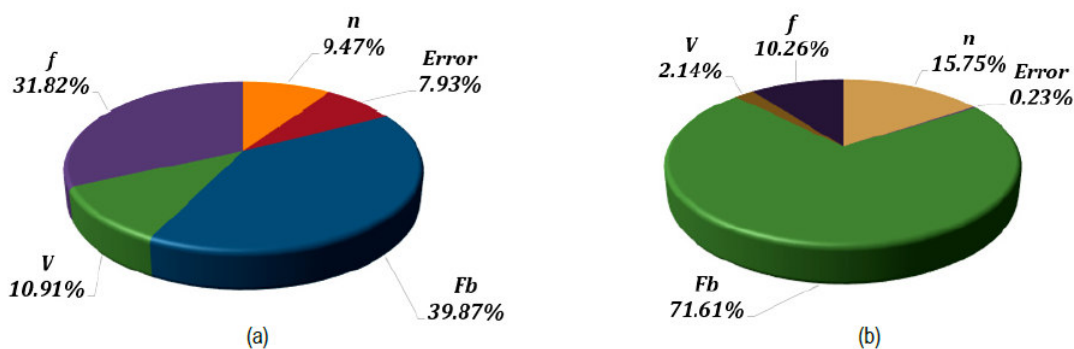


Figura 2.4: Parámetros que contribuyen al mejoramiento de la superficie. (a) [39] (b) [40].

2.4. Tipos de bruñidores

El bruñidor es la herramienta que se utiliza para realizar el proceso de deformación plástica superficial. La herramienta se compone de un cuerpo exterior donde se montan los elementos del bruñidor: muelle, una tapa externa, una tapa interna, una varilla de empuje, rodillo o esfera con casquillo de materiales duros como acero recubierto de cromo, diamante sintético o nitruro de titanio siendo los más comunes de acuerdo con la literatura [11, 41–43].

Se puede montar la herramienta en diversas máquinas de control numérico computarizado CNC, tornos, fresadoras o cepillos mecánicos [44]. Debido a su gran versatilidad también se pueden encontrar en diversos tamaños o ser montados en diversos ángulos según sea el requerimiento [9].

La clasificación de los tipos de bruñidores de acuerdo con sus componentes se divide en tres clases: mecánico, hidrostático y por vibración. De estos, los primeros 2 se utilizan industrialmente mientras que el bruñidor asistido por vibración se encuentra en investigación y no está disponible comercialmente [45].

2.4.1. Bruñidores mecánicos

La característica principal de este tipo de herramienta es el resorte mediante el cual se aplica la fuerza de bruñido a través de un muelle con resorte. El muelle es calibrado comprimiéndolo al inicio del proceso y se considera que la fuerza que es aplicada no presenta fluctuación durante el trabajo dinámico [46]. Aunque se considere idealmente de esta manera, existe una variación de fuerza que se sugiere considerar. La fuerza que se aplica está en función de la constante elástica propia del resorte y se calcula por medio de la ley de Hooke. De manera práctica, esta fuerza se calcula utilizando celdas de carga. En la Figura 2.5, se puede observar una ilustración de este tipo de bruñidor, el cual aplica el mismo funcionamiento pero la bola es sustituida por un rodillo.

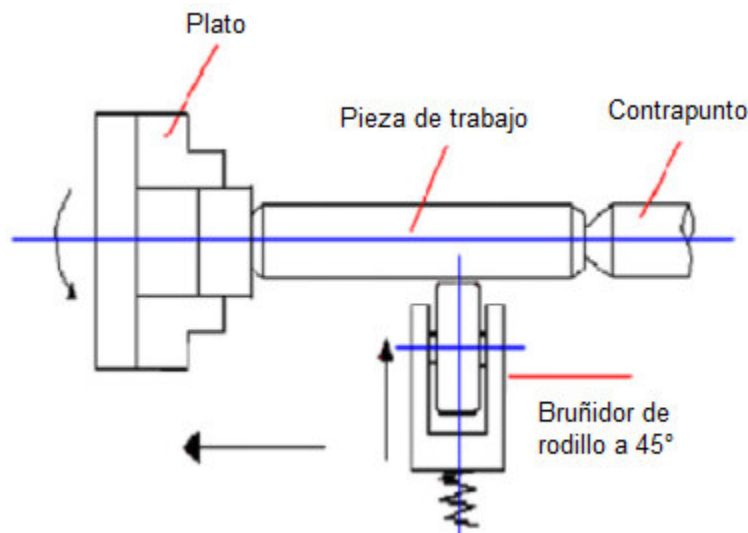


Figura 2.5: Bruñidor de rodillo mecánico [47].

2.4.2. Bruñidores hidrostáticos

Los bruñidores hidrostáticos cuentan con elementos similares a los bruñidores de bola. Sin embargo, la diferencia reside en la manera de aplicar la fuerza a la pieza. En los bruñidores hidrostáticos, la fuerza se suministra mediante una bomba hidráulica, la cual tiene una capacidad de hasta 40 MPa [48], y generalmente utiliza taladrina como agente refrigerante-lubricante. Este bruñidor proporciona una fuerza más precisa y con menores fluctuaciones a diferencia del bruñidor mecánico. Esta herramienta incluye un manómetro el cual mide la presión de la taladrina y es el instrumento con el cual se aplica la fuerza de bruñido [46]. En la Figura 2.6 se puede observar la configuración de la herramienta y la bomba que suministra la presión y por consecuencia la fuerza.



Figura 2.6: Bruñidor de bola hidrostático [49].

2.4.3. Bruñidores asistidos por vibración

El bruñidor asistido por vibración acopla una modificación a los bruñidores convencionales, al introducir un dispositivo oscilador de alta frecuencia. A este proceso se le llama bruñido con bola asistido por vibración VABB (Vibration-Assisted Ball Burnishing, por su siglas en inglés). El fenómeno físico en el cual se basa el proceso es llamado *acoustoplasticity*, también conocido como efecto Blaha o suavizado ultrasónico. Este se manifiesta como la reducción en los esfuerzos cuasi-estáticos requeridos para deformar el material mientras se le aplica una vibración con frecuencia ultrasónica [50]. Los efectos provocados por el proceso en los distintos materiales dependen de las propiedades mecánicas del material de estudio, aunque en general existe una relación directa entre la impedancia acústica y el grado en el que se afecta el material [51].

El parámetro principal en esta herramienta es la frecuencia con la cual se aplica la vibración, diversas fuentes proponen valores desde 60 Hz [52], pasando por 2.1 kHz [28] hasta valores de 40 kHz [53]. La herramienta en general consta de 3 módulos: módulo de regulación de fuerza, módulo de transmisión de vibraciones y módulo de transmisión de fuerza; los cuales se pueden observar en la Figura 2.7.

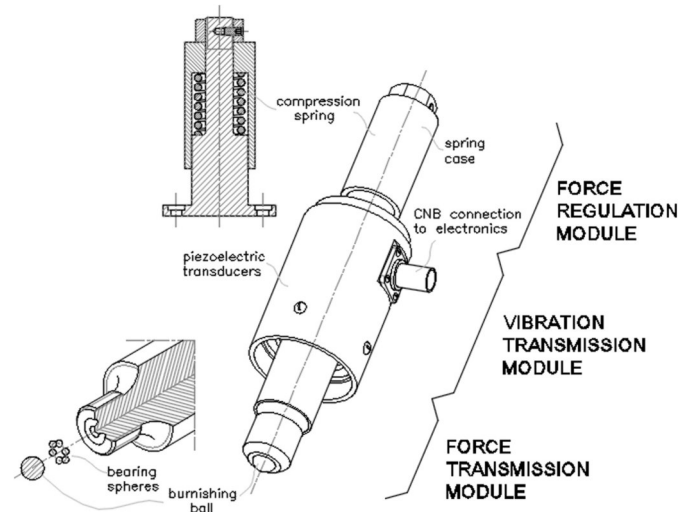


Figura 2.7: Herramienta VABB [51].

2.5. Material y diámetro de la bola del bruñidor

Con base en un estudio del estado del arte realizado por Saldaña et al. [8], se encontró que se utilizan bolas fabricadas de diversos materiales como: carburo de tungsteno, acero recubierto de cromo, acero de alta velocidad, acero de alta dureza, nitruro de silicio y titanio, acero inoxidable, acero al carbono, diamante sintético y diamante natural. Siendo estos los materiales de alta dureza más comunes, de los cuales se prefiere el acero con recubrimiento de cromo, nitruro de silicio y nitruro de titanio por sus propiedades y costos.

Para el diámetro de la bola se encontraron diversas relaciones que se pueden utilizar para hacer una elección adecuada del diámetro que se requiera, ya que el diámetro de la bola tiene efectos en la rugosidad media superficial y en la dureza. En la literatura se utilizan bolas en un rango desde 3 hasta los 20 mm.

- Los diámetros grandes (mayor a 10 mm) al presentar un área de contacto grande sobre la pieza, generan un mejor traslape de la huella del bruñido sobre la pieza, lo cual provoca una mejora en la rugosidad de la superficie.
- Los diámetros pequeños (6 mm por ejemplo), utilizando la misma fuerza de bruñido en comparación con diámetros de bola grande, ocasionan una mayor penetración en la superficie lo que resulta en una mayor compresión de la capa superficial y en una mejora en la dureza de la pieza.

De lo anterior, se deduce que al disminuir el diámetro de la bola con la misma fuerza, se puede disminuir la rugosidad superficial y aumentar la dureza. Por otro lado, al aumentar el diámetro es requerido un valor mayor de fuerza para lograr mejoras aceptables, ya que con diámetros grandes, el área de contacto aumenta y la deformación plástica superficial que se produce es menor.

Para este proyecto, se utilizó un vástago con un fragmento esférico de diamante marca ELLIOTT con número de identificación S375D1 el cual representa la bola. La herramienta se puede observar en la Figura 2.8.



Figura 2.8: Punta de bruñidor con fragmento de diamante utilizada para este proyecto.

2.6. Fuerza de bruñido

La fuerza de bruñido es uno de los parámetros que más se estudian, ya que es el parámetro que más efecto tiene en las mejoras que ofrece el proceso de bruñido según Mahajan y Tajane [44]. Las unidades que se manejan para medir la fuerza varían dependiendo del tipo de bruñidor que se utilice, ya sea unidades de presión si se trata de un bruñidor hidrostático o Newton si es un bruñidor mecánico. De acuerdo con la literatura revisada, la fuerza se puede calcular en función de la geometría de la bola y la presión. Sin embargo, se desprecia un 11% del valor calculado debido a las pérdidas de presión entre la bola y el soporte. Además, algunos autores consideran que si el sistema tiene un ángulo de contacto de 15° entre la herramienta y la superficie de trabajo, se reduce también el valor calculado [14, 17, 54, 55], por lo que la fuerza puede calcularse con la Ec.(2.1).

$$F_b = 0.89 \frac{\pi}{4} d^2 \rho \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) \quad (2.1)$$

Donde: F_b , fuerza de bruñido; d , diámetro de la bola; ρ , presión (carga aplicada).

De acuerdo a la literatura revisada, el 84.9% de valores de fuerza se encuentran en el rango de 7 – 476 N. Por lo que para este proyecto se decidió utilizar valores de fuerza dentro de esos rangos reportados en la literatura. En la Figura 2.9 se muestra que en algunos estudios se manejan valores más altos de fuerza, aunque es poco frecuente.

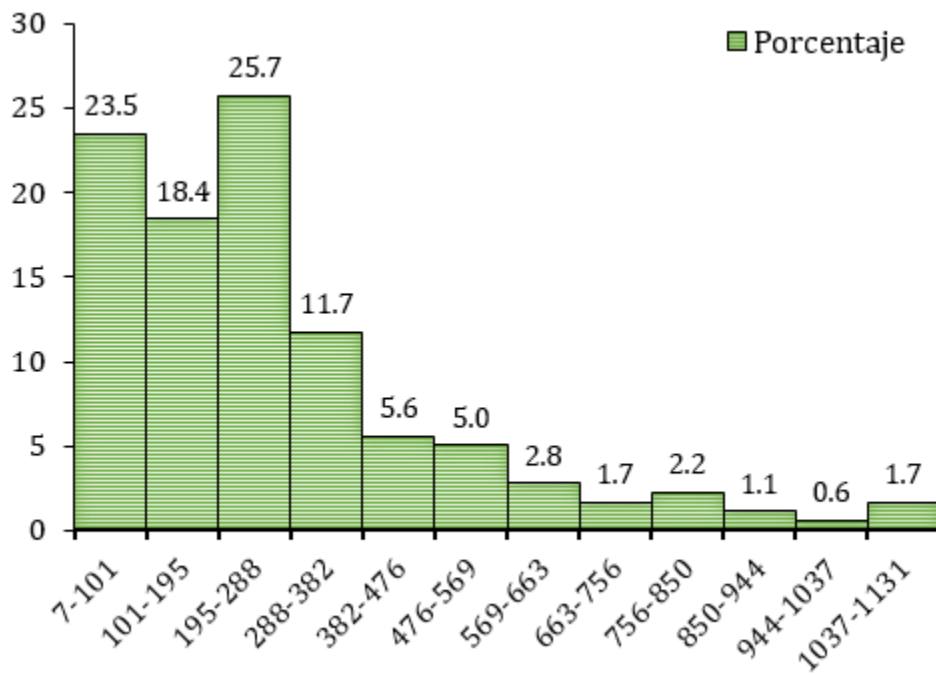


Figura 2.9: Valores de fuerza [N] más comunes [8].

2.7. Velocidad de avance

Es la velocidad con la cual se realiza el proceso de bruñido. Algunos autores utilizan diversos valores dentro del rango desde 1 a 120 m/min [56–58], o incluso valores cercanos a los 500 m/min [59]. El efecto más notable de la velocidad se puede observar en la rugosidad final del material, por lo que la relación entre estas dos variables, de manera general se puede ilustrar en la gráfica de la Figura 2.10. Con una velocidad mayor de bruñido, se pueden provocar vibraciones en la pieza que resultan en irregularidades de la superficie, lo que a velocidades bajas se determinó que se obtienen mejoras en la rugosidad [34].

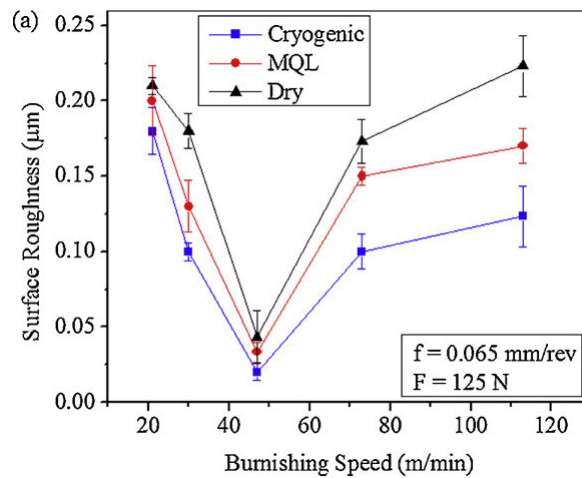


Figura 2.10: Relación de velocidad de bruñido-rugosidad [60].

De acuerdo con la literatura revisada, además que, de acuerdo con Saldaña et al. [8] la mayoría de los estudios utilizan un rango de velocidad de 0.1 a 35 m/min, como se puede observar en la Figura 2.11, por lo que en este proyecto se decidió utilizar valores de velocidad de 1000, 2000 y 3000 mm/min.

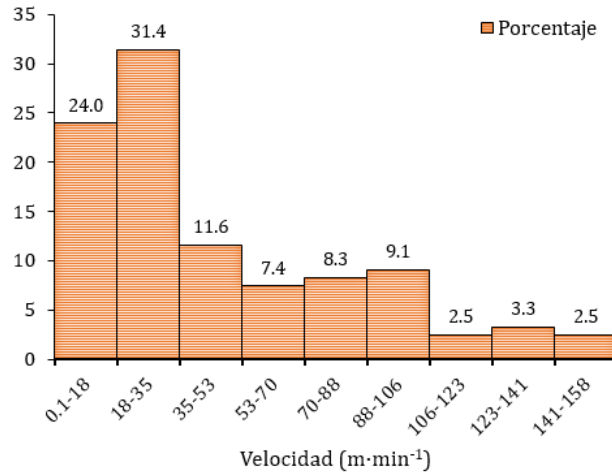


Figura 2.11: Valores utilizados de velocidad de bruñido.

2.8. Profundidad de bruñido en función de la fuerza

Para calcular la profundidad de la herramienta durante el proceso de bruñido, generalmente el estudio propuesto por Korzynski [61] basado en cuatro modelos de mecánica de contactos es utilizado. De éstos, se resuelven para la profundidad de la deformación plástica dejando la ecuación en función de la fuerza y propiedades propias del material. Los modelos principales son:

- Modelo Boussinesq y el valor de fuerza de bruñido calculado en la base: El modelo propone una fórmula para calcular la fuerza la cual se muestra en la Ec.(2.2)

$$P = \frac{2}{3}\pi R_e g^2 \quad (2.2)$$

Donde: R_e , constante del material; g , profundidad de la deformación plástica.

Por lo que al despejar g resulta la Ec.(2.3):

$$g = \sqrt{\frac{3P}{2\pi R_e}} \quad (2.3)$$

- Modelo de Hertz: el cual propone la fórmula de la Ec.(2.4):

$$P = cR_e g^2 \quad (2.4)$$

Donde: R_e , constante del material; g , profundidad de la deformación plástica; c , constante experimental.

Y despejando la profundidad de la deformación plástica resulta la Ec.(2.5):

$$g = \sqrt{\frac{P}{cR_e}} \quad (2.5)$$

Por lo tanto, se puede utilizar cualquier modelo para calcular la profundidad.

2.9. Número de pases

El número de pases es la cantidad de veces que el bruñidor realiza el recorrido total sobre la superficie en tratamiento. De acuerdo con Mahajan [44], este parámetro está en segundo lugar considerado después de la fuerza de bruñido, velocidad y avance. Del total de autores, el 53 % lo incluyeron como objeto de estudio. Este parámetro tiene una relación directa con la dureza y la rugosidad de la superficie, mostrando que al aumentar el número de pases incrementa la dureza superficial, pero hasta un número crítico que depende del material. Ya que superar este número de pases en conjunto con altos valores de velocidad y avance, podría presentarse un fenómeno llamado descamación, lo cual deteriora la rugosidad de la superficie. Cerca del 40 % de los estudios consultados por Saldaña et al. [8] sugieren que un promedio de 2 a 4 pases o un número bajo en conjunto con valores bajos de velocidad y avance, se logran los mejores resultados. Con base en lo presentado anteriormente, para este proyecto solamente se utilizó un pase de la herramienta, por lo que no fue considerado como variable de estudio.

Capítulo 3

Métodos experimentales

3.1. Diseño de experimentos en ingeniería

En el campo de la industria, así como en el de la investigación, el desarrollo de pruebas experimentales ha sido fundamental para observar el comportamiento de los materiales y sus componentes. Comúnmente estos experimentos se realizaban con base en prueba y error, guiados por la experiencia y la intuición. Aunque se obtengan buenos resultados, es necesario proceder de una manera más eficaz, ya que el desarrollo de materiales con propiedades más complejas así lo demanda.

El diseño de experimentos (DoE) es un conjunto de técnicas que permite planear cuáles pruebas se deben realizar, de qué manera y qué resultados se obtendrán. Así, al analizar estadísticamente los resultados, se puede analizar la influencia de los parámetros de estudio sobre la variable de respuesta. Los diseños de experimentos factoriales se utilizan para estudiar el efecto individual y de interacción entre varios factores (cualitativos o cuantitativos) sobre varias respuestas.

El diseño factorial 3^k , considera k como el número de factores que se analizan y el número 3 corresponde al número de niveles de cada factor. Este diseño se recomienda cuando se analizan 3 o 4 factores, si se piensa utilizar más factores representará un alto número de pruebas, por ejemplo, con 4 factores y una sola réplica (3^4) el diseño resultaría en 81 pruebas. Este diseño es útil cuando se busca estudiar efectos cuadráticos (si se piensa que la variable de respuesta no es lineal) y cuando de manera natural los factores poseen 3 niveles o se desean probar 3 niveles [62].

3.2. Parámetros experimentales

En el presente proyecto se utilizó un diseño factorial 3^2 el cual corresponde a 9 pruebas, realizando 2 réplicas de cada ensayo. Por lo que, se tienen 18 pruebas experimentales como se puede observar en la Tabla 3.1. Este diseño se seleccionó de acuerdo a la literatura revisada, ya que en diversos estudios los factores de bruñido (fuerza y velocidad) han presentado curvatura, lo que depende de los niveles seleccionados.

Prueba no.	Factor 1: Fuerza [N]	Factor 2: Velocidad [mm/min]
1	125	1000
2	125	1000
3	250	1000
4	250	1000
5	400	1000
6	400	1000
7	125	2000
8	125	2000
9	250	2000
10	250	2000
11	400	2000
12	400	2000
13	125	3000
14	125	3000
15	250	3000
16	250	3000
17	400	3000
18	400	3000

Tabla 3.1: Diseño experimental empleado.

Se utilizaron 2 de los parámetros más importantes que afectan la calidad superficial y diversas propiedades mecánicas de las piezas manufacturadas, que son la fuerza de bruñido y la velocidad de avance. De acuerdo al análisis de la literatura que se consultó, para este material se utilizaron dentro del diseño de experimentos los valores de fuerza de bruñido de: 125, 250 y 400 N. Estos valores de fuerza se definieron con base en un estudio previo del proceso de bruñido con este mismo material y adicionalmente estos valores están dentro del rango que más se ha empleado de acuerdo con Saldaña et al. [8].

Por otro lado, los valores que se utilizaron relacionados con la velocidad de avance fueron: 1000, 2000 y 3000 mm/min. Estos valores se seleccionaron acorde a la literatura, aunque también fueron definidos por estar dentro del rango de capacidad que proporciona la máquina herramienta que se utilizó. La velocidad de 3000 mm/min es una velocidad alta de la máquina-herramienta, la cual se propuso con el objetivo de reducir considerablemente el tiempo del proceso a nivel industrial, en caso de que este factor no afecte las variables de respuesta.

3.3. Fabricación de probetas

Para el presente proyecto se utilizó lámina de acero TRIP de 1.1 mm de espesor. Este material de baja aleación multifase combina alta resistencia y una buena formabilidad debido a su microestructura de austenita retenida incrustada en una matriz primaria de ferrita.

Las probetas se cortaron mediante láser y la forma se basa en la geometría que propone la norma ASTM E-8 [63]. La dirección de corte fue paralela a la dirección de rolado de la lámina. No fue aplicado ningún tratamiento de acabado superficial previo o posterior al corte, por lo que se midió la rugosidad en los especímenes y se registró una rugosidad superficial media inicial de $1.14 \mu\text{m}$. En la Figura 3.1 (b) se puede observar la geometría de un espécimen utilizado y en la Tabla 3.2 se observan las dimensiones que dicta la norma ASTM E-8.

Dimensión	Valor [mm]
Longitud del calibre (G)	50 ± 0.1
Ancho (W)	12.4 ± 0.2
Radio de la curva (R)	12.5
Longitud general (L)	200
Longitud de la sección de sujeción (B)	50
Ancho de la sección de sujeción (C)	20

Tabla 3.2: Dimensiones del diseño de probeta según la norma ASTM E-8.

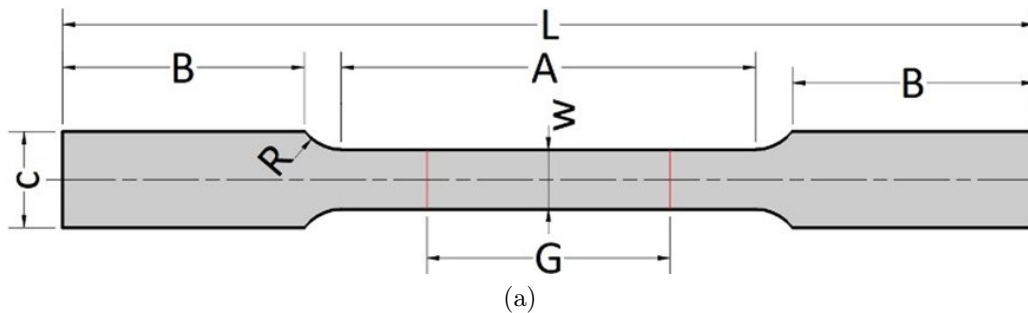


Figura 3.1: a) Geometría con base en la norma ASTM E-8 y b) Espécimen cortado por láser.

3.4. Pruebas de tensión

Las pruebas de tensión se realizaron con una máquina universal marca Instron[®] modelo 8872 con límite de carga de 25 kN. La máquina tiene la capacidad de realizar pruebas de tensión, compresión y fatiga axial. La secuencia de control y la introducción de parámetros se realizaron mediante una computadora con el software WaveMatrix. Esta máquina está gobernada por una unidad de control Fasttrack modelo 8800, la cual contiene ranuras para la conexión de sensores. Se utilizó una de estas ranuras para conectar un extensómetro Instron[®] de 50 mm de calibre para medir la deformación.

La prueba realizada se basó en el manual escrito por Capilla et al. [64]. En el software se configuró la frecuencia de adquisición de datos a 10 Hz, una velocidad de 5 mm/min y un punto de finalización de 25 mm. Se activó el recurso Static Break Detector, el cual, permite detener la secuencia de la prueba antes del punto de ruptura (en aceros HSS un valor de 200 N por debajo de la carga máxima permite detectar la falla del material antes de la fractura) para poder retirar el extensómetro y evitar dañarlo. La secuencia de la prueba y los parámetros que se utilizaron se seleccionaron con base en las especificaciones de la norma ASTM E-8 [63].

Una vez diseñada la prueba, se colocó el espécimen en las mordazas de la máquina, enseguida se montó el extensómetro para realizar la primera parte de la prueba como se muestra en la Figura 3.2. Posteriormente se desmontó y se continuó con la prueba hasta provocar la ruptura de la probeta. Al finalizar la prueba se exportaron los datos de carga (N), desplazamiento (mm) y deformación (%), los cuales se registraron y graficaron.

Posteriormente, por medio de los datos obtenidos y con ayuda de sus respectivas gráficas, se determinaron las propiedades mecánicas como esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}), porcentaje de elongación a la fractura ($\%El$), y esfuerzo de cedencia (σ_Y). Este último utilizando el método de límite elástico compensado al 0.2% de la deformación del origen.

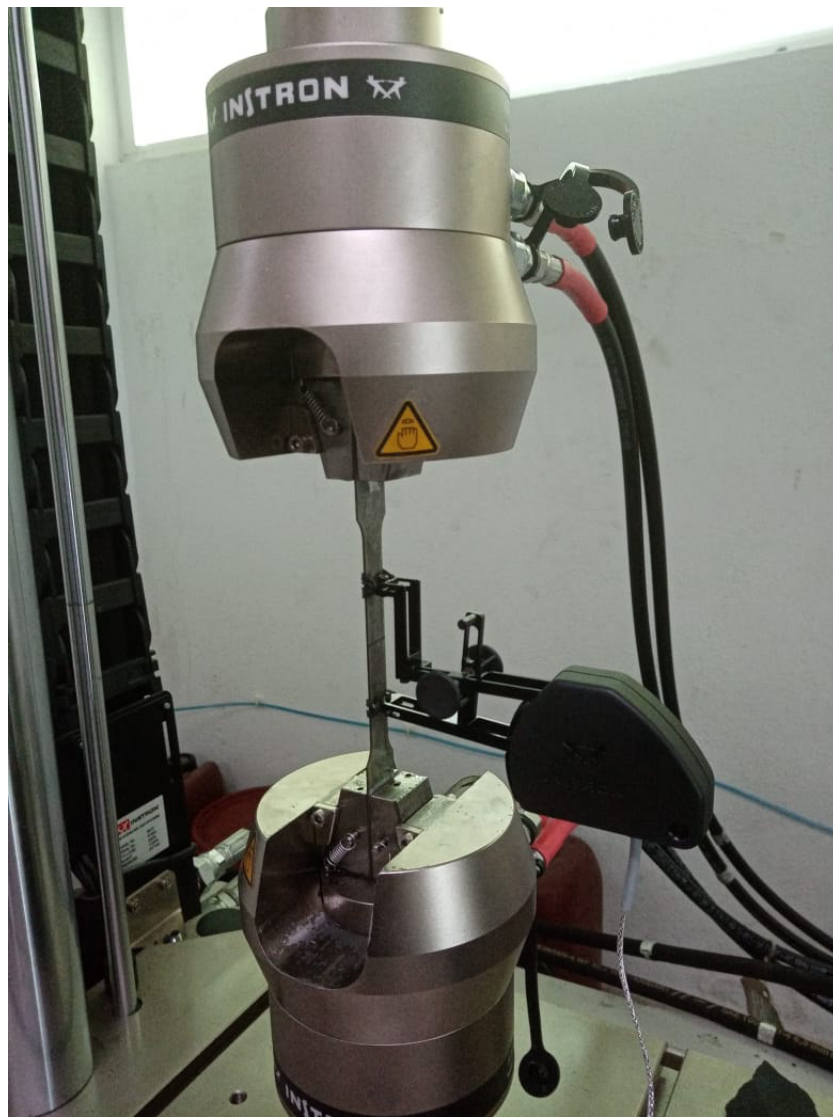


Figura 3.2: Configuración para la prueba de tensión en la máquina Instron® 8872.

3.5. Pruebas de bruñido con bola

Para aplicar las fuerzas de bruñido establecidas en el diseño de experimentos, se utilizó una herramienta novedosa de bruñido con sistema de adquisición de datos y celda de carga que permite medir, aplicar y registrar la fuerza. Se empleó esta herramienta para calibrar el desplazamiento vertical del bruñidor en función de la fuerza de bruñido (ver Figura 3.3). La herramienta de bruñido se montó en una fresadora CNC de 3 ejes marca VIWA® modelo VF1050 M400 con una potencia de entre 10 y 15 hp, la cual implementó las diferentes velocidades de bruñido. Una vez calibrado el desplazamiento vertical del bruñidor en función de la fuerza, se retiró del sistema la celda de carga y se realizó el proceso de bruñido acorde a los ensayos experimentales planteados en el diseño de experimentos.



Figura 3.3: Herramienta de bruñido con sistema de adquisición de datos.

Para la sujeción de la probeta se utilizó un molde maquinado, con la geometría de la probeta y en los extremos se utilizaron tornillos con arandelas de presión para mantener firme la probeta, esta configuración se puede observar en la Figura 3.4.



Figura 3.4: Probeta sujeta en el molde durante el proceso de bruñido.

Posteriormente, se realizó cada uno de los ensayos experimentales de bruñido de manera aleatoria acorde al DOE propuesto, implementando el valor de la fuerza según la corrida experimental (125, 250 y 400 N), así como el valor correspondiente de la velocidad de avance (1000, 2000 y 3000 mm/min). Se realizaron 2 réplicas de cada probeta, por lo que se obtuvieron 18 especímenes tratados con bruñido a las diversas condiciones planteadas. Un rugosímetro marca Mitutoyo® modelo surfstest SJ-310 se empleó para medir la rugosidad superficial media (R_a) (parámetro más empleado a nivel industrial para medir calidad superficial) en la probeta control y aquellas bruñidas a diferentes condiciones de acuerdo a la norma ISO 4287. La rugosidad superficial media (R_a) se determina como la integral del valor absoluto de la altura del perfil de rugosidad superficial $|y(x)|$ sobre la longitud de evaluación (l), como se muestra en la Ec. 3.1. Un promedio de 3 mediciones se llevó a cabo para cada probeta.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.1)$$

3.6. Trayectorias de bruñido

Para el proceso de bruñido se utilizó una trayectoria paralela a la dirección de tensión de la probeta, con un tamaño de paso del $S_0 = 50\%$ del trazo del vástago de diamante como se puede observar en la Figura 3.5. Se consideró bruñir 10 mm más fuera de la zona de bruñido para alcanzar una deformación uniforme ya que en pruebas previas se presentó fractura fuera de esta zona al realizar las pruebas de tensión lo cual se puede visualizar en la Figura 3.6.

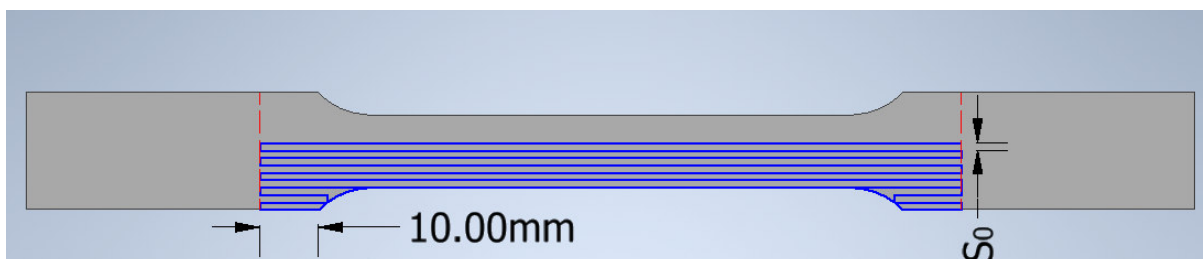


Figura 3.5: Trayectoria de bruñido.

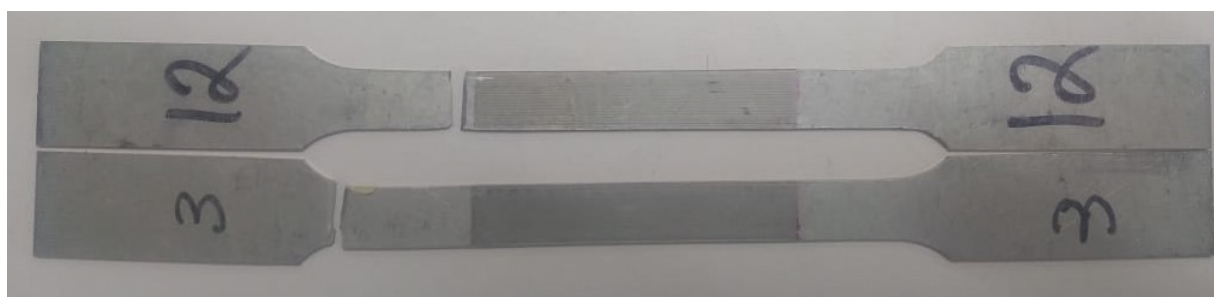


Figura 3.6: Probetas con fractura fuera de la zona de bruñido.

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1. Estudio estadístico para evaluar el efecto de los parámetros de bruñido sobre las propiedades elasto-plásticas

Para el análisis estadístico de los datos de respuesta, así como para realizar el análisis de varianza ANOVA (Analysis Of Variance, por sus siglas en inglés) de las distintas variables, se utilizó el paquete estadístico Design Expert v13. El cual ayudó de manera significativa en la realización de cálculos, sugerencia de transformaciones en caso de que las respuestas no tuvieran una distribución normal y en la elaboración de gráficas.

Se realizó en el paquete estadístico el diseño de experimentos que se utilizó en el presente proyecto, asignando a la fuerza de bruñido la notación (A) y a la velocidad de avance la letra (B), así como la interacción (AB) entre ambos factores. El análisis de resultados se presenta a continuación .

Para cada variable se revisó que los datos de respuesta cumplieran con los supuestos de normalidad. De acuerdo con Gutiérrez y De la Vara [62], existen 3 supuestos de normalidad que debe cumplir la serie de datos de la respuesta para considerar que proceden de una distribución normal y con ello realizar el respectivo ANOVA. Los supuestos son: normalidad, varianza constante e independencia. El software utilizado en este proyecto a su vez utiliza la gráfica de probabilidad para normalidad, la gráfica de residuos contra supuestos para la varianza constante y la gráfica de orden contra la distancia de Cook.

La respuesta rugosidad superficial media (R_a), no cumplió los supuestos de normalidad, el software sugirió realizar una transformación de logaritmo natural, la cual se aplicó para cumplir el supuesto de normalidad. Posteriormente, se procedió al ANOVA.

La Tabla 4.1 muestra el ANOVA para la variable de respuesta rugosidad superficial media (R_a), la cual muestra que los factores que muestran efecto significativo sobre la variable de respuesta son aquellos con un valor $p < 0.0001$ (95 % de nivel de confianza). Por lo que se puede observar que únicamente la fuerza de bruñido (A) presenta un efecto sobre la rugosidad. En otras palabras un cambio en la magnitud de la fuerza de bruñido ocasionará un cambio sustancial en la rugosidad media de la superficie del acero TRIP. Por otro lado, se puede observar que el factor principal de velocidad de bruñido (B) no tiene un efecto significativo en la rugosidad media. En otras palabras, si se utiliza cualquier velocidad se obtendrá la misma rugosidad superficial media. Esto sugiere utilizar la velocidad más alta de avance para reducir el tiempo del proceso, el cual repercute directamente en una mayor cantidad de piezas maquinadas en menor tiempo, ahorro de energía y menor desgaste del equipo CNC donde se aplica el proceso.

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrada	Valor f	Valor p	% Contribución
A -FB	4.0437	1	4.0437	146.488	<0.0001*	88.5
B -V	0.0056	1	0.0056	0.204	0.6596	0.1
AB	0.0619	1	0.0619	2.2453	0.1598	1.4
A^2	0.0233	1	0.0233	0.8445	0.3762	0.5
B^2	0.06107	1	0.06107	2.2125	0.1627	1.3
Residual	0.3312	12	0.0276			7.2
Total	4.5692	17				100

* Altamente significativo

Tabla 4.1: Tabla del ANOVA para la variable rugosidad (R_a).

Como se puede observar en la Tabla 4.1 la fuerza de bruñido juega un rol altamente significativo en la rugosidad media superficial con un porcentaje de contribución de alrededor del 89 % lo que ha sido comprobado por otros autores [39]. Por otro lado, la velocidad con aproximadamente 1.4 % no aporta en la determinación de la rugosidad media superficial.

En la Figura 4.1 se pueden observar las combinaciones de los diferentes parámetros con sus respectivos resultados de rugosidad media. Por un lado, se puede observar que utilizando fuerzas de bruñido bajas (e.g. 150 N), se tiene una disminución en la rugosidad. En este mismo sentido, el uso de grandes fuerzas de bruñido (e.g. 400 N) incrementa la variabilidad de la rugosidad. Esto está relacionado a la generación de crestas y valles en la superficie del material debido a las deformaciones generadas por la fuerza de compresión aplicada. Por otro lado, la velocidad de bruñido tiene un efecto menos significativo en la disminución de la rugosidad, lo que corrobora los resultados del ANOVA. Finalmente, se observa que todos los parámetros de bruñido proporcionan una rugosidad media menor a la rugosidad de la probeta sin tratamiento (R_a) de $1.14\mu\text{m}$.

El proceso de bruñido permitió mejorar la rugosidad superficial media de la lámina de acero TRIP, disminuyendo su rugosidad de $1.14\mu\text{m}$ a $0.2\mu\text{m}$, logrando una reducción del 82.5 % por medio de una fuerza de bruñido y una velocidad de avance de 125 N y 3000 mm/min. Además, se recomienda utilizar en el proceso de bruñido sobre este acero, una velocidad de 3000 mm/min ya que la velocidad no mostró efecto significativo sobre la rugosidad. Esta velocidad máxima de avance lograda con el equipo CNC permite disminuir el tiempo de maquinado y reducir costos de operación del proceso en este material.

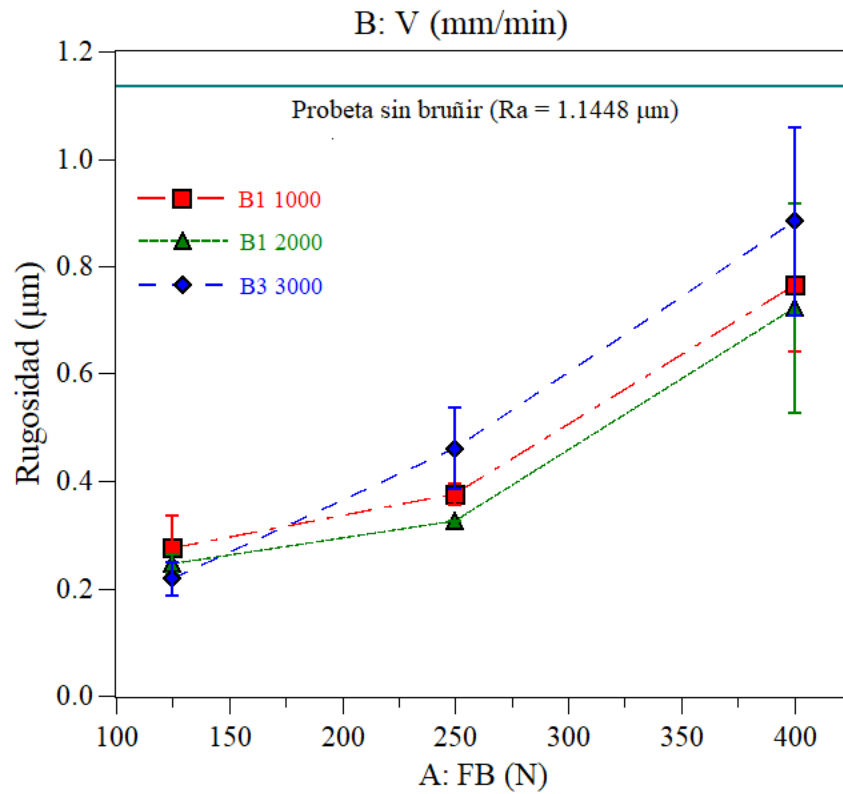


Figura 4.1: Rugosidad superficial media (R_a) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.

Para el esfuerzo de cedencia (σ_Y), una vez cumplidos los supuestos de normalidad, se procedió a realizar el ANOVA. Similar a la variable de rugosidad, se encontró mediante el ANOVA (ver Tabla 4.2), que la fuerza de bruñido es el factor que tiene efecto significativo sobre el esfuerzo de cedencia (σ_Y), mientras que la velocidad de avance (B) no muestra efecto significativo.

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrada	Valor f	Valor p	% Contribución
A -FB	26752.01	1	26752.01	96.0478	<0.0001*	86.3
B -V	305.6983	1	305.6983	1.0975	0.3154	1.0
AB	485.4394	1	485.4394	1.7428	0.2114	1.6
A^2	45.1544	1	45.1644	0.1621	0.6942	0.1
B^2	123.21	1	123.21	0.4423	0.5185	0.4
Residual	3342.33	12	278.5280			10.8
Total	30984.65	17				100

* Altamente significativo

Tabla 4.2: Tabla del ANOVA de la variable esfuerzo de cedencia (σ_Y).

Adicionalmente, en la Tabla 4.2 se muestra que la fuerza de bruñido es el parámetro más significativo que afecta el esfuerzo de cedencia (86.5% de contribución aproximadamente). Aunque, la velocidad (cerca de 1.5% de contribución) como en el caso anterior no tiene influencia en la determinación del esfuerzo de cedencia final.

En la Figura 4.2 se puede observar de manera más clara los resultados obtenidos así como un nivel de referencia tomado del esfuerzo de cedencia de la probeta no tratada ($\sigma_Y = 444$ MPa). Caso contrario al observado con la rugosidad, mientras más alta sea la fuerza de bruñido, mayor es el incremento del esfuerzo de cedencia con un comportamiento casi lineal. Con base en estos resultados, es posible declarar que mediante el proceso de bruñido, se puede modificar el esfuerzo de cedencia para aplicaciones en las cuales se requiera trabajar en el rango elástico de los materiales. La gráfica también corrobora que la velocidad de avance en los niveles evaluados experimentalmente no presenta influencia en el esfuerzo de cedencia (σ_Y). El proceso de bruñido permite incrementar el esfuerzo de cedencia del acero TRIP, aumentando el valor de 444 MPa hasta 561 MPa, logrando un aumento del 79% por medio de una fuerza de bruñido y una velocidad de avance de 400 N y 2000 mm/min.

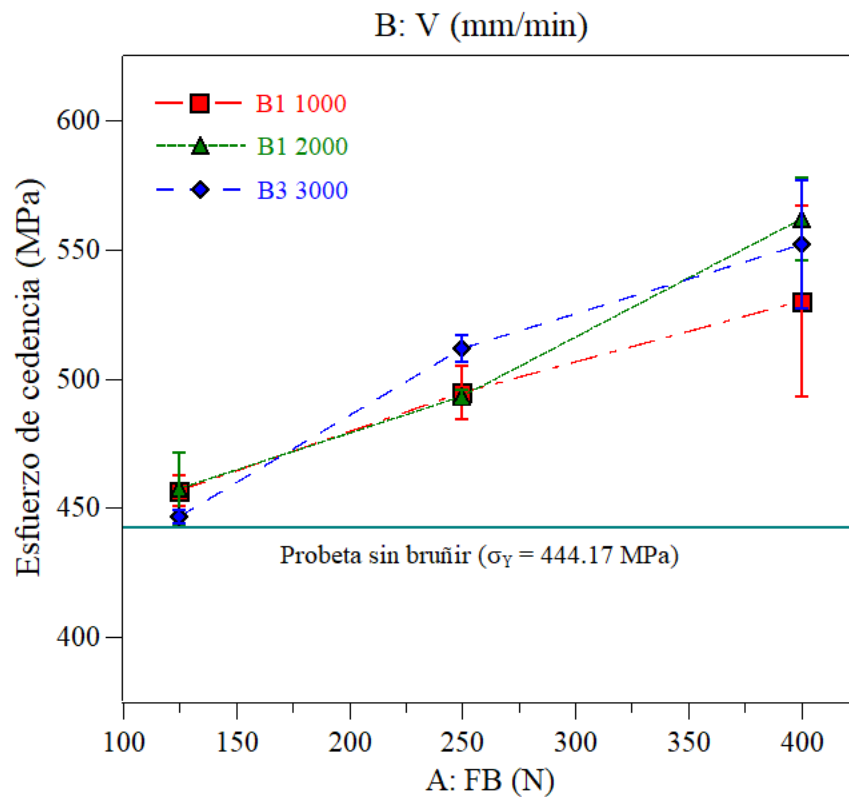


Figura 4.2: Esfuerzo de cedencia (σ_Y) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.

La Tabla 4.3 muestra el ANOVA para la variable de respuesta de esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}), se puede observar que los factores principales, así como su interacción no muestran un efecto significativo sobre el esfuerzo último a la tensión. Por lo que, no se observa un cambio del esfuerzo último a la tensión independientemente de la fuerza de bruñido o velocidad de avance aplicadas con el proceso sobre el acero. Esto se puede corroborar en los datos del valor p listados en la Tabla 4.3, esto debido a que la variable presentó una alta variabilidad.

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrada	Valor f	Valor p	% Contribución
A - FB	0.0888	1	0.0888	0.0002	0.9876	0.0011
B - V	392.471	1	392.471	1.0997	0.3149	5.1
AB	507.398	1	507.398	1.4218	0.2561	6.6
A^2	345.056	1	345.056	0.9668	0.3448	4.5
B^2	2158.283	1	2158.283	6.0478	0.03	28.2
Residual	4282.43	12	356.87			55.9
Total	7655.39	17				100

* Altamente significativo

Tabla 4.3: Tabla del ANOVA para el esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}).

La respuesta del esfuerzo de último a la tensión con la fuerza de bruñido y velocidad es mostrada en la Figura 4.3. Se observa que el (σ_{UT}) presenta valores menores que el valor de referencia de la probeta sin tratar, para todos los casos analizados. La velocidad de bruñido no tiene un efecto significativo. Aunque en los casos donde se utilizan velocidades de bruñido de 2000 y 3000 mm/min se observa una tendencia creciente con los incrementos de la fuerza.

La condición de velocidad de 1000 mm/min muestra una disminución significativa en el (σ_{UT}) al aumentar la fuerza hasta 400 N. Sin embargo, estos resultados presentan una variabilidad más amplia. Se puede calcular que el mayor decremento en los valores se presentó por medio de una fuerza de bruñido y una velocidad de avance de 250 N y 1000 mm/min, reduciendo su valor de 736.12 MPa a 677.14 MPa, lo que representa 8% de reducción.

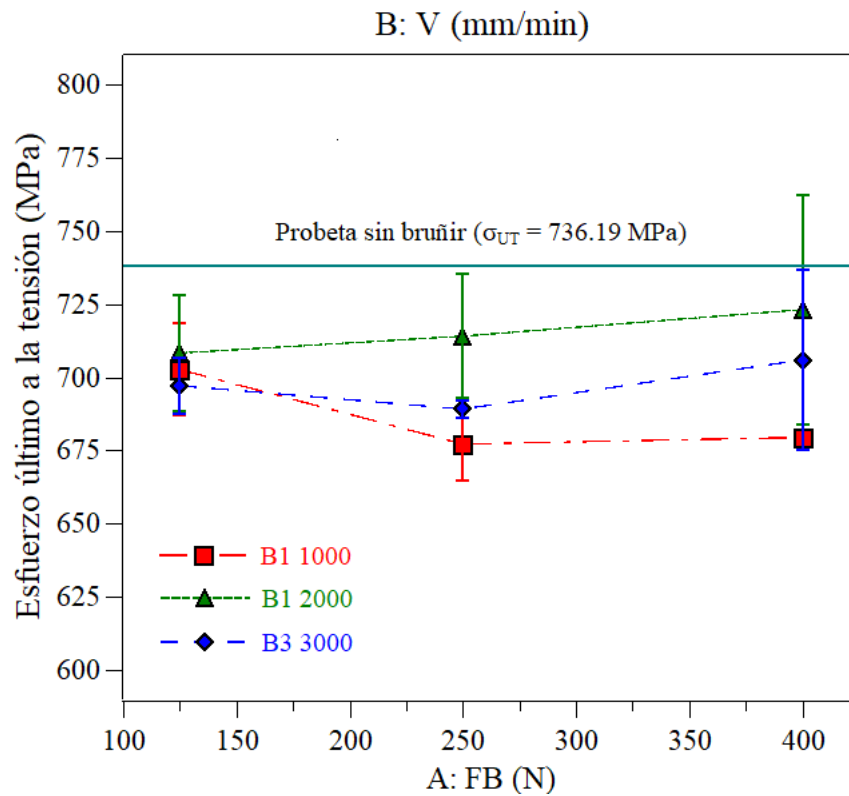


Figura 4.3: Esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.

Por último, la Tabla 4.4 muestra el ANOVA para el porcentaje de elongación a la fractura ($\%El$) una vez cumplido el supuesto de normalidad. Para esta variable de respuesta se observa un resultado diferente a las otras respuestas analizadas. La velocidad de bruñido resultó ser el factor significativo, mientras que la fuerza de bruñido no mostró efecto significativo. Por lo que, la velocidad de avance produce un cambio significativo en el ($\%El$), sin importar el nivel de la fuerza de bruñido empleada en este estudio. La interacción de ambos factores mostró un efecto significativo (36% de contribución aproximadamente); sin embargo, esto se debe a la influencia de la velocidad (cerca de 28.5% de contribución) sobre la respuesta.

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrada	Valor f	Valor p	% Contribución
A-FB	3.008×10^{-5}	1	3.008×10^{-5}	0.445	0.5173	1.1
B-V	7.64×10^{-4}	1	7.64×10^{-4}	11.312	0.0056	26.5
AB	1.039×10^{-3}	1	1.039×10^{-3}	15.382	0.002	36.0
A^2	1.0805×10^{-4}	1	1.0805×10^{-4}	2.6705	0.1281	6.5
B^2	2.84×10^{-5}	1	2.84×10^{-5}	0.4207	0.528	1.9
Residual	0.00081	12	6.75×10^{-5}			28.0
Total	0.0029	17				100

* Altamente significativo

Tabla 4.4: Tabla del ANOVA para el porcentaje de elongación ($\%El$).

Con base en los resultados del ANOVA, se esperaba obtener una influencia más significativa de los parámetros utilizados en la variación del ($\%El$). Sin embargo, se observó que al aplicar una fuerza de bruñido pequeña (125 N) es posible incrementar el ($\%El$) hasta 32.5 %, en comparación con el espécimen sin bruñir ($\%El=25\%$). Con base en esto se puede utilizar cualquier valor de velocidad que sea conveniente y obtener resultados bastante similares (ver Figura 4.4). Si lo que se desea es incrementar el ($\%El$) del material para alguna aplicación particular, se recomienda utilizar la fuerza de bruñido de 125 N con la máxima velocidad empleada en este estudio (3000 mm/min). Lo anterior, por un lado, permitirá reducir el tiempo de maquinado del proceso al emplear la máxima velocidad evaluada. Por otro lado, el utilizar la mínima fuerza de bruñido permitirá reducir el desgaste de la herramienta y el consumo de energía.

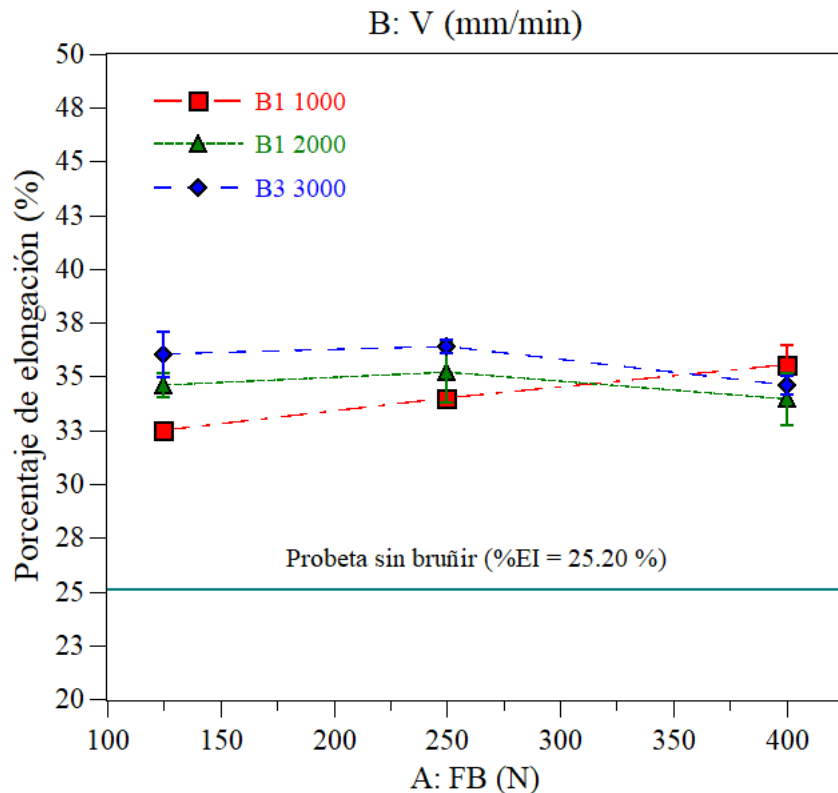


Figura 4.4: Porcentaje de elongación ($\%El$) en función de la velocidad y fuerza de bruñido.

El análisis de resultados muestra que para las variables de respuesta no se presentaron efectos cuadráticos a excepción del σ_{UT} . Lo anterior, para los niveles de fuerza y velocidad empleados en este estudio.

4.2. Resultados de las propiedades elasto-plásticas (esfuerzo de cedencia, esfuerzo último a la tensión, deformación uniforme y % de elongación a la fractura)

Las curvas esfuerzo-deformación fueron realizadas utilizando el promedio de los especímenes bruñidos con las mismas condiciones. La Figura 4.5 (a), (b) y (c) presenta las curvas esfuerzo-deformación para las tres velocidades de bruñido 1000 mm/min, 2000 mm/min y 3000mm/min. Primeramente, se puede observar que el esfuerzo de cedencia se incrementa con el aumento en la fuerza de bruñido, teniendo valores máximos para la fuerza de bruñido de $F = 400\text{N}$.

El valor máximo del esfuerzo de cedencia $\sigma_Y = 561\text{ MPa}$ es obtenido con la velocidad de 2000 mm/min. Esto está relacionado con los niveles de micro-deformación plástica generada en el material los cuales contribuyen a retrasar el inicio de la fluencia en tensión, incrementando el punto de cedencia. También puede ser observado en todas las condiciones que el incremento en la fuerza de bruñido genera una transición más aguda de la zona elástica a la zona plástica.

Por otro lado, el esfuerzo último a la tensión de las probetas bruñidas es ligeramente disminuido respecto al valor encontrado en la probeta sin bruñir. Como se observa en las curvas esfuerzo-deformación de las probetas bruñidas, éstas describen de forma más suave el endurecimiento por deformación del material.

Finalmente, se puede observar que la deformación uniforme ϵ_U se incrementa con el proceso de bruñido, incluso utilizando fuerzas pequeñas. Para la probeta virgen se obtuvo una deformación uniforme de 22 % mientras que para las probetas bruñidas se obtuvo un valor máximo de 32 % con una fuerza de bruñido y velocidad de 250 N y 3000 mm/min, respectivamente.

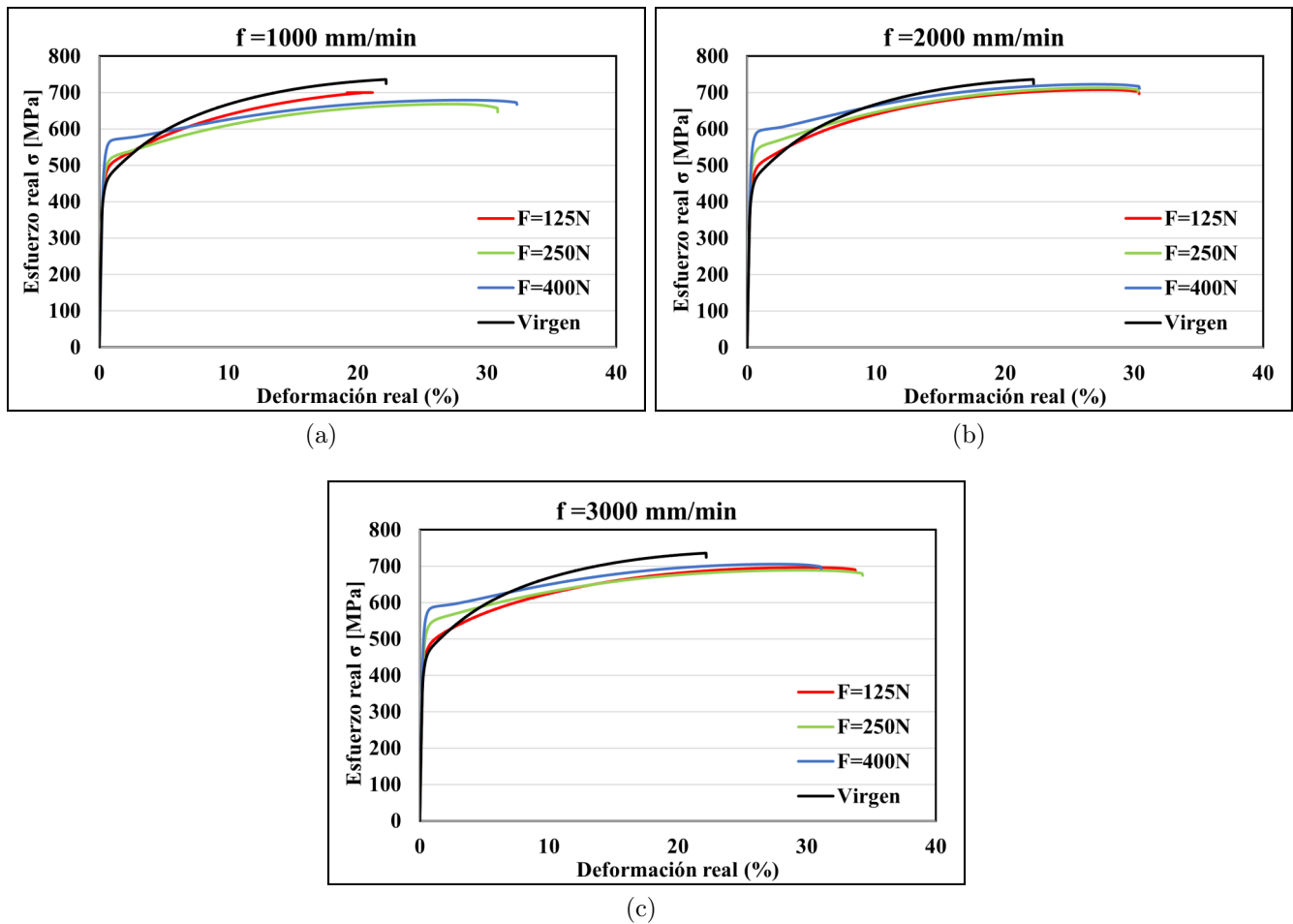


Figura 4.5: Curvas esfuerzo-deformación de diferentes fuerzas para velocidad de a) 1000 mm/min, b) 2000 mm/min y c) 3000 mm/min.

El análisis del porcentaje de elongación a la fractura ($\%El$) del material, el cual es tomado como una referencia para la ductilidad, es presentado en la Figura 4.6. En primera instancia se puede observar que la probeta sin bruñir presenta un $\%El=25.4\%$. Por otro lado, las probetas bruñidas muestran un incremento significativo en este parámetro, alcanzando un valor máximo de $\%El=36.4\%$ para una fuerza de 250 N y una velocidad de 3000 mm/min. Sin embargo, la diferencia en el $\%El$ al utilizar una $F=150 \text{ N}$ se obtiene un $\%El=36.05\%$. Se puede observar que la velocidad de bruñido tiene poca influencia en $\%El$ siendo el parámetro más significativo la fuerza de bruñido. Sin embargo, el utilizar velocidades altas en el proceso de bruñido permite la disminución del tiempo del proceso. De manera similar, el uso de fuerzas de bruñido bajas evita el desgaste excesivo de la herramienta, lo cual representa un ahorro cuando se requiere utilizar el proceso de forma masiva. El resumen general con los resultados de las propiedades elato-plásticas determinadas son listados en la Tabla 4.5.

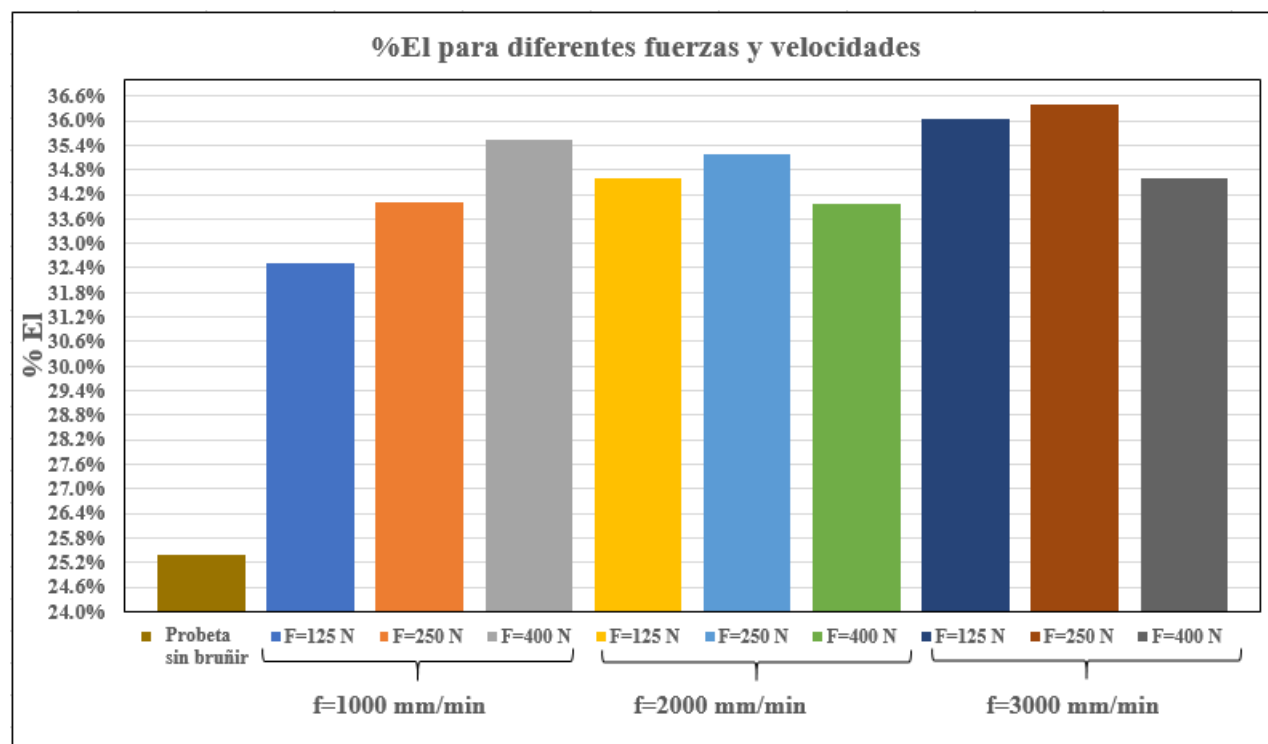


Figura 4.6: %El de todos los especímenes utilizados, agrupados por velocidad de bruñido.

Parámetros	Probetas	σ_Y [MPa]	σ_{UT} [MPa]	Eu [%]	%El
$Fb= 125$ N, $f= 1000$ mm/min	1,2	456.52	702.59	0.204	32.50
$Fb= 250$ N, $f= 1000$ mm/min	3,4	494.54	677.14	0.245	34.00
$Fb= 400$ N, $f= 1000$ mm/min	5,6	530.02	679.43	0.283	35.55
$Fb= 125$ N, $f= 2000$ mm/min	7,8	457.35	708.23	0.278	34.60
$Fb= 250$ N, $f= 2000$ mm/min	9,10	493.05	713.99	0.272	35.20
$Fb= 400$ N, $f= 2000$ mm/min	11,12	561.77	723.06	0.274	33.95
$Fb= 125$ N, $f= 3000$ mm/min	13,14	446.48	697.06	0.295	36.05
$Fb= 250$ N, $f= 3000$ mm/min	15,16	511.63	689.08	0.287	36.40
$Fb= 400$ N, $f= 3000$ mm/min	17,18	551.86	705.90	0.280	34.60
Virgen		444.00	736.12	0.222	25.4

Tabla 4.5: Promedio de los resultados de las propiedades elasto-plásticas.

4.3. Resultados de rugosidad

Para analizar los resultados de rugosidad se graficaron los perfiles de 3 probetas. Primeramente, la probeta virgen tomada como referencia, una probeta tratada con una fuerza de bruñido de $F=125$ N y una velocidad de 3000 mm/min y finalmente una probeta tratada con una fuerza de $F=400$ N y una velocidad de $f=3000$ mm/min. En las Figuras 4.7 y 4.8 se puede observar el patrón de rugosidad de la probeta sin bruñir, alcanzando valores de hasta $5 \mu\text{m}$ en los picos y $-3.5 \mu\text{m}$ en los valles.

El valor de rugosidad media de la probeta sin bruñir fue $R_a = 1.14 \mu\text{m}$. En la Figura 4.7 se puede observar el perfil de rugosidad de la probeta bruñida con una fuerza $F=125$ N y una velocidad de $f=3000$ mm/min en la cual se observan valores máximos de $0.96 \mu\text{m}$ en los picos y $-1.04 \mu\text{m}$ en los valles con una $R_a = 0.39 \mu\text{m}$. Con estos resultados, es claro que el uso de los parámetros adecuados del proceso de bruñido permite reducir la rugosidad y mejorar la calidad superficial de forma significativa.

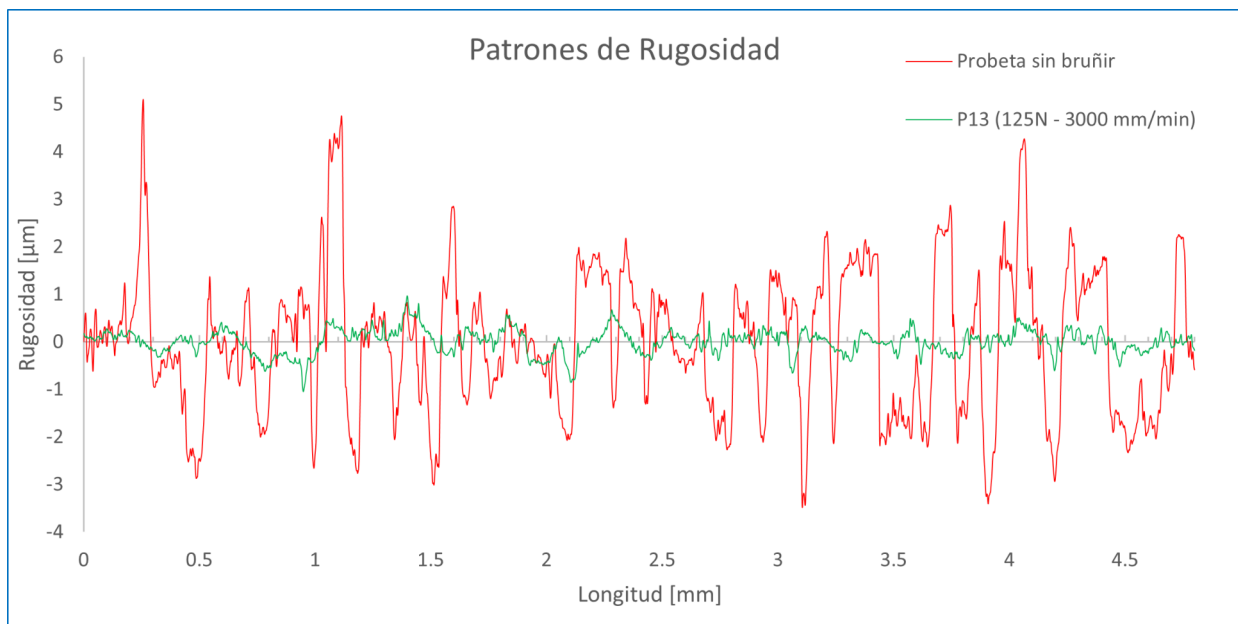


Figura 4.7: Patrones de rugosidad con la probeta bruñida con $F=125$ N y $f=3000$ mm/min y la probeta sin tratar.

Finalmente, para mostrar el efecto que tiene el uso de fuerzas grandes en la calidad superficial, la rugosidad media (R_a) de la probeta con los parámetros de bruñido más altos que se seleccionaron en el DOE del presente proyecto ($F=400$ N y $f=3000$ mm/min) en comparación con la probeta sin bruñir, se presentan en la Figura 4.8. Al utilizar una fuerza de bruñido alta, la rugosidad del material no se ve reducida. Por el contrario, se genera la marca de la huella de contacto del bruñidor sobre el material, esto por el alto nivel de deformación plástica que induce el bruñidor sobre la superficie de la probeta.

Como se puede observar en el perfil de rugosidad mostrado en la Figura 4.8, el proceso de bruñido genera un patrón de tipo sinusoidal con crestas y valles bien definidos de magnitud similar al obtenido en la probeta sin bruñir.

De lo anterior, se puede declarar que al utilizar fuerzas mayores a 400 N, la herramienta induciría una huella de contacto mayor, deformando aún más la superficie del material y ocasionando que, en lugar de reducir la rugosidad, ésta incremente por arriba del valor de la probeta sin tratar.

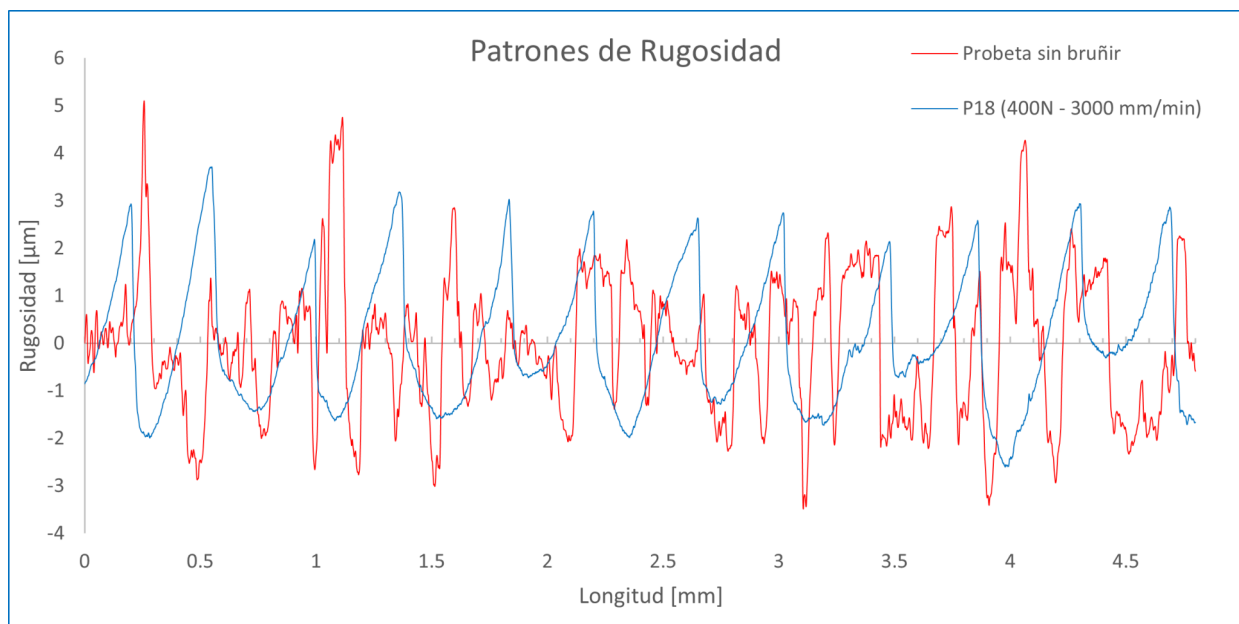


Figura 4.8: Patrones de rugosidad con la probeta bruñida con $F=400$ N y $f=3000$ mm/min y la probeta sin tratar.

Capítulo 5

Conclusiones

Se diseñó y realizó el DOE con un modelo 3^k , para analizar la influencia de la fuerza y velocidad de bruñido en el acabado superficial y propiedades elasto-plásticas del acero TRIP. Se desarrollaron 4 ANOVA's para determinar la influencia de los parámetros de bruñido en la rugosidad media superficial (R_a), el esfuerzo de cedencia (σ_Y), el esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}) y el porcentaje de elongación a la fractura ($\%El$). De acuerdo a los resultados obtenidos del presente estudio, se presentan las siguientes conclusiones:

- La rugosidad media (R_a) es principalmente influenciada por la fuerza de bruñido. Por otro lado, se observó que la velocidad no tiene un efecto considerable. El valor más bajo (mejor calidad superficial) de rugosidad fue un $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ obtenido con una fuerza de $F = 125 \text{ N}$. Por otro lado, con una fuerza de bruñido alta ($F = 400 \text{ N}$), la rugosidad media es incrementada hasta un valor de $R_a = 1.006 \mu$ debido a los niveles de deformación plástica ocasionados por la formación de crestas y valles pronunciados.
- El esfuerzo de cedencia (σ_Y) es influenciado principalmente por la fuerza de bruñido y en menor medida por la velocidad de bruñido. Para una fuerza de bruñido alta ($F = 400 \text{ N}$) el esfuerzo de cedencia incrementa hasta un valor $\sigma_Y = 573 \text{ MPa}$, representando un incremento del 29% respecto a la probeta sin bruñir. Aunado a esto, el uso de fuerzas de bruñido elevadas genera una transición más aguda entre la zona elástica y plástica del material.
- El esfuerzo último a la tensión (σ_{UT}) de acuerdo con el ANOVA, no depende de ningún factor, ya que el porcentaje de contribución de los parámetros es de 4.5% y 32.9% para fuerza y velocidad respectivamente. No se considera la velocidad como el factor más importante ya que el porcentaje de contribución del error puro es de 50.1% lo que explica la variabilidad de la respuesta. El esfuerzo último a la tensión se reduce en cualquier combinación de valores para fuerza y velocidad de bruñido, aunque con velocidades altas (3000 mm/min) se presenta la menor disminución del valor respecto a la probeta sin bruñir. Además, con esta velocidad el comportamiento parece estable al igual que con velocidades medias como $f = 2000 \text{ mm/min}$.

- El porcentaje de elongación a la fractura ($\%El$) se ve influenciado por la velocidad de bruñido (29.6% de contribución), y en menor medida por la fuerza de bruñido, aunque la interacción entre ambos factores contribuye en un 42.8% a la determinación de la respuesta. Se puede incrementar el $\%El$ hasta en 32.5% por encima de la probeta sin bruñir (25%), si se utiliza una fuerza de bruñido de $F=125$ N con la máxima velocidad empleada en este estudio (3000 mm/min). Lo anterior debido a que la respuesta muestra un comportamiento estable por lo que con valores altos de velocidad se puede obtener un aumento significativo aún reduciendo el tiempo del proceso de bruñido.

Del estudio experimental realizado en este trabajo se observa que es posible utilizar los parámetros de bruñido para modificar las propiedades elasto-plásticas y acabado superficial de este tipo de materiales. Esto brinda una base para la aplicación de estas técnicas de deformación plástica en procesos de formado de metales.

Finalmente, para estudios futuros del proceso de bruñido con bola sobre láminas AHSS se recomienda implementar mayores velocidades para estudiar su efecto y la posible reducción en los tiempos de manufactura para aplicaciones industriales.

Bibliografía

- [1] Kusiak, R., Kawalla, R., & Waengler, S. (2008). Advanced high strength steel for automotive industry. Archives of civil and mechanical engineering.
- [2] Zackay V.F., Parker E.R, Fahr D., Bush R.: The Enhancement of Ductility in High-Strength Steels, Trans. Am. Soc. Met., Vol. 60, 1967, pp. 252.
- [3] Sadagopan, S. (2019). "Formability Characterization Advanced High-Strength Steel". American Iron and Steel Institute. www.autosteel.org.
- [4] Galán, J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K., & Houbaert, Y. (2012). Advanced high strength steels for automotive industry. Revista de Metalurgia, 118-131.
- [5] Kardes Sever, N., Mete, O., Demiralp, Y., Choi, C., & Altan, T. (2012). Springback Prediction in Bending of AHSS-DP 780. Proceedings of NAMRI/SME.
- [6] Kim, H., Kimchi, M., & Altan, T. (2009). Control of Springback in Bending and Flanging Advanced High Strength Steels (AHSS). International Automotive Body Congress.
- [7] Center For Precision Forming. (s. f.). The Ohio State University. <https://cpf.osu.edu/home>
- [8] Saldaña Robles, A., Diosdado De la peña, J. Á., Balvatin García, A. d., Aguilera Gómez, E., & Plascencia Mora, H. S. (2017). The ball burnishing process: state of the art of a developing technology. DYNA, 28-33.
- [9] Saldaña Robles, A., Flores Ortega, A., Saldaña Robles, A., Saldaña Robles, N., & Gutierrez Vaca, C. (2017). Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas. Temas de Ciencia y Tecnología, 41-49.
- [10] Hamadache H., Laouar L., Zeghib N.E., et al. 'Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing'. Journal of Materials Processing Technology. December 2006. Vol.180-1. p.130-136. (DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.05.013).
- [11] Travieso-Rodríguez J.A., Desein G., González-Rojas H.A. 'Improving the surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process'. Materials and Manufacturing Processes. June 2011. Vol.26-12. p.1494-1502. (DOI:10.1080/10426914.2010.544819).
- [12] Rodríguez A., De Lacalle L.L., Celaya A., et al. 'Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique'. Surface and Coatings Technology. February 2012. Vol. 206-11. p. 2817-2824. (DOI:10.1016/j.surfcoat.2011.11.045).

- [13] Hassan A.M., Al-Dhifi S.Z.. 'Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process'. *Journal of Materials Processing Technology*. November 1999. Vol.96-1. p.73-80. (DOI:10.1016/S0924-0136(99)00254-X).
- [14] Yen Y.C., Sartkulvanich P., Altan T. 'Finite element modeling of roller burnishing process'. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*.-December-2005. Vol.54-1.pp.237-240. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60092-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60092-4).
- [15] Rodríguez-Ezquerro A., López de-Lacalle L.N.. *Tratamientos mecánicos superficiales para mejora de piezas mecanizadas: Bruñido con Bola*. 1a-Edición. Editorial-Académica-Española,-2012.-ISBN:9783659064906.
- [16] Bouzid, W. S. y K. Saï. (2005). Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 25(5-6). 460-465.
- [17] Sayahi M., Sghaier S., Belhadjsalah H.. Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. July 2013. Vol.67-5. p.1665-1673. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4599-9>.
- [18] Swirad, S., Wydrzynski, D., Nieslony, P., & G.M., K. (2019). Influence of hydrostatic burnishing strategy on the surface topography of martensitic steel. Elsevier, 590-601.
- [19] Gharbi, F., Sghaier, S., Hamdi, H., & Benameur, T. (2012). Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1-4), 87-99.
- [20] Kovács, Z. F., & Zsolt J. Ciharos, J. K. (2020). Surface flatness and roughness evolution after magnetic assisted ball burnishing of magnetizable and non-magnetizable materials. Elsevier.
- [21] Alghazoul, R., Makki, A., & Wahab, M. A. (2019). Improvement of flat surfaces quality of aluminium alloy 6061-O by a proposed trajectory of ball burnishing tool. *Computers, Materials & Continua*, 555-568.
- [22] Egea, A. S., Rodríguez, A., Celentano, D., Calleja, A., & de Lacalle, L. L. (2019). Joining metrics enhancement when combining FSW and ball-burnishing in a 2050 aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 367, 327-335.
- [23] Díaz Mendoza, A., Capilla González, G., Martínez Ramírez, I., Gutiérrez Rivera, M., Díaz Infante, D., & Ruíz López, I. (s.f.). Experimental and numerical analysis of the residual stress distribution in a three-point bending test of a TRIP sheet by using ESPI.
- [24] Kragelsky, I. V., & Alisin, V. V. (1981). *Tribology Handbook*. Mir, Moscow.
- [25] El-Axir, M., Othman, O., & Abodiena, A. M. (12 de May de 2008). Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process. *Journal of materials processing technology*, 120-128.
- [26] Iliesco, C. (1990). *Cold Pressing Technology*. Elsevier, Ámsterdam.

- [27] Travieso-Rodríguez, J. A., Jerez-Mesa, R., Gómez-Gras, G., Llumá-Fuentes, J., Casadesús-Farrás, O., & Madueño-Guerrero, M. (2019). Hardening effect and fatigue behavior enhancement through ball burnishing on AISI 1038. *Journal of Materials Research and Technology*, 5639-5646. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.032>
- [28] Gómez-Gras, G., Travieso-Rodríguez, J. A., González-Rojas, H. A., Nápoles-Alberro, A., Carrillo, F. J., & Dessein, G. (2015). Study of a ball-burnishing vibration-assisted process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(1), 172-177. <https://doi.org/10.1177/0954405414526383>
- [29] Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodríguez, J. A., Landon, Y., Dessein, G., Lluma-Fuentes, J., & Wagner, V. (2019). Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing. *Journal of Materials Processing Tech.*, 230-240. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
- [30] Boozarpour, M., & Teimouri, R. (2021). Parametric study of multi-roller rotary burnishing process. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4, 179-194. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.10.001>.
- [31] Kalisz, J., Zak, K., Wojciechowski, S., Gupta, M. K., & Krolczyk, G. M. (2020). Technological and tribological aspects of milling-burnishing process of complex surfaces. *Tribology International*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106770>.
- [32] Shan, C., Lv, X., & Duan, W. (2016). Effect of tool Inclination Angle on the Elastic Deformation of Thin-walled Parts in Multi-axis Ball-end Milling. *Procedia CIRP*, 56, 311-315. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.024>.
- [33] Loh, N. H., Tam, S. C., & Miyazawa, S. (1989). A STUDY OF THE EFFECTS OF BALL-BURNISHING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS USING FACTORIAL DESIGN. *Journal of Mechanical Working Technology*, 53-61.
- [34] Luca, L., Neagu-Ventzel, S., & Marinescu, I. (2005). Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision engineering*, 253-256.
- [35] Ulhe, P. N., Patil, U. D., & Patil, C. R. (2019). Optimization Of Roller Burnishing Process Parameters On Surface Roughness Using Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings*, 3632-3637.
- [36] Shiou, F. -J., & Chen, C. -H. (2003). Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 177-185.
- [37] Loh, N. H., Tam, S. C., & Miyazawa, S. (1989). Statistical analyses of the effects of ball-burnishing parameters on surface hardness. *Wear*, 235-243.
- [38] Chomienne, V., Valiorgue, F., Rech, J., & Verdu, C. (2016). Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 13, 90-96. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.12.003>.
- [39] El-Taweel, T. A., & El-Axir, M. H. (2009). Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, 301-310. doi:<http://dx.doi.org/1007/s00170-008-1485-6>.

- [40] Esme, U. (2010). Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA. *Materials and Technology*, 44, 129-135.
- [41] Prasad, K., Krishna, R., Janardhan , G., Raju, A., & Nahavandi, S. (2006). Experimental investigation and finite element analysis for the study of residual stresses in roller burnished components. *International Journal of Applied Engineering Research*, 1, 427-436.
- [42] Brostow, W., Czechowski, K., Polowski, W., Rusek, P., Tobola , D., & Wronska, I. (2013). Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers. *Materials Research Innovations*, 17(4), 269-277.
- [43] Hamadache , H., Zemouri, Z., Laouar, L., & Dominiak, S. (2014). Improvement of surface conditions of 36 CrNiMo6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28, 1491-1498.
- [44] Mahajan, D., & Tajane, R. (2013). A review on ball burnishing process. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(4), 1-8.
- [45] López D., L. L., Lamikis, A., Sánchez, J. A., & Arana, J. L. (2007). The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(9-10), 958-968.
- [46] Saldaña Robles, A., Álcantar Camarena, V. A., Diosdado de la Peña, Á., Saldaña Robles, N., Balvatin García, A., & Meza Enriquez, E. (2020). Diseño, manufactura y evaluación de un bruñidor con sistema de adquisición de datos y celda de carga. Irapuato, Gto.
- [47] Patel, N. K., & Patel, K. A. (2013). Parametric Optimization of Process Parameter for Roller Burnishing Process: A review. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2(2), 53-56.
- [48] Rodríguez, E. A., & López, L. N. (2012). Tratamientos mecánicos superficiales para mejora de piezas mecanizadas: Bruñido con Bola.
- [49] Gómez-Escudero, G., Fernández De Lucio, P., González Barrio, H., Calleja Ochoa, A., & López de Lacalle Marcaide, L. N. (2020, 18 noviembre). Acabado mediante bruñido hidrostático por bola. Importancia de la integridad superficial. *Interempresas Canales Sectoriales*. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/318875-Acabado-mediante-bruñido-hidrostatico-por-bola-Importancia-de-la-integridad-superficial.html>
- [50] Siu, K. W., & Ngan, A. W. (2011). Understanding acoustoplasticity through dislocation dynamics simulations. *Philosophical Magazine*, 91, 4367-4387. doi:10.1080/14786435.2011.606237
- [51] Jerez-Mesa, R., Landon, Y., Travieso-Rodríguez, J. A., Dessen , G., Lluma-Fuentes, J., & Wagner, V. (2018). Topological surface integrity modification of AISI 1038 alloy after vibration-assisted ball burnishing. *Surface and Coatings Technology*, 349, 364-377. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.061>.
- [52] Pande, S. S., & Patel, S. M. (1984). Investigations on vibratory burnishing process. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 24(3), 195-206. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(84\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0020-7357(84)90004-0)

- [53] Bozdana, A. T., Gindy, N. N., & Li, H. (2005). Deep cold rolling with ultrasonic vibrations? a new mechanical surface enhancement technique. *International Journal of Machine tools and manufacture*, 45(6), 713-718.
- [54] Sartkulvanich, P., Altan, T., Jasso, F., & Rodriguez, C. (2007). Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses.
- [55] Celaya, A.N., & De Lacalle L.L. Modelo de elementos finitos del bruñido con bola. 9º Congreso-Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Las Palmas de Gran Canarias:2009.
- [56] Neema, M. L., & Pandey, P. C. (1980). Investigation of the performance characteristics of cold-worked machined surfaces. *Wear*, 60(1), 157-166.
- [57] Papshev, D. D., & Golubev, Y. G. (1972). EFFECTIVENESS OF SURFACE WORK-HARDENING OF TITANIUM-ALLOY COMPONENTS. *RUSSIAN ENGINEERING JOURNAL-USSR*, 52(4), 48.
- [58] Papshev, D. D. (1983). Effectiveness of methods for finishing-strengthening treatment. *SOVIET ENGINEERING RESEARCH*, 3(7), 34-37.
- [59] Schneider, Y. G. (1970). Working surface microgeometry and the life of bearing components. *Machines and Tooling*, 41(11), 34-7.
- [60] Sachin, B., Narendranath, S., & Chakradhar, D. (2019). Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 564-571. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.051>.
- [61] Korzynski, M. (2009). A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. *journal of materials processing technology*, 209(1), 625-633.
- [62] Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (Segunda ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana. Obtenido de https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf
- [63] ASTM E8 / E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org
- [64] Capilla González, G., Aranda Moreno, M.G. & García Murillo, C.H. (2018). Manual para pruebas de tensión implementadas en una máquina Instron 8872 bajo la norma ASTM-E8. Salamanca, Gto. Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Recuperado de <https://www.dropbox.com/s/3faz5ja7go9jrsp/Manual%20de%20pruebas%20de%20Tensi%C3%B3n.pdf?dl=0>