

Diseño de dispositivo desmagnetizador
de componentes de sujeción de chapa
metálica en el proceso de fineblanking

2022

Juan Pablo Arreguin Rodriguez



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Diseño de dispositivo desmagnetizador de componentes de sujeción de
chapa metálica en el proceso de fineblanking

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de Maestro en Diseño e innovación

Presenta
Juan Pablo Arreguin Rodriguez

Dirigido por:
Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Co-Director:
Dr. Alonso Alejandro Jiménez Garibay

Querétaro, Qro. a Marzo, 2022



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en diseño
e innovación

**Diseño de dispositivo desmagnetizador de componentes de sujeción de chapa
metálica en el proceso de *fineblanking***

Opción de titulación

Tesis

Parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Diseño e Innovación

Presentador:

Ing. Juan Pablo Arreguin Rodríguez

Asesor principal

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

SINODALES

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Presidente

Dr. Alonso Alejandro Jiménez Garibay
secretario

Dr. José Manuel Álvarez Alvarado
Vocal

M.D.I. Anelisse Yerett Oliveri Rivera
sustituto

Dr. José Eli Eduardo González Durán
sustituto

Centro Universitario
Querétaro, QRO
México.
Marzo 2022

Esta tesis está dedicada a mis padres Maura y David, quienes me dieron la vida y las alas para perseguir mis sueños. También está dedicado a mi hermano David ... él siempre ha sido un ejemplo de superación para mí.....

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento al Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz, por la orientación, aliento y apoyo a lo largo de todos estos años. También me gustaría agradecer al Dr. Alonso Jimenez Garibay, al Dr. Sergio Campos Montiel, a la maestra Anelisse Yerett Oliveri Rivera y al Dr. José Eli Eduardo González Durán por sus valiosos aportes al desarrollo de esta tesis, por ser miembros de mi comité y darme sugerencias constructivas. Finalmente, quiero hacer un agradecimiento muy especial a un gran amigo y colega, Armando Gracia Gasca, con quien conversé durante todos estos años, desde los asuntos más elementales hasta las cuestiones más profundas de la propia existencia a quien también debo un gran conocimiento en las materias técnicas tratadas en este trabajo. Al organismo CONACYT y a la Facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo en el financiamiento del programa a lo largo de estos años.

Resumen

Este trabajo está enfocado al diseño, implementación y verificación de un dispositivo para la desmagnetización de troqueles de *fineblanking*, que genera un fuerte campo magnético, a través de una bobina que se excita con una corriente de 1 A. El sistema es útil en aplicaciones, donde los troqueles progresivos o simples tienden a producir piezas con marcas en su área superficial, dichas marcas son provocadas en su mayoría por rebaba atraída por el campo magnético que se produce en el sistema. Las dimensiones del dispositivo permiten que se pueda integrar para distintos tamaños de troqueles, su alimentación es a través de un transformador de corriente alterna que permite reducir el voltaje de 127 VCA a 12 VCA a una frecuencia de 60 Hz mediante una etapa de potencia que mantenga el suministro de energía eléctrica estable. Las mediciones de campo magnético realizadas con un gaussímetro FW Bell 6010, valida el campo generado por la bobina. Hacer un análisis y una validación de los datos adquiridos por medio del alfa de cronbach aplicado en los datos obtenidos en el banco de prueba diseñado para emular el entorno real donde se desempeña el desmagnetizador, permitió concluir que el campo dentro de la bobina del dispositivo está cerca del valor de campo que se necesita para cambiar la magnetización del troquel de *fineblanking*; las mediciones también validan el modelo magnético de la bobina utilizada en el diseño junto a la simulación realizada por medio del método de elementos finitos con apoyo del software Ansys Electronics Desktop en donde se pudo validar un modelo de desmagnetizador para la construcción final del instrumento. Este trabajo establece una alternativa de una topología de instrumentos de apoyo para la mejora de la calidad de las piezas producidas.

Abstract

This work is focused on the design, implementation and verification of a device for the demagnetization of *fineblanking* dies, which generates a strong magnetic field, through a coil that is excited with a current of 1 A. The system is useful in applications, where progressive or simple dies tend to produce parts with marks on their surface area, these marks are caused mostly by burrs attracted by the magnetic field produced in the system. The dimensions of the device allow it to be integrated for different sizes of dies, its power supply is through an alternating current transformer that allows reducing the voltage from 127 VAC to 12 VAC at a frequency of 60 Hz by means of a power stage that maintains stable electrical power supply. Magnetic field measurements made with a FW Bell 6010 gaussmeter validates the field generated by the coil. Carrying out an analysis and validation of the data acquired by means of the Cronbach's alpha applied to the data obtained in the test bench designed to emulate the real environment where the demagnetizer works, allowed to conclude that the field inside the device coil is near the field value that is needed to change the die magnetization of *fineblanking*; The measurements also validate the magnetic model of the coil used in the design together with the simulation carried out by means of the finite element method with the support of the Ansys Electronics Desktop software, where a demagnetizer model could be validated for the final construction of the instrument. This work establishes an alternative of a topology of support instruments for the improvement of the quality of the produced pieces.

Índice general

Agradecimientos

Resumen I

Abstract III

1. Introducción 1

2. Antecedentes 3

2.1. ¿Qué es el *fineblanking*? 3

2.1.1. Tipos de troqueles 5

2.2. Magnetismo 5

2.2.1. Magnetismo residual 5

2.2.2. Histéresis 5

2.2.3. Magnetismo residual en acero duro 6

2.2.4. Tipos de materiales según sus propiedades magnéticas 7

2.2.5. Materiales diamagnéticos 7

2.2.6. Materiales ferromagnéticos 7

2.2.7. Materiales paramagnéticos 7

2.2.8. Materiales ferrimagnéticos 7

2.3. Bobinas 8

2.3.1. Núcleo de aire 8

2.3.2. Núcleo de solido 8

2.3.3. Bobinas variables 9

2.4. Análisis de elementos finitos 9

2.5. Patentes y artículos científicos 11

2.6. Fundamento teórico 12

2.6.1. Desmagnetizadores en el mercado 12

2.6.2. Desmagnetizadores en el mercado 16

3. Problemática 19

4. Justificación 21

5. Hipótesis 23

6. Objetivos	25
6.1. Objetivos	25
6.1.1. Objetivo general	25
6.1.2. Objetivos específicos	25
7. Metodología	27
7.1. Doble diamante	27
7.2. Caracterización del campo magnético	29
7.3. Diseño experimental optimizado por FEM	30
7.4. Banco de pruebas	33
7.5. Implementación del prototipo	34
7.5.1. Factor controlable	34
7.5.2. Factores no controlables o de ruido	35
7.5.3. Factor estudiado	37
7.5.4. Niveles y Tratamientos	39
7.5.5. Errores	40
7.5.6. Factores estudiados en banco de pruebas	41
8. Resultados y discusión	45
8.1. Metodología doble diamante modificada	45
8.2. Primer prototipo de bobina	47
8.3. Prototipo de mecanismo	47
8.4. Simulación por método de elemento finito	48
8.5. Análisis en banco de pruebas	50
9. Conclusiones	61
Referencias	67
Apéndice	68

Introducción

En la actualidad el proceso de conformado de chapa metálica por medio del troquelado *fineblanking* (en español corte fino) ha tenido mucho éxito dentro del ramo automotriz debido a los requerimientos de volumen y calidad que son posibles lograr con esta tecnología, cada día los estándares van evolucionando y a su vez el incremento de la demanda de piezas sigue en crecimiento, es por eso que se vuelve un compromiso por parte de las empresas dedicadas a este giro crear herramientas más confiables y estables para seguir ofreciendo la misma calidad y ser capaz de incrementar su capacidad [1].

Con la llegada de la industria 4.0 el *fineblanking* no se queda atrás ante la migración de su tecnología, como frente a esa nueva era se está trabajando en la posibilidad de agregar monitores en tiempo real de los parámetros fundamentales que aseguran la calidad de las piezas dentro del *fineblanking* [2].

El *fineblanking* es una técnica de manufactura usada desde 1923, la cual consiste en tener un claro entre matriz y punzón más estrecho a lo habitual con el corte convencional, este claro es el equivalente al 1% del espesor del material, mientras que el troquelado convencional usa una holgura del 10% entre punzón y matriz. Esta holgura permite tener un corte más limpio en cuanto a acabado y permite que las piezas puedan ser usadas en ensambles de seguridad para la industria automotriz [3].

El *fineblanking* está innovando sus procesos teniendo un mejor monitoreo de los parámetros de máquina que permiten asegurar la calidad de la pieza, además permite tener una mejor reacción en cuanto a defectos o fallos del propio troquel [4].

La industria automotriz es el segundo sector económico más importante de México según cifras otorgadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) Aportó 3.7% del PIB nacional y 20.2% del PIB manufacturero en 2017. En el 2019 se contabilizaron alrededor de 336,370 de empresas dedicadas a la fabricación de piezas automotrices por medio del troquelado. De acuerdo a otro informe proporcionado por el mismo INEGI, la Industria básica de hierro y acero, que consiste en toda la fabricación de productos forjados y troquelados a partir de metal, representa el 3.6% del aporte de la industria automotriz al país, del cual el 72.7% se obtiene de insumos nacionales.

A pesar de lo representativo que es para el país la producción de vehículos no se debe dejar pasar el impacto ambiental que esto produce, según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) del troquelado en general se obtienen residuos sólidos por virutas rebabas y polvos, además se producen también residuos líquidos del aceite de corte a pesar de ser reciclado y del aceite empleado para la lubricación de las prensas [5].

Debido a que el *fineblanking* es un proceso de producción en serie tiene que mantener estándares de calidad a lo largo de todo su proceso, esta característica se ve debilitada al trabajar con elementos mecánicos que tienen que cumplir cada uno con tolerancias específicas para poder asegurar su desempeño óptimo dentro del proceso, de igual manera al ser elementos de este tipo pueden generar fenómenos que pueden ser poco controlables por la fricción como lo es: el calentamiento, el magnetismo y el desgaste. Estos tres fenómenos suelen ser perjudiciales dentro del *fineblanking* ya que, pueden llegar a provocar un mal funcionamiento dentro del herramental, como síntoma del mal funcionamiento se pueden tener piezas de mala calidad.

Uno de los principales defectos detectados que provocan mala calidad son las marcas por rebabas que aloja el herramental. Comúnmente este tipo de micro desperdicio suele expulsarse del área de trabajo mediante boquillas neumáticas pero en algunas ocasiones hay distintos factores que impiden que se elimine correctamente causando que queden expuestas a incrustarse entre la materia prima y los elementos de corte proyectando su geometría en la pieza, al ocurrir esto inmediatamente por estándares de calidad, la pieza se categoriza como desperdicio, generalmente para erradicar este problema se suelen hacer inspecciones visuales entre distintos procesos de manera estratégica para lograr contener el 100 % de estas piezas.

Actualmente en las empresas dedicadas a este tipo de proceso, de un solo número de parte que se manufactura se tiene un desperdicio del 5 % el equivalente a una pérdida de alrededor de 38,000.00 USD anuales. Esta investigación está enfocada a la búsqueda del método óptimo para la disminución de estas incidencias ocurridas dentro del proceso.

En el presente trabajo se comenzará analizando el estado del arte que involucra la mayoría de dispositivos y patentes que se han empleado dentro del proceso de *fineblanking* por parte de distintas empresas del sector privado que no han mantenido sus invenciones como secreto industrial. Se tratarán los distintos análisis matemáticos que se han empleado para el cálculo de la fuerza de atracción que poseen las partículas metálicas, así como las estrategias de solución que se aplicaron para la simulación del prototipado de la bobina y la metodología empleada para el diseño de la misma.

En una de las secciones se tratará la metodología empleada para el análisis de la efectividad y productividad de la prensa hidráulica donde trabaja el herramental a analizar, es importante mencionar que este análisis ya se realiza y puede ser replicado en cualquier prensa de corte fino.

Además, se enfocará al estudio del fenómeno magnético que se crea al contacto por fricción entre dos elementos metálicos dentro del proceso de producción de piezas por *fineblanking*, donde se realizará un análisis por medio del método de los elementos finitos para obtener una estimación del comportamiento que tendrá el inductor empleado para el dispositivo desmagnetizador.

Antecedentes

2.1. ¿Qué es el *fineblanking*?

El proceso de *fineblanking* es un proceso de conformado de metal caracterizado por tener una precisión muy efectiva. El proceso de corte fino es empleado específicamente sobre acero suave como un proceso de cizallamiento de una bobina de materia prima y tiene aplicaciones tanto en la industria automotriz como en la aeroespacial [6].

El corte convencional o corte por cizalla fue de las primeras tecnologías empleadas para la fabricación en serie de estas autopartes de lámina de metal. El proceso de corte y la configuración de sus parámetros es fundamental para un buen resultado de corte. La diferencia respecto al *fineblanking* es principalmente la deformación, la cual puede causar menos protección contra la corrosión y conduce a la falta de calidad en todo el proceso de producción [7].

En la Figura 2.1 se puede observar una comparación entre el acabado sobre las caras de las piezas resultantes del corte convencional y el *fineblanking*.

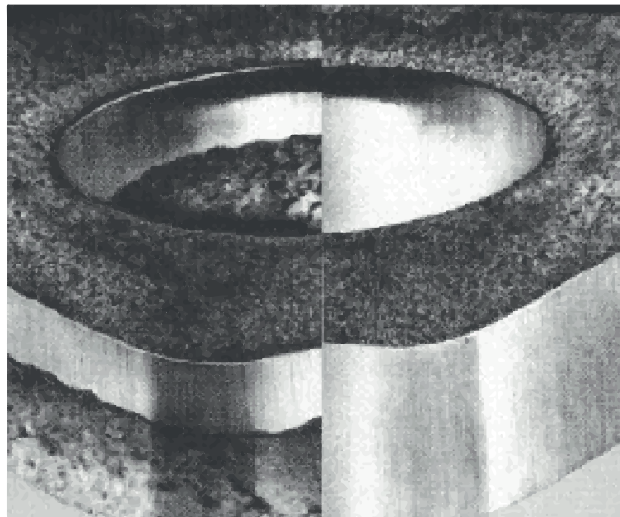


Figura 2.1. Troquelado convencional vs *fineblanking* [4].

En la Figura 2.2 se ilustra el proceso paso a paso del *fineblanking*. En (a) se observa la lamina de acero (5) que será troquelada dentro del área de sujeción entre la mordaza (1), el punzón (2), la matriz (3) y el eyector (4). En (b) se muestra la parte inferior del troquel subiendo y la actuación de la fuerza de mordaza (F_R) junto a la fuerza de contrapresión (F_G) que se encargan de tener el material firme, en (c) por el efecto de los elementos fijos que son los punzones se efectúa una fuerza de corte (F_S), en (d) se puede ver el troquelado, 6 es la pieza de trabajo y 7 es la chatarra que sale del proceso, en (e) la parte inferior vuelve a su lugar mientras la pieza de trabajo y la chatarra se mantienen alojadas en eyector y expulsor respectivamente, en (f) se puede entender la aplicación de la fuerza de extracción (F_{RA}) para poder despegar la chatarra de la parte superior, en (g) se caracteriza la aplicación de la fuerza de eyector (F_{GA}) que permite expulsar la pieza de trabajo, la tira de acero se despega de la mordaza, la pieza de trabajo y la chatarra son expulsadas dentro del área del troquel listas para ser retiradas como lo indica en (h) [2].

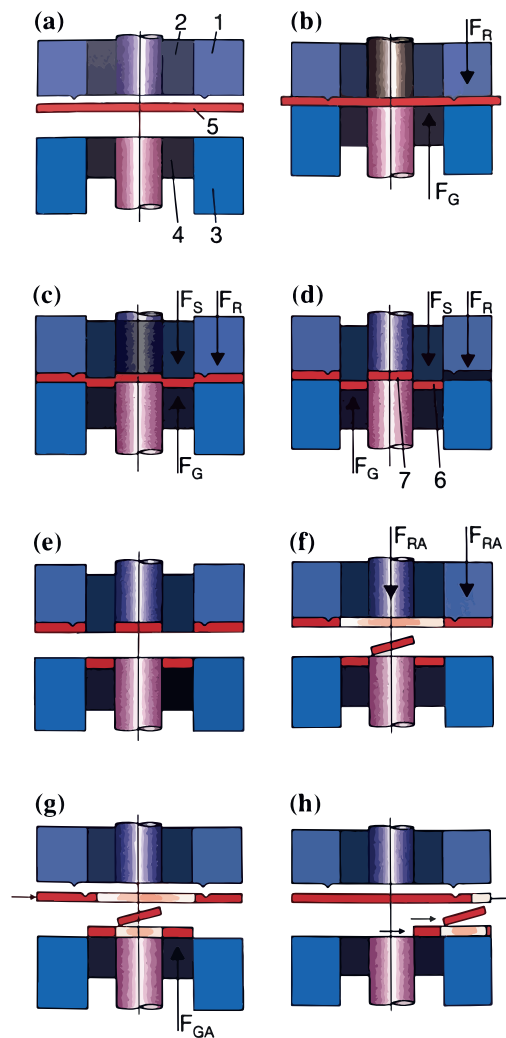


Figura 2.2. Proceso de formación del *fineblanking* [2].

2.1.1. Tipos de troqueles

- **Troqueles Simples**

Son troqueles que permiten realizar una operación en un paso o golpe, una de sus características principales es su baja productividad y su principal aplicación es para figuras simples que no requieren mucha fuerza de corte [4].

- **Troqueles Compuestos**

Estos troqueles tienen un tamaño mayor lo que les permite introducir más operaciones dentro de la misma herramienta [4].

- **Troqueles Progresivos**

Estos troqueles tienen un nivel de complejidad mayor así como su tamaño, permiten integrar muchas más operaciones de secuencia para modificar el material en distintas etapas, particularmente son usados para realizar dobleces o embutidos en los pasos previos y al final se obtiene la pieza terminada [4].

2.2. Magnetismo

Se conoce como magnetismo a la fuerza que ejercen los imanes y las corrientes eléctricas, las cuales pueden ser de repulsión o de atracción sobre materiales ferrosos [8].

2.2.1. Magnetismo residual

Antes de poder definir el magnetismo residual es necesario explicar que es la densidad de flujo magnético: que es el número de líneas de campo magnético por unidad de área, que es generado por corrientes eléctricas que circulan a través de circuitos eléctricos o por imanes. El magnetismo residual es la densidad de flujo magnético que existe en ciertos materiales después de dejar de ejercer fuerzas magnéticas sobre los mismos, puede presentarse en diferentes magnitudes dependiendo el tipo de material [9].

2.2.2. Histéresis

El ciclo de histéresis expresa de manera gráfica el desfase entre el campo de excitación y flujo en la pieza. Una curva de histéresis ancha indica que el material es difícil de magnetizar, tendrá alta reluctancia (es la resistencia que éste posee al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético). Esta curva (Figura 2.3 b) muestra que el acero duro tendrá las siguientes características:

- Baja permeabilidad.
- Alta retentividad.
- Alta fuerza coercitiva.
- Alta reluctancia.

- Alta cantidad de magnetismo residual [10].

Una curva de histéresis delgada (Figura 2.3 a) nos muestra un material suave, como el hierro con bajo contenido de carbono. Esta curva nos muestra que el hierro suave tendrá las siguientes características:

- Alta permeabilidad.
- Baja retentividad.
- Baja fuerza coercitiva.
- Baja reluctancia.
- Baja cantidad de magnetismo residual [10].

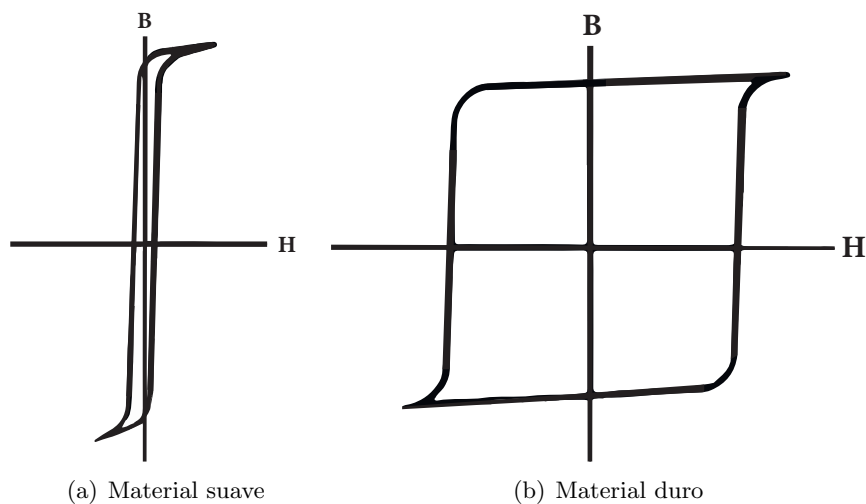


Figura 2.3. Ciclo de histéresis [10].

Para el acero y otros materiales duros, las pérdidas por histéresis son muy superiores a las de materiales magnéticos blandos, como el hierro o las ferritas. Para mostrar las características de histéresis de una sustancia, se trasladan sus densidades de flujo a un gráfico (B-H), como en la figura 2.3 con valores de la fuerza magnetizadora que se invierten periódicamente. La curva es el ciclo de histéresis, y la pendiente de la curva es el cambio de permeabilidad del material. Cuanto mayor sea el ciclo, mayores serán las pérdidas por histéresis [10]. Los aceros con un alto contenido en carbono, y tratados térmicamente a niveles altos de resistencia (temple y revenido), presentan los valores máximos de retentividad, que se reduce cuando el acero está recocido (bajo nivel de resistencia) [11].

2.2.3. Magnetismo residual en acero duro

De acuerdo a la investigación realizada por [12] en su trabajo del Estudio de magnetización residual de muestras de acero duro prueban que con una pequeña carga de corriente sobre el acero se crea un bucle capaz de mantener un magnetismo residual dentro del mismo acero generando así un campo magnético que atrae partículas no deseadas.

2.2.4. Tipos de materiales según sus propiedades magnéticas

Existe una clasificación para los materiales de acuerdo a sus propiedades magnéticas a continuación se mencionan los que poseen propiedades de atracción: Diamagnéticos, ferromagnéticos, paramagnéticos y ferrimagnéticos.

2.2.5. Materiales diamagnéticos

El diamagnetismo es definido mediante la aplicación de la ley de Lenz de manera sencilla pero a nivel molecular. Según la teoría electromagnética, cada que se tiene una variación en el flujo magnético se genera una corriente inducida y, de acuerdo a la ley que se comenta, *El sentido de las corrientes inducidas es tal que con sus acciones electromagnéticas tienden a oponerse a la causa que las produce* [13].

De manera general todos los átomos tienen electrones con movimiento libre y cuando se aplica un campo magnético exterior es inducida una corriente que se sobrepone teniendo como efecto magnético un campo opuesto al aplicado [13].

2.2.6. Materiales ferromagnéticos

Las partículas paramagnéticas (acero inoxidable austenítico) o diamagnéticas (aluminio) no pueden ser atraídas por campos de fuerza de magnetismo residual comunes (de 0 a 60 Gauss), pueden gracias a su alta susceptibilidad al magnetismo incluso magnetizarse significativamente con una baja intensidad de campo de otros componentes ferromagnéticos [13].

2.2.7. Materiales paramagnéticos

Los materiales paramagnéticos tienen la característica principal de que sus momentos magnéticos permanentes de sus moléculas son nulos. Estos materiales tienen características magnéticas débiles. Si se aplica un campo magnético exterior lo suficientemente elevado, los momentos magnéticos de los materiales paramagnéticos se tienden a ordenar de forma paralela al mismo.

Por tanto, los dipolos son orientados en la misma dirección y sentido del campo aplicado, por lo que la susceptibilidad magnética, es positiva y débil, y la permeabilidad relativa es ligeramente mayor que la unidad. Otra característica que los diferencia de los materiales ferromagnéticos es que cuando se elimina el campo externo aplicado el efecto del paramagnetismo desaparece [14].

2.2.8. Materiales ferrimagnéticos

El ferrimagnetismo es un fenómeno de magnetización permanente que se presenta en algunos materiales cerámicos. Las características de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos son semejantes; la diferencia de los dos sólo se encuentra en el origen de los momentos magnéticos. El ferrimagnetismo es un fenómeno físico donde se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de tal forma que no todos los momentos magnéticos están alineados en la misma dirección y sentido.

Algunos momentos magnéticos están opuestos y se anulan entre sí. Sin embargo estos no consiguen anular por completo la magnetización. Esto es debido a que algunos materiales cerámicos poseen átomos o iones con momentos magnéticos diferentes que cuando estos se alinean de forma antiparalela, se produce un momento magnético neto en una dirección. Este tipo de materiales se llaman ferritas, las cuales tienen baja conductibilidad y son útiles para muchas aplicaciones eléctricas y magnéticas [14].

2.3. Bobinas

Las bobinas o inductores son elementos pasivos de dos hilos conductores capaz de generar un flujo magnético cuando circula una corriente eléctrica, están conformadas por un alambre o terminal de cobre recubierto con esmalte devanado en un núcleo, los cuales pueden tener diferente topología de construcción ya sea al aire o en un material ferroso como por ejemplo acero magnético para incrementar su capacidad magnética. Su unidad de medida es el Henrio (H) en el Sistema Internacional pero se suelen emplear los submúltiplos μH y mH [15].

Para el cálculo de los henrios de un inductor se debe considerar lo siguiente:

1. El número de vueltas.
2. El diámetro de las espiras (vueltas).
3. Longitud del conductor.
4. El tipo de núcleo.

Las bobinas se clasifican en dos tipos principales fijas, donde su valor es fijo y dentro de este grupo podemos encontrar bobinas con núcleo de aire, núcleo sólido y variables.

2.3.1. Núcleo de aire

El conductor se embobina sobre un soporte hueco y posteriormente se retira quedando con un aspecto similar al de un resorte.

2.3.2. Núcleo de sólido

Dentro de este grupo podemos encontrar diferentes tipos de núcleos como el de hierro y ferrita. El núcleo de hierro es óptimo cuando se requiere un valor alto de inductancia ya que de esta manera se crea un mayor efecto magnético en comparación a cuando se tiene el núcleo de aire. Este núcleo es fabricado en placas de poco espesor o láminas que regularmente forman una letra “E” e “I” con el objetivo de disminuir pérdidas de energía en el proceso de inducción. Estos inductores se utilizan principalmente como filtros en fuentes de poder o en las lámparas fluorescentes conocidas como “balastos” [15].

El núcleo de ferrita se aplica en la electrónica ya que, con él se pueden fabricar bobinas de alta inductancia y pequeño tamaño, de igual manera se aplica en bobinas para trabajar en circuitos de

alta frecuencia.

La ferrita es un compuesto formado con polvo de óxido de hierro mezclado con otros componentes y revestido con material aislante, el cual se aglutina y comprime hasta quedar en forma sólida. Los núcleos de ferrita se fabrican en forma de varilla, en “E”, en dos medias “Es” o en forma de toroide [15].

2.3.3. Bobinas variables

Los inductores variables se requieren para ciertas aplicaciones especiales y están provistas de un sistema por el cual se pueden cambiar sus características principales como el número de vueltas o espiras, o la posición del núcleo [15].

2.4. Análisis de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) o método de aproximación por porciones es una técnica numérica empleada para obtener soluciones aproximadas de problemas matemáticos con condiciones de frontera que son regidos por ecuaciones diferenciales [16].

Algunas ventajas del método de los FEM son:

- Puede aplicarse a cuerpos compuestos por varios materiales.
- Las formas irregulares que se presenten en la frontera pueden ser aproximadas usando elemento con lados rectos o exactamente usando lados curvos.
- El tamaño de los elementos puede variar.
- El método emplea una formulación integral para generar un sistema de ecuaciones algebraicas [16].

La simulación de campos electromagnéticos se rige por las siguientes ecuaciones de Maxwell [17]:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} = J_s + J_e + J_v + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

$\nabla \times$ = Producto cruz

$\nabla \cdot$ = Producto punto

H = Vector de intensidad del campo magnético

J = Vector de densidad de corriente total

J_s = Vector de densidad de corriente de fuente aplicada

J_e = Vector de densidad de corrientes inducidas

D = Vector de densidad de flujo eléctrico (Maxwell se refirió a esto como el vector de desplazamiento, pero para evitar malentendidos con desplazamiento mecánico, aquí se utiliza el nombre de

densidad de flujo eléctrico.)

$t =$ Tiempo

$E =$ Vector de intensidad de campo eléctrico

$B =$ Vector de densidad de flujo magnético

Comúnmente se obtienen dos funciones potenciales para la solución, el potencial del vector magnético y el potencial escalar magnético. Los factores que afectan el potencial incluyen la dinámica del campo, la dimensionalidad del campo, la configuración de la corriente de la fuente, el tamaño del dominio y la discretización [17].

Para este problema considerando material saturable sin imanes permanentes, la relación constitutiva para los campos magnéticos es:

$$B = \mu H \tag{2.4}$$

$\mu =$ matriz de permeabilidad magnética, en general una función de H .

2.5. Patentes y artículos científicos

En el Cuadro 2.1 y Cuadro 2.2 se puede observar una lista de artículos, patentes y procedimientos que dan soporte teórico para el producto a realizar.

Cuadro 2.1. Patentes y artículos

año de Registro	Referencia	Descripción
2018	[2]	Marco teórico actual y futuro de la tecnología del <i>fineblanking</i> .
2014	[18]	Metodología nueva empleada en la manufactura de partes automotrices para evitar la generación de rebaba en el proceso.
2010	[19]	Muestra la estructura usada actualmente para el diseño de troqueles de corte fino.
2019	[20]	Muestra un sistema de expulsión mecánico de chatarra grande.
2015	[21]	Muestra un sistema de lubricación eficiente para evitar que la rebaba se pegue por exceso de lubricante.
2004	[4]	Parte del marco teórico para la explicación del proceso analizado.
2014	[22]	Sistema para el control de rebaba dentro del herramental de manera interna.
2018	[23]	Método experimental utilizado sobre las herramientas de corte para el comportamiento del material sometido a procesos de recubrimiento.
2003	[24]	Método para reducir los defectos visuales sobre piezas relacionados con el acabado y simulación CAM del proceso.
2008	[25]	Método actual para la expulsión de chatarra dentro del área de trabajo utilizando las boquillas de soplado algunas aun rebabas se quedan.
1988	[26]	Estudio del comportamiento magnético que tiene el material al ser troquelado por medio del <i>fineblanking</i> solo como materia prima no como residuos.
2014	[27]	Patente que muestra dispositivo robusto para la extracción de piezas y chatarra, evitando que queden expuestas a las marcas por el mismo troquel la desventaja es el alto coste del dispositivo.
2011	[28]	Tesis que sirve como punto de partida para revisar si las propiedades del material afectan directamente el campo magnético que se crea en el espacio de trabajo.
2017	[29]	Tesis que sirve como punto de partida para revisar si el comportamiento térmico, tiene influencia sobre la permeabilidad magnética del material manufacturado y los elementos de corte.
1981	[30]	Artículo científico que muestra un circuito electrónico empleado para la desmagnetización de polvo de cromo con un detector del campo magnético.
2002	[31]	Artículo científico que muestra la comparación de dos circuitos para la desmagnetización de material ferromagnético de gran tamaño analizándolo con desviación estándar para verificar la repetitibilidad de las pruebas.
2016	[32]	Tesis que explica el comportamiento que tiene el acero eléctrico ante dos procesos de manufactura: el corte láser y el cizallamiento los cuales, pueden ser puntos de partida para el estudio del efecto del rectificado sobre los componentes del herramental.
2014	[33]	Artículo que describe la metodología correcta para poder detectar y medir el magnetismo residual.
2014	[34]	Artículo que demuestra el efecto del magnetismo residual sobre materiales duros además, se demuestra que no existe una concentración uniforme y repetitiva sino que puede ser en diversas áreas.
2015	[35]	Artículo que orienta sobre el calculo de la fuerza ejercida por el campo magnético residual sobre las partículas que suele atraer, en este caso la chatarra.
1912	[36]	Artículo sobre el estado del arte de la mantención anormal en aceros.
2017	[1]	Artículo sobre el proceso de manufactura de los herramientas en México donde se menciona los pasos generales para fabricar cada componente del ensamble y los aspectos económicos que representan para la empresa que lo posee.
2011	[12]	Artículo sobre los efectos que tiene el magnetismo residual sobre el desgaste superficial de los componentes, además proporciona información acerca de la afectación que puede generar el deslizamiento de los componentes en dirección del campo magnético.
2016	[37]	Patente que muestra un método eficaz para estampar la rebaba que se produce en el proceso y así mantenerla controlada en dentro del entre hierro de materia prima que se deja como seguridad para que fluya el material.

Cuadro 2.2. Patentes y artículos

año de Registro	Referencia	Descripción
1987	[38]	Artículo científico donde se hace el estudio del efecto de la temperatura en el magnetismo Sobre el Fe(100).
2007	[39]	Patente que protege un circuito empleado para desmagnetizar un tubo por medio de un interruptor activador en un intervalo de tiempo.
1941	[40]	Patente que muestra un circuito empleado para desmagnetizar acero que sale de un sujetador magnético, este circuito se ha empleado como base para mejoras actuales en desmagnetizadores.
2015	[41]	Patente de un circuito de desmagnetización de CA optimizado para ser manipulado por un interruptor y que posee limitadores de corriente para protección del usuario.
2008	[42]	Patente de un circuito de desmagnetización AC controlado por tristores aplicable para diferentes tamaños de cuerpos y con reducción de calor y consumo.
2000	[43]	Patente de un circuito electromecánico muy conocido usado para desactivar los marcadores magnéticos que se colocan a los artículos en tiendas departamentales.
1988	[44]	Patente de aparato usado para desmagnetizar cintas magnéticas de manera eficiente por medio de reorientación de campo magnético.
2020	[45]	Artículo científico que describe un nuevo diseño para la construcción de un horno desmagnetizador eficiente.
2020	[46]	Patente de dispositivo comercial empleado para desmagnetizar objetos de pequeña escala mediante dos imanes.
2016	[47]	Artículo científico que presenta un dispositivo automatizado y refrigerado de campos de hasta 0.5 T.
2012	[48]	Artículo científico que caracteriza un sistema electrónico eficiente de bajo consumo para mandar pulsos desmagnetizadores a un cuerpo.
2011	[49]	Patente que muestra un circuito desmagnetizador usando IGBT de potencia para reducir el consumo de energía
2016	[50]	Artículo científico que muestra un circuito electrónico temporizado para desmagnetizar en puntos indicados por medio del calentamiento parcial y el desvanecimiento del campo magnético.
2017	[51]	Artículo científico que describe la medición del campo magnético residual como detector de defectos en materiales ferromagnéticos.
2017	[52]	Procedimiento para la desmagnetización de acero mediante un conveyor que transporta el acero a través del desmagnetizador que tiene una variación de corriente y distancia para hacerlo eficiente y automatizado.
2010	[31]	Artículo científico sobre un degaussing para un dispositivo giroscópico que a su vez es posible emplear para distintos sensores ópticos mediante un micro controlador.
2013	[53]	Procedimiento para poder simular en un laboratorio una prueba real sobre un herramental de <i>fineblanking</i> a menor escala y de bajo costo.
2019	[54]	Artículo científico que muestra una metodología para la construcción de un sistema con una bobina de Helmholtz empleado para generar campos magnéticos en direcciones controladas.
2018	[55]	Artículo científico que documenta un método para el diseño y simulación de una bobina de Helmholtz para la generación de un campo magnético uniforme.
2015	[56]	Artículo científico que muestra un método para poder caracterizar los materiales a analizar de acuerdo a sus propiedades magnéticas por métodos inductivos y estáticos.

2.6. Fundamento teórico

2.6.1. Desmagnetizadores en el mercado

En investigaciones realizadas en el 2014 por la empresa Maurer Magnetic AG, la cual trabaja directamente con componentes para la eliminación del magnetismo residual en distintas áreas dependiendo la necesidad del usuario, se encontró un método efectivo para poder medir las partículas incrustadas dentro de piezas de interés, que son atraídas por el magnetismo residual, cabe aclarar que este método es como tal un apoyo ya que, no existe un estándar establecido para medir el magnetismo residual en los componentes ferromagnéticos.

El magnetismo residual máximo sobre una superficie puede ser encontrado con los instrumentos

de medición adecuados. Los dispositivos de medición de magnetismo residual mas adecuados usan un sensor de efecto hall el cual requiere estar a una distancia menor de 0.5 mm. para funcionar de manera óptima. En la Figura 2.4 se puede observar el dispositivo capaz de dar la lectura de manera confiable [33].

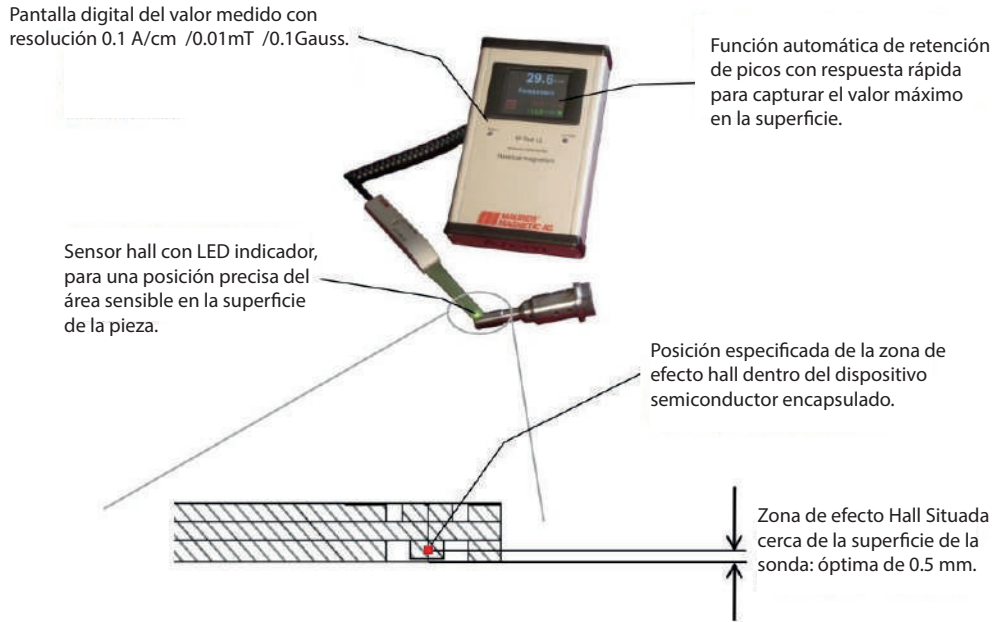


Figura 2.4. Medidor de magnetismo residual [33].

Debido a la alta permeabilidad de los materiales ferromagnéticos son capaces de recoger y conducir campos magnéticos, entre los cuales se encuentran el de la tierra, los que están presentes en la fundición del acero, al fabricar el rollo, al transportarlo, etc. Todos estos factores causan que los materiales tengan un cierto grado de magnetismo residual sobre ellos.

La medición de un campo magnético residual solo se da en condiciones idénticas y homogéneas de lo contrario no es posible reproducir esta medición ya que, los factores ambientales y geométricos también provocan una variación en este proceso [33]. El campo magnético de la tierra induce polos magnéticos en ambos extremos de parte ferromagnéticas alargadas como se puede observar en la Figura 2.5.

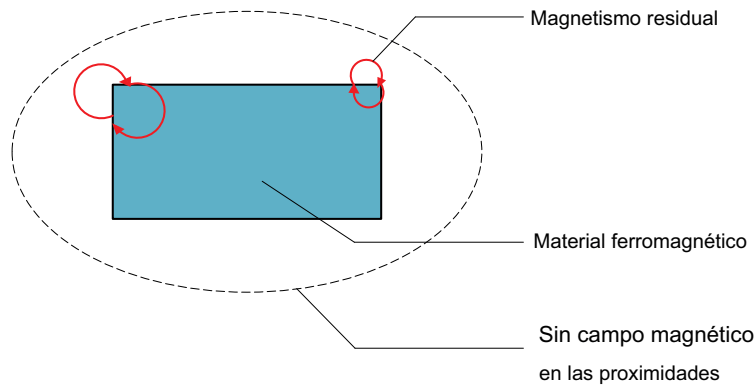


Figura 2.5. Aplicación de campo magnético inducido por la tierra [33].

En la Figura 2.6 se puede observar un escaneo de una sonda de magnetismo la cual permite observar el efecto de los residuos magnéticos en una superficie con dureza alta. En este tipo de materiales con alta coercitividad (mayor demanda de intensidad de campo magnético para desmagnetizar), tienen residuos mas altos y no necesariamente se encuentra en las esquinas o bordes sino en cualquier parte de la superficie, de igual manera se debe escanear toda la superficie a una distancia menor a 0.5 mm. para poder encontrar la zona con mayor intensidad de campo de magnetismo residual [34].

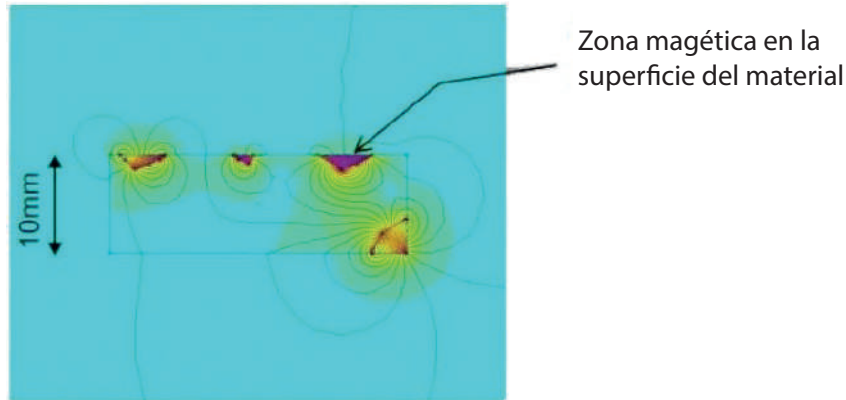


Figura 2.6. Material duro con acumulación de magnetismo residual [34].

Las propiedades magnéticas de las partículas metálicas dependen si se comportan como material paramagnético, diamagnético o ferromagnético. Los ejemplos mas comunes de materiales paramagnéticos son el aluminio y el titanio, los materiales diamagnéticos pueden ser el cobre y oro, ejemplos de materiales ferromagnéticos son el hierro y aleaciones de acero. Las partículas de materiales paramagnéticos y diamagnéticos no pueden ser atraídas por el magnetismo residual que regularmente oscila de 0 a 60 Gauss.

Las partículas ferromagnéticas pueden ser atraídas por este magnetismo residual debido a su susceptibilidad magnética incluso con bajas intensidades de campo [26].

Para medir la fuerza de atracción de las partículas es necesario usar las formulas de la susceptibilidad magnética ya que, describe la magnetización de un material se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación 2.5:

$$M_p = \frac{(\mu_i H_p)}{(1 + \frac{\mu_i H_p}{M_s})} \quad y \quad \chi_p = \frac{M_p}{H_p} \quad (2.5)$$

La susceptibilidad magnética de partículas esféricas de hierro se calcula por formula 2.5 y los valores:

Magnetización de saturación $M_s = 1550[kA/m]$

Permeabilidad relativa $\mu_i = 40$

Campo de fuerza H_p entre 1 a 50 [A/cm]

M_p es la magnetización de la partícula [26].

La fuerza de atracción magnética sobre las partículas ferromagnéticas se calcula por la ecuación 2.6:

$$M_p = \chi_p H_p \quad y \quad F_m = \mu_0 V_p M_p \nabla(H_p) \quad (2.6)$$

F_m = Fuerza de atracción magnética en una partícula (N)

$\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$ permeabilidad del vacío [Vs/Am]

V_p = Volumen de la partícula [m³]. [$V_p \sim (d_p)^3$]

$\nabla(H_p)$ = Gradiente del campo en el centro de la partícula (A/m²)

Se supone que la intensidad de campo y el gradiente de campo actúan en el centro de gravedad de la partícula, para razones de simplicidad la forma de la partícula se modela como una esfera. La distancia del centro de gravedad a la superficie de la esfera es $d_p/2$ de la partícula. El volumen V_p es el resultado de $V_p = 4/3 \times \pi \times (d_p/2)^3$.

Gradiente de campo = medida del cambio de intensidad de campo por unidad de distancia [26].

La Figura 2.7 muestra un diagrama de considerado para el calculo de la fuerza de atracción magnética.

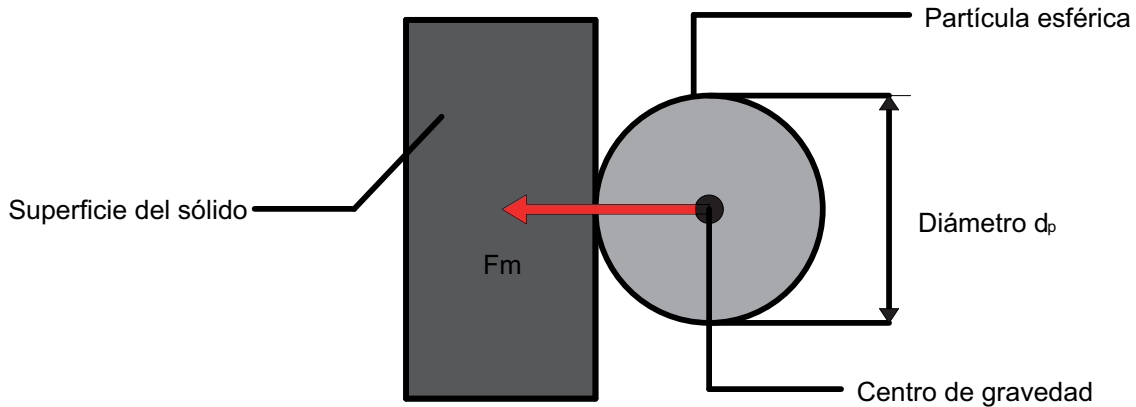


Figura 2.7. Diagrama estático de fuerza magnética ejercida por una esfera [26].

2.6.2. Desmagnetizadores en el mercado

La visualización de la metodología actual para la desmagnetización ayudo a recabar información sobre las posibles áreas de oportunidad donde puede ayudar el proyecto de tesis. En la Figura 2.8 se puede observar la desmagnetización de una mordaza mientras se le realiza mantenimiento correctivo al troquel de *fineblanking* con el desmagnetizador "PHASE II Demagnetizer 900-315".



Figura 2.8. Metodología actual de desmagnetización.

Problemática

Este tipo de partícula son consideradas como elementos contaminantes del proceso ya que, impiden que las piezas tengan la calidad requerida dejando pequeñas marcas e inclusive lograr obstruir agujeros funcionales dependiendo de las condiciones de servicio de cada pieza [26].

Después de un trabajo continuo por parte de los herramientales, estos tienden a almacenar mas energía cinética entre las partículas ocasionando que cada vez incrementa este campo provocando mantenimientos correctivos imprevistos para poder eliminar parte de estos residuos, para lograrlo se tiene que interrumpir el proceso e intervenir el herramental en máquina o en el área de mantenimiento.



Figura 3.1. Atracción de partículas en un material ferromagnético [26].

Para la industria es necesario eliminar en gran proporción estos tiempos muertos, para evitar que la pérdida monetaria sea mayor y mantener el flujo de trabajo constante, para esto se requiere del diseño de un prototipo capaz de controlar este fenómeno disminuyendo el tiempo requerido actualmente para realizar esta acción.

La Figura 3.2 muestra uno de los componentes principales que se ven afectados por el magnetismo residual donde, regularmente se encontrara alojada la mayor cantidad de partículas ferrosas no deseadas, en el recuadro rojo se encuentra el área de trabajo principal por donde hace contacto con la materia prima.

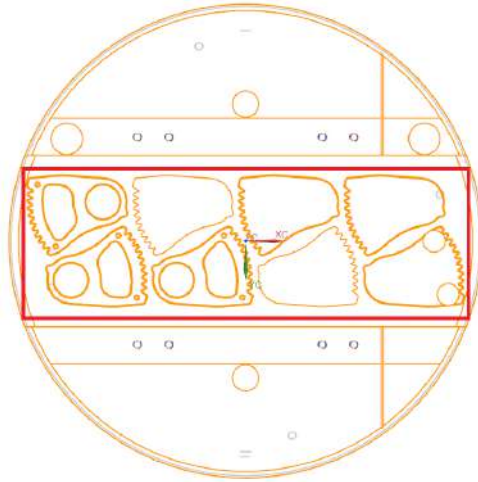


Figura 3.2. Elemento principal afectado por el magnetismo residual.

En las zonas marcadas como se muestra en la Figura 3.3 se puede observar en los recuadros azules las principales zonas donde afecta más el alojamiento de estas partículas ya que, la tira de materia se puede marcar antes de llegar al corte de la figura (zona marcada en amarillo).

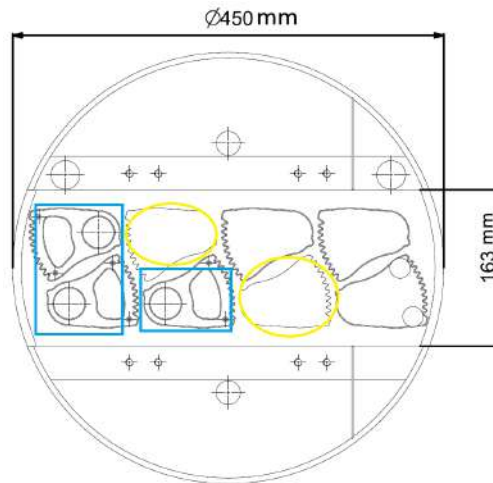


Figura 3.3. Zonas principales afectadas por el magnetismo residual.

Justificación

Las operaciones de corte inducen tensiones en aceros eléctricos y consecuentemente afecta sus propiedades magnéticas, estas son parcialmente deterioradas. Las pérdidas magnéticas aumentan y la permeabilidad disminuye como se puede observar en la Figura 4.1, el espectro muestra la relación (donde H es la dureza antes del corte y H_0 después del corte) del borde del corte de un acero M270-50A [57].

La magnitud del estrés residual, así como la tracción y compresión del acero afectan la magnetizabilidad de un acero eléctrico [57].

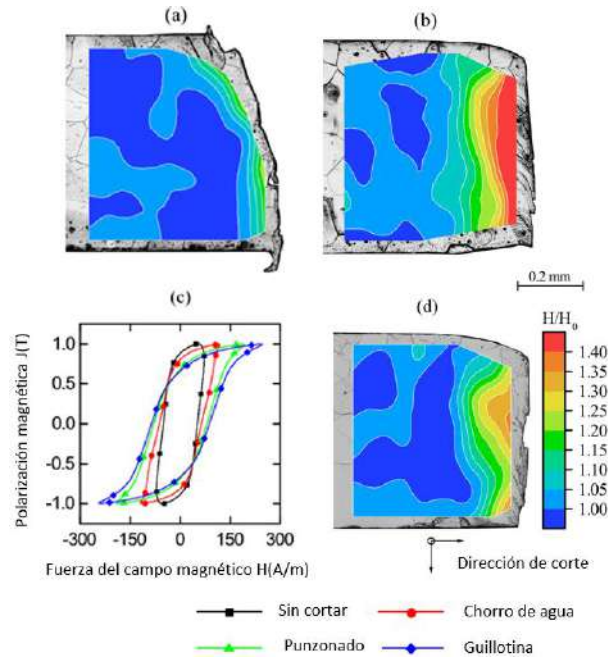


Figura 4.1. Influencia de las tres técnicas de corte diferentes (a) corte por chorro de agua, (b) guillotinado, y (d) punzonado en la dureza del material junto al corte superficie así como (c) en el comportamiento de magnetización a 100 Hz y 1.0 T en el dirección de laminación [57].

La investigación se enfocará al estudio del fenómeno magnético que se crea al contacto por fricción entre dos elementos metálicos dentro del proceso de producción de piezas por *fineblanking*.

Este tipo de partícula son consideradas como elementos contaminantes del proceso ya que, impiden que las piezas tengan la calidad requerida dejando pequeñas marcas e inclusive lograr obstruir agujeros funcionales dependiendo la funcionalidad de cada pieza [26].

Después de un trabajo continuo por parte de los herramientales, estos tienden a almacenar mas energía cinética entre las partículas ocasionando que cada vez incremente este campo provocando mantenimientos correctivos imprevistos para poder eliminar parte de estos residuos, para lograrlo se tiene que interrumpir el proceso e intervenir el herramental en máquina o en el área de mantenimiento.

Para la industria es necesario eliminar en gran proporción estos tiempos muertos, para evitar que la pérdida monetaria sea mayor y mantener el flujo de trabajo constante, para esto se requiere del diseño de un prototipo capaz de controlar este fenómeno disminuyendo el tiempo requerido actualmente para realizar esta acción.

Actualmente una de las referencias con más piezas rechazadas por marcas es el cinturón de seguridad del cual se requieren 11 millones de piezas anuales, de estas alrededor de 113,000 piezas son rechazadas por marcas en el troquelado como se observa en la Figura 4.2, si estas piezas se facturaran como pieza terminada dentro de especificaciones se tendría un adicional de 68,000 USD ya que cada pieza cuesta 0.6 USD de acuerdo a los datos recopilados del software encargado de la gestión.

Representación del desperdicio

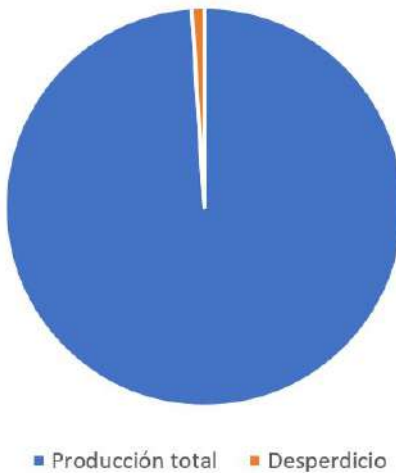


Figura 4.2. Gráfico representativo del desperdicio contra la producción total (autoría propia).

Hipótesis

El desarrollo de una bobina con apoyo de un software por el método de elemento finito ajusta la desmagnetización entre el 10% y 20% en un troquel de *fineblanking*.

Objetivos

6.1. Objetivos

6.1.1. Objetivo general

- Desarrollar un desmagnetizador optimizado por medio del análisis de elementos finitos para garantizar la eficiencia en el proceso de desmagnetización de troqueles de *fineblanking*.

6.1.2. Objetivos específicos

- Estudiar topologías de bobinas mediante el análisis comparativo.
- Optimizar la configuración de la bobina mediante parametrización en ANSYS.
- Proponer los modelos virtuales del dispositivo desmagnetizador que cumpla con la optimización obtenida por medio del método de elementos finitos.
- Desarrollar el prototipo de desmagnetizador mediante la manufactura en control numérico.
- Caracterizar el desmagnetizador a diferentes voltajes de operación para validación del desempeño.
- Evaluar el funcionamiento del desmagnetizador en condiciones reales de operación.

Metodología

7.1. Doble diamante

Según el Design Council todas las disciplinas del diseño comparten el mismo proceso creativo, al que han titulado El Doble Diamante “*The Double Diamond*”. El Doble Diamante es un mapa visual simple del proceso de diseño, está dividido en cuatro fases distintas con algunas etapas clave identificadas como se puede observar en la Figura 7.1.

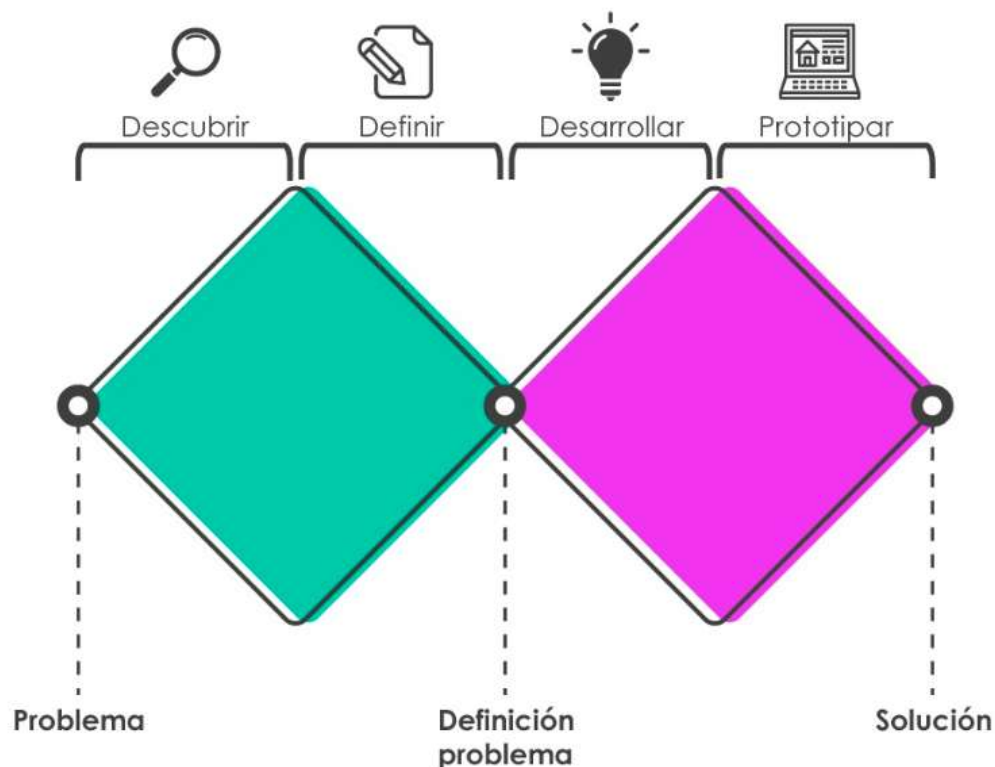


Figura 7.1. Diagrama de la metodología doble diamante (Design Council UK, 2005).

En la Figura 7.2 se puede observar el diagrama de la metodología adaptado al proyecto, donde se ilustran algunas de las adaptaciones realizadas a las etapas, a lo largo de esta sección se irán aclarando algunas de ellas y la dinámica de la metodología aplicada.

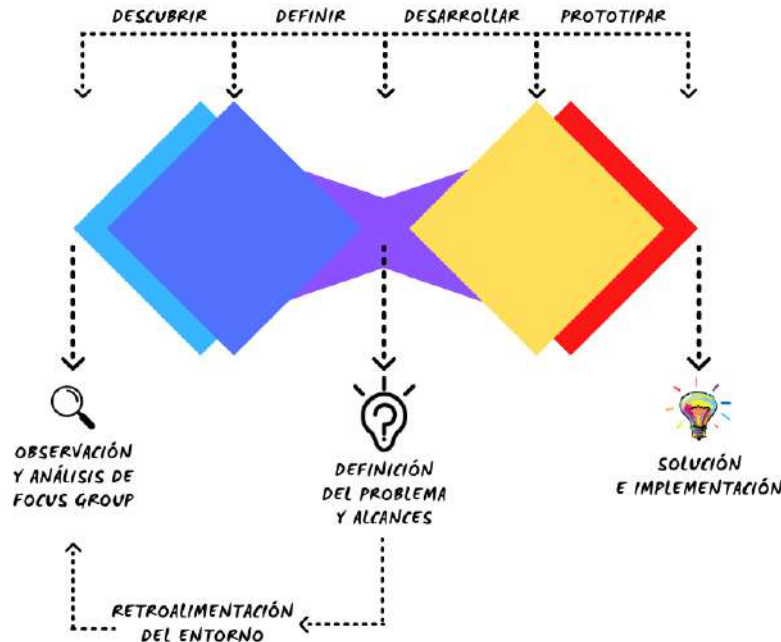


Figura 7.2. Diagrama de la metodología doble diamante adaptado (diagrama de autoría propia).

Descubrir (Discover): El primer tramo del modelo Doble Diamante cubre el inicio del proyecto. En esta etapa es donde se observa el entorno donde se desea realizar la investigación, las distintas variables que se pueden encontrar y un primer enfoque del contexto a investigar. En la Figura 7.3 se puede observar un ejemplo de una de las técnicas aplicadas en esta etapa conocido como focus group donde se busca recopilar información de distintos participantes en una sesión para analizar en conjunto la información [58].

Definir: El segundo tramo representa la etapa de definición del problema, aquí se trata de dar sentido a todas las posibilidades identificadas en la fase Descubrir. A partir de este punto es donde se empieza a priorizar la información, se establece un orden para llevar a cabo la investigación y se establece el contexto.

Por la estructura del diagrama presentado en la Figura 7.2 en esta etapa es posible llegar a tener una retroalimentación según el entorno donde se vaya a desarrollar el proyecto, la idea es presentarla al equipo y las personas más experimentadas aportarán su punto de vista con base en la experiencia que viven día tras día para validar o rechazar la propuesta antes de pasar a una fase más profunda de desarrollo y prevenir posibles errores.



Figura 7.3. Ilustración representativa de la herramienta focus group([58]).

Desarrollar: El tercer tramo marca un período de desarrollo donde se crean soluciones o conceptos, prototipos, probados e iterados. En etapa se lleva a cabo la implementación de la idea conceptualizada a lo largo del desarrollo, buscando probar con prototipos el comportamiento de las variables previsto.

Entregar: La última etapa del modelo de doble diamante, donde se finaliza el proyecto resultante (un producto, o servicio), para producirlo y lanzarlo al mercado. A este nivel de la metodología ya se han realizado las respectivas retroalimentaciones que surgen después de probar un numero finito de iteraciones de prototipos, hasta que el diseñador determine que la información nueva obtenida no es mucho mas relevante que lo obtenido al principio. Para esta ultima etapa se plantea un prototipo definitivo, tras obtener retro alimentación de un numero finito de iteraciones, haciendo en cada una de ellas las respectivas modificaciones necesarias para mejorar los errores o debilidades observados en pruebas previas.

También implica realizar un consenso en las modificaciones o construcciones de prototipos ya que, por la complejidad que puede llegar a tener el dispositivo, puede que los costos se eleven demasiado en esta etapa haciendo difícil esta etapa para el proyecto al no poder absorber los gastos a futuro ya que, el objetivo es crear un producto que tenga una buena relación costo beneficio en comparación con la metodología actual mencionada en párrafos anteriores.

7.2. Caracterización del campo magnético

Dentro del sector privado se puede tener acceso a distintos tipos de dispositivos de metrología para la caracterización de distintos fenómenos a estudiar, para el la tesis fue necesario emplear un gaussímetro de la marca FW Bell con el cual se logro obtener la magnitud de campo magnético de distintas mordazas para así poder establecer el rango de trabajo de nuestro prototipo y asegurar una desmagnetización parcial o total desde la etapa de diseño. En la Figura 7.4 se puede apreciar una vista frontal del dispositivo empleado para las mediciones.



Figura 7.4. Gaussmetro marca FW Bell modelo 5170.

En la Figura 7.5 se muestra la toma de lecturas realizada sobre una mordaza del troquel de *fineblanking* donde se puede apreciar la colocación de la sonda sobre la placa y el área de interés donde mas afecta el campo magnético.



Figura 7.5. Toma de lecturas de campo magnético en troquel de *fineblanking*.

7.3. Diseño experimental optimizado por FEM

Se aplicó la metodología del desarrollo del modelo de componente magnético que consiste en realizar el modelado magnético mediante el método de elementos finitos en dos fases: la de análisis y la de síntesis. La fase de análisis es registrar las medidas experimentales y el modelado de componentes magnéticos por medio del FEM, en la fase de síntesis se plantea el circuito eléctrico equivalente y se simula.

Teniendo como base los datos obtenidos en los cálculos anteriores se utilizó Ansys Electronics, que proporciona distintos gráficos como información de salida donde se puede comprobar si el modelo obtenido es el óptimo o de otro modo seguir iterando con diferente información considerando nuevos factores.

De las primeras configuraciones realizadas se seleccionó el tipo de análisis a emplear, en este caso fue un análisis transitorio ya que, permite observar el comportamiento del campo magnético a través del tiempo y además permite agregar movimiento a los componentes para ver la interacción de sus campos magnéticos. De manera previa también se realizó el análisis magneto estático para verificar individualmente la magnitud de campo magnético que produce la bobina diseñada.

Como primeros pasos es necesario realizar una iteración modelando la geometría que tendrá de manera física el embobinado, esto se realizó de manera nativa en el Ansys Electronics con las herramientas que tiene para el modelado. Posteriormente se eligió el tamaño de malla mas adecuado para obtener una convergencia en los resultados teniendo en cuenta la influencia del costo computacional en el modelo.

Para disminuir el costo computacional mencionado anteriormente, es necesario filtrar algunas geometrías innecesarias en los modelos a analizar, como primera característica fundamental para lograr esto se crearon aproximaciones en donde existan superficies circulares, en el caso de la mordaza al ser un cilindro, se convirtió a un polígono convexo de veinticuatro segmentos como se muestra en la Figura 7.6. Es importante también seleccionar el material del que está construido el componente para que el software pueda emular correctamente sus propiedades magnéticas, en este caso fue seleccionado un acero AISI D2 con modificación en la componente de su vector magnético donde se cambió x por z para acoplar correctamente el modelo al eje coordenado del sistema.

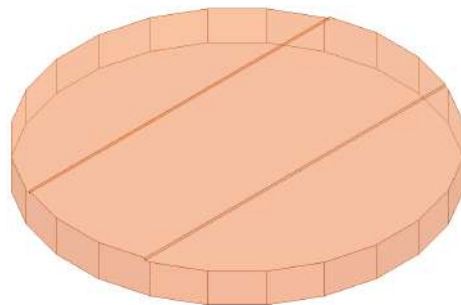


Figura 7.6. Modelo de mordaza simplificado para optimizar recursos informáticos.

Además, fue necesario eliminar del modelo original las roscas para tornillos, chafanes, redondeos y las cavidades donde se cortan las piezas ya que, para el software no es necesario realizar algún calculo sobre estas características y permite disminuir el tiempo consumido

para la solución de las ecuaciones.

Después de definir las geometrías se establecieron los parámetros a probar es decir, los calculados teóricamente para bobinas de núcleo de aire con un numero determinado de vueltas y de ahí variando las características físicas para obtener el campo magnético deseado [59]. Para poder obtener la gráfica que muestra el resultado es necesario elegir el método de solución de las ecuaciones deseado en este caso la solución al modelo fue de manera magneto-estática [16].

En la Figura 7.7 se ilustra el modelo simplificado de la bobina propuesta en donde se consideró su núcleo de aire y cobre como material, una altura del embobinado de 17 mm, diámetro interior de 45 mm, diámetro exterior de 60 mm. Debido a que el software posee distintas herramientas para la configuración de estos inductores es posible asignar parámetros como el número de vueltas y la corriente de alimentación, los cuales para este caso en particular se eligieron de 2,500 vueltas y 1.2 A respectivamente.

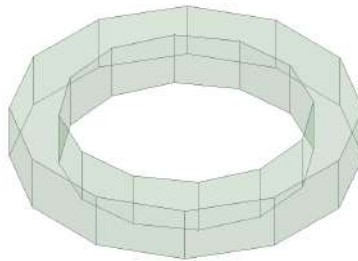


Figura 7.7. Modelo de bobina simplificado.

Una vez configuradas las características de la bobina y de la mordaza se estableció una región de trabajo como frontera, puede ser cualquier ambiente, en este caso es aire común. Otro punto importante a identificar es la posición que tendrán los componentes para realizar el análisis y en este caso al ser una simulación transitoria determinar el área de desplazamiento del componente motriz como se puede apreciar en la Figura 7.8.

De manera consecuente se describe la configuración de los parámetros de entrada de alimentación y de la solución. En la Figura 7.9 se puede observar el circuito empleado para alimentar la bobina emulando una fuente de voltaje externa en donde se determinó un valor de resistencia R conocido para poder hacer cálculos de potencia, es necesario declarar un inductor en el circuito para que lo asocie al modelo 3D que se encuentra en el espacio, además, debe contener el mismo nombre.

El tipo de solución requiere que se seleccione un intervalo de tiempo para resolver las ecuaciones para el análisis transitorio, en este caso particular el único requerimiento es que el inductor interactúe con la mordaza de manera longitudinal en dirección a la de trabajo para observar el comportamiento del campo magnético de la mordaza junto a una bobina que tiene

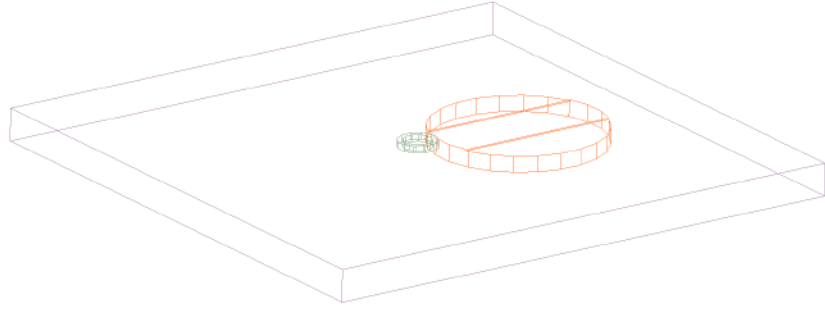


Figura 7.8. Frontera de trabajo (color morado), mordaza (color naranja) y bobina (color verde).

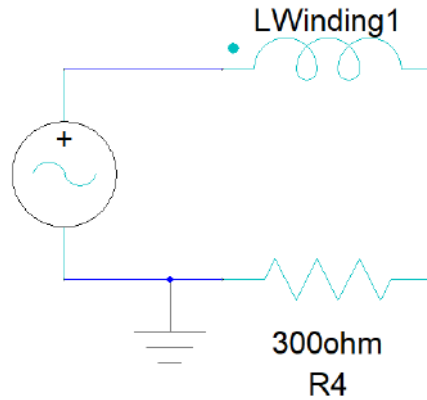


Figura 7.9. Circuito de alimentación propuesto para el inductor.

como propósito desorientarlo con una magnitud mayor a la medida en la Figura 7.10 se puede observar el diagrama representativo del espacio donde se puede desarrollar el movimiento de la bobina y la dirección de trabajo que se asignó.

La velocidad de movimiento en este caso no es relevante debido a que únicamente por motivos prácticos se requiere que la masa de la bobina sea desplazada sin ningún criterio específico.

7.4. Banco de pruebas

Para poder realizar pruebas en un entorno mas cercano a lo real se decidió utilizar un troquel de pequeña escala a las convencionales para prensas hidráulicas de alto tonelaje (escala 3:1), pero que funciona bajo los mismos principios del *fineblanking* y también se consideran los mismos materiales para su fabricación.

En la Figura 7.11 se pueden observar las vistas superior e inferior del troquel utilizado para pruebas, cabe resaltar que nos enfocaremos principalmente en la parte superior donde ocurre el fenómeno estudiado.

En la Figura 7.12 se pueden identificar por etiquetas los componentes principales de la parte

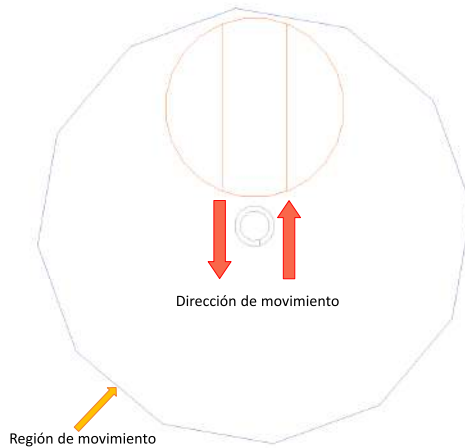


Figura 7.10. Región de movimiento declarada para la bobina.

inferior del troquel para pruebas.

El componente número 1 corresponde a los casquillos guía para las columnas superiores, el componente número 2 corresponde al eyector de las piezas, el componente número 3 es conocido como matriz de forma, la placa identificada con el número 4 corresponde a una sufridera utilizada para absorber el esfuerzo ejercido sobre la matriz y la placa número 5 corresponde al porta troquel.

En la Figura 7.13 de igual manera viene una vista frontal de la parte superior del troquel de pruebas donde se visualiza con el número 1 las columnas guía que aseguran el movimiento del herramental, con el número 2 la placa de sujeción o mordaza la cual es de nuestro interés ya que es el elemento que regularmente aloja las rebabas, el elemento número es el punzón de corte que se encarga de cortar contra la matriz para dar la forma de la pieza, el número 4 es la placa porta troquel que sirve como soporte y con el número 5 se tiene los resortes encargados de retirar la presión que se ejerce tras el corte entre la placa de sujeción y la matriz.

7.5. Implementación del prototipo

Primero se definió parte de los factores que están involucrados en el entorno del fenómeno, dicho esto podemos dividirlos en tres: Factores controlables, factores no controlables o de ruido y el factor estudiado.

7.5.1. Factor controlable

- La desmagnetización de un troquel.

El primer factor controlable es referente a la desmagnetización del troquel, este parámetro podemos manipularlo mediante los valores de entrada de alimentación de la bobina ya que,



Figura 7.11. Parte superior e inferior del troquel.

de acuerdo a la fundamentación de las ecuaciones de Maxwell tenemos una variación en la fuerza electromagnética según la corriente aplicada [60].

- Diseño de una bobina optimizada en consumo energético.

El segundo factor controlable va enfocado a la construcción física de la bobina la cual requirió del análisis de la magnitud de campo magnético que se necesita para la desmagnetización, dependiendo de esto podemos, establecer distintas combinaciones en Ansys Electronics. Una vez hechas las variaciones y obtenido el modelo teórico ideal se procedió a la construcción física del nuevo prototipo de bobina.

7.5.2. Factores no controlables o de ruido

- Exceso de lubricante

El primer factor no controlable para estas pruebas es el exceso de lubricante, esta situación se vuelve crítica cuando la válvula del aspersor del lubricante que tiene integrada la prensa de *fineblanking* no tiene un control sobre la cantidad de lubricante que esparce al sistema, en algunos modelos de prensas o sistemas mas recientes esto puede controlarse mediante una electro válvula de paso y un sensor en el contenedor del aceite para poder determinar los mililitros aplicados.

Para el caso donde la prueba se realice en sistemas sin este control, se deberá inspeccionar previamente de manera visual la cantidad que esta aplicando, si se concluye que es demasia-

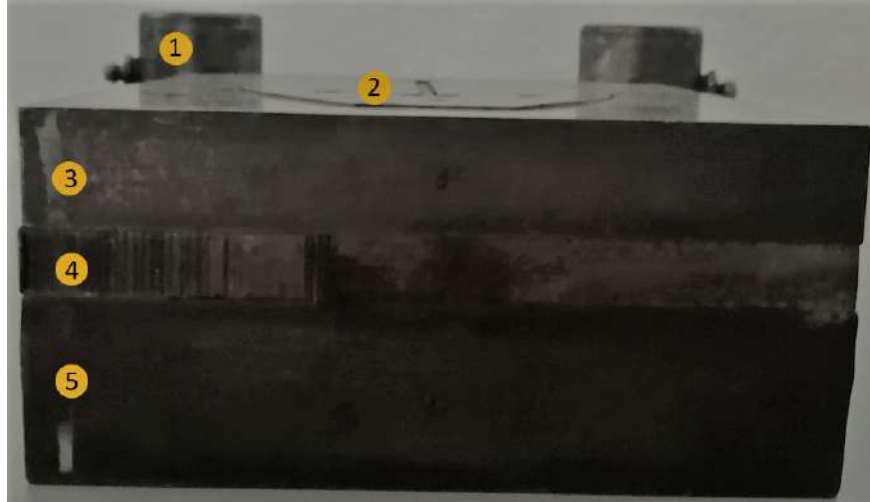


Figura 7.12. Componentes principales de la parte inferior.

do para generar un efecto de exceso de viscosidad que atrape las rebabas que intentan ser expulsadas de manera neumática, se deberá cerrar en proporción la válvula de paso asignada para delimitar la cantidad de aceite expulsado.

Debido a la naturaleza de la experimentación que se tuvo que adoptar, este factor se suprimió debido a que el banco de pruebas es estático y no posee la capacidad de emular completamente el proceso de troquelado.

- Materia prima defectuosa

El segundo factor no controlable va ligado a la mala calidad que puede tener el rollo de acero al momento de su montaje en la prensa para la producción, generalmente el proceso de recepción de rollos de acero es el siguiente: el proveedor envía el rollo de acero con su transporte, llega a planta y se dirige al área de recepción de materia prima, el encargado de esta área revisa que el pedido sea vigente, que las especificaciones que el proveedor proporciona coincidan con las del pedido del sistema y posteriormente pasa a corroborar que las especificaciones que entrega el proveedor en su hoja técnica sean iguales a las lecturas de los instrumentos de validación en planta.

La rigidez se mide en un durómetro (Ver Figura 7.14) en la escala requerida, para esto se extrae una pequeña porción de material conocida como probeta y se somete al efecto de la punta del instrumento, la cual depende de la escala en que se va a medir la propiedad en cuestión [61].

Otro aspecto que se debe analizar es el ancho del acero y el espesor ya que, si no son los indicados, el acero puede tener problemas de interferencias en el herramental, esto es medible con un vernier como se muestra en la Figura 7.15. Hay ocasiones en las que el problema del ancho del acero puede solucionarse lo que si es completamente evitable es el espesor, porque

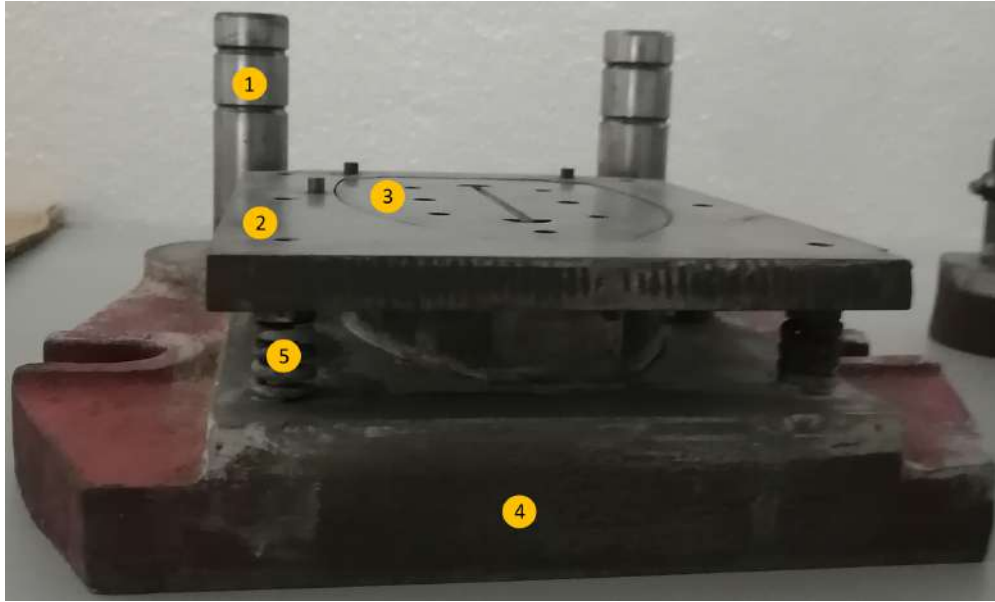


Figura 7.13. Componentes principales de la parte superior.

afecta a la seguridad del troquel y además se incumpliría una especificación del cliente.

Para finalizar debe realizarse una inspección visual del acero ya que, algunas veces se encuentra rallado o con muchos poros lo que, a lo largo del proceso provocara problemas mecánicos en producción y problemas de calidad.

Si el encargado del área de recepción de materia prima se encuentra con alguna anomalía en las características antes mencionadas es necesario que lo notifique al área de producción y si se trata de un acero destinado a un herramental en desarrollo, se debe comunicar al área de proyectos para ver posibles soluciones al respecto.

7.5.3. Factor estudiado

En el escenario donde la experimentación pueda realizarse de manera presencial en alguna organización donde se practique el *fineblanking* es necesario seguir los siguientes pasos:

Paso 1. Medidas de seguridad: La prueba se debe realizar en campo es decir directamente en la empresa, para poder tener acceso es necesario contar con el equipo de protección personal pertinente para una empresa del giro automotriz el cual es el siguiente: casco de protección, guantes, zapatos de seguridad, ropa protectora, tapones auditivos, lentes de seguridad y para el caso actual cubre bocas.

Al cumplir con estos requerimientos tendremos que registrarnos en una bitácora de visitas para que el personal de seguridad tenga los datos necesarios sobre la persona que ingresara y a que área se dirige, con la finalidad de llamar al encargado para que pueda dar acceso y guiar el



Figura 7.14. Medidor de dureza Brinell digital (foto extraída de TECHLABSYSTEMS).

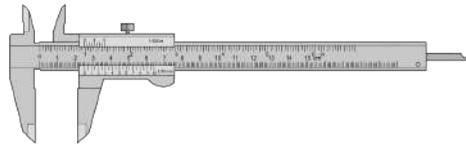


Figura 7.15. Vernier convencional para mediciones de precisión.

ingreso, como el objetivo son pruebas este tipo de actividades las coordina el área de proyectos.

Paso 2. Puesta a punto: Previamente notificada la hora y maquina donde se realizara la prueba se requiere de la presencia del operador de la maquina para que realice el funcionamiento normal, del encargado de mantenimiento para que este pendiente del montaje del prototipo, del personal de mantenimiento de herramientas por alguna situación anormal que surja durante la prueba y en encargado del área de proyectos que estará supervisando los protocolos y las medidas utilizadas para la prueba, esta persona previamente deberá estar informada del objetivo y metodología de las pruebas.

Paso 3. Identificación de los componentes y alimentación: El prototipo consta de un cilindro neumático para garantizar la velocidad del sistema y aprovechando que la prensa de *fineblanking* tiene tomas neumáticas para su sistema de expulsión, un riel de ajuste vertical , que permitirá variar la altura del dispositivo en caso de que se requiera, la bobina y un núcleo para poder ajustar con un tornillo a una base .

La bobina estará alimentada por una fuente de voltaje externa regulada donde nos permita variar los parámetros de voltaje y corriente, los valores que se le deben asignar estarán en el apartado de “Niveles y tratamientos”.

Paso 4. Ajuste del prototipo: Este ajuste de altura dependerá de la mordaza del troquel. Una vez hecho este ajuste se deberá revisar que el cilindro neumático se accione configurando sus conexiones eléctricas y suministrándolo con aire, de manera general se controlará con una válvula para cilindro de doble efecto accionada por solenoide que permite extender o retraer según donde reciba el pulso eléctrico. Para comprobarlo solo se tienen que enviar pulsos manuales con cualquier fuente de alimentación a los extremos de los solenoides y se deberá observar cómo se extiende y retrae el pistón.

Paso 5. Funcionamiento. Ahora bien como aun no se tiene definido un control autónomo para el prototipo, el personal operador de la maquina deberá iniciar la producción normal de 50,000 a 80,000 piezas hasta que se observe que las piezas producidas tienen alguna anomalía visual en su superficie como se describe en el apartado de errores, si esto ocurre inmediatamente se deberá pausar el proceso para corroborar que el defecto es por causa de rebabas y de ser así comprobar que la mordaza del troquel este magnetizada midiendo su campo magnético con un gaussímetro y tomando el registro, una vez cumplidas estas condiciones activaremos el prototipo.

Para la activación se realizará el mismo procedimiento de la prueba de funcionamiento, se deberá mandar un pulso de voltaje de acuerdo a la tabla analizada en la siguiente sección para el control de las pruebas y su posterior análisis. El tiempo de duración de la activación también deberá ser registrado, pero por la etapa de pruebas únicamente será de utilidad para la etapa de desarrollo del sistema de control del prototipo.

De manera paralela se deberán tomar lecturas en tiempos aleatorios para comprobar que el magnetismo está disminuyendo, dejando el dispositivo activado hasta observar que el campo magnético disminuye al menos en un 50 % de la lectura inicial.

Una vez alcanzado este nivel mandaremos un pulso para la retracción del cilindro neumático, indicaremos al personal de mantenimiento del herramental que limpie el sistema y procederemos a indicar que se continúe con la producción, deberemos comprobar que en efectivamente la mordaza quedo libre de rebabas y que las piezas nuevas después de la intervención ya no tienen anomalías superficiales.

Si ocurre un evento similar deberán volver a repetirse los pasos anteriores para disminuir el magnetismo, al finalizar se deberá realizar un sorteo de piezas para poder separar las que tengan defectos y realizar el conteo, una vez obtenida la cantidad se hará el cálculo del porcentaje de piezas que siguen saliendo defectuosas y se comparara con los registros anteriores antes de realizar la intervención, con este dato podremos hacer una comparación a lo que estipulamos en la hipótesis.

7.5.4. Niveles y Tratamientos

El voltaje corresponde al suministrado por un transformador que se alimenta de la línea eléctrica de 127 VCA y es capaz de realizar la reducción, en sus diferentes versiones se pue-

den encontrar diferentes voltajes de reducción, además también hay diferentes versiones con corriente de salida distintas.

Estas variaciones son propuestas para alimentar una bobina de embrague extraída de un compresor de aire acondicionado automotriz para asegurar que es un componente de línea, con esto se espera obtener diferentes magnitudes de campo magnético que tendrán un cierto efecto de desmagnetización dependiendo su valor y que a su vez influirá directamente en el porcentaje de piezas que sigan teniendo golpes por rebaba aun alojada por el efecto del campo magnético.

El experimento consistirá en alimentar la bobina de acuerdo a los parámetros mostrados en el ejemplo del Cuadro 7.1, en cada tratamiento se tomarán lecturas del nivel de magnetismo residual antes y después de la activación como registro, se tendrá que monitorear completamente un lote de producción que puede variar en el número de piezas, puede ir desde 50,000 a 250,000 piezas dependiendo de la referencia y el requerimiento del cliente.

Voltaje	Corriente	Tratamiento
6 V	600 mA	1
	1.2 A	2
12 V	600 mA	3
	1.2 A	4

Cuadro 7.1. Niveles y tratamientos para el experimento

También dependiendo de estas dos variables es el tiempo que lleva troquelarlas, es decir, puede darse el caso de que una orden de producción de 50,000 piezas se termine en un solo turno de 8 horas o menos si no existen complicaciones.

Para eliminar estos factores como obstáculos será necesario fijar las condiciones del experimento donde se propondrá el monitoreo del comportamiento de las variables de estudio, para esto se propone realizar el monitoreo en lotes de producción del rango de 50,000 a 80,000 piezas, si es posible sobre la misma referencia, para que esto sea posible será necesario hacer el estudio de manera semanal o cada dos semanas dependiendo de la demanda del producto.

Al completar esta tabla deberemos aplicar el Diseño factorial 2^k para validar el experimento y comprobar si con estos factores considerados es suficiente para predecir el comportamiento del sistema y tener un buen nivel de confianza.

7.5.5. Errores

Error Aleatorio

- Piezas marcadas por exceso de lubricante.

- Materia prima con defectos de origen.
- Piezas marcadas por choque con componentes internos del herramental al momento de ser expulsadas.

Error experimental

- Tiempo de producción corto que interfiere en el desarrollo del fenómeno de estudio.
- Numero de parte sin error relevante por el caso de estudio.
- Tooling sin espacio para el experimento.
- Relevancia de la producción sin espacio para pruebas.

Puede darse el caso de que el tiempo que se dispone para las pruebas es muy reducido, tanto que no daría oportunidad para realizar intervenciones apropiadas, si este es el caso se tendrá que buscar una referencia que no tenga demasiados requerimientos semanales y evitar congestionar el resto de la producción, cuidando que el nuevo objeto de estudio realmente necesite que se le realice este protocolo de pruebas o que al menos el numero de piezas desperdiciadas podría ayudar a justificar las pruebas.

Al seleccionar otra referencia hay que cuidar primero a nivel CAD que es factible colocar el prototipo debido a la complejidad de algunos herramentales progresivos es imposible adicionar elementos de este tamaño.

Además de elegir otras referencias se deberá tener cuidado con el tiempo asignado o si este será suficiente para poder validar el experimento, en el caso de tener muchas limitaciones se deberá hacer una nueva planeación hasta que la empresa decida que no tiene mucho cuello de botella para realizar la investigación.

7.5.6. Factores estudiados en banco de pruebas

Para poder realizar el estudio sobre la desmagnetización de un troquel de *fineblanking* se adapto la experimentación y los factores a estudiar mencionados en la sección anterior, debido a que la validación no fue realizada en la industria fue necesario eliminar algunos factores no controlables considerados como: Exceso de lubricante y la materia prima defectuosa, quedando como únicos factores controlables la desmagnetización de un troquel y el consumo energético de la bobina.

Para poder complementar el estudio se decidió agregar como factor controlable la distancia entre la bobina y la parte superior e inferior del troquel de manera paralela a la cara donde es atraída por el campo magnético la rebaba.

Para el control de la distancia se fabricaron 3 aumentos de diferentes tamaños (ver Figura 7.16) con la finalidad de mantener la separación controlada a 1 mm 3 mm y 5 mm como se muestra en la Figura 7.17.



Figura 7.16. Aumentos de madera (32 mm, 30 mm y 28mm respectivamente).

Para reducir los costos de fabricación en las pruebas se re utilizo una bobina de arranque la cual esta montada sobre una carcasa que permite ensamblar en diferentes elementos para su manipulación. Al momento de calibrar la distancia de la cara de la bobina a la cara del herramental se consideraron los 27 mm de profundidad de la carcasa de la bobina para la fabricación de los aumentos.



Figura 7.17. Bobina de arranque con carcasa.

En la Figura 7.18 se puede observar en el recuadro en color rojo la nueva altura que posee la bobina respecto a la cara del troquel para verificar la influencia que tiene esta variable.

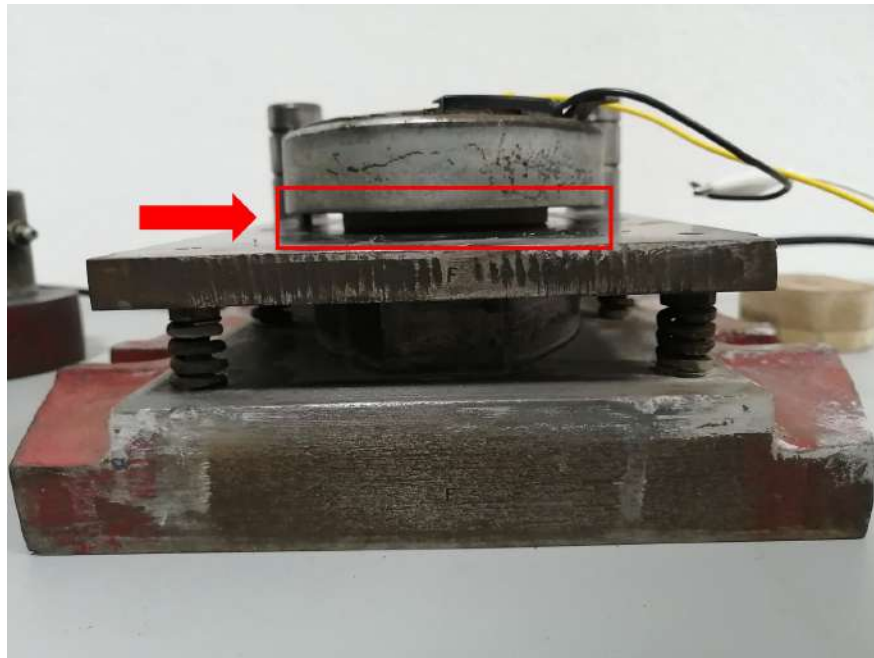


Figura 7.18. Bobina suplementada sobre la cara del troquel.

Resultados y discusión

8.1. Metodología doble diamante modificada

Tras aplicar esta metodología para el análisis del problema planteado se obtuvo información relevante en las distintas etapas que se mencionaron en la sección anterior. De manera particular en la etapa de descubrir, se inició con las entrevistas a las distintas personas más experimentadas con la tecnología *fineblanking*, para tener un acercamiento a profundidad con el problema y las distintas estrategias que se han intentado aplicar para tratar de reducir los efectos que ocasiona el magnetismo después de largas jornadas de troquelado en herramientas progresivos y algunos en específico que trabajan con aceros altos en carbón.

La información se obtuvo mediante un focus group como se mencionó anteriormente, de aquí se logró obtener distintos puntos de vista proporcionados por el jefe de diseño, el jefe de mantenimiento de herramientas, los encargados del área de mantenimiento y el ingeniero de procesos de una empresa del sector privado.

De esta herramienta de recolección de información, el equipo coincidió con la raíz del problema la cual presenta similitudes en su aparición y se concluyó que sucede cuando los troqueles tienen muchos pasos previos al corte, lo que permite que se pierda la precisión del avance a pesar de tener una buena guía, esto tiende a provocar que en el momento del cierre del troquel, la materia prima tenga movimiento en la apertura y esto roce con algunos componentes, llegando a desprender pequeñas partículas que ya no son parte de la pieza sino es considerado como rebaba, ponen como ejemplo cuando borras con una goma sobre una libreta esa fricción que generamos contra la hoja permite que se vaya perdiendo parte del sólido original dejando el desperdicio evidente por encima.

Otra etapa que proporcionó información relevante para el desarrollo del problema fue la etapa de descubrir. En esta etapa el equipo aportó con la información acerca de la metodología que se lleva a cabo actualmente a raíz del descubrimiento del problema.

Se comentó que al observar que el material empieza a salir con marcas que no son regulares del proceso, porque también pueden aparecer otro tipo de defectos sobre los cuales se tiene un control de detección más claro, se manda la orden de revisión del herramienta y dependiendo de la gravedad del problema existen dos opciones: una es, si el herramienta se puede desmagnetizar

inmediatamente en la maquina se realiza, para evitar el desmontaje de todo el sistema, transportarlo al área de mantenimiento y después abrirlo para realizar la tarea, y la otra posibilidad es directamente transportarlo para que se le dé un mantenimiento correctivo, estas dependen de que tan complejo y seguro sea introducir el “demagnetizer” modelo *PHASE II Demagnetizer 900-315* dentro del herramental.

Una vez conocido este proceso se definieron los puntos clave para poder encontrar una solución alternativa eficiente, en cuanto a consumo y aprovechamiento del magnetismo, permitiendo la detección prematura del problema sin tener que esperar a que salgan las piezas con algún defecto para determinar si el troquel se encuentra magnetizado o no, lo que implica comparar el OEE actual con el que se tiene al momento de usar el dispositivo. En la Figura 8.1 se muestra un ejemplo de detección de errores después de la etapa de producción.



Figura 8.1. Fotografía de pieza producida y empacada con defecto (autoría propia).

Aquí es donde se define que el proyecto tendrá un enfoque a solucionar el problema de mejora de la calidad de las piezas que tengan golpes ocasionados por la situación comentada anteriormente. Además como se desea que sea un producto completamente comerciable para cualquier empresa se deben emplear las normas necesarias para la construcción del mismo.

La siguiente etapa de la cual se obtuvieron datos específicos para continuar con la metodología fue la etapa de desarrollo. En esta etapa es donde se realizaron distintas propuestas de diseño y soluciones técnicas para poder integrar en un producto mas robusto, la idea fue poder realizar un producto que tenga características físicas reducidas para poder introducirlo sin alterar el proceso y/o tener que modificar parte del concepto del troquel ya que, aumentaría considerablemente el costo de implementación y el proyecto dejaría de ser factible.

8.2. Primer prototipo de bobina

Parte del primer acercamiento que se realizó para determinar que tipo de bobina que se emplearía para el prototipo de dispositivo desmagnetizador consistió en la fabricación de una bobina Helmholtz, la cual tiene las propiedades de ser una bobina circular o cuadrada con un radio igual a la distancia entre dos bobinas paralelas las cuales se encargan de generar un campo magnético uniforme [62].

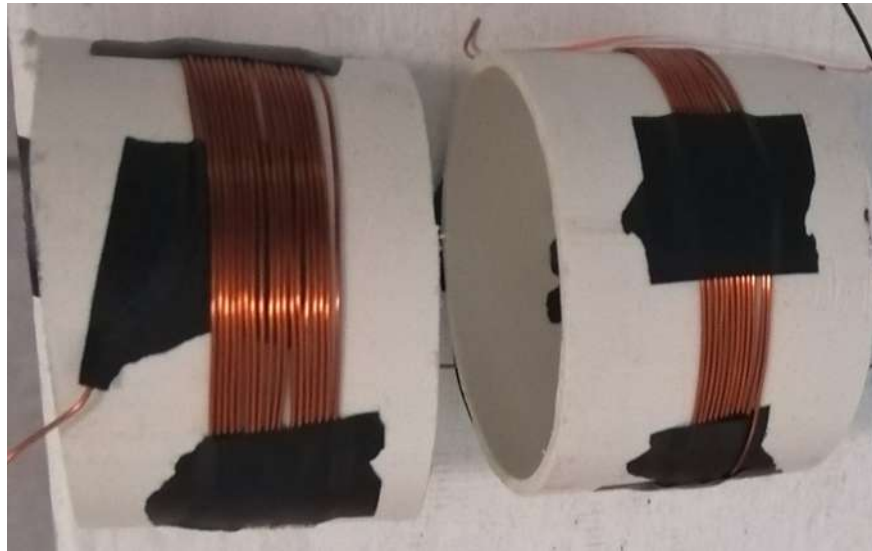


Figura 8.2. Prototipo de bobinas Helmholtz

8.3. Prototipo de mecanismo

De acuerdo a los pasos mencionados en la metodología del doble diamante obtenemos como producto el prototipo mostrado en la Figura 8.3 donde podemos apreciar 2 vistas modeladas en 3D. El prototipo consta principalmente de tres componentes: la bobina, un cilindro neumático y un sistema de ajuste vertical.

La bobina cuenta con un núcleo que sirve para darle rigidez y formar un buen ensamble con la base mostrada en color rosa, esta base irá unida al vástago del cilindro neumático el cual solo se activará cuando se le envíen las respectivas señales por medio de una electroválvula 5/2 biestable, el mismo pistón será anclado a un riel que permite un ajuste vertical por si existe variación en las alturas de la parte superior del herramental.

El prototipo fue implementado en un banco de pruebas para disminuir los posibles riesgos económicos y operativos que surgen al intentar implementarlo en campo, como se mencionó en la sección anterior.

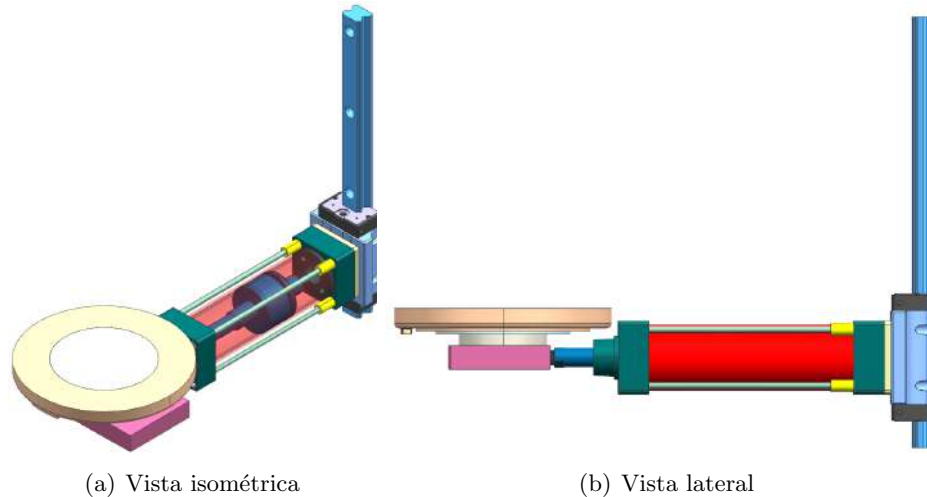


Figura 8.3. Propuesta de prototipo desmagnetizador

8.4. Simulación por método de elemento finito

De las simulaciones que se describen en la etapa de la metodología fue posible obtener la mejor configuración de dimensiones para la bobina que llevara a cabo la principal tarea de desmagnetización, además se obtuvo una visión preliminar del consumo de energía eléctrica que se le debe suministrar al inductor para poder desempeñarse de manera eficiente y producir el campo magnético suficiente para desmagnetizar la mordaza del troquel de *fineblanking*.

El propósito del análisis térmico es determinar la cantidad de energía calorífica que genera todo el dispositivo y así asegurarnos que no es un problema para el sistema interno de la prensa de *fineblanking*, además sirve como apoyo a los datos obtenidos de la simulación anterior y así poder corregir los parámetros en caso de que se tenga un consumo alto de potencia eléctrica.

En la Figura 8.4 se ilustra el gráfico de salida para el análisis de la energía que produce la bobina a lo largo de su geometría, cabe mencionar que en su zona más intensa alcanza los 35,800 Joules y se puede observar que es en la parte central, lo que proporciona información para el diseño del dispositivo y poder considerar algún tipo de aislante térmico en esta zona en caso de que pueda tocar o afectar algún componente del sistema.

De acuerdo al espectro que se puede observar en la Figura 8.5 podemos comparar los resultados obtenidos en la literatura con la metodología y los parámetros de entrada usados para la investigación [63].

El diagrama muestra el efecto que tiene el acercar la bobina desmagnetizadora de manera simplificada sin incluir el resto de los elementos del dispositivo al modelo de mordaza del troquel simplificado. Los valores obtenidos ayudan a dar soporte a la necesidad del campo magnético a producir por el dispositivo y así poder desorientar las líneas de campo magnético nativas de la mordaza.

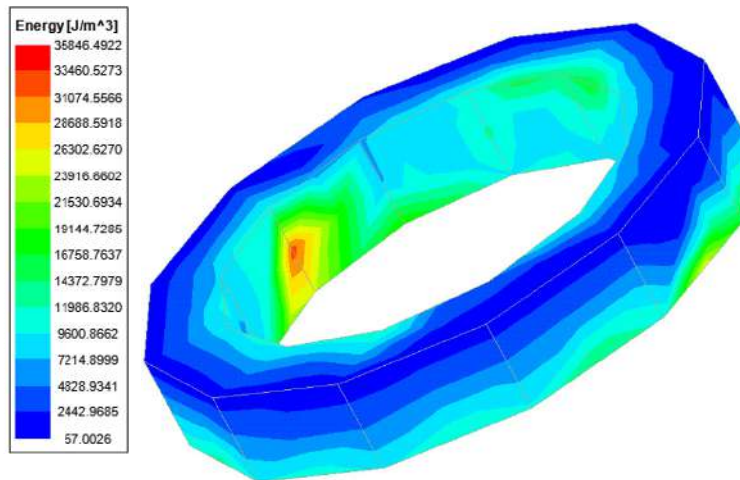


Figura 8.4. Gráfica de visualización de la cantidad de energía producida por la bobina en Joules por metro cúbico.

Además en la Figura 8.6 se muestra el gráfico de salida del voltaje de la bobina desmagnetizadora en el mismo trabajo de investigación, donde se puede obtener un criterio de diseño muy importante para la estructura del sistema ya que, permite ahorrar el tiempo en la fabricación y diseño del circuito de alimentación, únicamente buscando los elementos compatibles con una topología convencional para poder generar el voltaje objetivo máximo de 38 V.

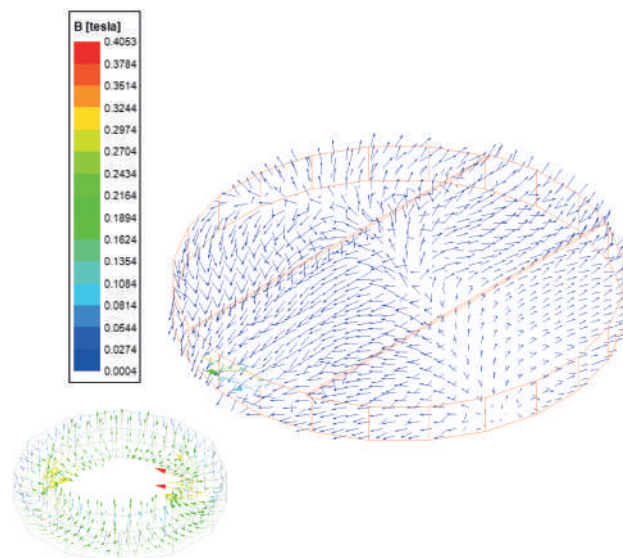


Figura 8.5. Gráfico de mordaza y modelo de bobina con vectores de campo magnético que muestra el campo magnético máximo (0,4 Tesla) y mínimo (0,1 Tesla) alcanzado con esta configuración.

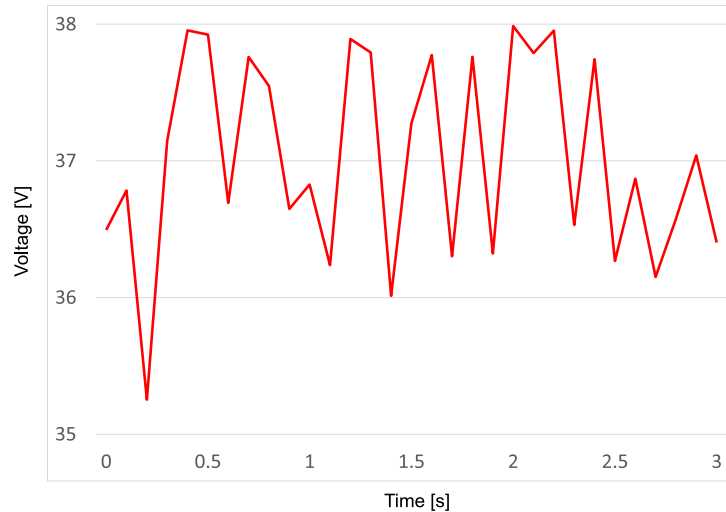


Figura 8.6. Gráfico de demanda de voltaje de la bobina desmagnetizadora para calcular el circuito eléctrico fuente ([63]).

8.5. Análisis en banco de pruebas

Para la validación de la capacidad de desmagnetización de la bobina diseñada por el método de elementos finitos con el voltaje propuesto y la selección de los componentes comerciales de serie para disminuir los costos de fabricación, se realizaron distintas mediciones con el gaussímetro FW Bell 6010, en la Figura 8.7 se puede observar la puesta a punto del instrumento de medición, mediante el apoyo de un compartimiento zero de Gauss o "Zero Gauss chamber" y una sonda axial, la cual se introduce dentro del compartimiento y se presiona el botón de zero en el panel del instrumento para referenciarlo a cero.



Figura 8.7. Gaussímetro FW Bell modelo 6010

Por ser un instrumento de precisión utilizado por su nivel de confianza que otorga, el fabricante entrega un certificado de funcionalidad al adquirirlo (ver Figura 8.8) donde asegura que trabajara

bajo las especificaciones mencionadas en el manual de usuario, sin embargo como todo instrumento de medición debe ser calibrado al menos una vez por año.



Figura 8.8. Certificado de calibración emitido por el fabricante del equipo.

Para realizar la calibración se requirió el apoyo de un sistema de medición de efecto Hall modelo MP55T de la marca ECOPIA como se muestra en la Figura 8.9, el cual se encuentra ubicado en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la Universidad Autónoma de México campus UAQ.



Figura 8.9. Sistema de medición de efecto Hall MP55T.

Este sistema permite el cambio de polaridad de dos imanes permanentes que siempre dan una magnitud constante de 0.55 Tesla, en la Figura 8.10 se pueden observar los dos imanes permanentes con una adaptación de unicel marcada en el recuadro rojo para no influir en el campo magnético que permite posicionar de mejor manera dentro del área donde se genera el campo magnético.

La calibración consistió en utilizar nuevamente la sonda axial y el compartimento zero de Gauss para calibrar el cero relativo del instrumento como se muestra en la Figura 8.11, como se mencionó en párrafos anteriores únicamente se presiono el botón zero en el instrumento para la referencia. Como siguiente paso es necesario mantener la sonda axial dentro de la zona del campo magnético preferentemente lo mas firme posible y centrado, manteniendo esta posición por unos segundos en lo que se estabiliza la lectura como se muestra en la Figura 8.12.



Figura 8.10. Soporte aislado para posición de sonda.



Figura 8.11. Calibración del cero relativo del gaussímetro.

Posteriormente se procedió a colocar de manera perpendicular al campo magnético la sonda axial del gaussímetro en la zona con la adaptación, teóricamente la lectura del instrumento debería de ser 0.55 T, tras diversas repeticiones del experimento se determino que la lectura real que muestra el instrumento es de 0.58 T como se muestra en la Figura 8.13 por lo cual se calculo la corrección general de 0.03 T a las posteriores lecturas del instrumento.



Figura 8.12. Manipulación de sonda axial en el campo magnético del sistema.



Figura 8.13. Lectura de los imanes permanentes.

Una vez calibrado el dispositivo se realizaron primeras pruebas sobre una cuchilla tomada como probeta de material AISI D2 (ver Figura 8.14) para verificar el procedimiento de magnetización y desmagnetización de los componentes. Para esto se mantuvo la probeta unos minutos bajo la influencia de un campo magnético externo para heredar estas propiedades.

Una vez magnetizada la probeta se procedió a realizar la lectura del campo magnético residual que retuvo, en la Figura 8.15 se puede observar el resultado de la lectura que es de 26.3 Gauss o su equivalente 2.63 mT, por lo tanto fue posible utilizarla para la experimentación.



Figura 8.14. Probeta de prueba para magnetización y desmagnetización.



Figura 8.15. Lectura de campo magnético de la probeta.

Se procedió a utilizar una muestra de rebaba de materiales similares a los que aparecen en el proceso de *fineblanking* con el propósito de verificar que la magnitud de campo magnético que posee la probeta retenga una cantidad apreciable para simular el mismo efecto dentro del proceso. En la Figura 8.16 se puede observar la muestra obtenida para el experimento.

Para verificar que la magnitud de campo magnético es suficiente como para mantenerse de manera no deseada en nuestra probeta de prueba, se esparcieron las partículas sobre la probeta



Figura 8.16. Muestra de rebaba para prueba en probeta.

para verificar que se mantenían unidas, en la Figura 8.17 se puede observar la probeta con las rebabas sobre su cuerpo de manera similar a lo que ocurre en la descripción de la problemática de la tesis.



Figura 8.17. Probeta magnetizada con rebaba incrustada.

Una vez observado el fenómeno se procedió a desmagnetizar la probeta manteniéndola tangente a la bobina desmagnetizadora como se muestra en la Figura 8.18, en donde se alimentó la bobina con un voltaje de 12 VCA y una corriente de 1.2 A durante 3 minutos sin movimiento alguno.

En la figura 8.19 se puede observar la medición obtenida después de la desmagnetización en donde se verifica que la bobina cumple su función y reduce el campo magnético en un 82 % tras tres minutos de influencia sobre la probeta.



Figura 8.18. Desmagnetización de probeta de prueba.



Figura 8.19. Medición de campo magnético de probeta después de la desmagnetización.

Una vez realizado el experimento a menor escala se replicó utilizando la parte inferior y superior del banco de pruebas, el procedimiento consistió nuevamente en colocar bajo influencia de un campo magnético externo los componentes para magnetizarlos y se procedió a tomar las lecturas como se muestra en la Figura 8.20 y en la Figura 8.21 respectivamente.

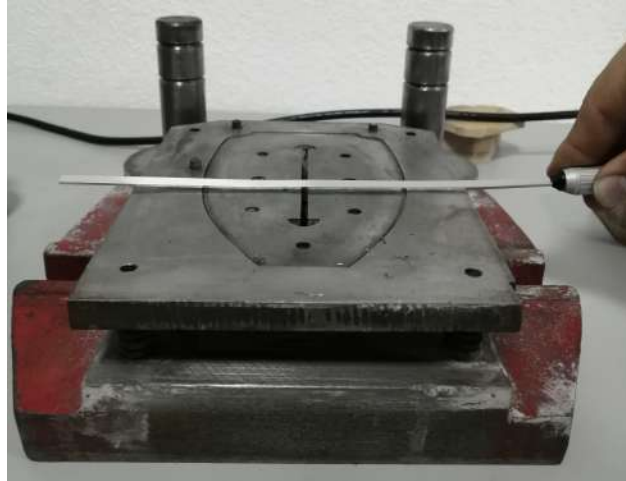


Figura 8.20. Medición de campo magnético de parte superior del troquel magnetizada.

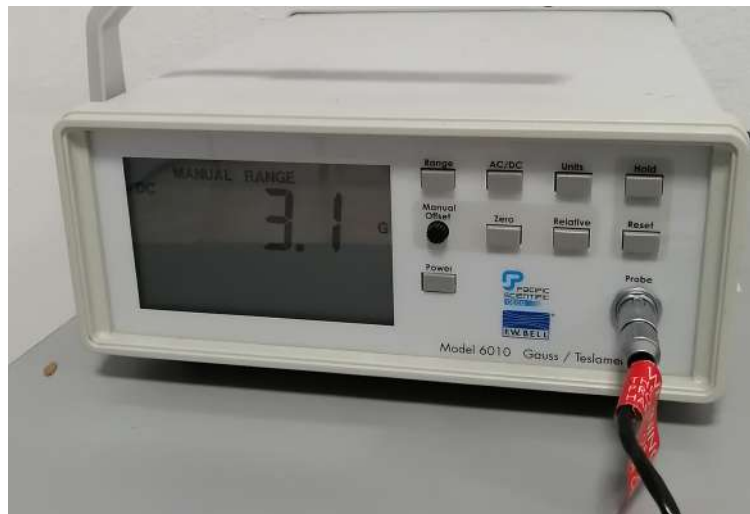


Figura 8.21. Lectura obtenida del campo magnético residual en parte superior.

Cabe destacar que para este procedimiento ya se implementaron las variaciones con los suplementos de madera para verificar la variación en la eficiencia de la desmagnetización con la bobina. En la Figura 8.22 se puede observar la aplicación de este procedimiento.

De igual manera se repitió la magnetización para la parte inferior como se muestra en la Figura 8.23 y Figura 8.24.

Al aplicar el proceso de desmagnetización se obtuvieron resultados en la parte superior de 0 mT y en la parte inferior de 0.08 mT, obteniéndose como resultado una eficiencia del 100 % y 71 % respectivamente.



Figura 8.22. Bobina desmagnetizadora con suplemento implementado.



Figura 8.23. Medición de campo magnético en parte inferior.



Figura 8.24. Lectura de campo magnético en parte inferior magnetizada.



Figura 8.25. Lectura de campo magnético en parte superior después de desmagnetizar.



Figura 8.26. Lectura de campo magnético en parte inferior después de desmagnetizar.

Conclusiones

La implementación de una metodología creada específicamente para mejorar el proceso de diseño es una gran ventaja para la definición del problema y la identificación de su causa raíz además, el agregar herramientas que ayudan a dar soporte a cada una de las etapas fortalecen el objetivo principal de la metodología. Obtener beneficios de realizar esta dinámica ayuda a que más empresas se integren al proceso creativo de que conlleva la creación de un producto capaz de atender las necesidades de los usuarios.

Actualmente en la industria automotriz se emplean herramientas similares enfocadas a *Six sigma* y *Lean Manufacturing*, las cuales son consideradas estándares para la misma, pero cuando se trata de innovación aplicar metodologías de diseño es la mejor forma de clasificar las etapas de los proyectos, asignar responsables para cada una de estas etapas y analizar los datos que surjan.

Es posible determinar un criterio de diseño para componentes activos como lo son los inductores de núcleo de aire partiendo de los parámetros esenciales del entorno donde se desempeñará, junto a características reales que están al alcance de los investigadores para poder realizar la construcción de la misma. Con la ayuda de la simulación por el método de elementos finitos se pudo obtener un objetivo fundamental para la construcción de un dispositivo desmagnetizador, evitando así los altos costos de pruebas en circuitos de alimentación con distintas topologías de construcción.

Además contribuyo al ahorro en cuanto a la selección de componentes comerciales con los que se puede llegar a obtener las demandas de alimentación mínimas o máximas requeridas para un correcto funcionamiento del desmagnetizador final.

La experimentación nos permitió validar el funcionamiento del modelo teórico obtenido con Ansys Electronics, así como eliminar distintos factores que pueden influir directamente en los costos de fabricación del producto final. Uno de los factores importantes eliminados fue la altura, donde se considera que no es necesario pensar en un mecanismo que permita calibrar la altura como se había pensado al momento de crear la propuesta 3D del prototipo.

La eficiencia al momento de desmagnetizar nos permite concluir que realmente es necesario generar un pequeño movimiento a lo largo del tiempo para mejorar el porcentaje de efectividad, ya que en algunas de las iteraciones de la experimentaciones se pudo verificar que dejar estática

la bobina no beneficia e inclusive vuelve nula la desmagnetización a pesar de estar generando un campo magnético tangente o a diferentes distancias de la superficie de interés.

A lo largo del desarrollo de la tesis se realizó el desarrollo y publicación de un artículo científico en la revista IEEE Xplore en conjunto con la Universidad Autónoma de Querétaro.

Este trabajo de investigación abre camino a la optimización de las nuevas metodologías empleadas para troquelar las nuevas necesidades de la industria automotriz así como mejorar el desempeño de lo último en tecnología de troquelado que involucran prensas hidráulicas de alta velocidad de hasta 90 golpes por minuto.

En una siguiente etapa se tiene como objetivo lograr implementar este nuevo producto en empresas dedicadas al desarrollo de esta tecnología en colaboración con sus centros de investigación dedicados a la predicción del comportamiento del proceso por medio del método de elementos finitos.

Bibliografía

- [1] Secretaria de economía. Estudio de prospectiva tecnológica para la manufactura de troqueles y su aplicación en el contexto nacional., 2014.
- [2] Qide Zheng, Xincun Zhuang, and Zhen Zhao. State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering*, 06 2018.
- [3] U Aravind, Uday Chakkingal, and P Venugopal. A review of fine blanking: Influence of die design and process parameters on edge quality. *Journal of Materials Engineering and Performance*, pages 1–32, 2020.
- [4] Farid Biglari, Amir Kermani, Mohammad Parsa, M. Nikbin, and Noel O’Dowd. Comparison of fine and conventional blanking based on ductile fracture criteria. *Proceedings of the 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2004*, 3, 01 2004.
- [5] Ramon Bagur. Procesos de manufactura. *Curso universitario de ingeniería metalúrgica, Universidad la Salle*, 2002.
- [6] M Sahli, Xavier Roizard, Mohamed Assoul, Guillaume Colas, Sylvain Giampiccolo, and Jean-Pierre Barbe. Finite element simulation and experimental investigation of the effect of clearance on the forming quality in the fine blanking process. *Microsystem Technologies*, 27(3):871–881, 2021.
- [7] Peter Sachnik, Sheikh Enamul Hoque, and Wolfram Volk. Burr-free cutting edges by notch-shear cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 249:229–245, 2017.
- [8] L. Gascon. *Electricidad y magnetismo*. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [9] M.A. Escobar V. Causes for magnetism on steel parts, 2020.
- [10] MCQ Alfredo Velásquez Márquez. El ciclo de histéresis en materiales ferromagnéticos. 2013.
- [11] E. Gomez de Leon. *Corrientes Inducidas, Nivel II*. Fundación Confemetal, 2004.
- [12] T.A. Stolarski and Y. Makida. Influence of permanent magnetic field on wear performance of dry sliding contacts. *Wear*, 271(7):1109 – 1123, 2011.
- [13] R.A. Serway. *Electricidad y magnetismo*. International Thompson Sapin Paraninfo, S.A., 2005.
- [14] R.A. Serway, C. Vuille, and A.E.G. Hernández. *Fundamentos de Física Vol 2*. Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2012.

- [15] R.G. Pérez. *Electrotecnia. ENAE0108*. IC Editorial, 2017.
- [16] Gustavo Betancourt and Escobar Andrés. Calculo de los valores máximos de campo magnético utilizando el método de los elementos finitos. *0122-1701*, XII:83, 05 2006.
- [17] William B Smythe. *Static and dynamic electricity*. 1988.
- [18] Ming Deng, Yi long Ma, and Lin Lv. Development of closed extruding fine blanking technology. *Procedia Engineering*, 81:1157 – 1162, 2014. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.
- [19] S. Takahashi. W. Grimm. PROCEDIMIENTO Y DISPOSITIVO PARA FABRICAR PIEZAS ESTAMPADAS, March 2010.
- [20] Lokeswar Patnaik, Saikat Ranjan Maity, and Sunil Kumar. A review on slug reversal during punching and blanking. *Materials Today: Proceedings*, 18:2745 – 2752, 2019. 9th International Conference of Materials Processing and Characterization, ICMPC-2019.
- [21] F. Castañón. Sistema de engrase de punzones sin aceite para matrices de estampación metálica y corte fino, March 2015.
- [22] Viktor Tittel and Ľubo Bernadi. Comparison of methods controlling slug pulling by using an indirect method in automotive industry. 2014.
- [23] Etsuro Katsuta, Tatsuhiko Aizawa, Hiroshi Morita, Kuniaki Dohda, and Masahiro Anzai. Fine piercing of electromagnetic steel sheets by micro-punches under nearly zero clearance. *Procedia Manufacturing*, 15:1459 – 1466, 2018. Proceedings of the 17th International Conference on Metal Forming METAL FORMING 2018 September 16 – 19, 2018, Loisir Hotel Toyohashi, Toyohashi, Japan.
- [24] Ridha Hambli, Simon Richir, Pascal Crubleau, and Bernard Taravel. Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22:20–25, 2003.
- [25] R.Q. Hsu, J.R. Chang, and D.L. Liang. Prediction of slug carry-up by the punch in blanking by air-blow of the slug. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1):252 – 255, 2008. 10th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies.
- [26] K. Sinram, A. Grafen, W. Janzon, and K. Werber. The influence of fine blanking on the magnetic properties of soft magnetic steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24(2):839–842, March 1988.
- [27] B. Walther J. Ochsenbein A. Walther, H. Fuchs. DEVICE FOR REMOVING PRECISION PUNCHING RESPECTIVELY FINE BLANKING PARTS FROM A TOOL OF A PRESS , July 2014.
- [28] M.D. Gram and R.H. Wagoner. *Fineblanking of high strength steels: Control of material properties for tool life*. PhD thesis, 2011.
- [29] Maurice Peterli. *Heat Treatment Simulation and Experimental Investigation of Thermal Distortion with a Special Focus on Fineblanked Parts*. PhD thesis, ETH Zurich, Zurich, 2017.

- [30] K. Karunakar, M. Ranjan, and K. Prabhu. A low cost demagnetizer with controllable cycle and adjustable level. *IEEE Transactions on Magnetics*, 17(5):2488–2492, 1981.
- [31] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey. Comparison of stepwise demagnetization techniques. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(4):1753–1758, 2002.
- [32] Luca Salvador. Influence of cutting process on magnetic properties of electrical steel, 2016-10-31.
- [33] Magnetic Maurer. Measuring residual magnetism of ferromagnetic parts. 2014.
- [34] Magnetic Maurer. Causes for magnetism on steel parts. 2014.
- [35] Magnetic Ma. Magnetic attraction forces on ferromagnetic particles. 2015.
- [36] B. Osgood Peirce. The anomalous magnetization of iron and steel. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 47(17):633–670, 1912.
- [37] A. Jegenstorf. DEVICE AND METHOD FOR SHAPNG SHEARED EDGES ON STAMPED OR FNE-BLANKED PARTS HAVING A BURR , July 2017.
- [38] H Hasegawa. Finite-temperature surface magnetism of fe(100). *Journal of Physics F: Metal Physics*, 17(1):165–183, jan 1987.
- [39] Jean-Paul Louvel and Peter Halupczok. Circuit arrangement for degaussing a picture tube, and respective picture display device, December 6 2007. US Patent App. 10/586,629.
- [40] John T Beechlyn. Alternating current demagnetizer, May 6 1941. US Patent 2,240,749.
- [41] Albert MAURER, Marek Rohner, Boris Ziegenhagen, et al. Uncontrolled alternating-current demagnetiser, December 24 2015. US Patent App. 14/749,350.
- [42] Elvir Kahrimanovic and Kenneth M Littwin. Thyristor controlled alternating current demagnetizer, February 7 2008. US Patent App. 11/881,619.
- [43] Jorge Fernando Alicot, Douglas A Narlow, Richard L Copeland, and David N Lambeth. Energizing circuit for eas marker deactivation device, August 29 2000. US Patent 6,111,507.
- [44] Albert Helfrick. Apparatus and method for degaussing magnetic storage media, March 8 1988. US Patent 4,730,230.
- [45] Huafeng Qin, Xiang Zhao, Shuangchi Liu, Greig Paterson, Zhaoxia Jiang, Shuhui Cai, Jinhua Li, Qingson Liu, and Rixiang Zhu. A newly designed demagnetization furnace for paleomagnetic thermal treatment with highly attenuated inside magnetic field intensity. *Earth and Space Science Open Archive*, page 52, 2020.
- [46] Daniel Pearson. Magnetizer and demagnetizer, February 13 2020. US Patent App. 16/058,675.
- [47] WE Schillinger, ER Morris, RS Coe, and DR Finn. Development of a 0.5 t magnetic-core alternating-field demagnetizer. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(4):1283–1295, 2016.

- [48] Li Feng Wei, Liang Cheng, and Xing Man Yang. The research and design of the adaptive pulse demagnetizer. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 182, pages 427–430. Trans Tech Publ, 2012.
- [49] Kneza Obrad, Batajniki DJUKIC, Viktor ZLATKOV, et al. Magnetizer/demagnetizer with a chopped magnetic field, March 3 2011. WO International Publication Number 2011/025402 A2.
- [50] AT Hovhannisyanyan and GI Pitkevich. Substantiation and development of demagnetizer structures the structure and operation of demagnetizer. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 3(3):32–35, 2016.
- [51] Sheng Bao, Meili Fu, Huangjie Lou, and Shuzhuang Bai. Defect identification in ferromagnetic steel based on residual magnetic field measurements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 441:590 – 597, 2017.
- [52] Takuhiko Ito, Arihito Kasahara, and Michitaka Hori. Novel demagnetization method after magnetic particle testing. In *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing pp. 1*, volume 16, 2017.
- [53] M Shahsavan and M Sedighi. An innovative experimental setup for laboratory tests of fine blanking process. In *Advanced Materials Research*, volume 650, pages 567–571. Trans Tech Publ, 2013.
- [54] A. Fontanet, Jordi Marcos, Llibert Ribó, Valentí Massana, and Josep Campmany. Design and construction of 3d helmholtz coil system to calibrate 3d hall probes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1350:012167, 11 2019.
- [55] MUKHAMEDGALI ADIL and Zaure Rakisheva. Design and simulation of uniform magnetic field. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6:22–26, 10 2018.
- [56] Alvaro Velásquez, Juliana Rodríguez, and Yhefferson Loaiza. Diseño y construcción de un teslámetro digital embebido para la caracterización magnética de materiales. *Ingeniería y Ciencia*, 11:99–113, 01 2015.
- [57] H. A. Weiss, P. Tröber, R. Golle, S. Steentjes, N. Leuning, K. Hameyer, and W. Volk. Loss reduction due to blanking parameter optimization for different non-grain oriented electrical steel grades. pages 1–7, 2017.
- [58] B. Martin, B. Hanington, and B.M. Hanington. *Universal Methods of Design: 100 Ways to Research Complex Problems, Develop Innovative Ideas, and Design Effective Solutions*. Rockport Publishers, 2012.
- [59] Frank BJ Leferink. Inductance calculations; methods and equations. pages 16–22, 1995.
- [60] Paul Lorrain and Dale R Corson. *Electromagnetism*. WH Freeman, 1979.
- [61] HJ Qi, K Joyce, and MC Boyce. Durometer hardness and the stress-strain behavior of elastomeric materials. *Rubber chemistry and technology*, 76(2):419–435, 2003.

- [62] ADİL Mukhamedgali and Zaure RAKİSHEVA. Design and simulation of uniform magnetic field. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(4):232–236, 2018.
- [63] Campos S Arreguin J, Rodriguez J. Design and optimization of a demagnetization device for fine blanking process by finite element analysis. 2021.

Índice de cuadros

2.1. Patentes y artículos	11
2.2. Patentes y artículos	12
7.1. Niveles y tratamientos para el experimento	40

Índice de figuras

2.1. Troquelado convencional vs <i>fineblanking</i> [4].	3
2.2. Proceso de formación del <i>fineblanking</i> [2].	4
2.3. Ciclo de histéresis [10].	6
2.4. Medidor de magnetismo residual [33].	13
2.5. Aplicación de campo magnético inducido por la tierra [33].	14
2.6. Material duro con acumulación de magnetismo residual [34].	15
2.7. Diagrama estático de fuerza magnética ejercida por una esfera [26].	16
2.8. Metodología actual de desmagnetización.	17
3.1. Atracción de partículas en un material ferromagnético [26].	19
3.2. Elemento principal afectado por el magnetismo residual.	20
3.3. Zonas principales afectadas por el magnetismo residual.	20
4.1. Influencia de las tres técnicas de corte diferentes (a) corte por chorro de agua, (b) guillotinado, y (d) punzonado en la dureza del material junto al corte superficie así como (c) en el comportamiento de magnetización a 100 Hz y 1.0 T en el dirección de laminación [57].	21
4.2. Gráfico representativo del desperdicio contra la producción total (autoría propia).	22
7.1. Diagrama de la metodología doble diamante (Design Council UK, 2005).	27
7.2. Diagrama de la metodología doble diamante adaptado (diagrama de autoría propia).	28
7.3. Ilustración representativa de la herramienta focus group([58]).	29
7.4. Gaussímetro marca FW Bell modelo 5170.	30
7.5. Toma de lecturas de campo magnético en troquel de <i>fineblanking</i>	30
7.6. Modelo de mordaza simplificado para optimizar recursos informáticos.	31
7.7. Modelo de bobina simplificado.	32
7.8. Frontera de trabajo (color morado), mordaza (color naranja) y bobina (color verde).	33
7.9. Circuito de alimentación propuesto para el inductor.	33
7.10. Región de movimiento declarada para la bobina.	34
7.11. Parte superior e inferior del troquel.	35
7.12. Componentes principales de la parte inferior.	36
7.13. Componentes principales de la parte superior.	37
7.14. Medidor de dureza Brinell digital (foto extraída de TECHLABSYSTEMS).	38
7.15. Vernier convencional para mediciones de precisión.	38

7.16. Aumentos de madera (32 mm, 30 mm y 28mm respectivamente).	42
7.17. Bobina de arranque con carcasa.	42
7.18. Bobina suplementada sobre la cara del troquel.	43
8.1. Fotografía de pieza producida y empacada con defecto (autoría propia).	46
8.2. Prototipo de bobinas Helmholtz	47
8.3. Propuesta de prototipo desmagnetizador	48
8.4. Gráfica de visualización de la cantidad de energía producida por la bobina en Joules por metro cubico.	49
8.5. Gráfico de mordaza y modelo de bobina con vectores de campo magnético que muestra el campo magnético máximo (0,4 Tesla) y mínimo (0,1 Tesla) alcanzado con esta configuración.	49
8.6. Gráfico de demanda de voltaje de la bobina desmagnetizadora para calcular el circuito eléctrico fuente ([63]).	50
8.7. Gaussímetro FW Bell modelo 6010	50
8.8. Certificado de calibración emitido por el fabricante del equipo.	51
8.9. Sistema de medición de efecto Hall MP55T.	51
8.10. Soporte aislado para posición de sonda.	52
8.11. Calibración del cero relativo del gaussímetro.	52
8.12. Manipulación de sonda axial en el campo magnético del sistema.	53
8.13. Lectura de los imanes permanentes.	53
8.14. Probeta de prueba para magnetización y desmagnetización.	54
8.15. Lectura de campo magnético de la probeta.	54
8.16. Muestra de rebaba para prueba en probeta.	55
8.17. Probeta magnetizada con rebaba incrustada.	55
8.18. Desmagnetización de probeta de prueba.	56
8.19. Medición de campo magnético de probeta después de la desmagnetización.	56
8.20. Medición de campo magnético de parte superior del troquel magnetizada.	57
8.21. Lectura obtenida del campo magnético residual en parte superior.	57
8.22. Bobina desmagnetizadora con suplemento implementado.	58
8.23. Medición de campo magnético en parte inferior.	58
8.24. Lectura de campo magnético en parte inferior magnetizada.	59
8.25. Lectura de campo magnético en parte superior después de desmagnetizar.	59
8.26. Lectura de campo magnético en parte inferior después de desmagnetizar.	60