

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Reducción de la incidencia magnética presente en un proceso de
troquelado debido a la composición martensítica de sus partes de
formado**

INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE
LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR
POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

ANA LUCIA MEZA CORDERO

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO

SAN JOSÉ, COSTA RICA

2017

TRIBUNAL EXAMINADOR

Proyecto de Graduación sometido a la consideración de la Escuela de Ingeniería Química
de la Universidad de Costa Rica como requisito final por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Química

Ana Lucia Meza Sustentante


Aprobado por:



Presidente del Tribunal



Natalia Hernandez. Ph.D
Directora del Proyecto
Profesora de Materiales de la Escuela de Ingeniería Química



Ligia Carmona Infante. M.Sc
Miembro Lector
Gerente de Calidad en Empresa de Industria Médica



Randall Ramirez. M.Sc
Miembro Lector
Profesor de Administración en la Escuela de Ingeniería Química

Proverbio

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa” (Mahatma Gandhi)

Reconocimientos

Reconocer a la Escuela de Ingeniería de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica por la ayuda brindada en el tema asesoría en tipos de materiales magnéticos y por la accesibilidad para la nitruración en frío realizada a las piezas en cuestión.

Reconocer a Ligia Carmona Infante, lectora del proyecto por parte de la empresa por todo su apoyo durante el transcurso del proyecto y por impulsar la implementación del mismo. También a la empresa por la disponibilidad de los equipos y por proveer todos los recursos necesarios para la realización de este proyecto

Reconocer al Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA) de la Universidad de Costa Rica por la disponibilidad de sus equipos para el Proyecto de Graduación.

A la Escuela de Ingeniería Química por la ayuda brindada durante todos los cursos del plan de estudios y durante la etapa final de carrera

Agradecimientos

A mi familia por el apoyo brindado todo este tiempo y por la perseverancia hacia la conclusión de este proceso, largo pero de mucha enseñanza y superación.

A mis amigos, especialmente mis compañeros de Ingeniería Química, los cuales me acompañaron durante todo este proceso brindando apoyo y lecciones aprendidas para una mejor ejecución del proyecto.

Resumen

El proyecto consistió en un antes y después de un proceso de troquelado de una industria médica en donde se daba una forma específica a un alambre de acero para luego ser ensamblado a otro componente. En su estado actual, el problema consistía en que en el proceso de troquelado se estaban adhiriendo residuos de alambre o viruta en las paredes de las partes de troquelado, las cuales generaban defectos en los alambres entrantes a la máquina. Se generaba un daño (mordedura) en el alambre, el cual debilitaba su diámetro y provocando el mismo no tuviera el mismo desempeño (se reventaba al accionar el dispositivo medico). Luego de un análisis investigativo por parte del departamento de calidad y manufactura de la empresa se concluyó que la adherencia correspondía a un efecto magnético en las partes de troquelado y que el efecto se debía principalmente a la composición del material de las mismas.

En el estado actual las partes estaban compuestas por acero 420, el cual corresponde a la familia de los aceros martensíticos los cuales presentan una permeabilidad magnética alta de μ_r 700-1000 y por ende se considera magnético.

El proyecto consistió en probar distintos materiales para las partes de troquelado que cumplieran con las propiedades mecánicas del proceso de formado, alta dureza debido al constante golpe de las mismas y baja tenacidad pero además que cumplieran con la condición antimagnética necesaria para contrarrestar o eliminar la adherencia de contaminación en las partes y por ende eliminar los defectos relacionados al daño en el alambre.

Después de distintas pruebas experimentales con prototipos de los nuevos materiales: Acero serie 304, Carbide y titanio serie 5, se concluyó que el titanio serie 5 cumplía con las propiedades mecánicas del proceso y que además presentaba la condición antimagnética del proceso.

Una vez concluida la prueba se validó el proceso con su respectivo proceso de implementación, cumpliendo con los requerimientos de calidad para que todos los procesos de formado/troquelado de las líneas de producción utilizaran el titanio grado 5 como material en las partes de formado.

Una vez implementado el cambio, se verificó la efectividad del mismo midiéndolo con la disminución de defectos en las unidades.

Índice

	Página
Resumen.....	vi
1 Introducción	15
2 Marco teórico	17
2.1 Sistema de Calidad en Industrias Médicas.....	17
2.2 Metodología Seis Sigma:	17
2.3 Resolución de problemas: Análisis de causa raíz y diagrama de causa y efecto	19
2.4 Propiedades de los materiales	20
2.5 Clasificación de los Materiales	22
2.6 Magnetismo en los materiales.....	23
2.7 Imanación y susceptibilidad magnética	25
2.8 Tipos de aceros inoxidables	27
2.9 Endurecimientos superficiales	32
2.10 Procesos de troquelado.....	33
2.11 Escalas de dureza	34
2.12 Medición del campo magnético	38
3 Metodología	38

3.1	Diagnóstico del proceso	39
3.2	Selección del material para la reducción de la incidencia magnética	41
3.3	Construcción del prototipo	43
3.4	Metodología de prueba para los prototipos.....	43
3.5	Recolección de datos una vez instalados los prototipos	43
3.6	Recolección de datos para el posible material elegido	44
3.7	Equipo experimental	46
4	Análisis de resultados.....	51
4.1	Diagnóstico del proceso	51
4.2	Selección del material optimo.....	59
4.3	Construcción de prototipos	66
4.4	Ejecución de la metodología de prueba del prototipo.....	66
4.5	Tratamiento superficial de las partes.....	68
4.6	Metodología de prueba con material elegido y análisis.....	70
4.7	Implementación (validación) del prototipo a todas las líneas de producción	75
4.8	Análisis de mejoras con la implementación lograda.....	80
5	Conclusiones y recomendaciones	88
5.1	Conclusiones	88

5.2 Recomendaciones.....	90
6 Nomenclatura	91
7 Bibliografía	92
8 Apéndice	95
8.1 Apéndice A: Datos experimentales	95
8.2 Apéndice B: Muestra de cálculo	95

Índice de figuras

	Página
Figura 2.2.1 Efectos de la disminución de la variabilidad de un proceso, modelo (Krajewski, 2000).	18
Figura 2.3.1 Diagrama de causa y efecto (Vasconcellos, 2003).	20
Figura 2.6.1 Diagramas de magnetización de dipolos (Seippel, 1977)	24
Figura 2.8.1 Diagrama de fases aceros (Vazquez, 2000).....	30
Figura 2.10.1 Diagrama de troquelado (DeGarmo, Black, & Kohser, 1994).....	33
Figura 2.11.1 Muestra de escala Rockwell (Groover, 1997)	35
Figura 2.11.2 Diagrama de ensayos de durezas Brinell y Rockwell (Groover, 1997).....	36
Figura 3.2.1 Metodología de selección del material (Asbhy).....	42
Figura 3.7.1 Cortadora/Máquina de hilo, electroerosionadora.	47
Figura 3.7.2 Máquinas de troquelado.	47
Figura 3.7.3 Dibujo de la parte de formado de troquelado.	48
Figura 3.7.4 Dibujo representativo de inserción del alambre en máquina de troquelado. ..	48
Figura 3.7.5 Durómetro utilizado para comparación en Rc.....	49
Figura 3.7.6 Gaussímetro utilizado para medición y comparación de campo magnético. ..	49
Figura 3.7.7 Comparador Óptico para revisión de geometría del alambre.....	50
Figura 3.7.8 Microscopio para análisis de rupturas en alambre	51
Figura 4.1.1 Unidad detectada en la línea de producción.	53
Figura 4.1.2 Unidad replicada por la estudiante Ana Lucía Meza.....	53

Figura 4.1.3 Unidad detectada en la línea de producción.	53
Figura 4.1.4 Unidad replicada por la estudiante Ana Lucía Meza.....	54
Figura 4.1.5 Partes contaminadas para ejecutar la réplica del defecto.	54
Figura 4.1.6 Adherencia en las partes de troquelado en un evento de producción.	55
Figura 4.1.7 Diagrama de causa y efecto para el defecto en análisis (Creado por Ana Lucía Meza, 2017).	56
Figura 4.1.8 Espacio para la remoción de viruta en las partes de troquelado y zonas probadas con el imán.	57
Figura 4.1.9 Ejemplificación del método empírico del imán con el acero 420.....	58
Figura 4.2.1 Metodología de selección propuesta por Ashby.....	60
Figura 4.2.2 Requisitos y restricciones para la selección del material.	62
Figura 4.2.3 Gráfico de Ashby de Desgaste contra Dureza.....	63
Figura 4.4.1 Proporción de las partes internas con respecto a las partes externas de troquelado.	67
Figura 4.6.1 Medición de dureza cara interna de parte de troquelado.....	72
Figura 4.6.2 Gráfico de comparación de durezas.	73
Figura 4.7.1 Proporción de las partes internas con respecto a las partes externas de troquelado.	76
Figura 4.7.2 Análisis de 1 Sample T Minitab para comparación de medias.....	79
Figura 4.7.3 Prueba de normalidad.....	80
Figura 4.8.1 Reducción de defectos luego de la implementación.	81
Figura 4.8.2 Reducción de tiempo muerto post implementación.	83

Figura 4.8.3 Mejora en quejas de usuario.....	86
Figura 4.8.4 Análisis de punto de cambio luego de la implementación de cambio de material	87

Índice de cuadros

	Página
Cuadro 2.4.1 Tipos de propiedades de los materiales (Ashby, 2008).....	21
Cuadro 2.7.1 Permeabilidad relativa de algunos materiales (Mosca, 2005).	27
Cuadro 2.8.1 Composición del titanio grado 5 (Acequisa, 1983)	31
Cuadro 2.8.2 Propiedades mecánicas del titanio grado 5 (Chilexpo, 2004).....	31
Cuadro 2.11.1 Diferentes durezas de los metales (Groover, 1997)	37
Cuadro 3.4.1 Valor de dureza de las partes por cambiar	43
Cuadro 3.6.1 Metodología de prueba para material seleccionado.....	45
Cuadro 3.6.2 Metodología de prueba variable	45
Cuadro 3.7.1 Equipo experimental	46
Cuadro 4.1.1 Herramienta “es/no es”	52
Cuadro 4.1.2 Análisis de presencia de campo magnético en material actual (Acero 420)..	58

Cuadro 4.2.1 Permeabilidad magnética material actual en proceso	62
Cuadro 4.2.2 Cuadro Comparativo: Propiedades de los Materiales (Dieter, 1997)	64
Cuadro 4.4.1 Pruebas experimentales con titanio grado 5	67
Cuadro 4.4.2 Pruebas experimentales con acero 304	67
Cuadro 4.4.3 Pruebas experimentales con Carbide	68
Cuadro 4.5.1 Pruebas experimentales con Carbide tratado	69
Cuadro 4.5.2 Pruebas experimentales con acero tratado	69
Cuadro 4.6.1 Composición del titanio grado 5	70
Cuadro 4.6.2 Dureza del titanio grado 5.....	70
Cuadro 4.6.3 Propiedades magnéticas del titanio grado 5.....	70
Cuadro 4.6.4 Resultados variables con gaussimetro en las partes con titanio grado	71
Cuadro 4.6.5 Resultados de dureza Rockwell C en el titanio grado 5	72
Cuadro 4.6.6 Costo total de las partes de troquelado con el nuevo material.....	74
Cuadro 4.6.7 Costo total de la inversión con el nuevo material implementado	74
Cuadro 4.7.1 Prueba partes internas con titanio grado 5	76
Cuadro 4.7.2 Prueba partes internas con Carbide y acero 304 tratado y sin tratar	77
Cuadro 4.8.1 Minutos de tiempo muerto pre implementación	83
Cuadro 4.8.2 Minutos de tiempo muerto luego de implementación	83
Cuadro 4.8.3 Ganancia por reducción de tiempo muerto en máquinas	84
Cuadro 4.8.4 Resultados de % de confianza del cambio percibido.....	86
Cuadro 8.1.1 Mediciones Gaussimetro: Acero 420 y Titanio	95

1 Introducción

Hoy en día el ingeniero químico abarca un gran campo profesional, esto debido a su alta aplicación en los diferentes procesos industriales. Un campo de aplicación que ha surgido con el paso de los años es el campo en las industrias médicas. El papel del ingeniero químico en este tipo de industrias ha sido considerado de valor agregado, principalmente debido a su conocimiento en el tema de materiales de proceso y optimización de recursos. Su amplio conocimiento en polímeros y metales ha logrado que la Ingeniería Química se posicione como una carrera llamativa ante este tipo de mercado tan exitoso en el mercado costarricense. El éxito de este tipo de industrias en el país radica principalmente en qué consisten en dispositivos de mínima invasión al cuerpo, disminuyendo así el periodo de recuperación de los pacientes. Adicionalmente sus proyecciones siempre cuentan con una visión de innovación, implementando nuevos productos y mejoras en sus procesos actuales. Adicionalmente el estricto control de aseguramiento de la calidad que presentan, garantiza que el producto llegue al paciente en perfectas condiciones.

También, el ingeniero químico ha sido solicitado en este tipo de industrias debido a su excelente desempeño en mejoras de procesos y resolución de problemas. Al detectarse una oportunidad de mejora dentro de un proceso industrial, inicia una etapa de monitoreo y análisis de oportunidades para así implementar mejoras robustas en el proceso productivo. Debido a esto, es indispensable el conocer las diferentes metodologías de mejoras en proceso ya que representan numerosos beneficios para este tipo de empresas, dado que se exponen a altas exigencias y entornos competitivos. Toda empresa competitiva busca

trabajar con calidad para brindar productos y servicios que permanentemente satisfagan al cliente, buscando constantemente: la eliminación de defectos repetitivos que llegan al mercado por medio de innovación, creatividad y análisis.

En este proyecto, se buscará una mejora a un proceso de troquelado en donde se le da una forma específica a un alambre de ensamble. Durante el proceso de formado, se forman residuos de alambre que se adhieren a las partes de formado debido a la naturaleza magnética de las mismas. Esto ocasiona defectos en los alambres ya que los mismos sufren de un corte mecánico, reduciendo considerablemente el diámetro del alambre. La mejora consiste en reducir el magnetismo de las partes de formado del sistema de troquelado, proponiendo un nuevo material con distintas propiedades. Esta mejora se hará mediante investigaciones de selección de material, análisis y pruebas experimentales

El proyecto se realizó en una empresa médica ubicada en el Coyoacán de Alajuela. Este mismo se relaciona con la Ingeniería Química debido al proceso investigativo y de prueba que requiere analizar el comportamiento de un material. También el proyecto involucra en gran medida la mejora de un proceso actual, con base en la metodología Six Sigma buscando siempre la mejora continua de los procesos.

2 Marco teórico

2.1 Sistema de Calidad en Industrias Médicas

El éxito de toda industria médica se basa principalmente en un robusto control o sistema de calidad que rige cualquier estrategia o planeación de la misma. El término control de calidad que explica Vairo (1993) se refiere a un ente cuyo propósito es garantizar la calidad de los productos que se entregan al mercado, y ésta es la resultante de un correcto diseño, del uso de materiales y equipos adecuados para el óptimo proceso (Vairo, 1993). Esto hace que la calidad del producto sea eficaz, que los costos disminuyan y que la producción aumente.

También se le conoce como aseguramiento de calidad ya que consiste en un conjunto de acciones planificadas y sistemáticas que según Alonso (1998) son necesarias para proporcionar una confianza adecuada de que un producto o servicio satisfará los requisitos dados sobre la calidad de la empresa (Alonso, 1998).

Es importante mencionar que el control de calidad no es algo estático que una vez que se alcance se deba mantener, lo que explica Alonso (1998) es que consiste en diferentes estrategias a largo plazo enfocadas en la mejora continua que permitan la competitividad en el mercado de la industria (Alonso, 1998).

2.2 Metodología Seis Sigma:

El modelo Six Sigma de acuerdo con Cabrera (2012) representa una metodología, considerada necesaria por numerosas empresas en el mundo, para racionalizar y mejorar los procesos reduciendo la variabilidad de los procesos bajo evidencia estadística con respecto

a un valor central y así lograr la estabilidad y capacidad de los procesos respectivos (Cabrera, 2012).

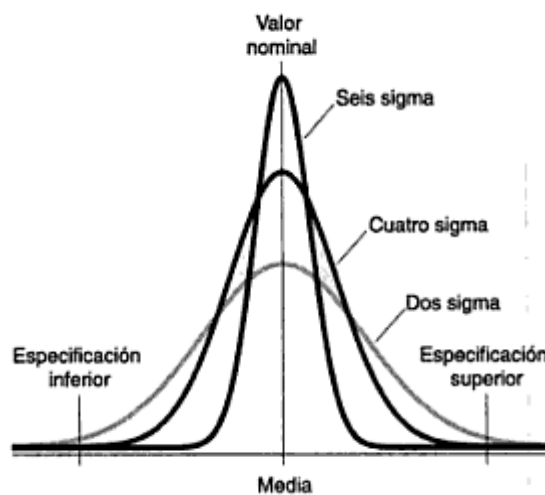


Figura 2.2.1 Efectos de la disminución de la variabilidad de un proceso, modelo (Krajewski, 2000).

- Definir oportunidades: consiste en realizar un mapeo de los procesos para detectar posibles mejoras identificando problemas críticos o causas raíces en los procesos (Rivera, 2006).
- Medir el sistema: Consiste en la medición de la relación de las variables críticas de entrada y las críticas de salida y en el diseño de experimentos para medir la variabilidad del proceso. También en la medición del sistema se analizan los datos variables y los atributos que brinda el proceso (Rivera, 2006).
- Analizar oportunidades: entre las herramientas utilizadas se encuentran: diagrama de causa y efecto, gráficas de control, análisis de capacidad, histogramas, análisis de planes estadísticos entre otros (Rivera, 2006).

- Mejorar el sistema: Implementación de mejoras continuas y sistemas más robustos.
- Controlar el sistema: Controlar el sistema de manera continua y robusta, para así evaluar y confirmar la efectividad de las mejoras.

2.3 Resolución de problemas: Análisis de causa raíz y diagrama de causa y efecto

El análisis de la causa raíz de un problema y su acción correctiva consiste en varios pasos a seguir según Okes (2009): (Okes, 2009).

1. Establecer el problema en cuestión
2. Entender el proceso: diagnosticar el proceso
3. Identificar las posible causas raíces del problema
4. Recolección de información o datos
5. Analizar los datos obtenidos
6. Identificar posibles soluciones a la problemática en cuestión
7. Seleccionar la solución a implementar para la mejora
8. Evaluar la eficacia y capacidad de la solución: verificar la efectividad

Diagrama de causa y efecto: conocido como Ishikawa por su creador, consiste en un diagrama visual de cola de pescado en donde se listan las posibles causas de un efecto o

problema específico. Vasconcellos (2003) describe que normalmente se listan las categorías: Hombre, método, material, equipo, ambiente, entre otros (Vasconcellos, 2003).

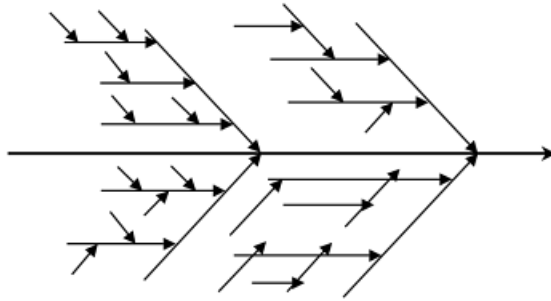


Figura 2.3.1 Diagrama de causa y efecto (Vasconcellos, 2003).

Procedimiento manual para elaborar un diagrama de causa y efecto de acuerdo a lo que explica Cabrera (2012) (Cabrera, 2012):

- Se define de forma concisa el problema (cabeza del pescado).
- Se indican las categorías que se consideren apropiadas al problema en las espinas de mayor tamaño.
- Se realiza una lluvia de ideas de posibles causas y se asocian a una categoría específica, esto con el equipo indicado de personas que tienen una relación directa al problema.

2.4 Propiedades de los materiales

Las propiedades de un material se expresan en términos del tipo y magnitud de la respuesta a un estímulo específico.

Ashby (2008) lista las propiedades importantes de un material sólido se agrupan en seis categorías (Ashby, 2008):

1. Mecánicas: módulo elástico y resistencia
2. Eléctricas: conductividad eléctrica, constante dieléctrica
3. Térmicas: conductividad térmica, constante calorífica
4. Magnéticas: respuesta ante un campo magnético
5. Ópticas: índice de refracción y reflectividad
6. Químicas: reactividad

A continuación se muestra un ejemplo de tipos de propiedades de acuerdo a Ashby (2008)

Cuadro 2.4.1 *Tipos de propiedades de los materiales (Ashby, 2008)*

Tipos de Propiedades	
Económicas	Precio, disponibilidad y reciclabilidad
Físicas	Densidad
Mecánicas	Módulos, límite elástico, resistencia a la tracción, dureza, tenacidad a la fractura, resistencia a la fractura, resistencia a la fluencia, amortiguamiento de las vibraciones
Térmicas	Conductividad térmica, calor específico, coeficiente de expansión térmica
Eléctricas y magnéticas	Resistividad, constante dieléctrica, permeabilidad magnética
Interacción con el entorno	Oxidación, Corrosión, Desgaste
Producción	Facilidad de producción, unión, acabado
Estéticas	Color, textura, aspecto

2.5 Clasificación de los Materiales

Los materiales sólidos se agrupan o clasifican en 3 principales grupos: metales, cerámicos y polímeros. Sin embargo también existen dos grupos adicionales de materiales considerados como técnicos: los materiales compuestos y los semiconductores (Callister, 2002). A continuación se describen sus principales características de acuerdo con lo que menciona Callister (2002):

- **Metales:** tienen un gran número de electrones deslocalizados que no pertenecen a ningún átomo en concreto. Los metales son aquellos materiales que conducen el calor y la electricidad. Son resistentes aunque algunos se deforman. Ante la luz, son opacos (Callister, 2002).
- **Cerámicas:** son aquellos compuestos constituidos por metales y no metales (óxidos, nitruros y carburos). Dentro de esta clasificación se encuentran materiales como la arcilla, vidrio y cemento. Este tipo de grupo se caracteriza por ser aislantes térmicos y eléctricos. También son duras y frágiles (Callister, 2002).
- **Polímeros:** son compuestos orgánicos compuestos de carbón e hidrógeno que se caracterizan por estructuras moleculares de gran longitud en su mayoría. Se consideran entre otras cosas como muy flexibles y poco densos (Callister, 2002).

- **Materiales Compuestos:** son aquellos materiales conformados por más de un tipo de material. La fibra de vidrio es un ejemplo claro de esta clasificación de materiales. Estos materiales son diseñados para para alcanzar la mejor combinación de las características de cada componente y así utilizarlos en distintas aplicaciones (Callister, 2002).
- **Semiconductores:** son aquellos materiales que tienen propiedades eléctricas intermedias entre los materiales conductores y los aislantes. Se utilizan principalmente en las industrias eléctricas de circuitos y ordenadores (Callister, 2002).

2.6 Magnetismo en los materiales

Ochoa (2002) menciona que todos los materiales están constituidos por átomos, los cuales tienen núcleos con cargas positivas rodeados por cargas negativas. Estas últimas giran de tal manera que dan lugar a campos magnéticos. Los materiales magnéticos también llamados ferromagnéticos son aquellos en los que sus giros de cargas negativas y los campos magnéticos se orientan en la dirección del campo magnético creado por las corrientes que circulan por los circuitos eléctricos, generando así la magnetización del mismo (Ochoa, 2002). El hierro, algunos de los tipos de aceros, y el mineral magnetita son ejemplos de materiales que poseen propiedades magnéticas. Todos los materiales sin embargo, son atraídos en mayor o menor medida por un campo magnético.

Felix (2012) explica que las propiedades de un material magnético se encuentran reflejadas en su curva de magnetización o curva de histéresis, esta nos describe la forma en la que se va magnetizando un material en función del campo externo aplicado. Dependiendo de esta curva de histéresis, es posible clasificar los materiales magnéticos de acuerdo a su aplicación (Felix, 2012).

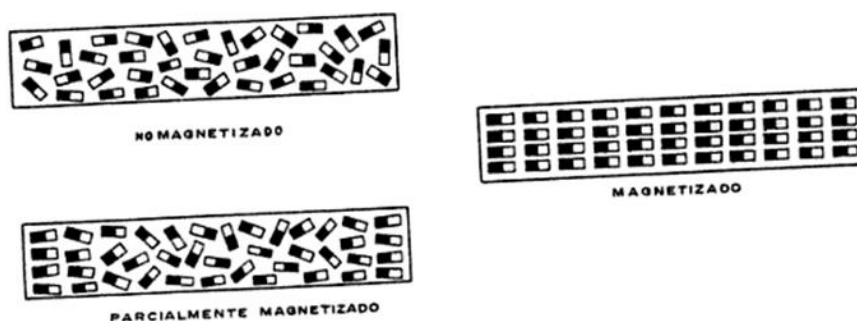


Figura 2.6.1 Diagramas de magnetización de dipolos (Seippel, 1977)

A continuación se muestra la clasificación de los materiales según su magnetismo, es decir su clasificación de acuerdo a su comportamiento ante un campo magnético externo:

- **Paramagnéticos:** explica Mosca (2005) que surge por el alineamiento parcial de los espines electrónicos o de los momentos magnéticos atómicos o moleculares en presencia de un campo magnético externo en la dirección y sentido del campo magnético. En este tipo de materiales, los dipolos magnéticos no interaccionan de manera fuerte entre sí, y la mayoría del tiempo están orientados al azar. En los materiales paramagnéticos a temperaturas normales y con campos magnéticos normales en magnitud, solo una pequeña porción de las moléculas se ven constantemente alineadas (Mosca, 2005).

- **Diamagnéticos:** estos materiales, describe Mosca (2005), poseen momentos dipolares magnéticos orbitales inducidos la mayoría del tiempo por un campo magnético externo. Estos momentos son opuestos al sentido del campo magnético y por lo tanto debilitan el campo total. El fenómeno del diamagnetismo se observa en aquellos materiales que no poseen momentos magnéticos permanentes (Mosca, 2005)
- **Ferromagnéticos:** son aquellos materiales con una fuerte interacción entre los dipolos magnéticos vecinos que lo rodean. Ante campos magnéticos externos débiles estos materiales presentan una fuerte y directa alineación de sus átomos. Mosca (2005) explica que es tan fuerte la alineación que sin la presencia de campos magnéticos externos, estos materiales pueden tener sus dipolos alineados (Mosca, 2005).

2.7 Imanación y susceptibilidad magnética

Existen dos propiedades importantes cuando se trata de magnetismo: imanación y susceptibilidad magnética. A continuación se definen ambas:

Imanación: cuando un material se sitúa en un campo magnético intenso, como el de un solenoide, describe Mosca (2005) el campo magnético de este tiende a alinear los momentos dipolares magnéticos (permanentes o inducidos) dentro del material en cuestión. A este fenómeno se le conoce comúnmente como imanación.

La imanación (M) tiene como definición el momento dipolar magnético neto por unidad de volumen del material (Mosca, 2005):

$$M = \frac{du}{dV}$$

$$B_m = u_o M$$

En los materiales paramagnéticos y ferromagnéticos, M posee la misma dirección y sentido que el campo magnético (B_m) y en los diamagnéticos, M se opone al mismo. X_m corresponde a la susceptibilidad magnética. Para los materiales paramagnéticos. X_m es un número pequeño, cerca de uno y es dependiente de la temperatura, esto según lo descrito por Mosca (2005).

$$M = X_m \frac{B}{u_o}$$

En los materiales diamagnéticos la susceptibilidad es un número negativo independiente de la temperatura. En los materiales ferromagnéticos esta propiedad tiene un valor mucho mayor a uno, considerándose como materiales magnéticos (Mosca, 2005).

Permeabilidad magnética: Mosca (2005) lo define como la medida de la capacidad de un material para conducir líneas de fuerzas magnéticas y es descrito de la siguiente manera:

$$u_r = \frac{u}{u_o}$$

A continuación, en el cuadro 2.7.1, se muestran las permeabilidades magnéticas de algunos materiales ferromagnéticos como referencia y ejemplificación:

Cuadro 2.7.1 *Permeabilidad relativa de algunos materiales (Mosca, 2005).*

Material	Permeabilidad Relativa
Níquel	50
Fierro Fundido	1000
Acero Fundido	2000
Acero para transformador	5000
Pemalloy	30000 a 80000

2.8 Tipos de aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aquellos materiales altamente resistentes a la corrosión, elevada resistencia y que comúnmente tienen un alto contenido de cromo. Su nombre inoxidable corresponde a que en presencia de aire (oxígeno) estos forman una pared o película delgada de óxido de cromo, protegiéndolo de esta forma contra la corrosión.

Schimid (2002) describe que este tipo de acero también contiene altos contenidos de: níquel, molibdeno, cobre, titanio, aluminio, entre otros elementos. Una característica importante para estos aceros, es que entre más elevado el contenido de carbono menor será la resistencia a la corrosión del tipo de acero en cuestión (Schmid, 2002).

De acuerdo con Schmid (2002) los aceros inoxidables se clasifican en cinco tipos principales (Schmid, 2002):

- **Aceros Austeníticos:** son aquellos aceros nombrados con serie 200 y 300 con base en normas y bases de datos. Este tipo de acero está constituido principalmente por níquel, cromo y manganeso. Se consideran antimagnéticos y con una alta resistencia a la corrosión. Sin embargo estos suelen tender a agrietarse. Son el tipo más dúctil de todos los aceros. Entre sus principales aplicaciones en la industria están: artículos de cocina, componentes para hornos e intercambiadores de calor y acoplamientos.
- **Aceros Martensíticos:** son aquellos nombrados con serie 400 y 500 según normas y bases de datos. Este tipo no contiene níquel y suelen endurecerse por tratamientos térmicos. Son altamente resistentes a la fatiga y corrosión y su porcentaje de Cr normalmente ronda el 17%. Los aceros martensíticos son magnéticos. Entre sus principales aplicaciones en la industria se encuentran: la cuchillería, válvulas y herramientas quirúrgicas.
- **Aceros Ferríticos:** son aquellos nombrados con serie 400 con base en las normas y bases de datos. Es el tipo de acero que contiene mayor porcentaje de cromo (alrededor de 27%). Este tipo de acero se endurece mediante el trabajo en frío. Su aplicación cubre principalmente la industria automotriz
- **Aceros Endurecidos por precipitación:** Son aquellos con alta resistencia a la corrosión y muy dúctiles. Se caracterizan por su alta resistividad a altas temperaturas. Se aplican principalmente en las industrias aeroespaciales y automotriz

- **Aceros Estructura dúplex:** son aceros caracterizados por una mezcla de austenita y ferrita. Entre las principales aplicaciones se encuentran las plantas de tratamiento de aguas e intercambiadores de calor.

A continuación se muestra el diagrama de fases para los aceros, en el cual según lo explicado en Kalpakjian y Schmid (2002), dependiendo de la cantidad de carbono, de la cantidad de deformación plástica (trabajo) y del método de tratamiento térmico se muestran las variaciones (Kalpakjian & Schmid, 2002).

Sola (1991) describe que el diagrama es la representación de estabilidad de las distintas fases en función de la temperatura y del porcentaje de carbono. Se obtiene principalmente mediante curvas de enfriamiento y mediante ensayos metalográficos. Este diagrama sugiere o determina la clasificación de la aleación en hierro, acero y fundición. Si la aleación contiene un porcentaje en carbono hasta el 2% de hierro se denomina acero. Las aleaciones que contienen mayor porcentaje de carbono se denominan como fundiciones (Sola, 1991).

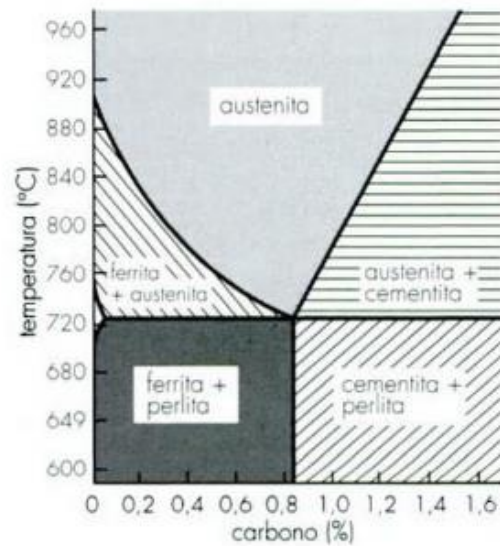


Figura 2.8.1 Diagrama de fases aceros (Vazquez, 2000)

Cada aleación o material cumple con ciertas características para un propósito definido.

- **Titanio grado 5:** Los grados 1, 2, 3 y 4 pertenecen a los titanios puros. La aleación de titanio 5 es conocida como Ti6Al4V Eli, es la aleación más utilizada en el mundo dado a que es la que presenta mayor resistencia mecánica y también a que presenta un buen comportamiento ante temperaturas elevadas (Planell). También sus propiedades pueden ser modificadas si se somete a tratamientos térmicos. (Chilesxpo)

La combinación de su resistencia a la corrosión, fortaleza y costo hacen de este material uno altamente atractivo para las industrias. (Planell)

La mayoría de sus aplicaciones son en: motores internos de combustión, industria médica (implantes), industria aeroespacial y marítima y en astilleros

Cuadro 2.8.1 Composición del titanio grado 5 (Acequisa, 1983)

Titanio Grado 5 UNS R56400		
Elemento	Símbolo	Máximo
Carbono	C	0,08
Oxígeno	O	0,2
Hidrógeno	H	0,015
Titanio	Ti	Balance
Aluminio	Al	5,50-6,75
Nitrógeno	N	0,05
Vanadio	V	3,5-4,5
Hierro	Fe	0,40

Cuadro 2.8.2 Propiedades mecánicas del titanio grado 5 (Chilesxpo, 2004)

Propiedad	Valor
0.2% Offset Limite Elástico Ksi	120
Resistencia a la Tracción Ksi	138-159
Elongación	10
Dureza Brinell	334

2.9 Endurecimientos superficiales

Schmid (2002) describe que son aquellos tratamientos termoquímicos aplicados al acero en los cuales la composición de la superficie de la parte se altera o modifica por la adición de nitrógeno, carbono y otros elementos. Los tratamientos para endurecer más comunes son: carburizado, carbonitrurado, cianurado, nitrunado, boronizado, endurecimiento a la flama, endurecimiento por inducción y endurecimiento por láser. Se aplica este tipo de tratamientos principalmente a aceros de bajo contenido de carbono para lograr una corteza exterior resistente al desgaste (Schmid, 2002).

Cada proceso mencionado tiene sus distintos procedimientos, metales por endurecer, características generales y aplicaciones generales.

Por ejemplo, el carbonitrurado se utiliza en aceros bajos de carbono, su procedimiento consiste en calentar el acero a temperaturas de 700°C a 800°C en una atmosfera de gas carbónico y amoníaco, esto según explica Schmid (2002). Después se procede a realizar un temple en aceite. Una vez finalizado el proceso el acero logra alcanzar una dureza superficial de 55 a 62 HRC y su aplicación es principalmente en pernos y tuercas (Schmid, 2002).

También existe una técnica llamada Martempering la cual consiste en introducir el acero austenizado en un baño salino o de metal fundidos a una temperatura determinada, y se deja por unos minutos para asegurar la conversión. Posteriormente, de acuerdo con Sola (1991), se calienta hasta la temperatura capaz de dar al acero la dureza requerida (transformación isotérmica de la austenita en martensita) (Sola, 1991).

La carburación líquida por otro lado, se realiza sumergiendo las partes a endurecer en baños de sales fundidas, las cuales proporcionan el agente carburante. Según Sola (1991) Estas sales suelen ser mezclas de cianuros de sodio, de potasio y de calcio con cloruros o fluoruros de calcio y estroncio, los cuales funcionan como catalizadores en la reacción de la carburación (Sola, 1991).

2.10 Procesos de troquelado

La definición de un proceso de troquelado es aquel conjunto de operaciones en las cuales se somete una lámina o alambre a ciertas deformaciones o transformaciones para lograr una geometría propia. Un troquel es aquella máquina utilizada para recortar o estampar por presión planchas o cartones. Este proceso es de los más utilizados en la producción de embalajes de cartón (Corapse, 2014).

El troquelado plano es un proceso utilizado para corte, hendido y grabado. A continuación se muestra un esquema del proceso:

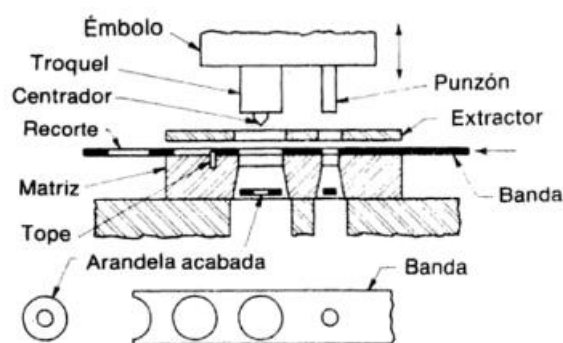


Figura 2.10.1 Diagrama de troquelado (DeGarmo, Black, & Kohser, 1994)

Según Corapse (2014), los tipos de troquelado existentes son: perforación, cizallado, corte, punzonado, doblado, embutición y rebordeado, a continuación se menciona un pequeño resumen de los mismos (Corapse, 2014):

Perforación: es la tecnología más sencilla y principalmente consiste en hacerle agujeros a la pieza.

Cizallado: es la operación de corte de una lámina de metal a lo largo de una línea recta entre dos bordes de corte, principalmente para una reducción de espesor.

Corte: en las operaciones donde el borde superior de corte se mueve hacia abajo sobrepasando el borde estacionario inferior de corte

Punzonado: implica el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza de metal del material circundante

Doblado: es el proceso en donde ocurre una deformación del metal alrededor de un eje recto

Embutición: son aquellos empleados para formar piezas huecas

Rebordeado: forman un reborde curvado en piezas huecas

2.11 Escalas de dureza

La dureza es una propiedad mecánica importante de evaluar a la hora que se están eligiendo materiales para diferentes aplicaciones. La dureza es una medida de la resistencia a la deformación plástica localizada

A lo largo de los años, se han creado diferentes métodos de medición de esta propiedad. Métodos más recientes corresponden a técnicas cuantitativas que basan sus

resultados en un pequeño componentes penetrador que es forzado sobre sobre una superficie del material por ensayar o medir. Esto se realiza en condiciones controladas y manejadas de carga y velocidad. En este tipo de mediciones se revisa la profundidad de la superficie resultante haciendo la relación con la dureza del componente. Callister (2002) explica que mientras más blando sea el material por probar, la huella o desgaste resultante será más profunda y por ende tendrá una dureza menor (Callister, 2002).

A continuación se listaran los diferentes métodos y escalas para medir la dureza de los materiales:

Rockwell: Groover (1997) describe que es un método ampliamente y comúnmente usado. Tiene un uso muy conveniente y ha evolucionado a través de los años para adaptarse a más materiales de uso. En este ensayo se presiona sobre el espécimen o material de prueba un indentador en forma de cono o esfera de 1/16 o 1/8 pulg de diámetro utilizando una carga de 10kg o menos, luego se aplica una fuerza mayor (150 kg) para que el indentador penetre en el material una cierta distancia. Esa distancia se convertirá en el indicador de dureza Rockwell. Existen diferentes escalas Rockwell que dependen de las diferentes cargas aplicas y los tipos de indentadores utilizados. A continuación, en la figura 2.11-1, se mencionan algunas escalas (Groover, 1997):

Escala Rockwell	Símbolo de dureza	Indentador	Carga (kg)	Materiales típicos
A	HRA	Cone	60	Carburos, cerámicos
B	HRB	Bola de 1/16 pulg	100	Metales no ferrosos
C	HRC	Cone	150	Metales ferrosos, aceros de herramienta

Figura 2.11.1 Muestra de escala Rockwell (Groover, 1997)

Brinell: Groover (1997) lista que es un ensayo utilizado para probar la dureza de metales y no metales de dureza baja a media. Durante el ensayo se presiona una bola de acero endurecido (en ocasiones podría ser carburo cementado de 10 mm de diámetro contra la superficie del material por probar usando una carga de 500, 1500 o 3000 kg luego se utiliza la siguiente ecuación para calcular la dureza Brinell. En materiales con una dureza superior a los 500 HB se utilizan materiales más duros tales como el carburo (Groover, 1997).

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b (D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})}$$

Donde F= es la fuerza de indentación (kg), Db= diámetro de la bola y Di= diámetro de indentación

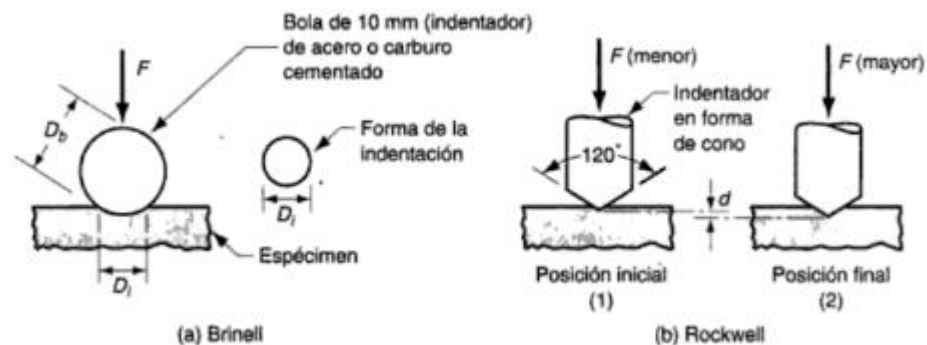


Figura 2.11.2 Diagrama de ensayos de durezas Brinell y Rockwell (Groover, 1997)

Vickers: según Groover (1997), este ensayo de dureza usa un inductor en forma de pirámide hecho de diamante. El ensayo se basa en el principio de las impresiones hechas por el inductor tienen geometrías similares independiente de la carga que se aplicó.

$$HV = \frac{1.854F}{D^2}$$

Donde F= fuerza aplicada (kg), D= diagonal de la impresión hecha (mm). Este ensayo se puede utilizar o aplicar en la mayoría de los metales. A continuación se muestra la dureza típica de algunos metales de interés, en donde los valores de dureza se dan en la escala B o C, los valores restantes indican que la dureza es demasiado baja para ser medida en la escala de Rockwell (Groover, 1997).

Cuadro 2.11.1 Diferentes durezas de los metales (Groover, 1997)

Metal	Dureza Brinell, HB	Dureza Rockwell, HR
Aluminio Recocido	20	20
Aluminio trabajado en frio	35	
Aleaciones de aluminio recocidas	40	
Aleaciones de aluminio endurecidas	90	528
Aleaciones de aluminio, fundición	80	448
Hierro colado gris, como fundición	175	10C
Cobre recocido	45	
Cobre aleado: bronce recocido	100	60B
Plomo	4	
Aleaciones de magnesio endurecidas	70	35B
Níquel recocido	75	40B
Acero bajo C, laminado en caliente	100	60B
Acero alto C, laminado en caliente	200	93B, 15C
Acero aleado, recocido	175	90B, 10C
Acero aleado, tratado térmicamente	300	33C
Acero	150	85B
Titanio de alta pureza	200	95B
Zinc	30	

2.12 Medición del campo magnético

La unidad para medir los campos magnéticos es el Tesla (T). Su nombre se debe al científico serbio Nikola Tesla. Otras unidades de medición según lo referenciado en Coghill (2000) corresponden al gauss y el oersted, el gauss sigue siendo muy utilizado en diversas aplicaciones (Coghill, 2000).

Explica Arias (2001), intensidad del campo magnético se designa la mayoría de las veces por la letra H o B. cuando se designa con H, su magnitud de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades se mide en amperes/metro (A/m). Cuando se designa con la letra B, normalmente se mide en tesla (Arias, 2001).

Uno de los equipos utilizados para la medición del campo magnético es el magnetómetro el cual es un instrumento utilizado para medir la amplitud y dirección de un campo magnético. Los más utilizados son los del tipo vibración, sin embargo los más modernos son magnetómetros nucleares. Según explica Perez (2007), el de vibración fue desarrollado por Gauss en el año 1832 y se basa principalmente en el ritmo de oscilación de una barra imantada suspendida en un plano (Perez, 2007).

3 Metodología

El objetivo principal del proyecto consistió en implementar un material de carácter no magnético para las partes de formado de un proceso de troquelado de un dispositivo para el área de endoscopia, esto sin alterar las prestaciones mecánicas requeridas para su aplicación

Para lograr esto, se decidió dividir la metodología en 8 rubros distintos y así planear el debido método para cada uno:

1. Diagnóstico del proceso
2. Selección del nuevo material
3. Desarrollo del prototipo
4. Metodología de prueba del prototipo
5. Recolección de datos general (materiales elegidos)
6. Recolección de datos para material elegido
7. Equipo experimental a utilizar

3.1 Diagnóstico del proceso

Para el debido diagnóstico de la problemática del proceso se solicitaron todas las investigaciones al departamento de quejas de clientes/doctores de la empresa. Inicialmente lo que se investigó fue el tipo de fallo que estaban dando los alambres y si este podía ser generado por el proceso de manufactura o por un factor externo al proceso (problemáticas del suplidor o problemáticas operacionales del mismo cliente). Esto para defectos reportados por los debidos departamentos en fechas pasadas al proyecto. Posteriormente se decidió poner en marcha una contención en el proceso para poder investigar los defectos conforme estos iban detectándose y así poder recolectar aún más información de la problemática del proceso de troquelado. Cada vez que se encontraba un defecto en la línea con las características de mordedura o corte en el alambre del dispositivo, se pidió proceder de la siguiente manera a los encargados de producción:

1. Detener la línea de producción en donde se detecta el defecto
2. Intervenir el equipo de troquelado por parte del técnico de mantenimiento
3. Revisar las partes de troquelado, identificar si había residuo de alambre (viruta en las mismas)
4. Limpiar las partes, generando un reporte de mantenimiento
5. Continuar con el proceso de producción normal, notificando el defecto al grupo de ingenieros de calidad del departamento.

Con esta información, sería posible analizar y diagnosticar el proceso de una manera directa con información real y en el tiempo exacto de la detección.

En la fase de diagnóstico del proceso/problema se ejecutó un diagrama es/no es y de causa raíz, en donde se listaron todas las posibles causas de la problemática en el alambre para finalmente elegir los principales causantes con los respectivos descartes. Para realizar el proceso de diagnóstico, también se revisó la ficha técnica de los materiales en uso de troquelado para ver la incidencia magnética de las mismas.

El proceso de diagnóstico se rectificó con una metodología de réplica del defecto para analizar los siguientes puntos:

- Realmente el proceso de manufactura en estudio genera el defecto en cuestión
- Si el proceso de manufactura lo presentaba, bajo qué condiciones se replicaba.

Finalmente se realizaron mediciones de presencia de campo magnético utilizando un gaussímetro en posición perpendicular al área de trabajo. Esto para concluir la presencia

magnética en las partes de troquelado. Para esta conclusión también se realizaron métodos empíricos con imanes.

3.2 Selección del material para la reducción de la incidencia magnética

Una vez establecido el diagnóstico del sistema o proceso actual, se crearon distintas reuniones con especialistas para seleccionar los posibles candidatos de materiales a seleccionar. En la selección se tomaron en cuenta las siguientes propiedades:

- Dureza: debido a la naturaleza del proceso de troquelado
- Índice de dureza: debido a la naturaleza del proceso de troquelado
- Permeabilidad o Susceptibilidad magnética: Debido a la problemática que se quiere erradicar
- Resistencia a la corrosión: Debido al tipo de industria. En una industria médica se pueden utilizar únicamente materiales resistentes a la corrosión.
- Porcentaje de Carbono: ya que está altamente relacionado al magnetismo de las partes
- Costo: es la propiedad menos importante o con menos prioridad para la problemática, sin embargo se incluye para analizar la inversión

Para la selección final del material se utilizó una metodología propuesta en Ashby de restricciones/requisitos que debía cumplir el material tanto en un proceso de troquelado como en una industria médica en general. A esto también se incluyó el requisito fundamental del proyecto: que la permeabilidad magnética fuera nula o baja.

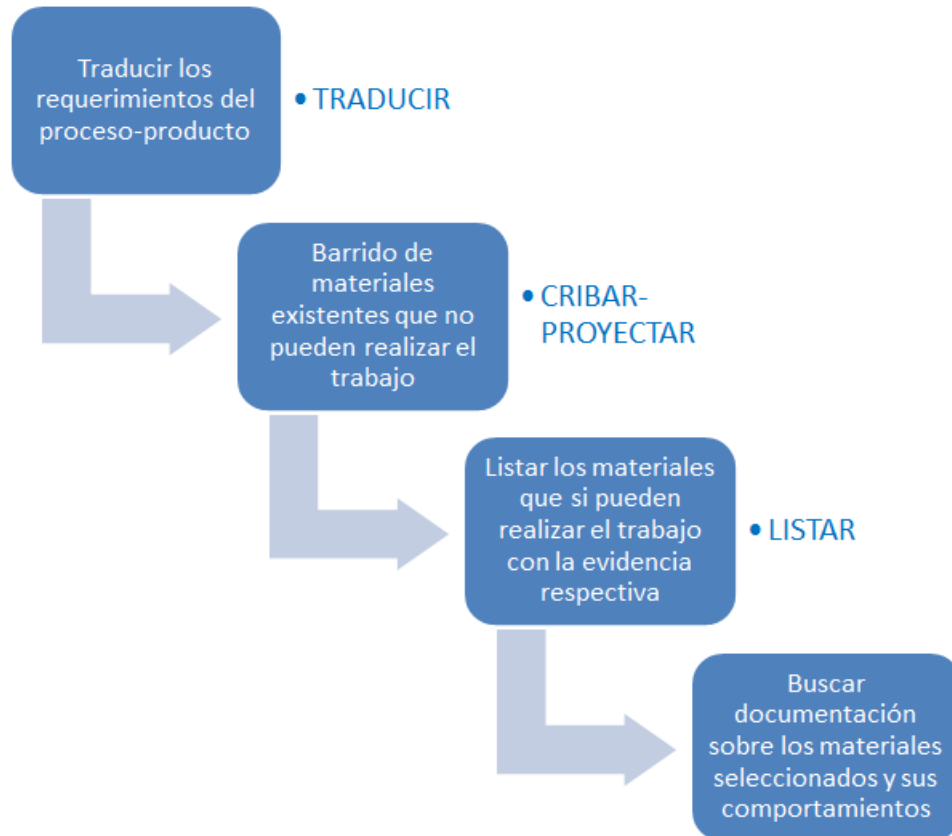


Figura 3.2.1 Metodología de selección del material (Ashby)

Aparte de esta metodología, se hizo uso de algunas graficas de Ashby para la selección del material apto (graficas de desgaste y dureza y graficas de costo de material por kg)

Finalmente se realizó un cuadro comparativo entre las propiedades en cuestión y los materiales seleccionados para listar.

3.3 Construcción del prototipo

Una vez seleccionados los materiales óptimos, se procedió a contactar al departamento de maquinado de la empresa para la coordinación de la construcción de los prototipos de las partes en los materiales seleccionados. El departamento de maquinado, cuenta con una máquina de hilo para construir el prototipo. Debido a la alta demanda de construcción que esta misma posee, los prototipos debieron solicitarse con dos semanas de anticipación, indicando mediante una orden de compra el dibujo de la parte con la instrucción de los materiales a utilizar.

3.4 Metodología de prueba para los prototipos

Cada prototipo se probó durante un lapso de 2 horas (equivale a 400 alambre producidos)

Una vez construido el prototipo, se procedió a enviar las partes al Tecnológico de Costa Rica.

Cuadro 3.4.1 *Valor de dureza de las partes por cambiar*

Material por probar	Cantidad de prototipos
Acero Inoxidable 304	2
Carbide	2
Titanio	2

3.5 Recolección de datos una vez instalados los prototipos

Una vez realizados los prototipos se probaron en la máquina de troquelado durante aproximadamente 2 hora de producción. Estos alambres se verificaban en un sistema de

visión conjunto a la máquina de troquelado, en donde se revisaban como control de proceso la correcta geometría del alambre luego del proceso. Por cada pieza formada, se toma una foto, la cual se amplía en el sistema de visión. De esta manera el operario puede concluir si la pieza está bien formada (con geometría correcta) y pasarla a la siguiente operación.

Si en el sistema de visión el operario notaba alguna anomalía con la geometría del alambre, el mismo debería verificarse en el comparador óptico que compara el alambre formado contra la especificación que el mismo debería tener.

También en cada corrida con los nuevos prototipos, se verificaba la adherencia de viruta de los mismos para descartar o confirmar el magnetismo.

Terminada la prueba de los prototipos, se continuó a establecer la metodología para el material elegido.

3.6 Recolección de datos para el posible material elegido

Para la recolección de datos de las pruebas ejecutadas se realizó un formato de recolección para monitorear las partes con el nuevo material con la siguiente frecuencia:

Esta prueba se realizó durante 5 semanas consecutivas

Cuadro 3.6.1 Metodología de prueba para material seleccionado

Prueba	Encargado	Monitoreo
Cada hora de producción	Personal horario	De producto: Revisar la integridad del alambre en un comparador óptico , 5 alambres por hora
Cada inicio de Turno de producción	Técnicos de equipos	De partes: Revisar el estado de las partes

El 100% de las piezas serían comprobadas en el sistema de visión del proceso de troquelado para verificar la correcta geometría de los alambres formados en el periodo de prueba del prototipo elegido.

Además de la revisión de las partes se procedió a realizar mediciones variables con un gaussimetro y con un durómetro para verificar a nivel variable las correctas propiedades necesarias para las partes.

Cuadro 3.6.2 Metodología de prueba variable

Análisis con Gaussimetro	Prototipo Aislado	Prototipo en área de trabajo
Medición 1	Valor 1	Valor 1
Medición 2	Valor 2	Valor 2
Medición 3	Valor 3	Valor 3

Se decidió trabajar de esta forma para poder también tener datos variables que respaldarán la prueba atributiva mencionada anteriormente.

La validación del equipo se realizó siguiendo la metodología de implementaciones de la empresa, ejecutando la documentación requerida tal como informe técnico justificando el porqué del cambio, verificando que la solución dada es efectiva y dando

evidencia que no tiene ningún efecto adverso en los modos de falla del producto. Posteriormente al informe técnico, se realizó un reporte de equivalencia para implementar el resto de réplicas. También se hizo uso de los softwares estadísticos de la empresa para demostrar estadísticamente la efectividad del cambio de material en el proceso en cuestión.

3.7 Equipo experimental

A continuación en el cuadro 3.7.1 se muestran los equipos utilizados para la implementación del proyecto.

Cuadro 3.7.1 *Equipo experimental*

Equipo	Fabricante
Medidor de dureza Rc	SATO
Gaussimetro	F.W Bell
Electro erosionadora	Mitsubishi
Lupa	No disponible
Microscopio	Lynx
Comparador óptico	Optical Gaging Products
Imán	No disponible
Equipo de troquelado	Carácter Confidencial

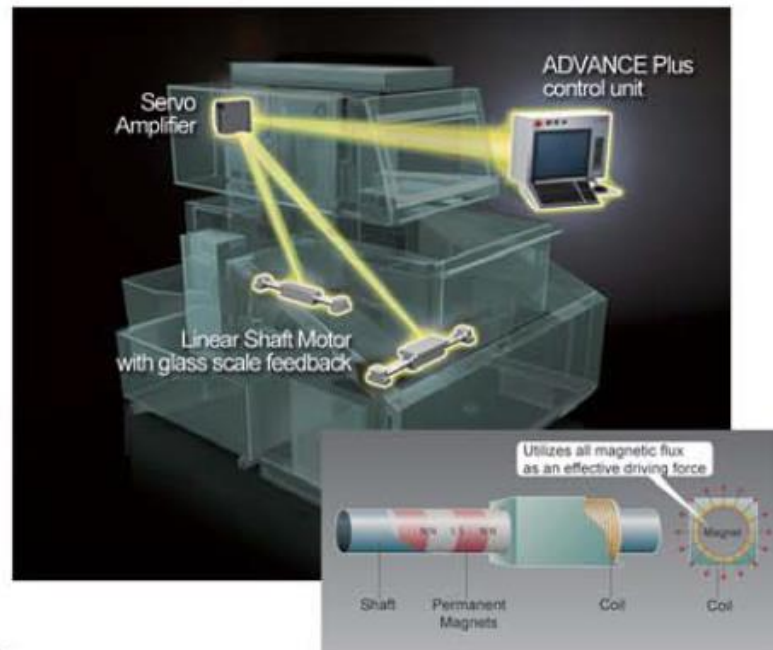


Figura 3.7.1 Cortadora/Máquina de hilo, electroerosionadora.



Figura 3.7.2 Máquinas de troquelado.

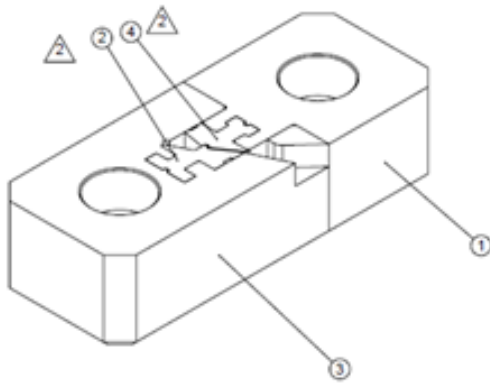


Figura 3.7.3 Dibujo de la parte de formado de troquelado.

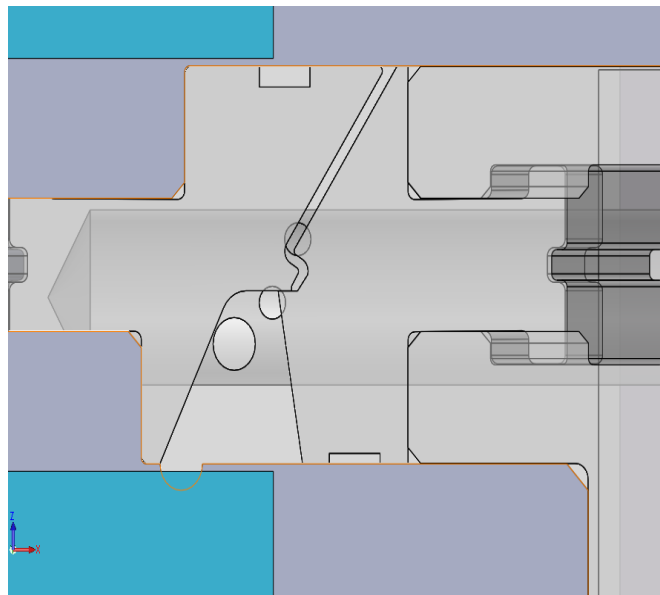


Figura 3.7.4 Dibujo representativo de inserción del alambre en máquina de troquelado.



Figura 3.7.5 Durómetro utilizado para comparación en Rc.

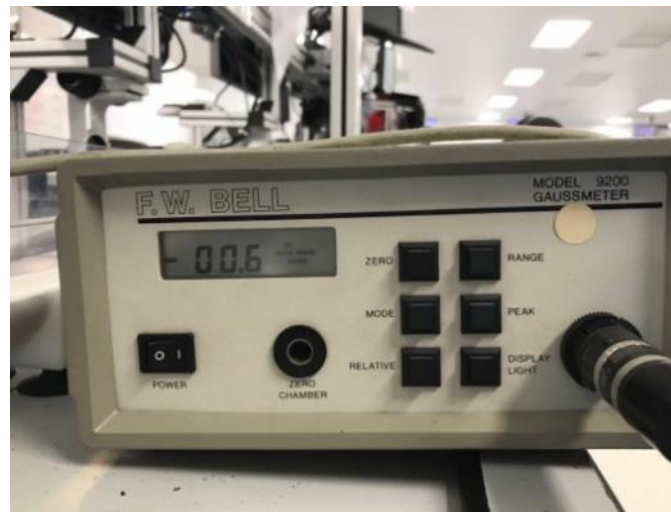


Figura 3.7.6 Gaussimetro utilizado para medición y comparación de campo magnético.



Figura 3.7.7 Comparador Óptico para revisión de geometría del alambre

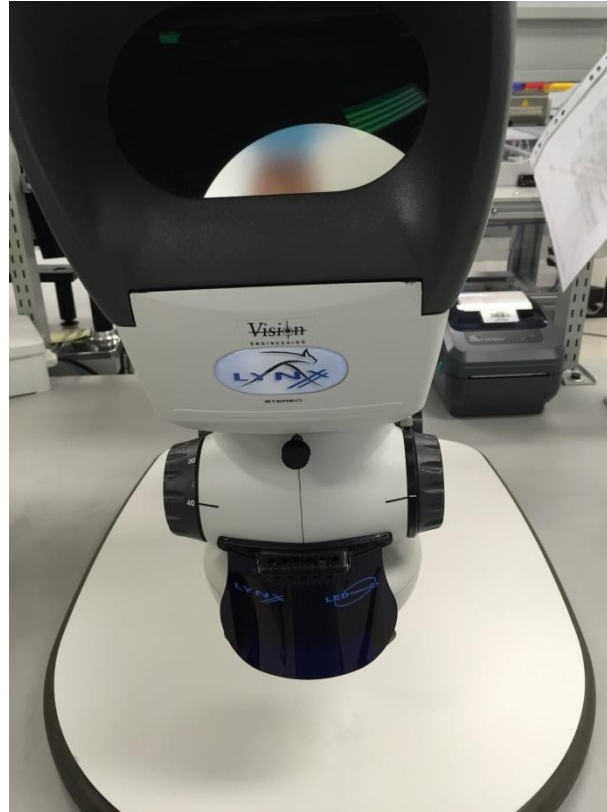


Figura 3.7.8 Microscopio para análisis de rupturas en alambre

4 Análisis de resultados

4.1 Diagnóstico del proceso

Una vez ejecutada la metodología experimental se procedió a analizar los resultados obtenidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos se realizó una herramienta llamada “es/ no es” para identificar el problema. La herramienta se muestra a continuación en el cuadro 4.1.1:

Cuadro 4.1.1 Herramienta “es/no es”

Pregunta	Es	No es
Que	Alambre dañado cerca de la zona curva de la pinza de biopsia	No está dañado en ninguna otra zona del alambre
Quando	Se detecta el defecto en las siguientes fechas: 10 de Febrero 2015, 26 de Marzo 2015, 7, 14, 16 y 22 de Abril 2015	En el año 2014 no se reportan eventos del modo de falla según la documentación del sistema de calidad de la empresa
En donde	Los defectos se han detectado en la estación de troquelado y en la estación de inspección de visual de las líneas de producción	No se detectan defectos en estaciones previas al sistema de troquelado
Cuanto	7 unidades detectadas con el defecto en las fechas indicadas	No se reportan quejas de doctores u hospitales relacionadas al modo de falla

Posteriormente se procedió a realizar un proceso de replicación del fallo, en las siguientes imágenes se muestran las unidades detectadas en la línea de producción contra las réplicas. El proceso de réplica se ejecutó colocando residuos de alambre en las caras de los dados como se muestra en la figura 4.1.5 y procesando los alambres bajo esa condición. Todas las siguientes imaginadas fueron analizadas en el microscopio mostrado en la sección de equipo experimental de este documento.

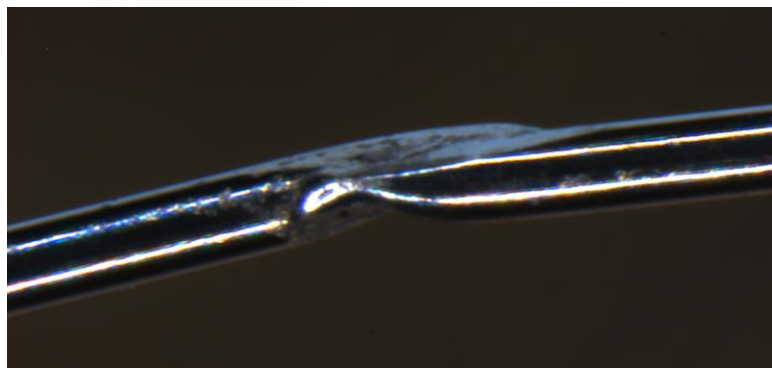


Figura 4.1.1 Unidad detectada en la línea de producción.

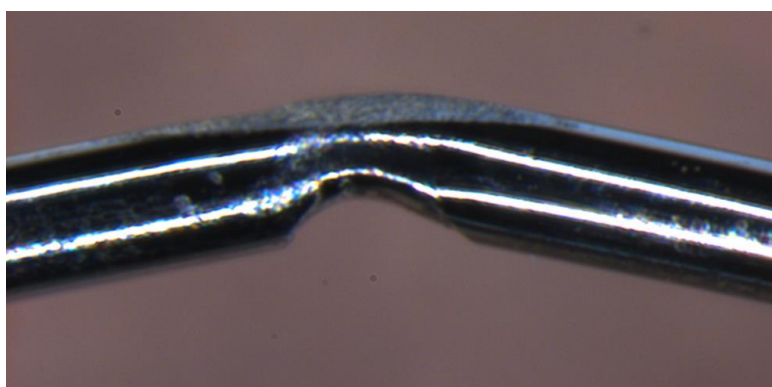


Figura 4.1.2 Unidad replicada por la estudiante Ana Lucía Meza.

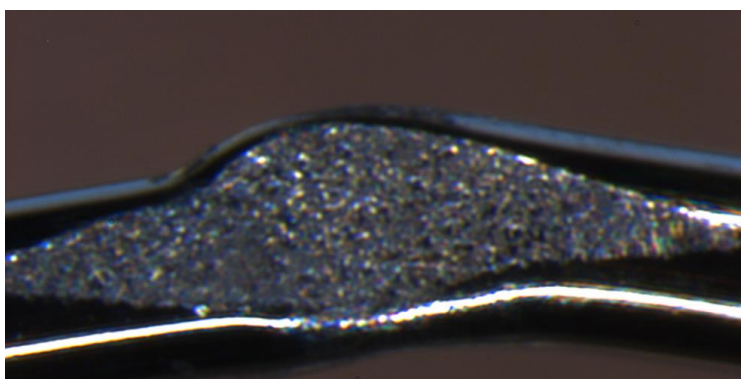


Figura 4.1.3 Unidad detectada en la línea de producción.

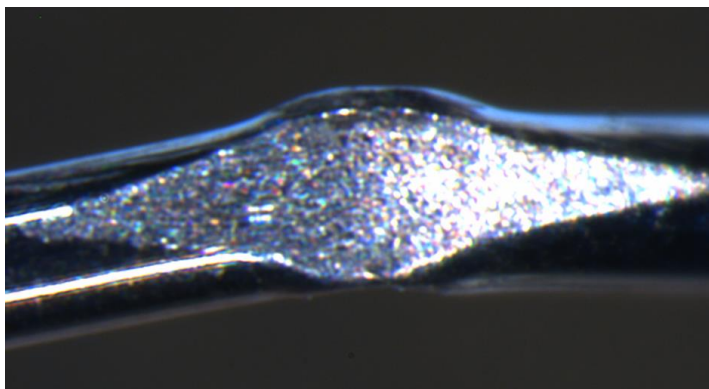


Figura 4.1.4 Unidad replicada por la estudiante Ana Lucía Meza.



Figura 4.1.5 Partes contaminadas para ejecutar la réplica del defecto.

En total se identificaron un total de 20 eventos en los cuales en las intervenciones se detectó la presencia de residuo de alambre en las partes. A continuación, en la Figura 4.1.6 se observa la acumulación de viruta en los troqueles, y como esta se adhería por magnetismo.



Figura 4.1.6 Adherencia en las partes de troquelado en un evento de producción.

Consecuentemente se tuvo que analizar por qué el residuo se estaba adhiriendo al alambre.

Del diagnóstico del proceso se identificó que las partes externas que sujetan los dados moldeadores están construidas con acero 420, los dados moldeadores están contruidos de CPM, (Crucible Particle Metallurgy) la cual se considera como un acero inoxidable endurecido alto en carbono (2,45% C) con una alta dureza. Esto según la ficha técnica y dibujo de la empresa, en donde se especifican las dimensiones requeridos y materiales de las parte. Una vez conocidos los materiales se procedió a analizar su incidencia magnética.

Según la bibliografía, los aceros serie 400 se consideran aceros martensíticos y a su vez magnéticos, debido a su alto porcentaje en cromo y carbono.

Posteriormente se realizó un análisis de posibles causas contribuyentes a la adherencia de viruta, para confirmar que únicamente el tipo de material afectara la adherencia.

El diagrama se muestra a continuación en la figura 4.1-7:

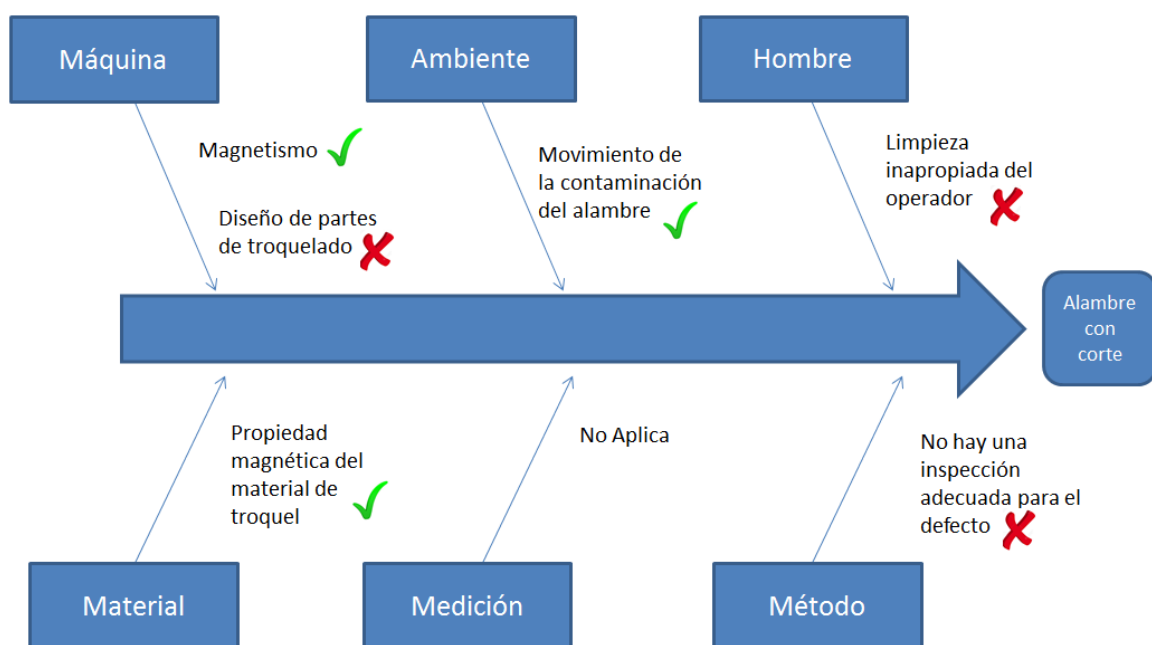


Figura 4.1.7 Diagrama de causa y efecto para el defecto en análisis (Creado por Ana Lucía Meza, 2017).

El diseño del dado fue descartado debido a que esta cuenta con un espacio para la remoción de viruta en el proceso, el mismo se muestra a continuación:

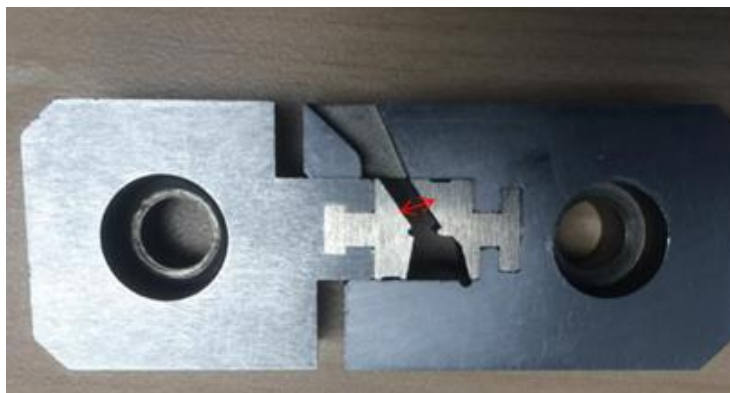


Figura 4.1.8 Espacio para la remoción de viruta en las partes de troquelado y zonas probadas con el imán.

La limpieza inadecuada se descartó también debido a que la frecuencia establecida era la correcta, sin embargo era tal el magnetismo que aumentando esta frecuencia, igual el factor acumulación de viruta se presentaba. También aunque en el proceso no hubiera una inspección relacionada al defecto en cuestión, esta no es considerada como una causa raíz debido a que no es el factor que generaba el defecto.

Para ratificar la presencia de magnetismo en las partes y poder concluir que esta era la principal causa al problema se procedió a realizar pruebas empíricas utilizando un imán. Se colocó el imán en 6 zonas distintas de las partes de troquelado, siendo este atraído por el imán en las 6 zonas probadas según la figura 4.1.8.

Finalmente para la confirmación de la presencia magnética en las partes de troquelado se realizaron mediciones continuas y perpendiculares en posición longitudinal al área de trabajo utilizando un gaussímetro. Se realizaron pruebas en las mismas 6 zonas del imán y se repitió la prueba en dos repeticiones, con las partes de troquel aisladas del equipo

(en estado de reposo) y con las partes de troquel justo después de accionarse en el equipo.

Los resultados se muestran a continuación en el cuadro 4.1.2:

Cuadro 4.1.2 *Análisis de presencia de campo magnético en material actual (Acero 420)*

Medición	Prototipo Aislado (G)	Prototipo en área de trabajo (G)
1	11,9	2,6
2	9,7	2,8
3	11,6	3,6
Promedio	11,1	3,0

Junto con el análisis del gaussímetro se confirmó la presencia del magnetismo con la ayuda de un imán sencillo para corroborar la atracción de las piezas de acero al mismo. A continuación se muestra una foto de la prueba y de su resultado.



Figura 4.1.9 *Ejemplificación del método empírico del imán con el acero 420*

4.2 Selección del material óptimo

Una vez identificado el magnetismo debido al material de los componentes como causa principal de la adherencia de la viruta a las partes, se procedió a buscar una metodología para la correcta selección del material a utilizar. Es decir, se decidió enfocar los esfuerzos en la mejora del proceso basándose en el cambio de material en las partes de troquelado. Esta selección se enfocó en tratar de establecer un material con un carácter menos magnético que cumpla con las propiedades necesarias para las partes de formado de un proceso de troquelado de un dispositivo para el área de endoscopia.

Para esto se ejecutaron diferentes reuniones con expertos en materiales junto con un estudio bibliográfico, para proponer los principales candidatos a ser los nuevos materiales para el proceso. También se revisaron las fichas técnicas de los materiales en estudio con ayudas de bases de datos. Finalmente se utilizó una metodología de restricciones y requisitos del material en estudio para lograr identificar posibles candidatos. Esto se hizo con base en la metodología propuesta de Ashby que indica traducir los requerimientos técnicos del diseño del producto o proceso, realizar un barrido de los materiales existentes e identificar cuales no pueden hacer el trabajo requerido con base en índices y propiedades, listar los materiales que pueden hacer bien el trabajo y probarlos y buscar la documentación requerida.

Inicialmente, por la naturaleza del proceso, se descartaron los materiales cerámicos y plásticos debido a las propiedades de dureza requeridas del proceso de troquelado.

La selección investigativa de los candidatos se consolidó o enfocó únicamente en materiales metálicos, ya que según fuentes bibliográficas son los más utilizados en procesos

de golpe o troquelado que inclusive se le llama metalmecánica. No obstante los demás materiales se incluyeron en la investigación para confirmar su debido descarte.

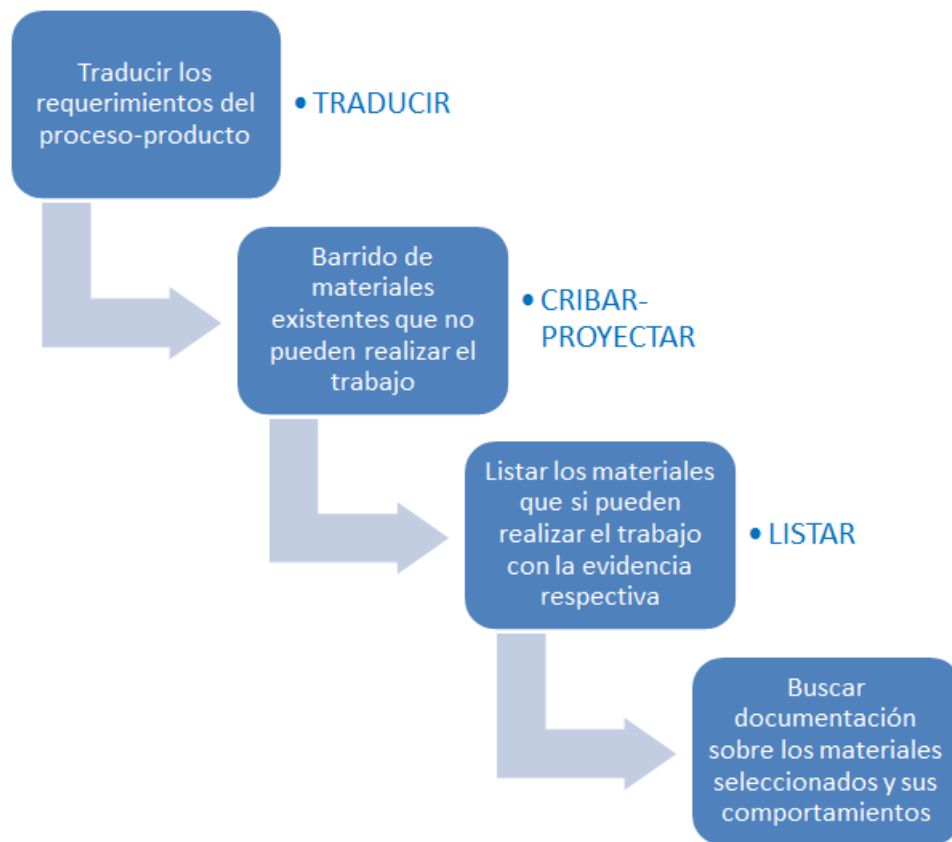


Figura 4.2.1 Metodología de selección propuesta por Ashby

Como se mencionó en la sección de metodología, la selección se basó en las propiedades de interés:

- Dureza: debido a la naturaleza del proceso de troquelado

- Índice de dureza: debido a la naturaleza del proceso de troquelado
- Permeabilidad o Susceptibilidad magnética: Debido a la problemática que se quiere erradicar
- Resistencia a la corrosión: Debido al tipo de industria. En una industria medica se pueden utilizar únicamente materiales resistentes a la corrosión.
- Porcentaje de Carbono: ya que está altamente relacionado al magnetismo de las partes

Los resultados a la metodología utilizada se muestran en la figura 4.2.2

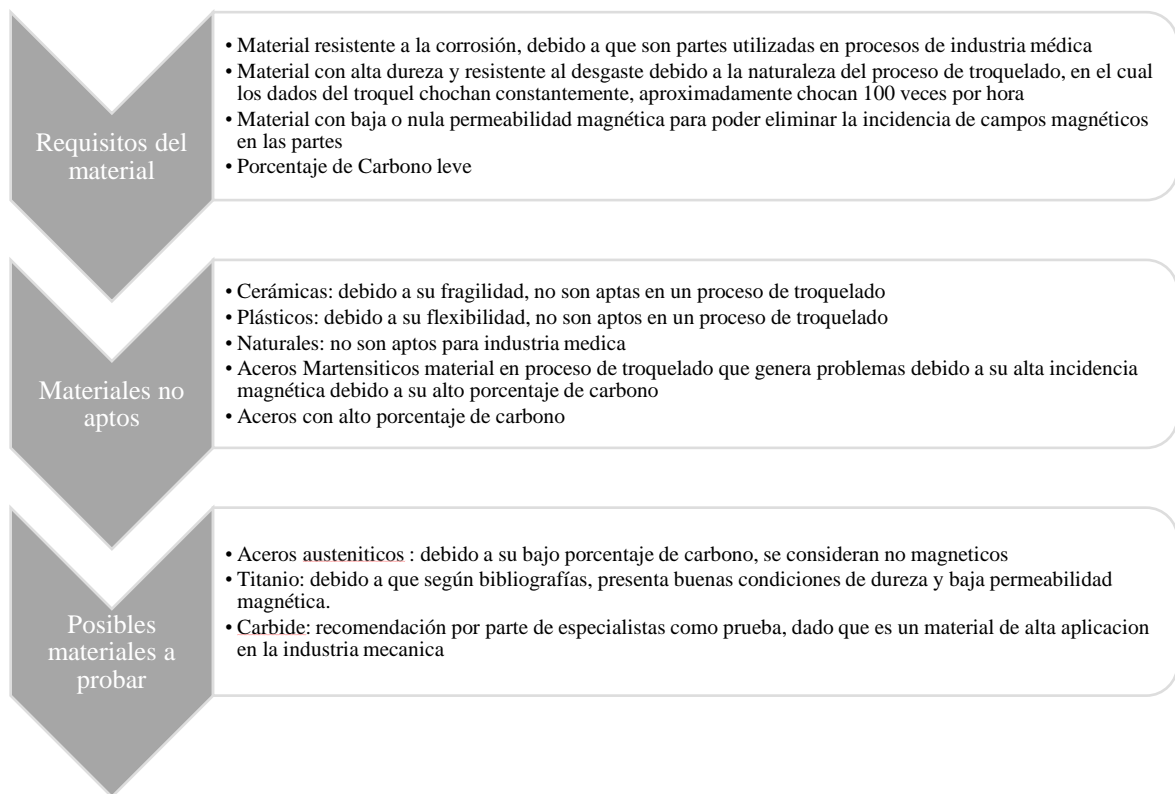


Figura 4.2.2 Requisitos y restricciones para la selección del material.

Una vez establecidos los requerimientos y restricciones del material en cuestión, se procedió a analizar la propiedad permeabilidad magnética, la cual es una de las causantes de la presencia del campo magnético en el proceso. La permeabilidad magnética de la parte de acero inoxidable (acero 420) actual era de 700-1000, un valor considerado alto en un proceso donde el magnetismo no es deseado.

Cuadro 4.2.1 *Permeabilidad magnética material actual en proceso*

Propiedad	Material SST 420
Ur (Permeabilidad magnética)	700-1000

También se hizo uso de la gráfica de Ashby para desgaste-dureza, debido a que el objetivo del proyecto consistía en eliminar el magnetismo del proceso sin perjudicar las prestaciones mecánicas de las partes, ya que al ser un proceso de troquelado las mismas deben conservar su dureza. En el grafico se puede observar que en cuanto a los metales, las aleaciones de cobre son las que presentan mayor desgaste. También comparando la relación de los aceros, se puede observar que los aceros con bajo porcentaje en carbono son los que presentan mayor desgaste en comparación con los de porcentaje medio/alto.

También se puede analizar que las cerámicas son las que presentan una mejor relación dureza-desgaste, debido a que el desgaste de las mismas es casi nulo. Sin embargo debido a la naturaleza del proceso en cuestión, se descartan debida a su alta fragilidad ante un proceso de troquelado de choque constante.

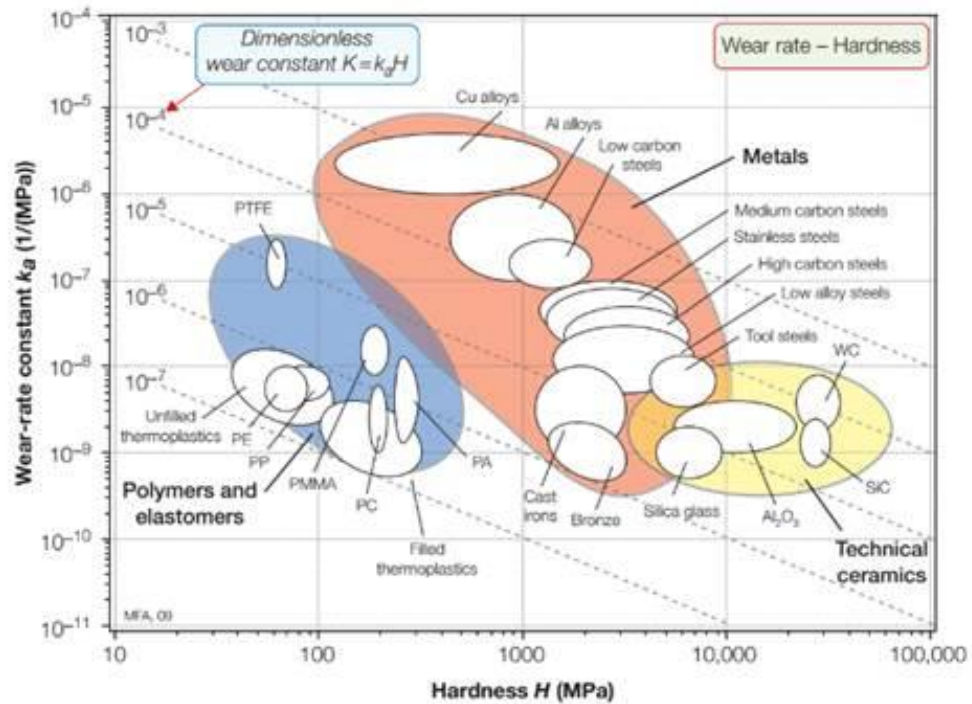


Figura 4.2.3 Grafico de Ashby de Desgaste contra Dureza

Finalmente, una vez recopilada toda la información para la selección del material, se procedió a realizar un cuadro comparativo incluyendo aleaciones no ferrosas, los principales tipos de aceros inoxidable y también cerámicas y polímeros. El cuadro comparativo se muestra a continuación:

Cuadro 4.2.2 Cuadro Comparativo: Propiedades de los Materiales (Dieter, 1997)

Materiales (Screening)	% en C	Resistencia a la corrosión	Índice de dureza a la fractura (MPa/\sqrt{m})	Dureza	Permeabilidad magnética	Costo (\$/kg)
Aceros ferríticos	0,03-0,08	Buena	12 a 92	83-100 HB	P	0,67-0,74
Aceros martensíticos	0,15-1,2	Moderada	27-92	88 HB-52 Rc	700-1200	0,72-0,8
Aceros austeníticos	0,03-0,08	Alta	41-82	88-95 HB	1.10	0,63-0,7
Aleaciones de Mg	0	Baja	12 a 18	56 HB-73 HB	1	5,2-5,7
Aleaciones de Al	0	Buena	22-35	19 HB-150 HB	0,99	1,5-1,7
Aleaciones de Cu	0	Buena	30 a 90	44 HB-150 HB	1	3,2-3,5
Aleaciones de Ti	0,08	Buena	14-120	55.8 HB-46.8 Rc	1	67-74
Cerámicas	0	Alta	0,5-1,7	2000-10000 Vickers	0	0,041-179
Polímeros Sintéticos	0	No Aplica	0,07-5,12	2-50 HB	0	1,5-5,6
Naturales (Madera)	0	No Aplica	0,05-9	1-7 HB	0	0,8-24

Del cuadro comparativo construido utilizando las referencias bibliográficas respectivas (Ashby, 2008), (Groover, 1997), (Dieter, 1997), se puede observar que el titanio es claro candidato a probar debido a que cumple con los requisitos previamente descritos (dureza alta, permeabilidad magnética baja y buena resistencia a la corrosión). También se puede observar que el acero austenítico cumple con el requisito de baja permeabilidad magnética, resistencia a la corrosión sin embargo posee una dureza considerada baja, lo cual posteriormente se podría tratar con un recubrimiento o proceso de endurecimiento. Además la resistencia en la corrosión para los polímeros y materiales naturales se dejó como no aplica, debido a que la corrosión es un proceso de oxidación y en este tipo de materiales lo que ocurre es una degradación. También la composición o porcentaje de Carbono para las aleaciones de aluminio, cobre y magnesio se consideró cero debido a que

según la literatura los elementos involucrados en estas aleaciones son principalmente silicio y manganeso.

Se puede observar también que la mayor complejidad del proyecto consiste en que hay una relación no proporcional entre la dureza y el magnetismo, ya que más bien entre más alto el porcentaje de carbono, más duro el material pero por ende más magnético. Entre menos porcentaje de carbono, el material es menos magnético pero por ende menos duro. Acá se demuestra la complejidad de la selección.

Finalmente se eligieron los siguientes candidatos para las respectivas pruebas:

- Titanio grado 5: Debido a lo que se muestra en el cuadro comparativo
- Acero inoxidable serie 304: Debido a lo que se muestra en el cuadro comparativo, la dureza podía ser tratada con un proceso de endurecimiento
- Carbide: Debido a las recomendaciones de los expertos en materiales de herramientas, ya que según ellos es un material altamente utilizado en la industria por su excelente dureza y resistencia al desgaste. Aunque no se encontró información sobre su magnetismo, se decidió proceder para probarlo sin ser tratado y tratándolo y ver sus resultados a modo investigativo.

Debido a que se contaba con la disponibilidad de la máquina de hilo y también de la máquina de troquelado, se decidió construir los tres prototipos en los distintos materiales y así lograr una prueba aplicada para los tres.

4.3 Construcción de prototipos

Una vez establecidos los materiales por probar, se crearon los prototipos en cada material utilizando una máquina de hilo. Cada prototipo duro aproximadamente 2 semanas en construirse debido a la alta demanda de las máquinas de precisión de la empresa. Además se tuvo que considerar un tiempo adicional de importación de placas de material virgen debido a que la empresa no contaba con los mismos (el titanio y el carbide se tuvieron que comprar externamente).

4.4 Ejecución de la metodología de prueba del prototipo

Una vez entregadas las partes construidas, se probó cada uno procesando 400 piezas en la máquina. Una vez construidas las 400, se revisa la geometría de las mismas utilizando un comparador óptico (mencionado en la sección de equipo experimental de este documento) y también al finalizar la construcción de las piezas, se revisaba el estado de las partes de troquelado para confirmar o descartar el magnetismo por medio de la adherencia de los residuos. También se revisaban las partes para confirmar o descartar si presentaban algún tipo de desgaste luego de la construcción de las piezas. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada material. Es importante recalcar que los prototipos fueron creados para las partes externas mostrados en la figura 4.4.1 (referirse a diferencia en el contraste de los grises)

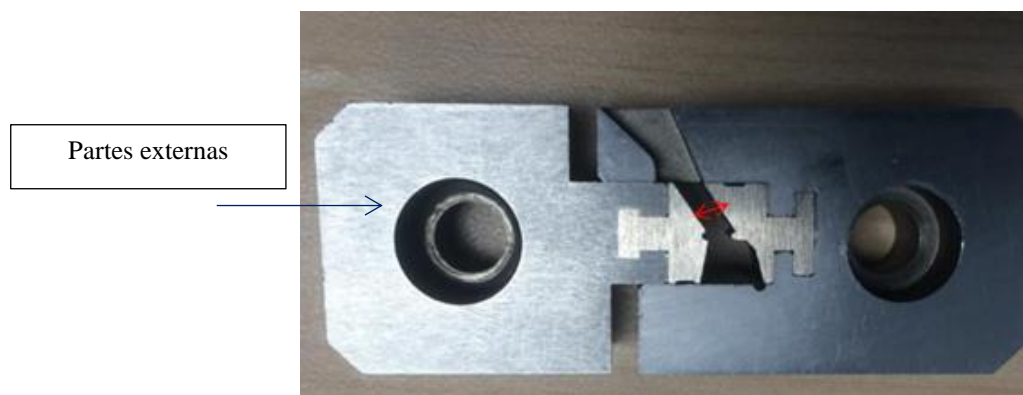


Figura 4.4.1 Proporción de las partes internas con respecto a las partes externas de troquelado.

Cuadro 4.4.1 Pruebas experimentales con titanio grado 5

Prototipo de la parte	Desgaste	Magnetismo (adherencia de viruta)	Geometría del alambre	Piezas procesadas
Titanio grado 5	No	No	Geometría correcta del alambre	400

Cuadro 4.4.2 Pruebas experimentales con acero 304

Prototipo de la parte	Desgaste	Magnetismo (adherencia de viruta)	Geometría del alambre	Piezas procesadas
Acero 304	Si	No	Geometría incorrecta del alambre	400

Cuadro 4.4.3 Pruebas experimentales con Carbide

Prototipo de la parte	Desgaste	Magnetismo (adherencia de viruta)	Geometría del alambre	Piezas procesadas
Carbide	No	Si	Geometría correcta del alambre	400

De los cuadros anteriores, se concluyó que el titanio era el único material que no presentaba magnetismo en el proceso y que además no perjudicaba la geometría del producto. La ventaja que se obtuvo con este material, es que es de los pocos materiales no magnéticos que ofrecen una dureza lo suficientemente alta como para un sistema de troquelado.

4.5 Tratamiento superficial de las partes

De las pruebas realizadas en el punto 4.4, se concluyó que dos de los materiales no dieron los resultados esperados. Es por esto, que se coordinó con Instituto Tecnológico de Costa Rica para realizarles un tratamiento superficial y así luego probar si las mismas mejoraban su desempeño requerido. Los prototipos fueron tratados en el laboratorio de Ingeniería de Materiales del Tecnológico para tratar de inducir mejores condiciones de dureza para el caso del acero inoxidable 304 y reducir las propiedades magnéticas para el Carbide. El proceso que se realizó fue el de nitruración líquida en frío explicado en el marco teórico de este documento. Los resultados de la misma metodología de prueba anterior pero con los materiales tratados con nitruración se muestra a continuación.

Cuadro 4.5.1 Pruebas experimentales con Carbide tratado

Prototipo de la parte	Desgaste	Magnetismo	Geometría del alambre	Cantidad de piezas
Material Carbide tratado con nitruración	No	Si	Geometría correcta del alambre	400

Cuadro 4.5.2 Pruebas experimentales con acero tratado

Prototipo de la parte	Desgaste	Magnetismo	Geometría del alambre	Cantidad de piezas
Material Acero tratado con nitruración	Si	No	Geometría incorrecta del alambre	400

Ningún material tratado dio resultados diferentes en cuanto al desempeño requerido. El acero continuaba presentado desgaste y por ende formando incorrectamente el dado y el carbide continuaba presentado adherencia de virutas en sus superficies. Debido a esta evidencia realizada por medio de pruebas, se seleccionó el titanio como candidato a ser el nuevo material de las partes de troquelado, ya que el mismo presento resultados satisfactorios a los requerimientos deseados sin necesidad de ningún tratamiento adicional. Adicionalmente, no se realizaron mediciones de dureza y magnetismo en las partes tratadas debido a que la prueba atributiva no fue satisfactoria, por lo que se decidió realizar estas pruebas únicamente en el material seleccionado como ideal.

4.6 Metodología de prueba con material elegido y análisis

El titanio seleccionado es de grado 5, conocido como Ti-6Al-4V. Su composición se indica a continuación

Cuadro 4.6.1 *Composición del titanio grado 5*

Componente	% Peso
Al	6
Fe	Max 0,25
O	Max 0,2
Ti	90
V	4

Además, las propiedades mecánicas de interés se muestran en el cuadro 4.6.2:

Cuadro 4.6.2 *Dureza del titanio grado 5*

Durezas	
Dureza Brinell	379 HB
Dureza Rockwell C	41 HC
Dureza Vickers	396 HV

Las propiedades eléctricas del titanio grado 5 se muestran a continuación

Cuadro 4.6.3 *Propiedades magnéticas del titanio grado 5*

Propiedades magnéticas en estudio	(Adimensional)
Susceptibilidad magnética	1,00005
Permeabilidad magnética	3,30E-06

Aparte de la prueba inicial para la selección del nuevo material, el prototipo elegido se probó durante aproximadamente 1 mes de producción (equivalente a 30 mil unidades manufacturadas). Se tomaron datos atributivos sobre la no presencia de residuos de alambre

en las partes. Este monitoreo lo realizaron los técnicos de mantenimiento de la empresa, expertos en troquelado. Se realizó el monitoreo dos veces por día durante un mes. El proceso de revisión consistió en desmontar las partes y verificar la no presencia de viruta y también el desgaste que las partes iban presentando conforme el tiempo. Todas las revisiones fueron documentadas en hojas de recolección de datos cada día.

También se llevó un control de la cantidad de defectos relacionados a alambre mordido o dañado en el periodo de prueba. La línea en la cual se probó el prototipo no reportó ningún defecto relacionado en ese mes de prueba.

A nivel variable, se midió el campo magnético presente en los nuevos prototipos en 1 línea de producción, utilizando la misma metodología que en la fase de diagnóstico. Se realizaron pruebas de campo magnético en dirección perpendicular al área de trabajo en seis zonas distintas. Se realizaron estas A continuación se muestran los resultados:

Cuadro 4.6.4 *Resultados variables con gaussímetro en las partes con titanio grado*

Medición	Prototipo Aislado (G)	Prototipo en área de trabajo (G)
1	0,8	0,7
2	1,4	1,3
3	0,7	1,2
Promedio	1,0	1,2

Con los resultados obtenidos en el cuadro 4.6.4, se puede afirmar que la relación en Gauss del titanio con respecto al acero es considerablemente más baja, confirmando la mejora en cuanto a remoción del magnetismo en el proceso, esto comparando los resultados obtenidos también en el cuadro 4.1.2 de la sección de diagnóstico del proceso.

Finalmente, se realizaron mediciones variables de la dureza del titanio a prueba para confirmar la dureza del mismo, esto en un durómetro en escala Rc facilitado por la empresa.



Figura 4.6.1 Medición de dureza cara interna de parte de troquelado.

Cuadro 4.6.5 Resultados de dureza Rockwell C en el titanio grado 5

Análisis con Durómetro	Valor en Rc
Zona 1: cara interna parte corta	33
Zona 2: cara interna parte corta	29
Zona 3: cara interna parte larga	32,5
Zona 4: cara interna parte larga	31
Zona 5: cara de frente parte corta	33
Zona 6: cara de frente parte larga	32
Zona 7: Centro en parte corta	30
Zona 8: Centro en parte corta	31

De lo anterior, se puede observar que la dureza promedio obtenida fue de 31,4 Rc. Comparando este resultado con el valor obtenido teóricamente de dureza para el material de acero 420 (45 Rc), si se evidencia que el titanio es un material ligeramente menos duro, sin embargo esto no tuvo ninguna afectación en el proceso de producción, debido a que no mostraron ningún tipo de desgaste en las pruebas realizadas.

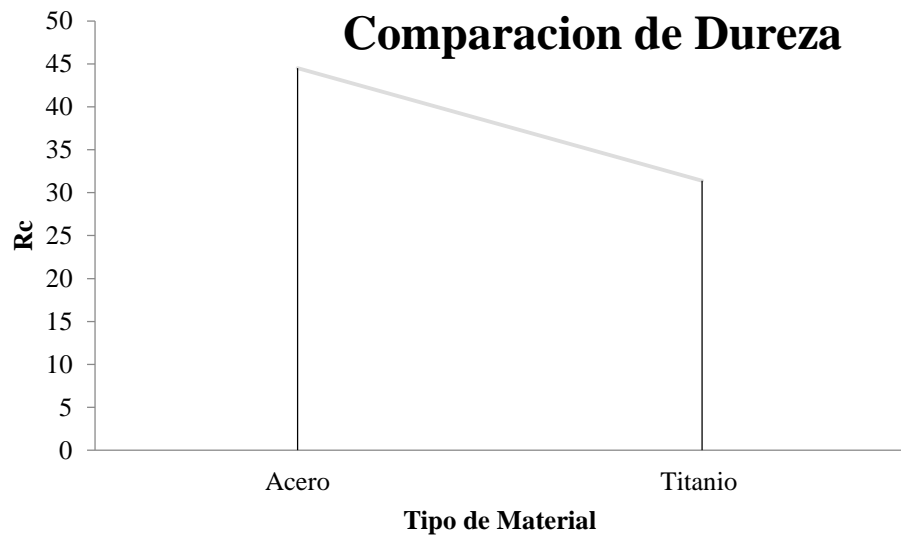


Figura 4.6.2 Gráfico de comparación de durezas.

Dado que los resultados obtenidos en el mes de prueba fueron satisfactorios se procedió a realizar un análisis de costo de la inversión si el material fuera implementado en las 11 líneas de producción.

Cada par de partes tuvo un costo de \$286 con el nuevo material. El material actual (acero 420) tenía un costo de \$110 el par. Cada máquina de producción requiere de 4 pares

de partes y son 11 máquinas en total en el área de endoscopia de la industria médica. El desglose del costo por cada par de partes de troquelado se muestra a continuación:

Cuadro 4.6.6 *Costo total de las partes de troquelado con el nuevo material*

Costo	Acero 420	Titanio
Costo materia prima (por par de partes)	\$11	\$128
Mano de obra (maquinado)	\$88	\$110
Herramientas de maquinado	\$11	\$24
Total	\$110	\$262

Cada máquina de troquelado del área de endoscopia de la empresa medica cuenta con 4 polos distintos de troquelado. El área cuenta con 11 máquinas de troquelado en 11 líneas de producción distintas. Por lo que la inversión al cambiar el material seria la siguiente:

Cuadro 4.6.7 *Costo total de la inversión con el nuevo material implementado*

Partes por comprar	Costo
Par de partes en acero 420	\$110
Par de partes en titanio	\$262
Diferencia estimada	\$152
4 polos en cada máquina	\$608
Inversión en 11 máquinas	\$6688

Una vez estimado el costo, a nivel de gerencia se dio el visto bueno de la inversión para todas las líneas de producción, dado a que la misma se consideraba como una inversión baja asociado al beneficio y devolución que traería el cambio para la reducción de los defectos y quejas del mercado.

4.7 Implementación (validación) del prototipo a todas las líneas de producción

Una vez que la solución propuesta se consideró válida para el asunto en cuestión, se procedió a hacer la implementación del mismo en todas las líneas de producción que trabajan con un proceso de troquelado. Para esto, se realizó un reporte técnico el cual fue aprobado por el gerente de manufactura del área. En el reporte se mostraba la efectividad del cambio de material respecto a la reducción de la incidencia magnética en la máquina y en las partes de formado. También se realizó un formulario de cambio de proceso en donde se detalló el cambio de plano de las partes especificando el cambio de material.

Una vez implementado el cambio en las 11 líneas de producción se hizo una verificación de la efectividad del cambio de material realizado. Es decir se realizó una comparación de los eventos relacionados a viruta por magnetismo antes del cambio y después del cambio.

La base de eventos se calculó con los datos recolectados en el proceso de contención. El proceso antes del cambio implementado presentaba una ocurrencia de 1.35ppm (6 unidades defectuosas en 4435760 unidades). Los eventos mencionados estaban distribuidos en 4 meses, lo cual equivale a 1.5 eventos por mes. Debido a esta tendencia, la efectividad del cambio se iba a medir al no tener eventos en el primer mes de implementación. Estos resultados también fueron satisfactorios, dado que la verificación fue efectiva.

Una vez finalizado el proceso para las partes de troquelado externas, se procedió a implementar el mismo material (titanio grado 5) de troquelado para las partes internas del troquel.

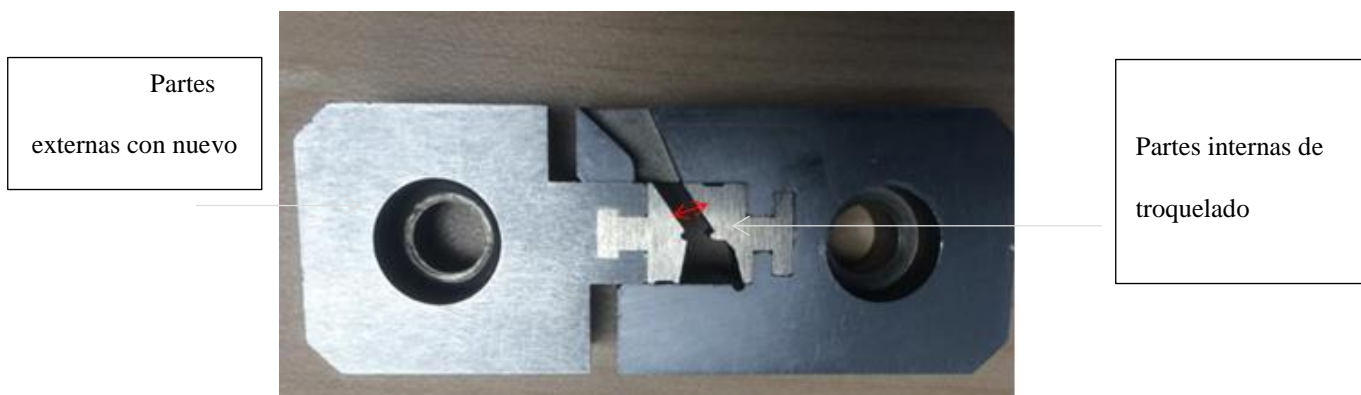


Figura 4.7.1 Proporción de las partes internas con respecto a las partes externas de troquelado.

Cuando se procedió a ejecutar la misma metodología ejecutada para las partes internas, con solamente 400 piezas ejecutadas el dado interno comenzó a desgastarse. En el mismo se formaron canales de deformación, los cuales deformaban el alambre con una geometría incorrecta a la esperada.

Cuadro 4.7.1 Prueba partes internas con titanio grado 5

Prototipo de la parte	Desgaste	Magnetismo	Geometría del alambre	Cantidad de piezas procesadas
Material Titanio grado 5	Si	No	Geometría correcta del alambre	400

Estas partes internas tienen contacto directo con el alambre que forma. Debido a esto se concluyó que el titanio es una buena opción de cambio de material para las partes externas, debido a que no tienen contacto directo con la deformación del cable, mas no para las partes internas dado a lo explicado.

Luego de realizar la prueba no satisfactoria con el titanio se procedió con la misma metodología de pruebas y materiales de las partes internas. Los resultados se muestran a continuación:

Cuadro 4.7.2 Prueba partes internas con Carbide y acero 304 tratado y sin tratar

Material	Desgaste	Magnetismo	Geometría del alambre	Cantidad de piezas procesadas
Carbide	No	Si	Geometría correcta del alambre	400
Acero 304	Si	No	Geometría incorrecta del alambre	400
Carbide tratado con nitruración	No	Si	Geometría correcta del alambre	400
Acero tratado con nitruración	Si	No	Geometría incorrecta del alambre	400

De los cuadros anteriores, se concluyó que ningún material era apto (en cuanto a magnetismo y desgaste) para las piezas internas de troquelado dado que el titanio y el acero no presentaron condiciones magnéticas sin embargo, si presentaron desgaste interfiriendo en el correcto formado de la geometría del alambre y provocando un efecto adverso en las unidades. Por ende no era viable implementar un material que presentará baja incidencia magnética si el producto final médico se estaba viendo perjudicado Para el Carbide paso lo opuesto, no presento desgaste, sin embargo si presentaba magnetismo.

El material actual de las partes de formadas internas está constituido por CPM, una aleación con alto porcentaje de carbono lo cual coincide al ser un material sumamente duro,

de aproximadamente 70 Rc. Dada a la dureza del material actual, no se encontró ningún material no magnético que presentara durezas con valores tan superiores.

En la figura 4.7.1 se puede observar que el porcentaje de material que se logró cambiar corresponde a aproximadamente un 90% (parte externa) mientras que un 10% (parte interna) permaneció con el mismo material CPM. Es decir con las mejoras implementadas en las partes externas del conjunto de troquelado se logró reducir un 90% del volumen magnético original que presentaba el equipo de troquelado. Para el 10% restante se investigó que existen insertos de partes magnéticas a nivel de núcleo de material, sin embargo no es algo dentro del rango de este proyecto.

Finalmente para robustecer el proceso de implementación, se realizó un análisis estadístico de 1 sample t en Minitab 17 Statistical Software. El análisis consistió en comparar la media obtenida para el acero con los valores obtenidos con el gausimetro para el titanio y así observar si había diferencia significativa entre ellas.

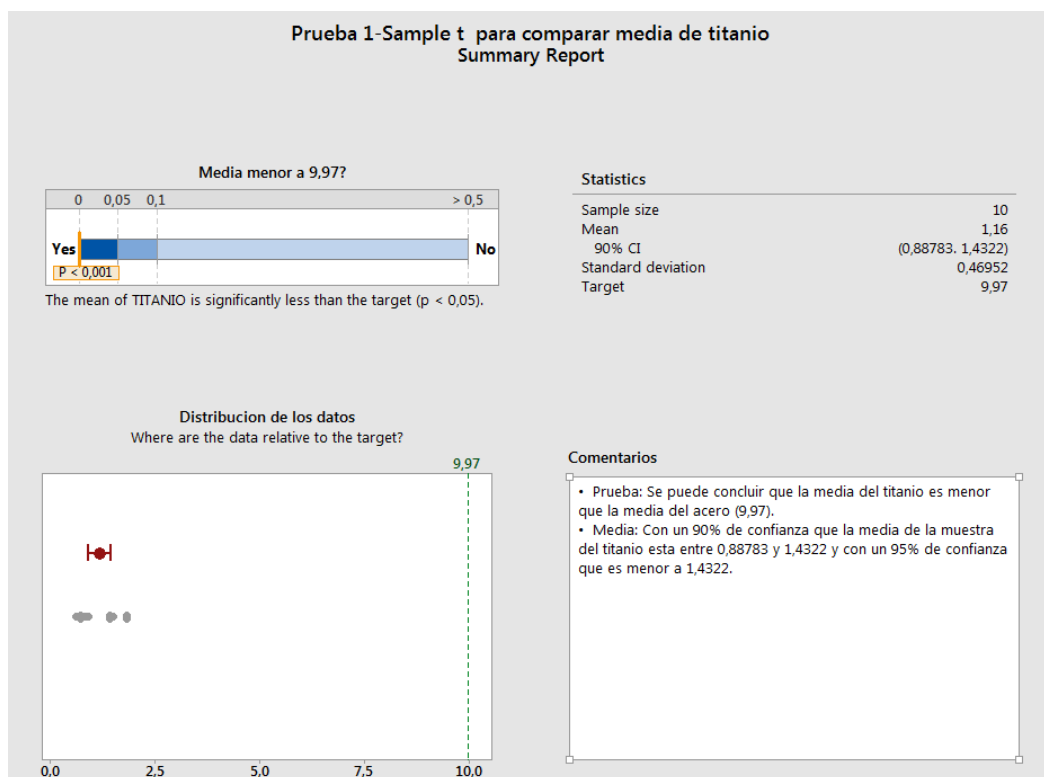


Figura 4.7.2 Análisis de 1 Sample T Minitab para comparación de medias

En la figura 4.7.2 se puede observar que la media del titanio es significativamente menor a la del acero. También se puede establecer con un 90% de confianza que la media del titanio se encuentra entre 0,88783 y 1,4322. Finalmente se procedió a realizar los supuestos estadísticos del diseño experimental tales como: normalidad, independencia y varianza constante.

Para la verificación de los supuestos estadísticos se utilizó el programa Minitab. A continuación, en la figura 4.7.3 se muestra el resultado para la prueba de normalidad de la

muestra de titanio, en la cual, el valor de P value es mayor a $\alpha=0.05$ y por lo tanto los datos se pueden concluir como normales.

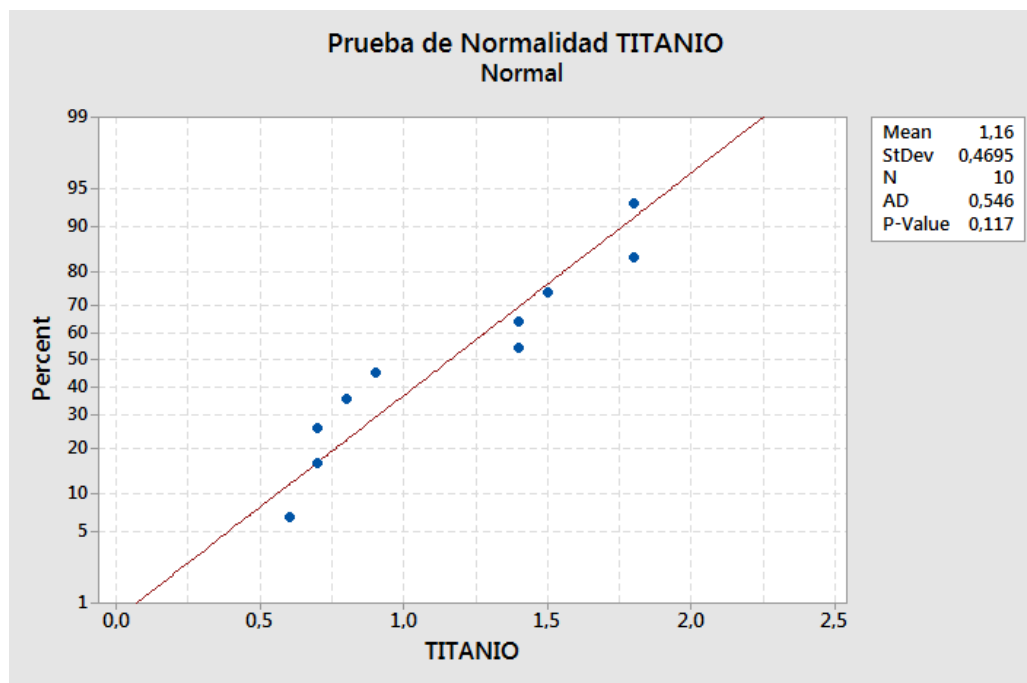


Figura 4.7.3 Prueba de normalidad

El análisis de residuos no se realizó debido a que este análisis estadístico es únicamente una prueba 1 sample T y no un modelo estadístico. La prueba de independencia de datos utilizando la prueba chi al cuadrado se realiza cuando los datos son categóricos, dado que para la comparación en estudio no es el caso, no se realizó. Para la prueba 1 sample T, se toma en consideración que los datos sean aleatorios y normales.

4.8 Análisis de mejoras con la implementación lograda

Una vez implementadas las mejoras se analizó el beneficio de las mismas. Se tuvo una mejoría en dos importantes aspectos:

- Reducción de defectos: los eventos relacionados a este tipo de defectos disminuyeron en un 40%.
- Mantenimientos al equipo: una vez implementadas las mejoras, dado a que el número de defectos disminuyó, las intervenciones y por ende tiempo muerto de las máquinas disminuyó considerablemente.

A continuación se muestran la cantidad total de defectos antes y después de los cambios de material implementados:

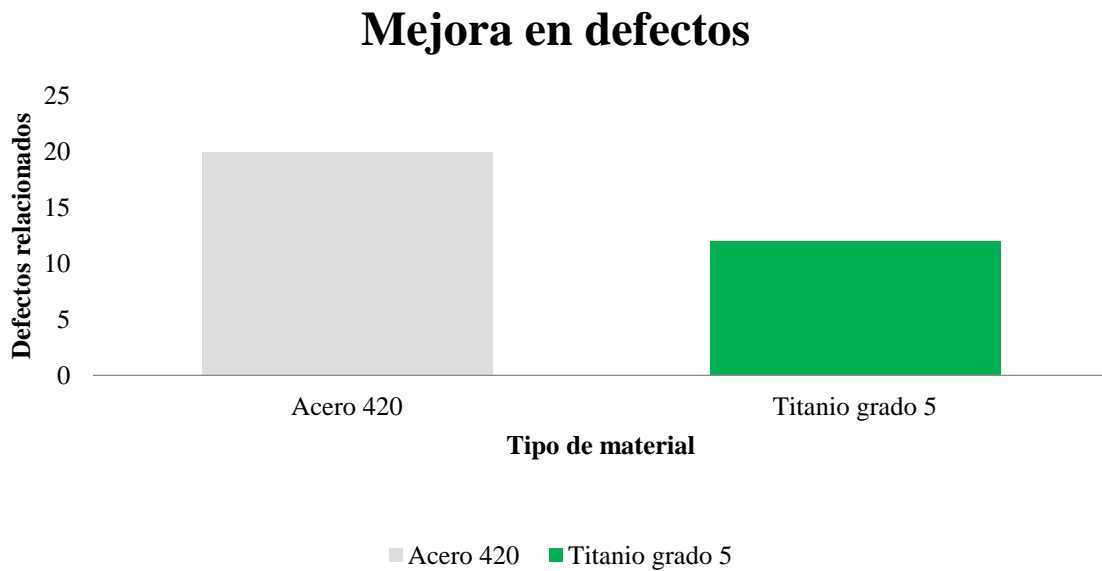


Figura 4.8.1 Reducción de defectos luego de la implementación.

Cada vez que se detectaba un defecto como los mostrados en la figura 4.1.1 existía un protocolo de mantenimiento para intervenir la máquina de troquelado en donde se detectó el daño. El protocolo inicial en los dados de troquelado consistía en:

1. Remover los dados de troquelado externos e internos de los 4 nidos de la máquina (los internos son removibles con facilidad, los externos cuentan con un par de tornillos de fijación)
2. Verificar la presencia de contaminación en los mismos y limpiarla
3. Desmagnetizar ambos pares (dados internos y externos) en un desmagnetizador de placa presente en el laboratorio de mantenimiento
4. Colocar nuevamente los pares de troquelado (dados internos y externos)
5. Devolver la máquina a producción, realizando un reporte de mantenimiento de lo ejecutado en la máquina que generó el defecto.

El protocolo luego de la mejora consistió en lo siguiente:

1. Remover únicamente los dados internos de troquelado, los externos quedan en el equipo
2. Verificar la presencia de contaminación en los mismos y limpiarla
3. Desmagnetizar los dados internos en un desmagnetizador de placa presente en el laboratorio de mantenimiento
4. Colocar nuevamente los pares internos en la máquina de troquelado
5. Devolver la máquina a producción, realizando un reporte de mantenimiento de lo ejecutado en la máquina que genero el defecto

Las mejoras ejecutadas influenciaron en que el tiempo muerto de los equipos ante un evento disminuyera 30 min en cada evento.

Cuadro 4.8.1 *Minutos de tiempo muerto pre implementación*

Defectos reportados previo al proyecto	Tiempo muerto en la máquina por defecto reportado (min)	Total de minutos de tiempo muerto previo a la mejora (min)
20	40	800

Cuadro 4.8.2 *Minutos de tiempo muerto luego de implementación*

Defectos reportados posterior al proyecto	Tiempo muerto en la máquina por defecto reportado (min)	Total de minutos de tiempo muerto previo a la mejora (min)
12	10	120



Figura 4.8.2 Reducción de tiempo muerto post implementación.

Traduciendo los minutos recuperados o no perdidos en piezas se tiene lo siguiente:

Cada hora de producción equivale a 480 unidades de pinzas de endoscopia

Tras la implementación del nuevo material se recuperaron 11, 33 horas en un periodo de seis meses.

Cuadro 4.8.3 *Ganancia por reducción de tiempo muerto en máquinas*

Parámetros de mejora	Valor
Minutos ganados (min)	680
Horas recuperadas (h)	11,33
Piezas por hora por línea	480
Piezas ganadas	5440
Costo estándar por pieza (\$)	4
Dólares ganados (\$)	21760

La importancia de este proyecto radica en que se corrigió un proceso que generaba problemas para el producto de la empresa cambiando las condiciones del material que se usaban en un equipo. Con esta mejora no solo se logró disminuir la cantidad de defectos que comprometían la calidad del producto siendo este primordial al tratarse de un producto médico, sino que también se logró disminuir el tiempo muerto de las máquinas, ganando 11, 33 horas que equivale a 5440 unidades de endoscopia adicionales, ganando \$21. 760 en un periodo de seis meses.

Tomando en cuenta la inversión realizada de \$6688 según lo mencionado en el cuadro 4.6.7, la ganancia real fue de \$15072.

Finalmente y tal vez el logro más importante se explica en la reducción de quejas de usuario. Utilizando acero 420 en el proceso, se recibieron tres quejas del mercado en las cuales el paciente se quejaba de que el dispositivo dejó de funcionar durante el procedimiento. Más específicamente, que el dispositivo no accionaba a la hora de tomar la muestra de tejido. El proceso de quejas de la empresa consiste en primero recibir la descripción de la queja y posteriormente si la queja es devuelta, se revisan los dispositivos en un laboratorio de quejas con las respectivas medidas de seguridad y salud. Una vez que los dispositivos en cuestión retornaron, se pudo confirmar en la sesión de análisis del producto que en efecto los dispositivos contaban con un defecto de alambre mordido/reventado, el cual era generado por el problema en cuestión de este proyecto. Una vez implementado el cambio de material en el proceso no se recibieron más quejas en el departamento del defecto en cuestión. Esto sin duda es lo más rescatable en cuanto a industria médica se refiere, ya que la prioridad número uno es el paciente.

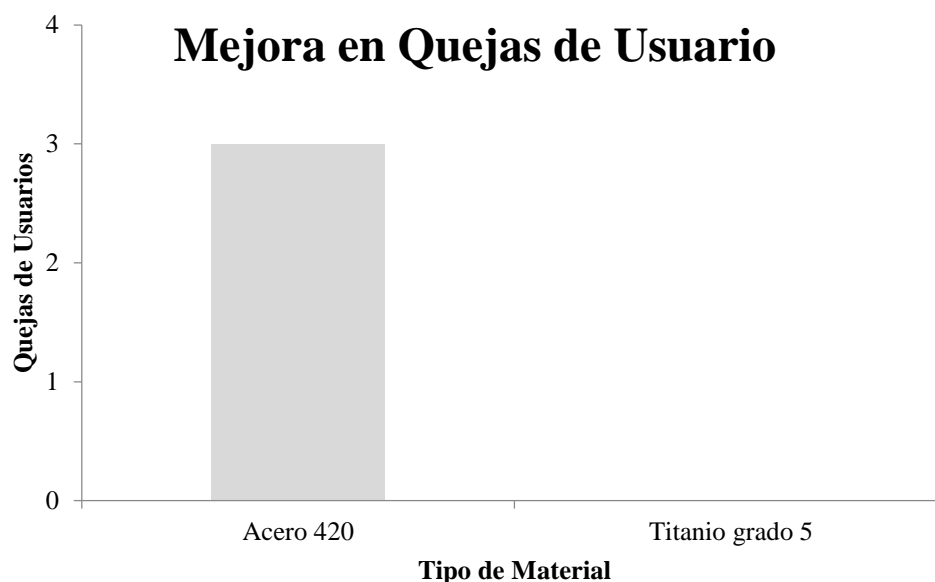


Figura 4.8.3 Mejora en quejas de usuario

Adicionalmente se hizo uso del software de la herramienta Change Point Analyzer, el cual analiza datos en un periodo de tiempo ordenado para determinar si hubo algún cambio. El software cuenta con graficas en donde los colores muestran el cambio que el programa detecta y además brinda intervalos de confianza para cada cambio detectado. Se puede utilizar para datos atributivos y variables, promedios, desviaciones estándar y datos individuales

Cuadro 4.8.4 Resultados de % de confianza del cambio percibido

Mes de Manufactura	Nivel De Confianza	De	A	Nivel
No(equivalv-15	98%	1	0	1

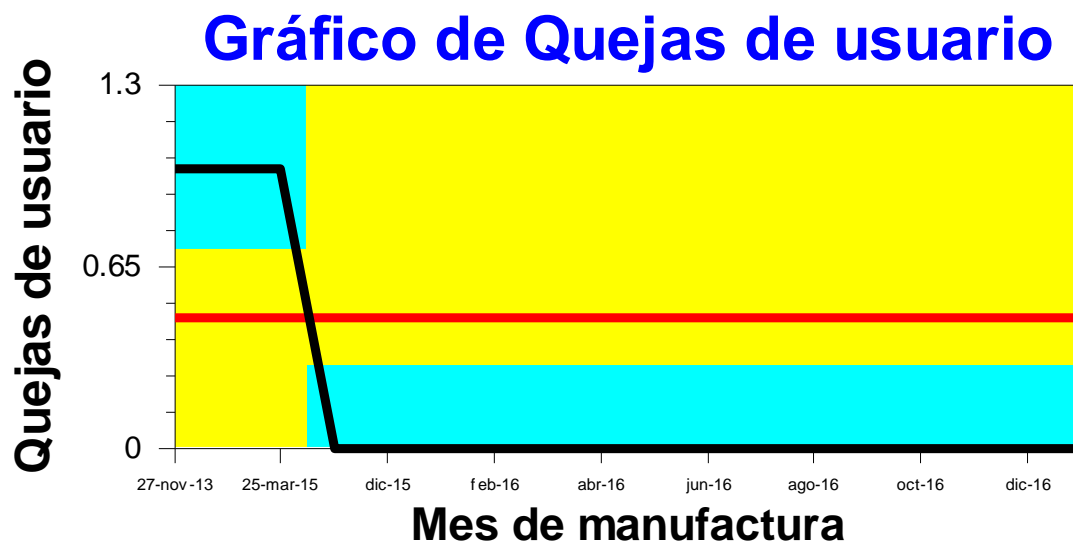


Figura 4.8.4 Análisis de punto de cambio luego de la implementación de cambio de material

De la figura 4.8.4 y del cuadro 4.8.4 mostrados, se puede analizar que hubo un cambio en noviembre 2015 (mes de la implementación del cambio) con un 98% de confianza. Además en la gráfica el cambio se ve ejemplificado con los colores celestes.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Para piezas que no tienen contacto directo con el material por troquelar (piezas de soporte) el titanio grado 5 funcionó como parte de troquelado con incidencia magnética casi nula.
- Utilizando titanio grado 5 en las partes de soporte se vio un porcentaje de reducción de 40% en eventos relacionado a corte en el alambre por adherencia de viruta en las partes de troquelado.
- Al probar los materiales no magnéticos (Acero inoxidable serie 300 y titanio) como material de las partes internas del proceso, las partes sufrieron deformaciones las cuales interfirieron en la correcta geometría del alambre, no cumpliendo con la especificación del mismo. Es decir, para un proceso de troquelado que requiere que sus partes sean tan duras como 70 Rc (por tener contacto directo con el material por troquelar), el titanio y acero serie 300 sufren desgastes en sus superficies considerados adversos para el proceso.
- La nitruración en frío realizada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica no contribuyó a que las piezas perdieran o cedieran sus condiciones magnéticas.
- La nitruración en frío realizada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica no contribuyó al aumento en la dureza de las piezas de troquelado, debido a que la

adherencia de las partículas nitruradas se hizo de manera superficial y no a nivel del núcleo de los dos materiales en cuestión.

- Al utilizar el gaussímetro, los resultados obtenidos fueron consistentes en la afirmación que las partes de acero tanto aisladas como en la máquina de troquelado mostraron valores mayores al titanio en las mismas condiciones, confirmando mayor magnetismo en el proceso anterior.
- Una vez establecidas las mejoras en el proceso relacionadas al cambio de material en las partes externas, la calidad del producto mejoró considerablemente. Desde su implementación no se recibieron más quejas de mercado, y además la incidencia en el piso de producción disminuyó, evidenciando la mejora.
- Una vez establecidas las mejoras en el proceso relacionadas al cambio de material en las partes externas, se disminuyó el tiempo muerto de las máquinas por intervenciones de mantenimiento en 11,33 horas (en un periodo de seis meses).
- Una vez establecidas las mejoras en el proceso, se logró una favorabilidad de 5440 piezas de pinzas de endoscopia adicionales, lo que equivale a un aproximado de \$22000. Al contemplar la inversión realizada en las máquinas una vez que se cambió el material, la ganancia total en el proceso por piezas adicionales debido a una disminución de tiempo muerto fue de \$15072.
- Del análisis estadístico 2 sample t test, se concluye que la media de los valores en Gauss para el acero 420 es significativamente mayor que la del titanio. Con esto

se puede concluir que tanto en un nivel estadístico como en un nivel práctico, los resultados del proyecto son satisfactorios

- La mayor complejidad del proyecto consistió en que no existió una relación directa 1:1 entre el material y las intenciones o requerimientos del proceso, producto o diseño, debido a que había una relación indirectamente proporcional entre porcentaje de carbono (dureza) y magnetismo.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar injertos de materiales (con técnicas de mecánica de precisión) con una alta dureza a los materiales no magnéticos para aumentar su dureza y no solo realizarlo superficialmente.
- Se recomienda la utilización de un gráfico de Ashby en el proceso de selección de material, para así incluir todas las propiedades necesarias que el material debe cumplir en su propósito de proceso.
- Se recomienda utilizar un gaussímetro modelo portátil 5100 para las mediciones del campo magnético en las partes, ya que el gaussímetro utilizado contaba con una tecnología considerada antigua (modelo 9200), la cual dificultó las mediciones realizadas en términos de estabilidad. Los modelos 5100 se caracterizan por ser de fácil manejo, por su amplia aplicabilidad y por no requerir calibraciones

6 Nomenclatura

Símbolo	Nombre	Unidades
G	Gauss	Gauss
Ur	Permeabilidad Magnetica	Adimensional
Rc	Dureza Rockwell C	Rc
Kc	Indice de dureza a la fractura	Mpa/ \sqrt{m}
HB	Dureza Brinell	HB

7 Bibliografía

- Acequisa. (1983). *Aceros y Equipos*. Acequisa, Madrid. Obtenido de <http://acequisa.com/spanish/contacto.html>
- Alonso, V. C. (1998). *Control estadístico de la calidad*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Arias, A. G. (2001). *Que es el magnetismo?* Salamanca, España: Ediciones Universidad Salamanca.
- Ashby, M. (2008). *Materiales para Ingeniería I "Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño"*. Barcelona, España: Reverte.
- Cabrera, R. C. (2012). *Lean Six Sigma Toc*. PYMES.
- Callister, W. (2002). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona, España: Editorial Reverte.
- Chilexpo. (2004). *Titanio Gr 5: Ficha técnica*. Chile: Chilexpo. Obtenido de http://www.chilexpo.com/dinamicos/calidades/604904-titanium_gr5_esp.pdf
- Coghill, R. (2000). *El libro de la magnetoterapia*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Sirio S.A.
- Corapse, Y. (2014). *Proceso de Troquelado y Estampado*. Obtenido de <https://prezi.com/5xqefuce3xb6/proceso-de-troquelado-y-estampado/>
- DeGarmo, E., Black, J., & Kohser, R. (1994). *Materiales y Procesos de Fabricación*. Barcelona: Editorial Reverte.
- Dieter, G. (1990). *Volume 2: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special Materials*. United States of America.

- Dieter, G. (1997). *Volume 1: Properties and Selection: Irons, steels and high performance alloys*. United States of America.
- Felix, L. A. (2012). *Caracterizacion Y Estudio de Materiales Magneticos* . : EAE.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*. Pearson, Prentice Hall.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- Krajewski, L. J. (2000). *Administracion de operaciones: estrategia y analisis*. Mexico: Pearson.
- Mosca, T. (2005). *Fisica para la Ciencia y la Tecnologia: Electricidad y Magnetismo*. Barcelona, Espana: Reverte.
- Ochoa, F. G. (2002). *Problemas de Campos Electromagneticos* . Madrid: Comillas.
- Okes, D. (2009). *Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action*.
- Perez, F. P. (2007). *Diccionario de Fisica*. Madrid, Espana: Editoria Complutense.
- Planell, F. G. (s.f). *Aplicaciones Biomedicas del titanio y sus aleaciones*. Barcelona: Dpto de Ciencia de los Materiales e Ingenieria Metalurgica, Universidad Politecnica de Cataluna .
- Rivera, L. N. (2006). *Seis Sigma Guia para para principiantes* . Mexico DF: Panorama .
- Schmid, S. (2002). *Manufactura Ingenieria y Tecnologia* . Mexico: Prentince Hall.
- Seippel, G. (1977). *FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD Principios de Electricidad, Electronica, Control y Ordenadores*. Barcelona, Espana : Riverte.
- Sola, P. M. (1991). *Tratamientos termicos de los metales*. Barcelona: Productic.

Vairo, J. (1993). *Gestion estrategica de la calidad en los servicios sanitarios* . Madrid: Diaz

De Santos S.A.

Vasconcellos, A. (2003). *Quality Assurance for the Food Industry*. CRC Press.

Vazquez, D. d. (2000). *Diccionario de Ciencias*. Espana: Oxford-Complutense.

8 Apéndice

8.1 Apéndice A: Datos experimentales

Todos los datos atributivos obtenidos se hicieron con base en la documentación de la empresa médica en donde se realizó el proyecto de graduación, la cual se considera confidencial. Esta información consistía en los datos recolectados durante las pruebas con los prototipos y con el prototipo final, data atributiva.

A continuación se muestran los valores obtenidos con el gaussímetro tanto para la parte de diagnóstico del material que estaba en la partes como para el material propuesto e implementado

Cuadro 8.1.1 Mediciones Gaussímetro: Acero 420 y Titanio

Medición de Campo Magnético (G)	
Acero	Titanio
8,9	1,4
11,6	0,7
9,4	1,8
9,7	1,4
9,1	1,8
11,9	0,8
9,6	1,5
9,9	0,6
9,7	0,7
9,9	0,9

8.2 Apéndice B: Muestra de cálculo

- Promedio

$$\text{Medicion 1} + \text{Medicion 2} + \text{Medicion 3} = \text{Promedio}$$

$$\text{Ejemplo: } 11,9 + 9,7 + 11,6 = 11,1$$

- Costo de partes

$$\text{Costo Materia Prima} + \text{Maquinado} + \text{Herramienta de Maquinado} \\ = \text{Costo de la parte}$$

Ejemplo: $\$128 + \$110 + \$24 = \262

- Total de Inversión

$$(\text{Costo de parte titanio} - \text{Costo de parte acero}) \times 4 \\ \times \text{numero de maquinas} \\ = \text{Inversion por nuevo material}$$

Ejemplo: $(\$262 - \$110) \times 4 \times 11 = \6688

- Tiempo muerto total

$$\text{Numero de eventos} - \text{tiempo muerto del evento} = \text{Tiempo muerto}$$

Ejemplo: $20 \times 40 \text{ min} = 800 \text{ min}$

- Minutos recuperados

$$\text{Tiempo muerto total con acero} - \text{tiempo muerto total con titanio} \\ = \text{Minutos recuperados}$$

Ejemplo: $800 \text{ min} - 120 \text{ min} = 680 \text{ min}$

- Mejora en costo (dólares ganados)

$$\text{Horas recuperadas por mejora} \times \text{numero de piezas por hora} \\ \times \text{costo estandar de cada pieza} = \text{Mejora en costo}$$

Ejemplo: $11,33 \text{ h} \times 480 \text{ unidades por hora} \times \$4 = \$21760$

- Mejora total, tomando en cuenta inversión

Mejora en costo – total de la inversión = Mejora total

Ejemplo: $\$21760 - \$6688 = \$15072$