



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE UN PROCESO DE MANUFACTURA PARA EL
MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE LOS ESLABONES EN LAS
ARTICULACIONES DE MAQUINARIA PESADA**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Mecánico

**AUTORES: JULIO ANDRÉS GUACHISACA MASA
RICARDO MICHAEL OCHOA MERINO**

TUTOR: ING. JORGE ISAAC FAJARDO SEMINARIO, Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2022

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Julio Andrés Guachisaca Masa con documento de identificación N° 1150290813 y Ricardo Michael Ochoa Merino con documento de identificación N° 1900509553; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 1° de abril del 2022

Atentamente,



Julio Andrés Guachisaca Masa

1150290813



Ricardo Michael Ochoa Merino

1900509553

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Julio Andrés Guachisaca Masa con documento de identificación N° 1150290813 y Ricardo Michael Ochoa Merino con documento de identificación N° 1900509553, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño de un proceso de manufactura para el mantenimiento correctivo de los eslabones en las articulaciones de maquinaria pesada”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1° de abril del 2022

Atentamente,



Julio Andrés Guachisaca Masa

1150290813



Ricardo Michael Ochoa Merino

1900509553

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Isaac Fajardo Seminario con documento de identificación N° 0102495777, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN PROCESO DE MANUFACTURA PARA EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE LOS ESLABONES EN LAS ARTICULACIONES DE MAQUINARIA PESADA, realizado por Julio Andrés Guachisaca Masa con documento de identificación N° 1150290813 y Ricardo Michael Ochoa Merino con documento de identificación N° 1900509553, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico, que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1° de abril del 2022

Atentamente



Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario, Ph.D
0102495777

DEDICATORIA

A mis padres Ángel y María por todo el apoyo que con amor incondicional y sacrificio que me han brindado su apoyo en todo este tiempo de estudios. Por qué siempre me han sabido guiar con sus consejos.

A mis hermanos que siempre han estado ahí para alentarme y motivarme a siempre seguir adelante. Porque han sido un pilar fundamental para seguir adelante.

Julio

Le dedico primero a mi poder superior que es Dios y principalmente con todo mi corazón a mi familia. A mi padre Ricardo por enseñarme la importancia de trabajar honestamente y por ser un ejemplo para salir adelante. A mi madre Esperanza por ser el ser máspreciado para mí. A mis hermanos Diego, Edison, Jhon y Bryan que forman parte de mi vida, me han brindado su amistad entera. A mis sobrinos y sobrinas por seguir activando la chispa de mí ser interior. A mi abuelita Carmen que me brindo su total paciencia y completo amor.

Michael

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme bendecido con una buena familia, por todos los momentos que he vivido gracias a su bendición y a mis padres Ángel y María que han brindado un apoyo incondicional en todo este tiempo de estudios, por todo el esfuerzo que han hecho para que logre culminar con esta meta profesional.

También quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana por haber permitido ser parte de esta comunidad de estudiantes que se forman con miras a una vida profesional.

Julio

Primeramente, deseo agradecer a mi poder superior Dios, que me permite aún disponer de mi familia, padre, madre y hermanos. Gracias por su amor y creer en mí.

También deseo agradecer a todos los docentes y compañeros a lo largo de mi preparación académica. Gracias Universidad Politécnica Salesiana por las oportunidades que me han brindado, son incomparables.

Les agradezco haciendo presente mi gran afecto hacia su persona.

Michael

ÍNDICE

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE	VI
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUCCIÓN	14
GLOSARIO.....	15
PROBLEMA	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Problema general.....	16
1.3 Problemas específicos	17
2 GRUPO OBJETIVO	18
3 OBJETIVOS.....	19
3.1 Objetivo general	19
3.2 Objetivos específicos.....	19
4 MARCO TEÓRICO	19
4.1 Cojinete de fricción.	19
4.2 Desgaste.	20
4.3 Tribología.....	21
4.3.1 Tribotécnia.	21
4.4 Tipos de lubricación	21
4.5 Fricción.....	22
4.6 Tratamientos térmicos.	22
4.6.1 Temple.....	23
4.6.2 Cementación.....	24
4.6.3 Cementación sólida	24
4.6.4 Nitruración.	25

4.6.5	Aceros para Nitruración.	25
5	MARCO METODOLÓGICO	27
5.1	Hipótesis general.	27
5.2	Hipótesis específicas.	28
5.3	Cargas en los bujes	28
5.3.1	Identificación de cargas en el punto A del brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.	28
5.4	Descripción de los aceros para el Estudio.	43
5.4.1	Selección del acero para la fabricación de los bujes de estudio.	45
5.5	Selección del tratamiento térmico para los bujes de estudio.	46
5.5.1	Diseño del tratamiento de Carburización (cementación)	47
5.5.2	Segunda ley de Fick.	47
5.6	Descripción de materiales y equipos.	50
5.6.1	Equipos.....	50
5.6.2	Materiales y herramientas	53
5.7	Proceso de manufactura para la producción de bujes	53
6	Análisis de resultados.....	59
6.1.1	Características del buje.....	59
6.2	Resultados de la Dureza del buje cementado.	60
6.3	Resultados del estudio revenido.	61
6.3.1	Resultados de la dureza del buje cementado – revenido.	62
6.3.2	Resultados del estudio de espectrometría.....	63
6.4	Resultados del estudio de nitruración.....	68
6.5	Análisis técnico-económico del proceso de manufactura.	69
7	CONCLUSIONES.	75
8	RECOMENDACIONES	76
9	REFERENCIAS	77
10	ANEXOS.....	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de desgaste.....	20
Tabla 2. Influencia en los elementos de aleación.	26
Tabla 3. Puntos de análisis del brazo retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.....	29
Tabla 4. Datos de excavación (Autor).	32
Tabla 5. Distancia entre eslabones del brazo excavador (m).	33
Tabla 6. Ángulos de convergencia de las reacciones RE y RA.....	34
Tabla 7. RE y RA, que actúan en un frente de trabajo estático.	35
Tabla 8. Ángulos calculados, formados por los eslabones de mecanismo de 4 barras ..	36
Tabla 9. Datos para el cálculo de la fuerza Fdb.....	37
Tabla 10. Datos de fuerzas calculadas en los eslabones del mecanismo de cuatro barras. 38	
Tabla 11. Datos para el cálculo del área sometida a esfuerzo.	38
Tabla 12. Resumen de fuerzas y esfuerzos que actúan sobre los bujes del punto A.	41
Tabla 13. Comparativa de esfuerzos analítico y simulados, que actúan sobre los bujes del punto A.	43
Tabla 14. Resumen de los posibles aceros en Stock para fabricar de los bujes.	44
Tabla 15. Matriz de decisión o situación de certeza para seleccionar el acero de estudio. 45	
Tabla 16. Matriz de Coste / Oportunidad del Criterio Savage.	46
Tabla 17. Valores de tratamientos térmicos para el acero de estudio.....	46
Tabla 18. Matriz de decisión o situación de certeza para seleccionar el tratamiento térmico. 47	
Tabla 19. Resumen de la segunda ley de Fick [10].....	48
Tabla 20. Coeficiente de difusión.....	49
Tabla 21. Descripción de los materiales y herramientas.	53
Tabla 22. Parámetros para el mecanizado de los bujes.	55
Tabla 23. Caracterización y dimensionado del buje antes del tratamiento térmico.	60
Tabla 24. Dureza del acero después del revenido.	61
Tabla 25. Resumen del estudio de espectrometría del buje cementado.	64
Tabla 26. Los resultados de la dureza y contenido de carbono del acero DIN 20 Mn V6 cementado – revenido.	65
Tabla 27. Estudio de espectrometría del buje Caterpillar.....	66
Tabla 28. Análisis de precios unitarios del “Buje”.....	70
Tabla 29. Análisis de precios unitarios de la “Caja de cementación”.	71
Tabla 30. Análisis de precios unitarios de la “Manta cerámica”.....	72

Tabla 31. Análisis de precios unitarios del “Tratamiento térmico”.	73
Tabla 32. Costo total del proceso de fabricación de bujes.	74
Tabla 33. Análisis comparativo de los bujes.	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Tiempo vs Temperatura del Temple[8].....	23
Figura 2. Ubicación de los puntos y eslabones del brazo retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.....	28
Figura 3. D.C.L. del brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.	29
Figura 4. Diagrama de cinemático del brazo excavador.	30
Figura 5. Diagrama de cinemático del brazo excavador.	31
Figura 6. Brazo de retroexcavadora en un frente de trabajo estático con un ángulo de 180° (pluma y cucharón).....	32
Figura 7. Distancia en tiempo real entre eslabones del brazo excavador.	33
Figura 8. Diagrama de convergencia de las reacciones (RE-RA) en el punto O.	34
Figura 9. Diagrama para sumatoria de momentos en el punto E.....	34
Figura 10. D.C.L. del sistema de cuatro barras que sujeta el cucharón.....	35
Figura 11. Ángulo Lambda que forma el cilindro hidráulico con la vertical.	36
Figura 12. D.C.L de fuerzas que actúan en los eslabones del mecanismo de cuatro barras.	37
Figura 13. Subconjunto de pin y buje en el punto A, que conecta el brazo y el cucharón.	38
Figura 14. D.C.L. para representar un esfuerzo cortante doble sobre el buje del punto A.	39
Figura 15. D.C.L. Cargas de aplastamiento, buje de la pluma y buje cucharón.....	40
Figura 16. Superficie de la pluma sometida a esfuerzo de apoyo.	40
Figura 17. Buje A, Simulado y posicionamiento de fuerzas.	42
Figura 18. A ; condiciones iniciales, B ; tipo de mallado, C ; reporte de esfuerzo Von Mises, D ; reporte del esfuerzo de compresión (aplastamiento).	43
Figura 19. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.....	49
Figura 20. Medidor de Dureza Rockwell	50
Figura 21. Sistema de templado N 7/H.....	51
Figura 22. Horno de cementación.	51
Figura 23. Torno paralelo.	52
Figura 24. Rectificadora Plana GSG – 1224 AD III.....	52
Figura 25. Espectrómetro Foundry Master Xpert.....	53
Figura 26. Proceso de fabricación de los bujes.	54
Figura 27. Diagrama del proceso de fabricacion de los bujes.	56
Figura 28. Dimensionado del buje.....	59
Figura 29. Puntos para el control dimensional del buje.	59

Figura 30. Dureza obtenida después del tratamiento térmico de cementación.	61
Figura 31. Variación de la dureza en función de la temperatura, para acero DIN 20 Mn V6 cementado revenido a 200 °C, 300 °C y 400 °C durante 2 horas.....	62
Figura 32. Dureza obtenida después del tratamiento térmico de Revenido.	63
Figura 33. Porcentaje de carbono del buje cementado y original.....	64
Figura 34. Comparación de la dureza y el contenido de carbono en función de la profundidad.....	65
Figura 35. Comparación de los elementos de aleación del buje original, del buje alterno y del acero Din 20Mn V6.	67
Figura 36. Variación del contenido de carbono del buje nitrurado	69

RESUMEN

Este proyecto de titulación se forma con el objetivo analizar y diseñar un proceso de manufactura para el mantenimiento correctivo de eslabones articulados de maquinaria pesada para beneficio de la empresa taller mecánica Guachisaca (TGM). Con la determinación de las cargas expuestas en los eslabones articulados a las cuales se somete una retroexcavadora de 11 Toneladas (Caterpillar). Se realiza un estudio de campo para seleccionar el acero disponible y el tratamiento térmico más adecuado, con la difusión de carbono (segunda ley de Fick) analizamos la difusión de átomos con altas temperaturas en un tiempo determinado. Las durezas y deformaciones ocasionadas por el tratamiento térmico se evalúan escalonadamente desde la superficie hasta una profundidad 2 mm con intervalos de 0.05 mm (buje suministro) y 0.08 mm (buje cementado) para generar un contexto de referencia. En el revenido se utiliza tres testigos cementado-templado para evaluar a diferentes temperaturas respectivamente generando datos, mostrando el comportamiento sobre una gráfica de dureza en función de la temperatura manteniendo constante el tiempo del tratamiento. Finalmente, se lleva a cabo un estudio técnico-económico para la posible implementación de una línea de fabricación de bujes personalizados para retroexcavadora de 11 Toneladas.

Palabras claves: Ley de Fick, difusión de carbono, cementación, tratamiento térmico, Austenita, carbón activo, revenido,

ABSTRACT

The objective of this degree project is to analyze and design a manufacturing process for the corrective maintenance of articulated links of heavy machinery for the benefit of the company Taller Mecánica Guachisaca (TGM). With the determination of the exposed loads in the articulated links to which an 11-ton backhoe loader (Caterpillar) is subjected. A field study is carried out to select the available steel and the most suitable heat treatment, with the diffusion of carbon (Fick's second law) to analyze the diffusion of atoms with high temperatures in a given time. The hardnesses and deformations caused by the heat treatment are evaluated in steps from the surface to a depth of 2 mm with intervals of 0.05 mm (supplied bushing) and 0.08 mm (case hardened bushing) to generate a reference context. In quenching, three cemented bushings are used to evaluate at different temperatures respectively generating data, showing the behavior in a graph of hardness as a function of temperature, keeping the treatment time constant. Finally, a technical-economic study is carried out for the possible implementation of a manufacturing line of tailor-made bushings for 11-ton backhoe loaders.

Keywords: Fick's law, carbon diffusion, cementation, heat treatment, Austenite, activated carbon, tempering,

1 INTRODUCCIÓN

Taller mecánico Guachisaca (TMG) viene laborando desde 1998 en la ciudad de Loja, brinda mantenimiento correctivo a maquinaria pesada como excavadora, cargadoras, retroexcavadoras, los eslabones articulados pierden el ajuste con holguras excesivas y existe la necesidad de personalizar los bujes y/o accesorios. En la actualidad se fabrican bujes personalizados de acero templado utilizando acero EN 102941 (barra perforada), sometido a un temple artesanal. Los bujes fabricados por TMG tienen una vida útil aproximadamente similar con los alternos de 12 meses.

Mediante el uso de laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, Tratamientos Térmicos y Ensayos destructivos, se pretende proporcionar información eficaz, confiable y estructurada que sirva como base para diseñar una guía de manufactura para la fabricación de bujes personalizados para las articulaciones de excavadoras, retroexcavadoras y cargadoras, etc.

El objetivo es diseñar un proceso de manufactura para el mantenimiento correctivo de los bujes en eslabones articulados de maquinaria pesada. Para lograr dicho objetivo se ahonda en conceptos como; dibujo técnico, resistencia de materiales, trigonometría, difusión de carbono, estática, tratamientos térmicos, para obtener la zona de mayor esfuerzo en los bujes que conectan el brazo y cucharón, además mediante una simulación aproximar los resultados para validarlos.

En este punto se valida la conceptualización de la segunda ley de Fick mediante una hoja de cálculo Excel que permite apreciar detalladamente el comportamiento del tiempo en función de la temperatura proponiendo datos una vez seleccionado el tratamiento térmico y parámetros de diseño. Se procede a caracterizar el acero y buje con sus tolerancias antes y después del tratamiento térmico, con la obtención de datos se realiza una comparación de la deformación mediante tablas.

Con los resultados finales se procede a llevar a cabo un análisis económico para decidir la vía más factible para el diseño de una guía para un proceso de manufactura de bujes personalizados, con lo cual se puntualizan las conclusiones del proyecto y los resultados obtenidos formulan una alternativa de solución.

GLOSARIO

Bonificación: Es un tratamiento térmico en el cual se obtiene propiedades principalmente de tenacidad y resistencia para un acero, el cual desempeña una función determinada. Mediante una variación de temperatura en el acero por un lapso de tiempo, se logra excitar los átomos de hierro y carbono para lograr en ellos un estado de austenización, para luego ser enfriado conservando las características requeridas.

Austenización: Proceso en el que se genera una distribución ordenada o controlada en los átomos hierro - carbono, tanto en la parte química, porcentaje en volumen y la dispersión exacta de los carburos.

Austenita: Proceso en el que se genera un ordenamiento diferente en los átomos hierro – carbono mediante una variación de temperatura que oscila entre 900 ° C a 1500 ° C, el resultado es una disolución sólida de carbono de hierro que alcanza un máximo de 2.1%, que es tenaz, blando y dúctil.

Carburación: Proceso de difusión termoquímica que se caracteriza por añadir carbono a las superficies del acero con bajo contenido de carbono.

Segunda ley de Fick: Es una ley cuantitativa para describir la forma en la que la difusión de materia provoca que varíe la concentración de carbono con el tiempo, en un estado estacionario.

Fatiga: Proceso degenerativo que produce daño, puede ser generado por cargas variables y cargas constantes.

Fricción: Fuerza de contacto entre dos superficies planas que impiden el deslizamiento entre sí, se provoca por las imperfecciones microscópicas en la superficie de contacto.

Desgaste: Erosión provocada en el material por la fricción de dos superficies, se desecha material de una sección producida por un accionamiento mecánico.

Fluencia: Es el límite donde el material puede recuperar su estado inicial o a su vez deformarse permanentemente.

PROBLEMA

1.1 Antecedentes

EL mantenimiento correctivo de maquinaria pesada como excavadoras, retroexcavadoras y cargadoras, se basa en la reparación de elementos y componentes que se encuentran parcialmente o completamente averiados, debido a que soportan cargas de levantamiento, desprendimiento de material minero, canteras pétreas, drenado de ríos y desbanques de terrenos para la construcción.

Los principales sistemas y componentes que conforman una máquina para el movimiento de suelo son: sistema hidráulico, sistema eléctrico, sistema de transmisión, sistema de frenos, dirección y el motor

El Taller de Mecánica Guachisaca (TMG) tiene una amplia experiencia en el mantenimiento de maquinaria pesada, establecido en la ciudad de Loja en 1998, desde entonces ha venido trabajando en el mantenimiento de maquinaria pesada como excavadoras, retroexcavadora, cargadoras y minicargadoras, en su experiencia ha trabajado con bujes alternos y bujes originales.

En el mantenimiento de maquinaria pesada los principales daños observados en el TMG son; el desgaste y/o la rotura del buje y pin, en ocasiones extremas las cavidades del buje en las articulaciones también presentan desgaste que debe ser corregido debido a las cargas, la fricción, tiempo de falla y presencia de partículas abrasivas por las condiciones de trabajo. Las cargas antes mencionadas oscilan entre 54.629 N para la pala cargadora y 32.378 N para el cucharón de la pluma de una retroexcavadora Caterpillar 416 F2.

1.2 Problema general

En la actualidad en el TMG se fabrican bujes con materia prima local, los cuales están enfocados para el mantenimiento de las articulaciones de los eslabones que conforman la pluma, el brazo, el cucharón y la pala, en el mercado se puede encontrar bujes alternos y bujes originales los cuales son de acero bonificado para las articulaciones de las máquinas comerciales como Caterpillar, John Deere, Komatsu y New Holland.

No obstante, en casos extremos los bujes se destruyen debido al prolongado tiempo de uso por desgaste en la cavidad que se aloja el buje, por tales motivos los repuestos originales o alternos pierden el ajuste alojándose con holguras excesivas, se ve la necesidad de personalizar los bujes y/o accesorios. Por este motivo el TMG fábrica bujes personalizados en acero DIN 20Mn V6 / EN 10294-1, el cual es sometido a un temple artesanal.

Por lo antes expuesto se plantea la siguiente interrogante como problema general:

- ¿Es posible diseñar un proceso de manufactura que permita fabricar bujes personalizados de acero tratados térmicamente para el mantenimiento correctivo de los eslabones de maquinaria pesada?

1.3 Problemas específicos

En el mercado existen alternativas de bujes de varias marcas, con costos elevados debido al tipo de tratamiento térmico, acabado superficial, tolerancias geométricas, mecanizado de los canales de lubricación y el acero utilizado tiene buenas propiedades mecánicas principalmente es resistente a los impactos. Por lo contrario, los alternos son más económicos, no cuentan con los canales de lubricación y el tratamiento térmico no satisface algunas propiedades mecánicas.

Los bujes personalizados que se fabrican en el TMG tienen en promedio una vida útil de 12 meses, debido que el proceso de fabricación no es el adecuado para garantizar la duración del buje y el costo/beneficio. En el mercado nacional existen bujes de acero alternos que tienen una duración aproximada de 8 a 12 meses y los bujes originales Caterpillar tienen una duración aproximada de 36 meses, cabe recalcar que el desgaste y el tiempo de duración de cada buje varía por las propiedades del acero, factores tribológicos, condiciones ambientales, mantenimiento y tipo de operación que realiza la maquinaria. Además, en relación con los precios de venta los bujes fabricados en el TMG son 50% más económico que los bujes originales Caterpillar. Los bujes alternos CTP son entre 30% y 45% más económicos que los fabricados en TMG.

Ante esta situación se vio la necesidad de diseñar un proceso de manufactura para fabricar bujes personalizados de las articulaciones de excavadora, retroexcavadoras y

cargadoras con aceros que se encuentran disponibles en el mercado ecuatoriano como; Acero SAE 4041 y DIN 20Mn V6 / EN 10294-1 (barra perforada) en el cual mediante este proceso se apliquen las bondades de los tratamientos térmicos a los aceros con conceptos tribológicos y superficie de contacto, para que sean capaces de soportar elevadas cargas y condiciones extremas de trabajo.

Es así, que para este trabajo se han establecido las siguientes incógnitas como problemas específicos:

- ¿A qué cargas está sometido el buje de acero de la pluma del cucharón de una retroexcavadora de 11 Toneladas?
- ¿Cuál es el acero y el tratamiento térmico más adecuado para obtener bujes de acero que cumpla con las sollicitaciones mecánicas a las que se exponen?
- ¿Cuáles son los parámetros del proceso de manufactura de bujes de acero sometido a un tratamiento térmico de una retroexcavadora de 11 Toneladas?
- ¿Es factible desde los aspectos técnico-económicos la implementación de una línea de fabricación de bujes personalizados para retroexcavadora de 11 Toneladas?

2 GRUPO OBJETIVO

Con la utilización del laboratorio de Tratamientos Térmicos, Metalografía y Ensayos destructivos, se pretende proporcionar información eficaz, confiable y estructurada que sirva como base para diseñar un proceso de manufactura para la fabricación de bujes personalizados para las articulaciones de excavadoras, retroexcavadoras y cargadoras.

Con la elaboración del proyecto se beneficiará a la empresa TMG, también el sector de maquinaria pesada de la ciudad de Loja, ya que se busca mejorar el proceso de manufactura para la fabricación los bujes personalizados de acero, además los propietarios de la maquinaria pesada también se beneficiarán debido a que el estudio estará enfocado a mejorar las propiedades mecánicas de los aceros para prolongar la vida útil de los bujes.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Diseñar un proceso de manufactura para el mantenimiento correctivo de los eslabones en las articulaciones de maquinaria pesada.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar las cargas a las que está sometido el buje de acero de la pluma del cucharón de una retroexcavadora de 11 Toneladas.
- Determinar el acero y el tratamiento térmico más adecuado para obtener bujes de acero que cumpla con las sollicitaciones mecánicas a las que se exponen.
- Determinar los parámetros del proceso de manufactura de bujes de acero sometido a un tratamiento térmico de una retroexcavadora de 11 Toneladas.
- Realizar un estudio técnico-económico para la implementación de una línea de fabricación de bujes personalizados para retroexcavadora de 11 Toneladas.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Cojinete de fricción.

Los cojinetes son elementos de sacrificio cuyo objetivo es aumentar la vida útil de una maquinaria soportando sollicitudes de carga y/o velocidades transmitidas desde un eje de rotación reduciendo así la fricción sobre los elementos de contacto prolongando la vida útil de los mismos [2].

Los cojinetes de fricción disponen una clasificación según el tipo de lubricación que disponga.

- *Clase I:* cojinete con lubricación permanente de una fuente externa. Son fabricados con materiales de fácil disipación de calor.
- *Clase II:* cojinete con una capa de lubricante abundante en la zona de contacto impidiendo así un contacto sólido - sólido.
- *Clase III:* consiste en rodamientos sin lubricación. Los materiales del cojinete son de baja fricción y en ocasiones consiste en materiales autolubricantes [2].

4.2 Desgaste.

El desgaste es la pérdida de material de dos cuerpos en contacto en movimiento relativo. Son varios factores que influyen en el desgaste, incluidas las propiedades del material, las condiciones ambientales y la geometría de los cuerpos en contacto. [3]

Existen diversas formas de desgaste en la industria y en nuestra vida diaria. Se pueden usar diferentes métodos para clasificar un proceso de desgaste. Por ejemplo, el desgaste se puede dividir como desgaste lubricado y desgaste no lubricado, severo y desgaste leve.

Sin embargo, todos los procesos de desgaste implican una combinación de mecanismos de desgaste que incluyen abrasión, adhesión, fatiga y oxidación u otras acciones triboquímicas. [4]

En la tabla 1, se indica los tipos de desgaste, así como las causa y los efectos de cada uno. [4]

Tabla 1. Tipos de desgaste.

Desgaste	Causa	Efecto
Abrasivo	Abrasión de tres cuerpos involucra partículas duras extrañas, entre dos superficies deslizantes.	Desgaste de las dos superficies o el desgaste de una superficie debido a la incrustación en una superficie más blanda.
	Abrasión de dos cuerpos involucra a las protuberancias de una superficie dura en el contacto de metal con metal.	Corte o rayado de la otra superficie que puede evolucionar a un desgaste de tres cuerpos.
Adhesivo	Microuniones por la soldadura entre las asperezas opuestas en las superficies de fricción.	Adherencia a la superficie dura debido al desgarre en la unión y la pérdida de material más blando.
Fatiga	Carga cíclica durante la fricción. La fatiga ocurre si la carga aplicada es mayor que la resistencia a la fatiga del material.	Las grietas comienzan en la superficie del material y se extienden a las regiones subsuperficiales que pueden conectarse entre sí dando como resultado la separación del material.
Corrosivo	Corrosión de las superficies en contacto.	Las asperezas en la superficie dura penetrarán a través de la capa delgada de óxido probando un contacto metal con metal y produciendo un desgaste por abrasión o adhesión
Erosivo	Impacto de partículas sólidas.	Perdida de material de la superficie por el impacto repetido de partículas sólidas.

4.3 Tribología.

El término Tribología se utilizó por primera vez en Inglaterra por P. Jost en el año 1966 este neologismo proviene de las palabras griegas “tribos”, que significa fricción, y “logos”, que significa estudio; la Tribología abarca los procesos de fricción, desgaste y lubricación de los cuerpos en contacto.

4.3.1 Tribotécnica.

Rama de la Tribología aplicada que se ocupa de los medios y procedimientos para el dominio técnico – económico de la fricción, lubricación y el desgaste en la proyección construcción y explotación de los sistemas mecánicos. Desde el punto de vista técnico la tribología estudia los problemas relacionados con materiales, diseño, construcción, lubricación, explotación, mantenimiento etc. de los sistemas tribológicos, surgiendo con ello:

- **El Tribodiseño:** Considera los aspectos de la fricción y el desgaste durante la proyección y el diseño de los elementos de los sistemas tribológicos.
- **Los Tribomateriales:** Se basa en el desarrollo de nuevos materiales antifricción y de elevada resistencia al desgaste, más baratos y de menos peso.[5]

4.4 Tipos de lubricación

Existen cinco formas de lubricación:

- Hidrodinámica
- Hidrostática
- Elastohidrodinámica
- Límite
- De película sólida

La lubricación hidrodinámica: Significa que las superficies se encuentran separadas por una película de lubricante relativamente gruesa, para prevenir el contacto de metal con metal y que la estabilidad que se obtiene pueda explicarse mediante las leyes de la mecánica de fluidos. La lubricación hidrodinámica no depende de la introducción del lubricante a presión, aunque puede ocurrir, sino de la existencia de un suministro adecuado todo el tiempo.[6]

La lubricación hidrostática: Se obtiene al introducir el lubricante, que a veces es aire o agua, en el área de soporte de carga a una presión suficientemente alta para separar las superficies con una película de lubricante gruesa. Por lo tanto, a diferencia de la lubricación hidrodinámica, esta no requiere movimiento de una superficie en relación con otra. Tal vez primero ocurra una lubricación hidrodinámica mezclada o de tipo límite a medida que las superficies se acercan, la lubricación de tipo límite predomina. La viscosidad del lubricante no tiene tanta importancia en la lubricación límite como en la composición química.[6]

La lubricación elastohidrodinámica: Es el fenómeno que ocurre cuando se introduce un lubricante entre las superficies en contacto rodante, como en los engranajes acoplados o en cojinetes de rodamiento.

4.5 Fricción.

La fricción puede definirse como la resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos que están en contacto. Normalmente, la fricción se representa mediante el denominado coeficiente de rozamiento μ y expresa la pérdida gradual de energía cinética, donde parte de esta energía se disipa en forma de calor y otra parte interviene en los procesos de deformación, dando lugar al desgaste de las superficies que están en contacto. Varios mecanismos actúan conjuntamente en la fricción predominando unos sobre otros dependiendo de las condiciones de deslizamiento.

4.6 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos son una combinación de operaciones de calentamiento, mantenimiento de la temperatura y enfriamiento por tiempos determinados, aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido para alterar su estructura o propiedades. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos en aceros incluyen la transformación de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.[7]

Es el proceso al que se somete a los aceros para poder mejorar sus propiedades mecánicas, en especial la dureza, la resistencia y la tenacidad. Lo que hacen es modificar la microestructura de los aceros sin variar su composición química.

4.6.1 Temple.

El temple se caracteriza por un enfriamiento rápido el cual se lo puede realizar mediante agua, aceite o aire. El tratamiento térmico de tipo martensítico conocido como temple aumenta la dureza, pero se disminuye la tenacidad y alargamiento unitario, como se muestra en la figura 1. El procedimiento del temple a seguir son el calentamiento, permanencia o mantenimiento y enfriamiento rápido.

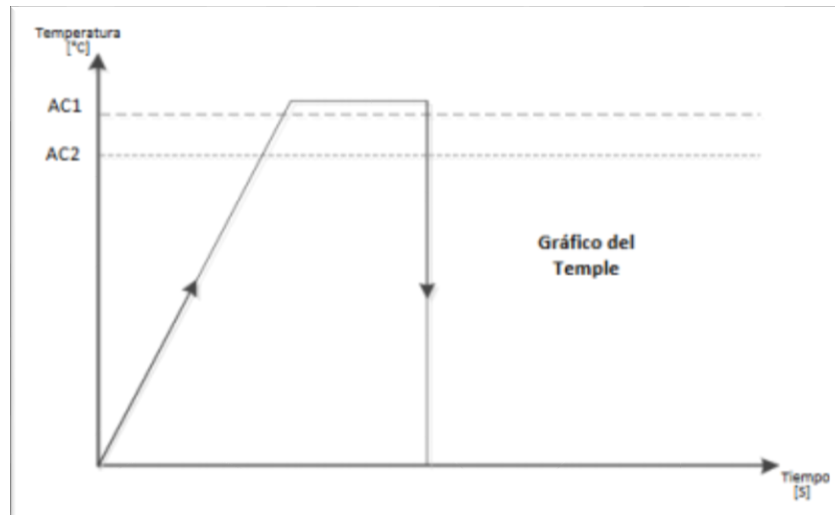


Figura 1. Diagrama de Tiempo vs Temperatura del Temple[8]

Muchos aceros al carbono y de baja aleación, contienen menos de 0.83% de C y como consecuencia, la microestructura es una mezcla de dos componentes: el hierro α (ferrita) y la perlita (que no es sino una estructura eutectoide ordenada de ferrita y Fe_3C). A concentraciones de carbono por debajo de 0.83% y temperaturas menores a las del eutectoide (aproximadamente $723\text{ }^{\circ}C$), los componentes son ferrita y perlita. A concentraciones arriba de 0.83%, los componentes por debajo de los $723\text{ }^{\circ}C$ son perlita y cementita (Fe_3C).

Si un acero que contiene una concentración de carbono menor que la eutectoide es calentado a una temperatura arriba de la temperatura eutectoide, la perlita se descompone para producir una mezcla de dos fases, ferrita y austenita.

Si el calentamiento se continúa a altas temperaturas, la ferrita progresivamente se transforma para formar más austenita. A una temperatura lo suficientemente alta, la ferrita es completamente transformada para producir una microestructura homogénea austenítica; este proceso térmico es llamado tratamiento de solución o austenitización.

4.6.2 Cementación.

Es un tratamiento térmico superficial que trata de calentar la pieza de acero de bajo carbono a unas temperaturas que oscilan entre 900-950 °C bajo la presencia de una atmósfera carburante que está conformada por dióxido de carbono y monóxido de carbono con el fin de generar carbono en la superficie de la aleación, el mismo que ingresa por difusión en el acero. Tras la penetración de 1 mm o más milímetros se procede a templar la probeta. [6]

Los aceros a ser cementados poseen un porcentaje bajo de carbono (0,15% – 0,23%), por medio de un proceso de cementación la dureza en el material puede aumentar hasta valores aproximados a 62-63HRC si el porcentaje de carbono aumenta en 0,90% en la parte superficial. La difusión del carbono es mayor si la diferencia de concentración y la temperatura son altas, por este motivo la cementación se realiza a temperaturas superiores a los 900 °C. [16]

4.6.3 Cementación sólida

Los aceros que mejor responden a la cementación son aquellos que poseen un bajo contenido de carbono y conservan tenacidad en su núcleo. La cementación para los aceros al carbono se la realiza a temperaturas entre 900 ° C y 950 ° C, el tratamiento de temple se lo efectúa a temperaturas de entre 875 ° C y 925 ° C en agua o aceite, el siguiente tratamiento de temple se lo realiza a temperaturas de entre 925°C y 775°C en agua, y el tratamiento de revenido se realiza a una temperatura que no debe sobrepasar los 200 ° C. [16]

La cementación es un tratamiento termoquímico austenítico que es usado en los aceros de bajo carbono, es decir con un contenido menor de 0,25%, el mismo que no ha sido templado previamente con el objetivo de incrementar el contenido de carbono a porcentajes superiores al 0,8% en la capa superficial del acero. El material en cuestión se austeniza en una atmósfera rica en carbono, que es difundido hacia el interior de la pieza, permitiendo a la austenita disolver altos porcentajes de este. Para conseguirlo se debe someter al carbono en su forma básica a altas temperaturas 900 ° C - 950 ° C, con esto se produce la difusión de los átomos de carbono dentro del material de la pieza.

Su aplicación está basada en la combustión y disociación de un cementante en estado sólido en una atmosfera con pequeños porcentajes de oxígeno, con el fin de generar una buena cantidad de monóxido de carbono, el CO es un gas reactivo que tiene la capacidad de descomponerse en carbono y en dióxido de carbono, esta última reacción es la que rige el proceso de cementación.

4.6.4 Nitruración.

La nitruración es un proceso termoquímico que tiene la finalidad de endurecer la superficie del acero, mediante la difusión de nitrógeno atómico. A diferencia de la cementación, la nitruración se la realiza en aceros con estructura ferrítica, mediante el calentamiento a temperaturas de 500 °C a 560 °C. Para realizar este proceso las piezas o probetas deben ser sometidas a un tratamiento de temple, posteriormente un tratamiento de revenido a temperatura entre 500 °C y 700 °C, la cual debe ser superior a la temperatura de aplicación para el proceso de nitruración. [9]

Entre las técnicas que permite modificar la zona superficial de los materiales y, por tanto, su comportamiento en aquellas condiciones de servicio donde sean prioritarias las propiedades superficiales.

La dureza aumenta mediante nitruración. La nitruración superficial clásica o conversión de la superficie del hierro y de los elementos del acero en nitruro, en atmosferas de amoníaco (NH_3) disociado o en baño de sales, tiene también por finalidad mejorar las propiedades de fricción y de resistencia a la abrasión, a la fatiga y a la corrosión. La temperatura del tratamiento oscila normalmente entre 450 y 580 °C, y el proceso puede clasificarse en: nitruración líquida, gaseosa o iónica según que el medio de tratamiento sea un baño de sales fundidas formado por cianuros (CN^-) y cianatos (CON^-) puede incorporar al acero carbono con preferencia al nitrógeno en ciertas condiciones de temperatura y producir carburos de hierro en la zona superficial. [10]

4.6.5 Aceros para Nitruración.

Para realizar el proceso de nitruración se debe realizar una selección porque no todos los aceros pueden ser usados para ello, en algunas ocasiones este tratamiento puede resultar perjudicial, como ocurre con aceros al carbono, en los mismos que el nitrógeno ingresa a una velocidad muy elevada y produciendo que la capa nitrurada tienda a

desprenderse. Para la nitruración resulta conveniente que el acero este compuesto con una cierta cantidad de aluminio cercana al 1%. “Este tratamiento puede ser utilizado con aceros al cromo níquel, ciertas fundiciones con aluminio o al cromo y con los aceros inoxidables”. A continuación, se presenta algunos aceros utilizados en la nitruración:

- Acero para nitruración al Cr-Mo-V de alta resistencia, como el acero RLM VCMo 230.
- Acero para nitruración al Cr-Mo-V de media resistencia, como el acero RLM VCMo 135
- Acero para nitruración al Cr-Al-Mo de alta dureza, son parte de la familia de aceros aleados 41XX, un acero que es ejemplo de esta familia es el acero SAE 4130

En la Tabla 2 se indica la influencia de los principales elementos de aleación en los aceros.

Tabla 2. Influencia en los elementos de aleación.

Elemento	Influencia
El molibdeno	Aumenta la dureza de la capa exterior. Mejora la tenacidad del núcleo.
El aluminio	Incrementa la resistencia a la formación de cascarilla, la resistencia a la corrosión y la sensibilidad al envejecimiento.
El cromo	Incrementa la resistencia a la corrosión. Incrementa la resistencia a la fatiga, la resistencia al desgaste Incrementa la capa dura y la influencia de aluminio y del molibdeno.
El nitrógeno	Incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia mecánica en caliente, la resistencia al desgaste, la fragilidad.
El vanadio	Incremento de la resistencia y la tenacidad. Incrementa la profundidad de nitruración y el espesor de las capas duras.

5 MARCO METODOLÓGICO

Para el análisis de los parámetros antes mencionados, la investigación que se va a realizar es de tipo experimental, mediante la caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros, el diseño de un tratamiento térmico y finalmente se realizara una comparación de resultados obtenidos. El análisis se hará en 4 etapas

Etapa 1

En esta etapa se ejecuta un estudio descriptivo de las cargas a las que se encuentra expuesto el buje, la caracterización los aceros y de los tratamientos térmicos disponibles para fabricar bujes.

Etapa 2

En esta etapa se lleva a cabo estudios exploratorios y experimentales mediante los cuales se diseña el proceso de manufactura para obtener bujes de acero sometidos a un tratamiento térmico.

Etapa 3

En esta etapa se efectúa un estudio correlacional en el que presenta un análisis de los resultados experimentales entre los bujes obtenidos mediante el proceso de manufactura previamente establecido, los bujes originales y los bujes alternos.

Etapa 4

En la etapa final se procede un análisis e interpretación de la información en base los resultados obtenidos y a la revisión bibliográfica considerando las características y propiedades relacionadas con un tratamiento térmico.

5.1 Hipótesis general.

- ¿Es posible determinar diseñar un proceso de manufactura para el mantenimiento correctivo de los eslabones articulados de maquinaria pesada?

5.2 Hipótesis específicas.

- ¿Es posible determinar las cargas a las que está sometido el buje de acero de la pluma del cucharón de una retroexcavadora de 11 Toneladas?
- ¿Es posible determinar el acero y el tratamiento térmico más adecuado para obtener bujes de acero que cumpla con las sollicitaciones mecánicas a las que se exponen?
- ¿Es posible determinar los parámetros del proceso de manufactura de bujes de acero sometido a un tratamiento térmico de una retroexcavadora de 11 Toneladas?
- ¿Es posible realizar un estudio técnico-económico para la implementación de una línea de fabricación de bujes personalizados para retroexcavadora de 11 Toneladas?

5.3 Cargas en los bujes

5.3.1 Identificación de cargas en el punto A del brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.

A continuación, en la Figura 2, se muestra el brazo una retroexcavadora cargadora CAT-416 F2 un punto de trabajo estático y la ubicación de los eslabones, es accionado hidráulicamente, su aplicación es para minería, remoción de material pétreo, construcción, etc.

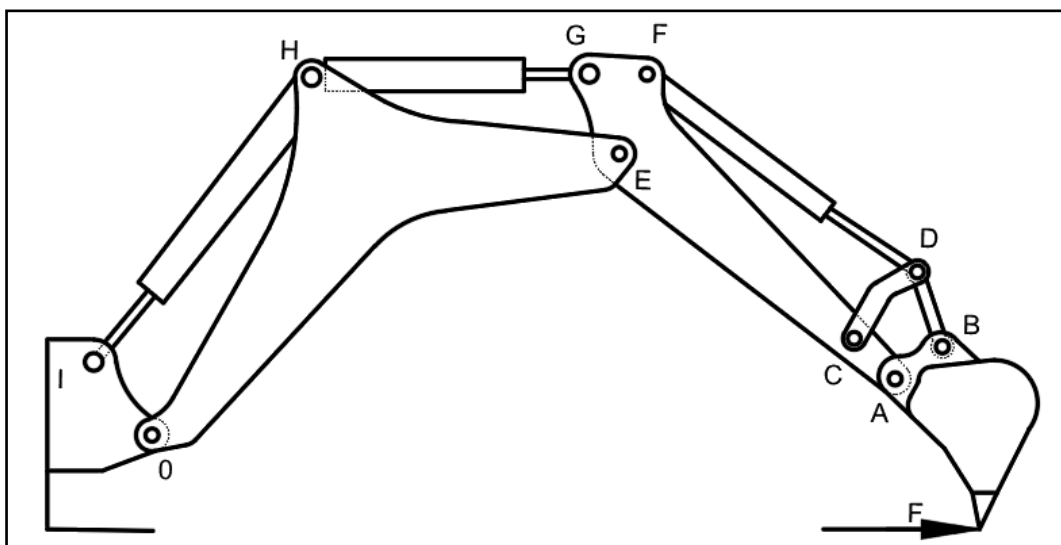


Figura 2. Ubicación de los puntos y eslabones del brazo retroexcavadora cargadora CAT-416 F2

5.3.1.1 Descripción de los puntos:

En la Tabla 3, se indica los puntos de análisis y su descripción del brazo de la retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.

Tabla 3. Puntos de análisis del brazo retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.

Puntos	Descripción
O	Punto de unión entre la base de giro y la pluma, es el centro de referencias del mecanismo (bancada).
G	Punto de agarre del cilindro hidráulico de levante del brazo.
I	Punto de agarre del cilindro hidráulico de levante de la pluma.
H	Punto de agarre de cilindro hidráulico de levante del brazo y pluma
F	Punto de agarre de cilindro hidráulico de levante del cucharón.
E	Punto de agarre del brazo y la pluma.
A-B-C-D	Puntos del sistema mecánico de cuatro barras, mecanismos que accionan el cucharón.

En la Figura 3, se muestra el diagrama de cuerpo libre del brazo de la retroexcavadora cargadora CAT-416 F2, para identificar sistemas mecánicos, identificando un mecanismo de 4 barras en los puntos A, B, C y D, el cual sujeta el cucharón, donde centraremos el estudio.

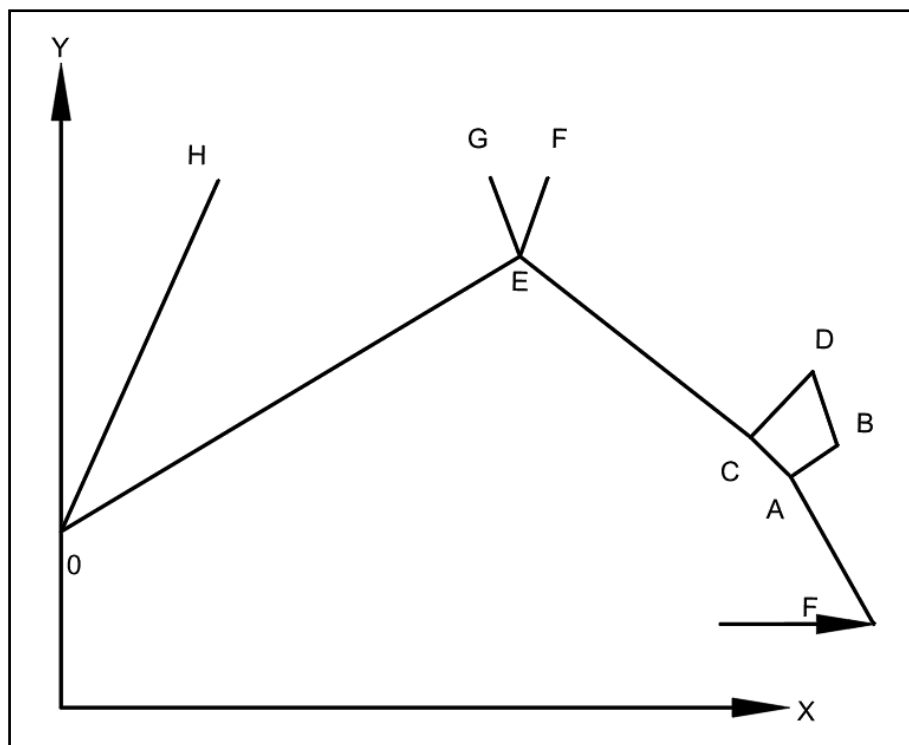


Figura 3. D.C.L. del brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.

5.3.1.2 Análisis de movilidad cinemática del brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2.

Seguido en la Figura 4, se muestra el diagrama cinemático del brazo de retroexcavadora CAT-416 F2, permitiendo identificar detalladamente componentes que generan el movimiento del sistema excavador.

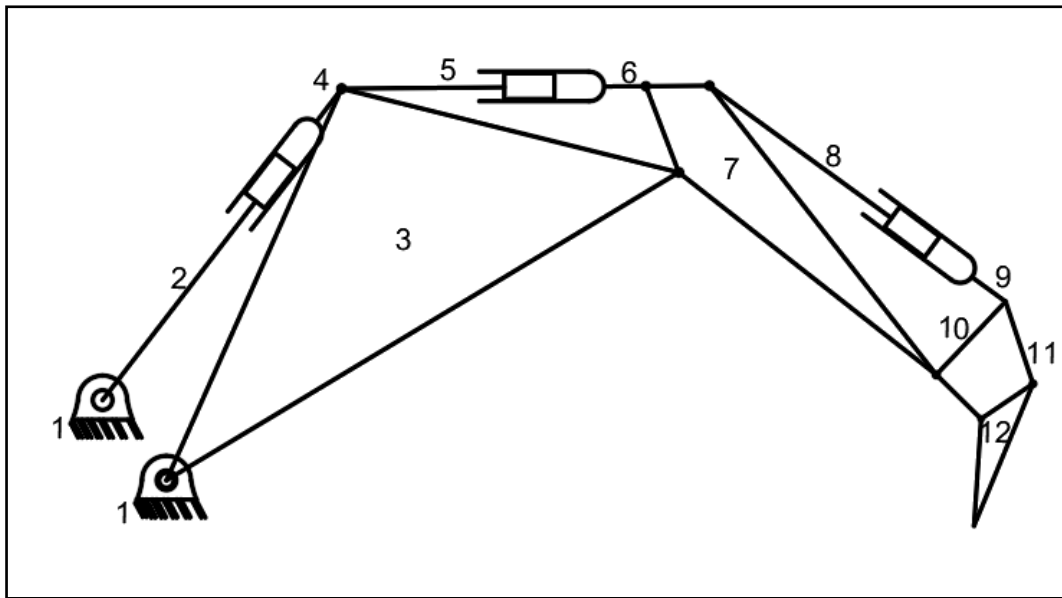


Figura 4. Diagrama de cinemático del brazo excavador.

Descripción:

1. Bancada.
2. Balancín.
3. Balancín (eslabón ternario).
4. Collarín (brazo hidráulico).
5. Biela.
6. Collarín (brazo hidráulico).
7. Biela (Eslabón cuaternario).
8. Biela.
9. Collarín (brazo hidráulico)
10. Biela (eslabón binario-mecanismo 4 barras).
11. Biela (eslabón binario-mecanismo 4 barras).
12. Biela (cucharón).

A continuación en la Figura 5, se muestra el diagrama cinemático, dónde obtendremos la cantidad de collarines necesarios para generar el movimiento desde la bancada hasta el cucharón excavador, evitando pérdidas de fuerza.

R = revoluta (1 GDL - movimiento rotatorio)

P = prismático (1 GDL - movimiento traslación)

J1 = Número de pares Superiores.

J2 = Número de pares Inferiores.

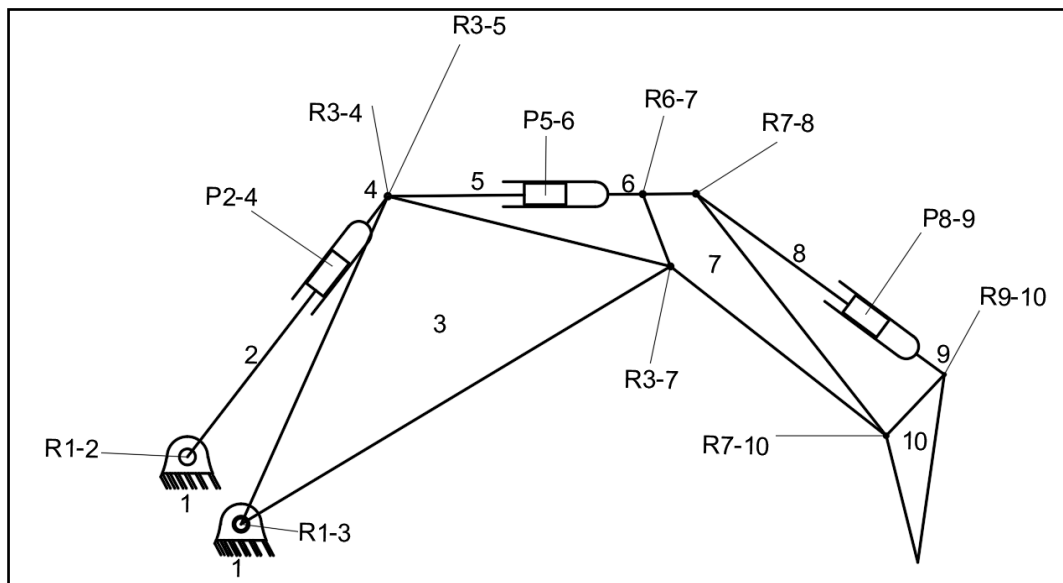


Figura 5. Diagrama de cinemático del brazo excavador.

Datos:

$$n = 10$$

$$J1 = 12 (R = 9 \text{ revolutas} : P = 3 \text{ prismáticos.})$$

$$J2 = 0$$

Movilidad (m):

$$m = 3(n - 1) - (2 * J1) - J2$$

$$m = 3$$

Necesita tres sistemas hidráulicos para lograr la movilidad del cucharón.

5.3.1.3 Cálculo fuerzas en los eslabones del mecanismo de cuatro barras del brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2

En la Figura 6, se muestra el brazo de retroexcavadora cargadora CAT-416 F2 en un frente de trabajo estático de 180° (pluma y cucharón) en un plano 2D considerando el

mayor esfuerzo de iniciación, para calcular las fuerzas de los eslabones A, B, C, D. Obtenidas las fuerzas procede el cálculo de esfuerzos en el Punto A.

Una fuerza de excavación aplicada en las uñas del cucharón es de 8 kN a 10 kN, depende del medio de trabajo, la fuerza máxima de los cilindros hidráulicos es de 32.8 kN cada uno (especificación de catálogo, Ver ANEXO 1).

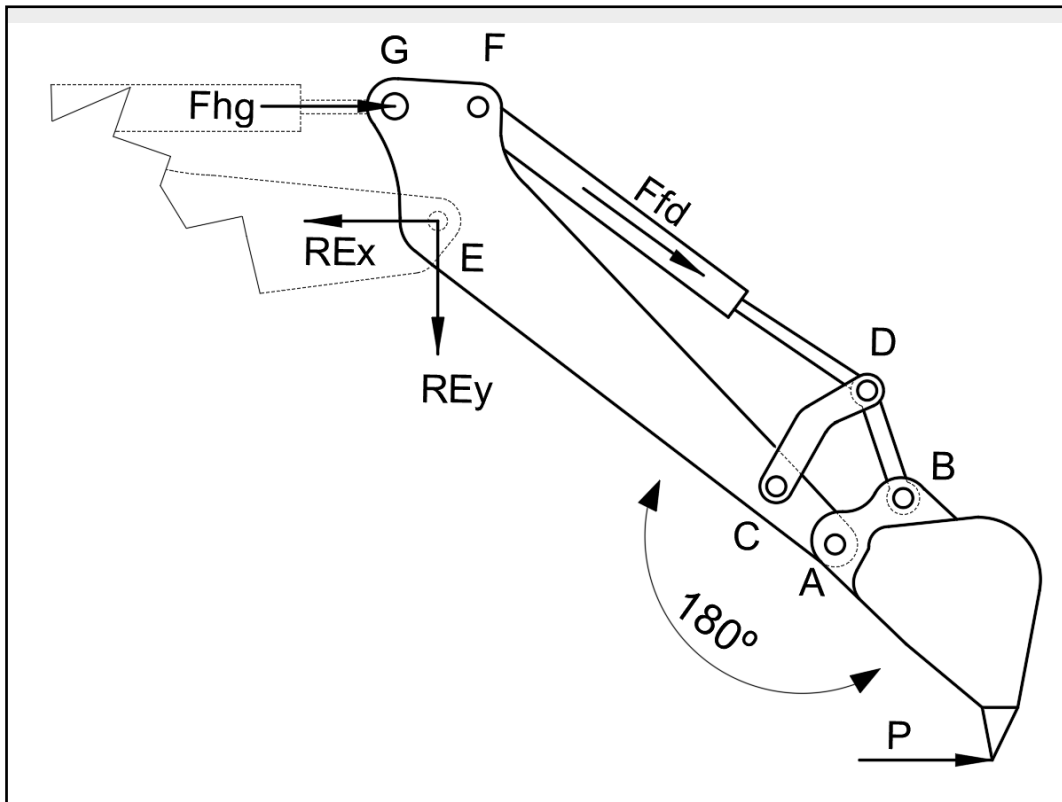


Figura 6. Brazo de retroexcavadora en un frente de trabajo estático con un ángulo de 180° (pluma y cucharón).

En la Tabla 4, se muestra los datos para el cálculo de las fuerzas, para la toma de las magnitudes entre eslabones se obtiene mediante mediciones con la maquinaria apagada, utilizando cintra métrica y un nivel láser en un plano estático.

Tabla 4. Datos de excavación (Autor).

P	<i>fuerza de excavación (10 kN).</i>
Ffd	<i>Fuerza máxima aplicada al sistema (32 kN).</i>

A continuación en la Figura 7, se muestra un esquema acotado en centímetros (cm) donde se observa fuerzas y distancias entre eslabones del brazo excavador, para el cálculo de fuerzas en el punto A.

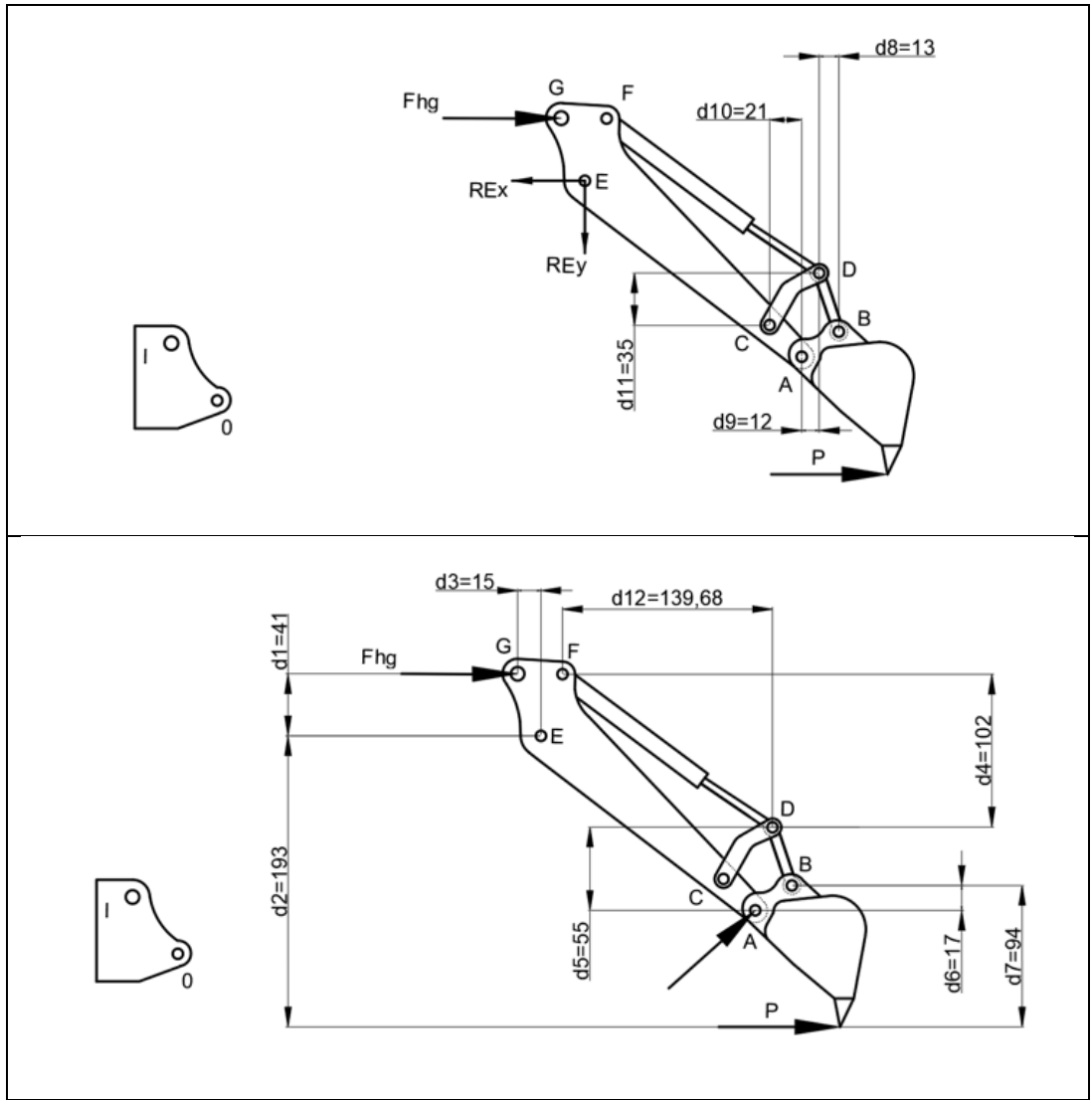


Figura 7. Distancia en tiempo real entre eslabones del brazo excavador.

En la Tabla 5, se muestra las distancias acotado en metros (m) entre eslabones que conforma el segmento de estudio seleccionado del brazo hidráulico de una retroexcavadora.

Tabla 5. Distancia acotada en m, entre eslabones del brazo excavador (m).

d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12	P	Fhg
0.41	1.93	0.15	1.02	0.55	0.17	0.94	0.13	0.12	0.21	0.35	1.39	10kN	32kN

En la Figura 8, se muestra un diagrama de convergencia acotado en centímetros (cm) donde se inicia calculando los ángulos que forman las reacciones RE y RA con respecto al punto fijo O.

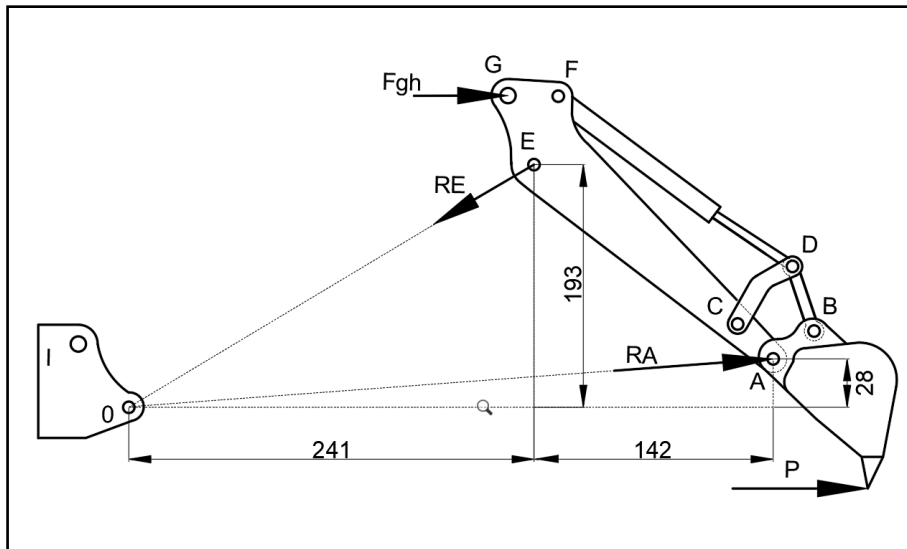


Figura 8. Diagrama de convergencia de las reacciones (RE-RA) en el punto O.

En la Tabla 6, se muestra ángulos calculados que actúan en los puntos E y A. Que permiten calcular las reacciones.

Tabla 6. Ángulos de convergencia de las reacciones RE y RA.

$$\alpha = 4.1^\circ$$

$$\beta = 51.5^\circ$$

5.3.1.4 Cálculo de reacciones (RE y RA)

En la Figura 9, se muestra un diagrama acotado en centímetros (cm) donde se sitúa la bancada y brazo excavador, para analizar sumatoria de momentos en el punto E, esto permite calcular la resistencia RA necesaria para el análisis en el punto A.

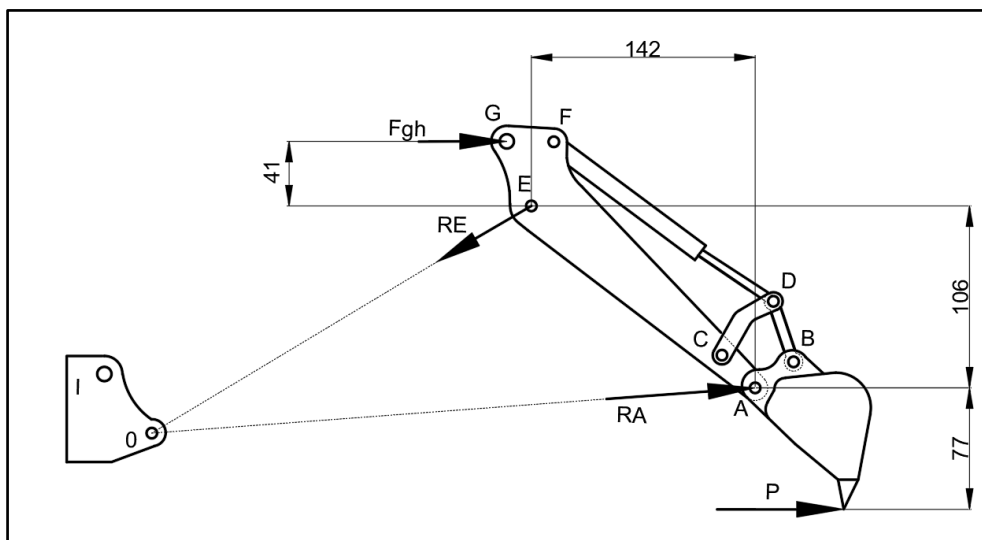


Figura 9. Diagrama para sumatoria de momentos en el punto E.

Datos:

$$\alpha = 4^\circ$$

$$\beta = 51^\circ$$

$$P = 10 \text{ kN}$$

$$\sum M_E = 0 \tag{1}$$

$$RA = 4 \text{ KN}$$

$$\sum F_x = 0 \tag{2}$$

$$RE = 41 \text{ KN}$$

En la Tabla 7, se muestra las reacciones encontradas. Para el análisis en el punto A donde se localiza el buje de estudio.

Tabla 7. RE y RA, que actúan en un frente de trabajo estático.

RA	4 kN
RE	41 kN

5.3.1.5 Cálculo de fuerzas sobre los eslabones del mecanismo de 4 barras.

En la Figura 10, se muestra el D.C.L. del sistema de cuatro barras que sujeta el cucharón donde se realizará el estudio de fuerzas para identificar la cantidad de esfuerzo recibe el punto A.

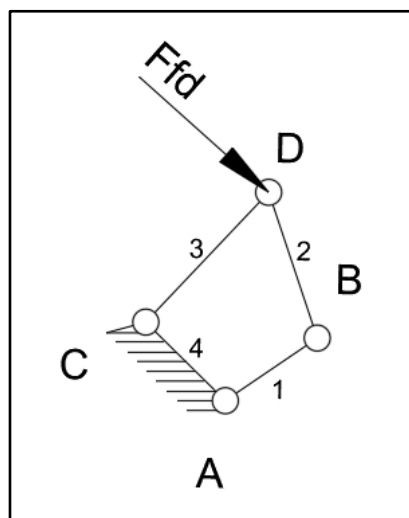


Figura 10. D.C.L. del sistema de cuatro barras que sujeta el cucharón.

Los eslabones del mecanismo de cuatro barras forman algunos ángulos, a continuación, se calculan. En la Figura 11, se muestra un esquema acotado en centímetros (cm) y el ángulo inicial Lambda (λ) se forma por la fuerza del cilindro hidráulico (Ffd) y la vertical (eje Y).

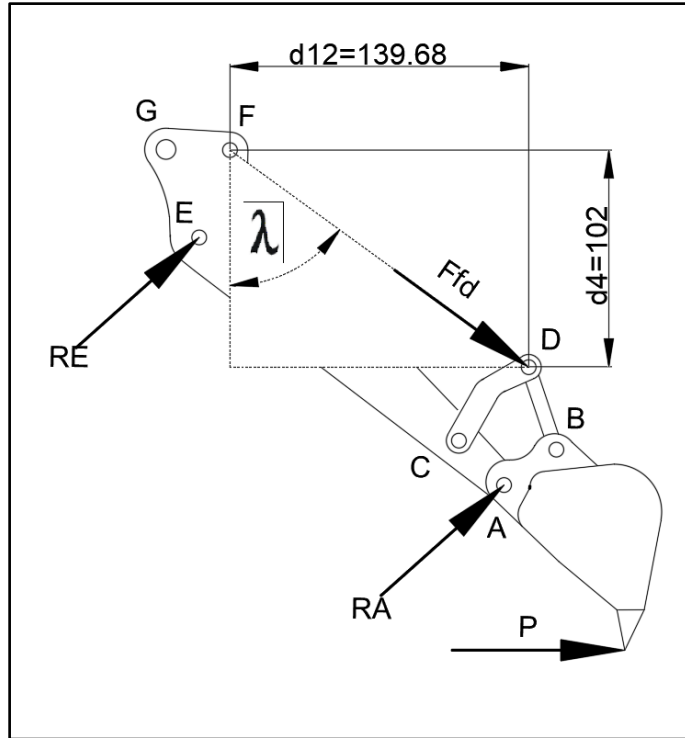


Figura 11. Ángulo Lambda que forma el cilindro hidráulico con la vertical.

Aplicando fundamentos de trigonometría se calcula el ángulo que forma la fuerza F_{fd} aplicada al punto D. En resumen, los ángulos siguientes de los eslabones DB, DC, BA y CA, se lleva a cabo mediante el mismo procedimiento trigonométrico anterior de eslabón FD. En la Tabla 8, se muestran los ángulos calculados de las fuerzas que actúan en cada eslabón respectivamente.

Tabla 8. Ángulos calculados, formados por los eslabones de mecanismo de 4 barras

Fuerza	Eslabón	Ángulo	Magnitud	Eje de referencia
F_{fd}	FD	λ	53.7°	Vertical
F_{db}	DB	γ	18.8°	Vertical
F_{dc}	DC	θ	46.6°	Horizontal
F_{ba}	BA	δ	34.2°	Horizontal
F_{ca}	CA	ε	26.5°	Vertical

5.3.1.6 Cálculo de fuerzas ejercidas en los eslabones DB, DC, CA, BA.

Una vez encontrados los ángulos de los eslabones FD, DB, DC, BA y CA, calculamos las fuerzas que actúan en cada eslabón respectivamente. En la Figura 12, se muestra el brazo excavador con todas las fuerzas representadas, para iniciar el análisis, utilizamos la fuerza (F_{db}) que actúa sobre el punto B.

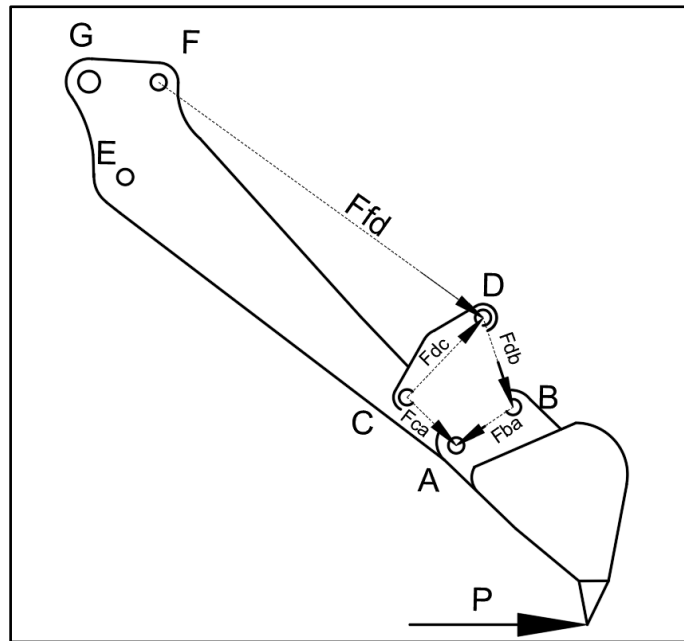


Figura 12. D.C.L de fuerzas que actúan en los eslabones del mecanismo de cuatro barras.

En la Tabla 9, se muestra los datos empleados para la sumatoria de momentos en el punto A, para hallar la primera fuerza (F_{db}) que actúa sobre el punto B del mecanismo de cuatro barras.

Tabla 9. Datos para el cálculo de la fuerza F_{db} .

P	$d6 - d7$	Ffd	λ	$d5$	$d9$	γ°	$d8 + d9$	$d6$
10 kN	0.77 m	32 kN	53.7°	0.55 m	0.12 m	18.8°	0.25 m	0.17 m

$$\sum M_A = 0 \quad (3)$$

$$Ffd * (-(d9 * \cos \lambda) - (d5 * \sin \lambda)) + Fdb * (-(d5) * \cos \gamma) - (d8 + d9 * \sin \gamma) + P * (d6 - d7) = 0$$

$$Fdb = \frac{Ffd * ((d9 * \cos \lambda) + (d5 * \sin \lambda)) - P * (d6 - d7)}{-(d6) * \cos \gamma - (d8 + d9 * \sin \gamma)} = -36.45 \text{ kN}$$

Fuerza en compresión en el punto B.

El mismo procedimiento por sumatoria de momentos y fuerzas permite encontrar las fuerzas restantes en los puntos del mecanismo de cuatro barras, hasta llegar al punto A. En la Tabla 10, se muestra las fuerzas calculadas en los eslabones.

Tabla 10. Datos de fuerzas calculadas en los eslabones del mecanismo de cuatro barras.

PUNTOS	FUERZA	MAGNITUD (kN)	ESTADO	ÁNGULO
D	Ffd	32.0	Tensión	$\lambda = 53.7^\circ$
C	Fdc	31.0	Tensión	$\theta = 46.6^\circ$
B	Fdb	36.5	Compresión	$\gamma = 18.8^\circ$
A	Fca	37.1	Compresión	$\varepsilon = 26.5^\circ$
	RA	4	Tensión	$\alpha = 4.1^\circ$
	Fba	22.7	Compresión	$\delta = 34.2^\circ$

5.3.1.7 Cálculo de esfuerzos normal, cortantes y de aplastamiento en el buje del punto A.

En la Tabla 11, se muestra los datos para encontrar el área considerada con mayor esfuerzo, para un análisis de esfuerzos en el buje del punto A.

Tabla 11. Datos para el cálculo del área sometida a esfuerzo.

P [kN]	Φ_{int-b} [mm]	Φ_{ext-b} [mm]	L_b [mm]
59.8	50.2	63	45

A continuación, en la Figura 13, se muestra el esquema acotado en milímetros, de pin, buje de pluma y buje de cucharón en el punto A, para hallar los esfuerzos correspondientes.

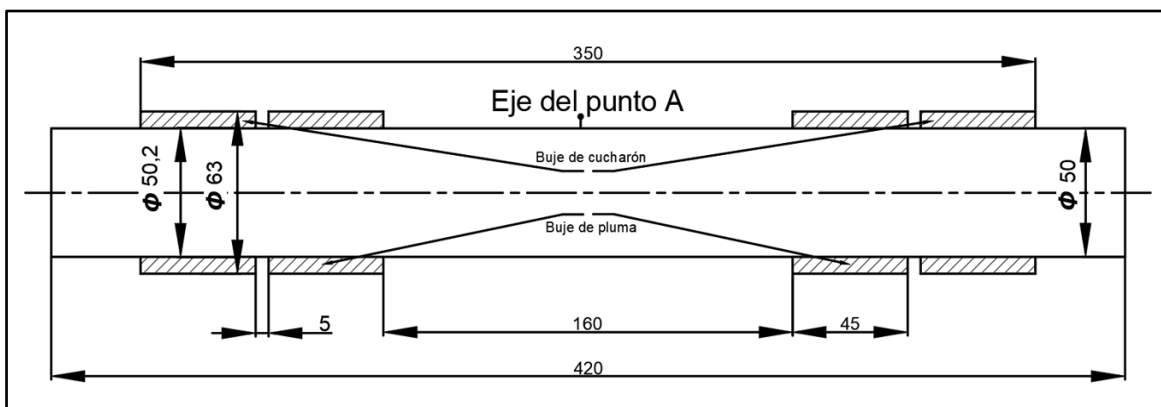


Figura 13. Subconjunto de pin y buje en el punto A, que conecta el brazo y el cucharón.

5.3.1.8 Esfuerzo normal para el buje A.

$$\sigma = \frac{P}{A_T} \quad (4)$$

$$\sigma = 352.5 \text{ MPa}$$

5.3.1.9 Esfuerzo Cortante doble en la conexión del cucharón y pluma en el buje A.

En la Figura 14, se muestra el esquema para un análisis de cortante doble en el pin del punto A, donde el cual conectado la pluma y cucharón.

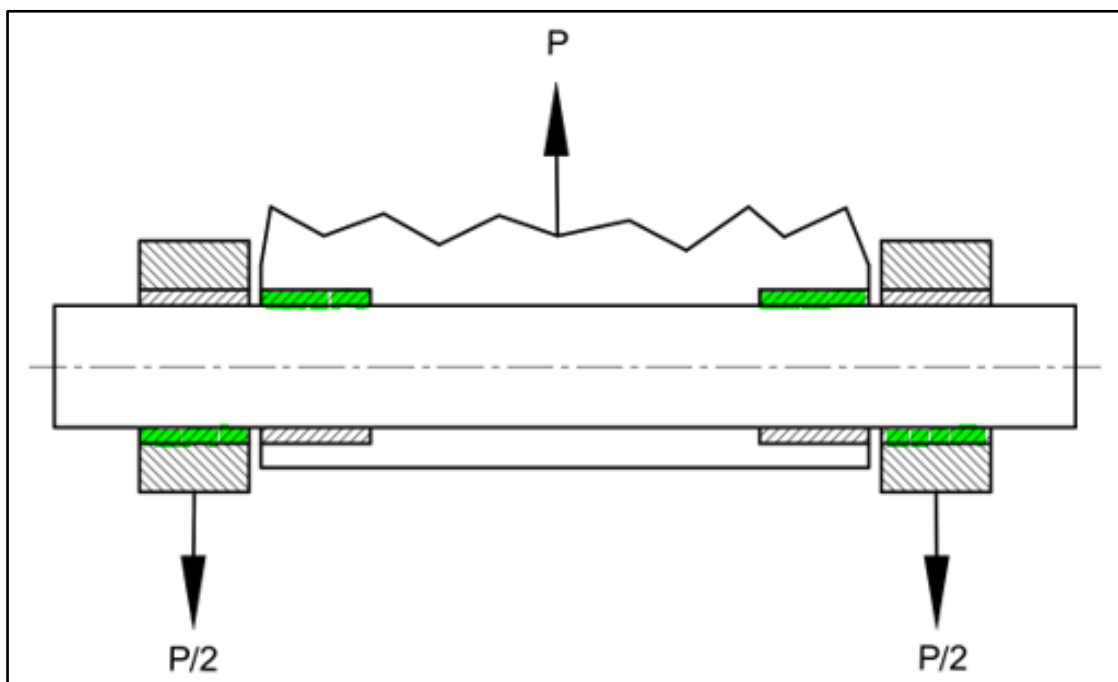


Figura 14. D.C.L. para representar un esfuerzo cortante doble sobre el buje del punto A.

Hallamos el esfuerzo cortante doble ocasionado en la ménsula del cucharón en el pin del punto A.

$$\tau_{prom} = \frac{P}{2A} \quad (5)$$

$$\tau_{prom} = 879.4 \text{ MPa}$$

5.3.1.10 Esfuerzo de apoyo en el buje A.

En la Figura 15, se muestra un segmento acotado de pin y bujes en el punto A, para el cálculo de cargas de aplastamiento en el buje de la pluma y cucharón.

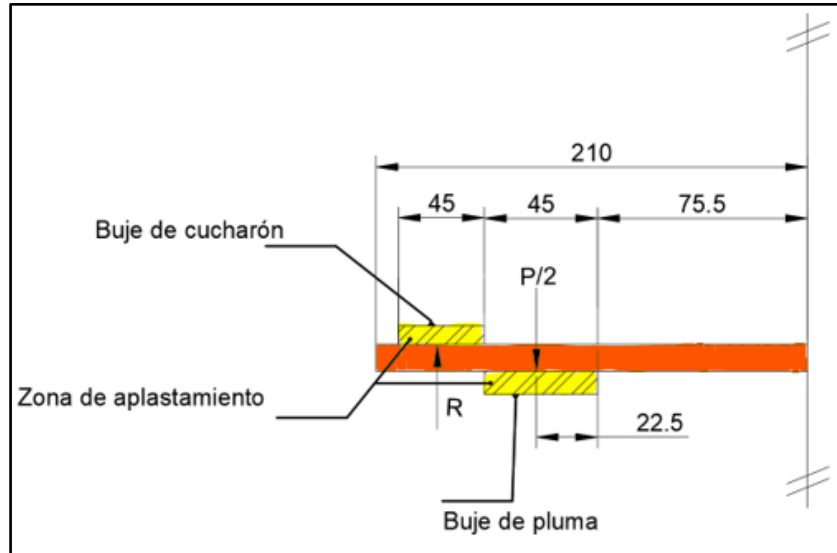


Figura 15. D.C.L. Cargas de aplastamiento, buje de la pluma y buje cucharón.

En la Figura 16, se muestra la zona sometida a aplastamiento, está cavidad se encuentra punto A, tanto en la pluma y cucharón, donde se alojan los bujes que con mayor desgaste.

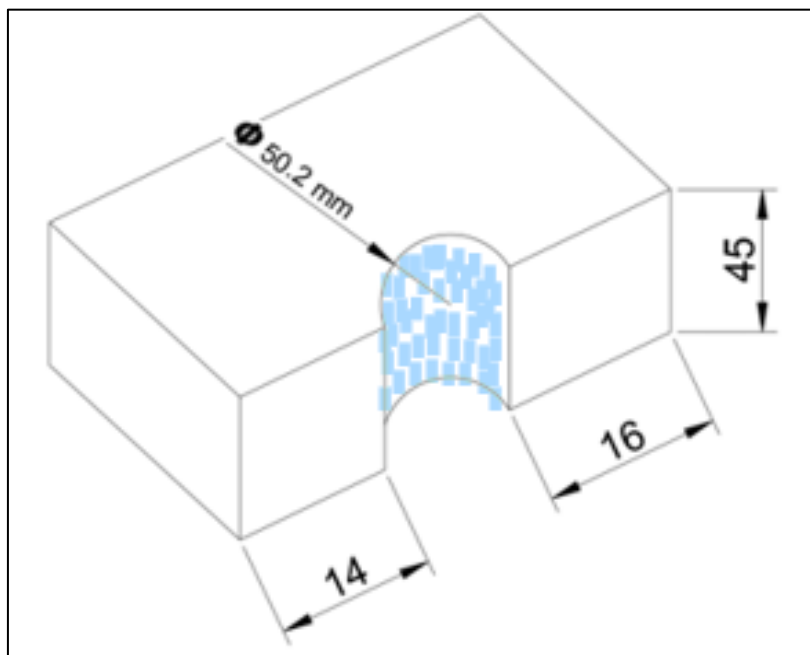


Figura 16. Superficie de la pluma sometida a esfuerzo de apoyo.

Hallamos el esfuerzo de aplastamiento.

$$\sigma_b = \frac{P}{A_T} \quad (6)$$

$$\sigma_b = 467.2 \text{ MPa}$$

5.3.1.11 Esfuerzo Efectivo o Von Mises generado en el buje del punto A.

Calculamos la equivalencia de la combinación de esfuerzos multiaxiales sobre materiales dúctiles.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} * ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad (7)$$

$$\sigma_{eq} = 460.6 \text{ MPa}$$

Las fuerzas y esfuerzos que se soportan los bujes ubicados en el punto A, mismos que componen un sistema de cuatro barras se indican en la Tabla 12.

Tabla 12. Resumen de fuerzas y esfuerzos que actúan sobre los bujes del punto A.

Descripción	Cargas [kN]	Esfuerzos [MPa]
Fuerza Fba, del eslabón BA que actúa en el punto A	22.7	
Fuerza Fca, del eslabón CA que actúa en el punto A	37.1	
Esfuerzo normal en el eje del punto A		352.5
Esfuerzo cortante doble en el eje del punto A		879.4
Esfuerzo de aplastamiento, en el punto A		467.2
Esfuerzo Von Mises en el eje del punto A		460.6

5.3.1.12 Análisis mediante software CAE.

Para validar los cálculos analíticos de los esfuerzos encontrados en el buje A, se procedió a realizar un análisis estático de esfuerzos por elementos finitos en un punto único aplicando un software especializado, considerando las restricciones, fuerzas aplicadas en el buje A, el momento donde se generan los mayores esfuerzos y tensiones. En la Figura 17, se muestra el posicionamiento y ubicación de las cargas que vamos a simular.

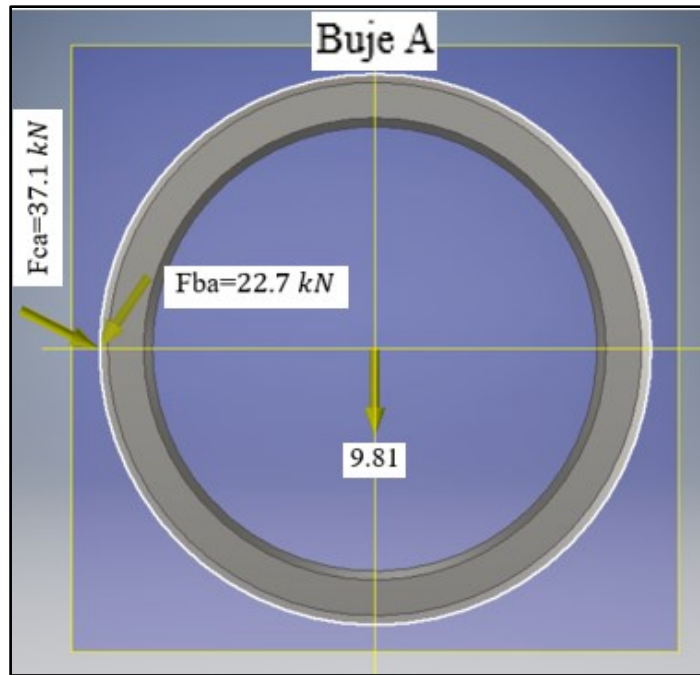


Figura 17. Buje A, Simulado y posicionamiento de fuerzas.

El material por defecto utilizado de la biblioteca del software es Steel, Carbón, un acero Isotrópico con un módulo de Young (200 GPa), módulo cortante (79 GPa), esfuerzo de fluencia (350 MPa) y un esfuerzo de tensión (420 MPa), utilizamos dos restricciones fijas para simular las condiciones del buje sobre la cavidad de la pluma, la malla aplicada es tetraédrica refinada, se ubica con un ángulo de giro de 60° y el tamaño medio del elemento es de 0.1 m y el tamaño mínimo del elemento es de 0.1 m , para mejor precisión.

En la Figura 18, se muestra: **A.** Condiciones iniciales, con dos restricciones fijas para simular una cavidad y carga distribuida para que la presión de la carga se ejerza en toda la superficie de la curva del buje. **B.** Tipo de mallado refinado, permite eliminar las tensiones al dividir el buje en triángulos pequeños para una mejor precisión. **C.** Esfuerzo efectivo o Von Mises, es un esfuerzo de tensión, sirve para poder construir diagramas de esfuerzo – deformación, es aplicado en elementos dúctiles. **D.** Esfuerzo de compresión máximo (1st Principal Stress), todo en el buje del punto A respectivamente.

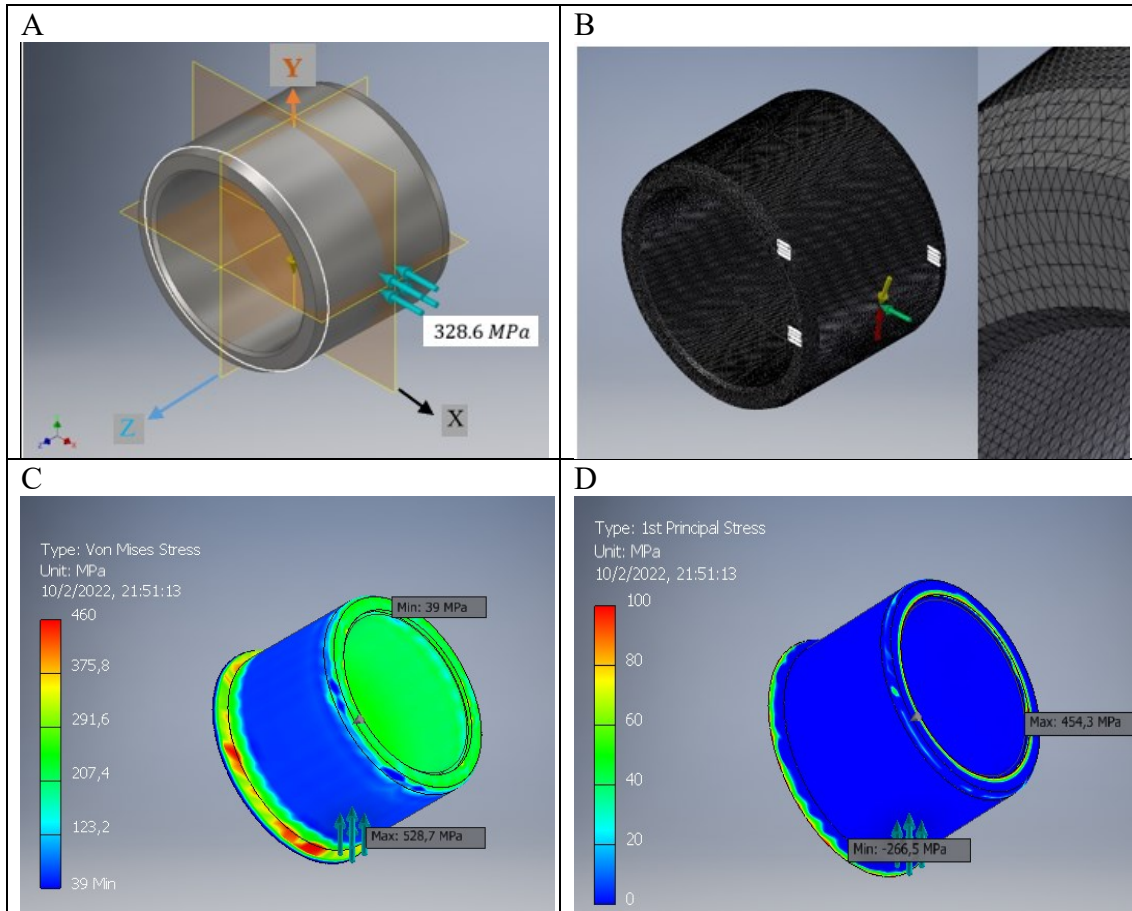


Figura 18. **A**; condiciones iniciales, **B**; tipo de mallado, **C**; reporte de esfuerzo Von Mises, **D**; reporte del esfuerzo de compresión (aplastamiento).

A continuación, la Tabla 13 se muestra la comparación de esfuerzos entre resultados analítico y computacional.

Tabla 13. Comparativa de esfuerzos analítico y simulados, que actúan sobre los bujes del punto A.

Descripción	Esfuerzos	Esfuerzos
	Analíticos	Simulados
	[MPa]	[MPa]
Esfuerzo de aplastamiento (compresión), en el punto A	467.2	454.3
Esfuerzo Von Mises en el punto A	460.6	528.7

5.4 Descripción de los aceros para el Estudio.

Existe un amplio campo de aceros en el Ecuador como materia prima, mediante una minuciosa selección en los catálogos digitales del proveedor de acero DIPAC e IVAN BOHMAN, además tomando en cuenta algunos factores como, composición química, disponibilidad en stock, propiedades mecánicas y medio de suministro, se clasificó los tres mejores prospectos.

En la Tabla 14, se muestra un resumen de los posibles aceros disponibles para la fabricación de los bujes, cada acero enseñará sus principales características mediante valoraciones como; composición química, propiedades mecánicas, entre otras, para ser seleccionado como el óptimo.

Tabla 14. Resumen de los posibles aceros en Stock para fabricar de los bujes.

Aceros	Descripción	Composición química %	Propiedades mecánicas	Tratamiento térmico	Aplicaciones
SAE 4140/ DIN 42CrMo4	Acero bonificado al Cr-Mo, buena maquinabilidad Susceptible a nitruración Estado de suministro barra redonda Dureza de 275 – 320 HB	C 0.38 – 0.43 Mn 0.75 - 1.0 Si 0.15 – 0.35 P 0.30 S 0.04 Cr 0.80 – 1.10 Mo 0.15 – 0.25	σ_y 70 (kg/mm ²) Rm 90 – 105 (kg/mm ²) Elongación min 12 % KU Aprox. 25 J	Templar 830 – 850 ° C, enfriamiento en aceite. Revenir 500 – 700 ° C de 1 a 2 horas. Recocer 680 – 720 ° C, enfriamiento en horno. Nitrurar a 560 ° C.	Bielas Árboles de transmisión Cigüeñales Engranajes Vástagos Barrenos Ejes reductores
SAE 4340/ DIN 34CrNiMo6	Acero bonificado al Cr-Ni-Mo, apto para altas exigencias de resistencia a la torsión y tenacidad Estado de suministro barra redonda Dureza de 270 – 330 HB	C 0.38 – 0.43 Mn 0.6 – 0.8 Si 0.15 – 0.35 P 0.03 S 0.04 Ni 1. 65 – 2.00 Cr 0.70 – 0.90 Mo 0.15 – 0.25	σ_y 70 (kg/mm ²) Rm 90 – 110 (kg/mm ²) Elongación min 12 % KU Aprox. 20 J	T 830 – 860 ° C, enfriamiento en aceite. Revenir 600 – 700 ° C, enfriamiento en el aire. Recocer 650 – 700 ° C, enfriamiento en horno. Nitrurar 560 ° C.	Partes y piezas en la fabricación de aviones y maquinaria pesada como: Ejes de maquinaria pesada Bielas Cigüeñales Arboles de transmisión.
DIN 20 Mn V6 / EN 10294-1	Acero de alta resistencia con aleación de vanadio. Fácil maquinado y soldabilidad. Estado de suministro Barra perforada. Dureza de 220 HB	C 0.16 – 0.22 Mn 1.30 – 1.70 Si 0.10 – 0.50 P ≤ 0.03 S 0.015– 0.05 V 0.80 – 0.15 Al ≥ 0.010	σ_y 40 – 47 (kg/mm ²) Rm 66 – 81 (kg/mm ²) Elongación min 17 %	Templar 900 a 920 ° C, enfriamiento en agua. Recocer 650 – 680 °C, enfriamiento al horno. Revenir 100 – 400 °C. Cementar 850 – 950 ° C. Nitrurar 570 °C.	Bocines Pistas Columnas de taladros Ejes estriados Ejes Rodillos cuerpos de bomba. Casquillos de perforación.

Símbolos: σ_y : esfuerzo de cedencia, R_m : resistencia a la tracción, KU: resistencia al impacto.

5.4.1 Selección del acero para la fabricación de los bujes de estudio.

Para fabricar los bujes se seleccionarán y estudiarán tres tipos de aceros existentes en el país, el acero SAE 4140, SAE 4340 y el acero DIN 20Mn V6 / EN10294-1. Para la selección del material (acero), se realiza mediante una matriz de decisión, para valorar las alternativas de aceros disponibles. En la tabla 15, se indica el primer criterio de decisión, la situación de certeza permite agrupar las estrategias y estados de la naturaleza para la obtención de un resultado esperado por cada estrategia, y dado un estado de la naturaleza.

Los costos de mecanizado de dos bujes fueron adquiridos del taller TMG a la fecha 09 de junio del 2021 por cotización directa y los costos de suministro son obtenidos del distribuidor VIRSA en la ciudad de Loja, el acero DIN 20MN V6 con fecha de ene/2022 y factura 25335, el acero SAE 4340 con fecha de ene/2022 y factura 25375, el acero SAE 4140 a la empresa BÖHLER por medio de cotización telefónica directa realizada en las fechas jun/2021.

Tabla 15. Matriz de decisión o situación de certeza para seleccionar el acero de estudio.

Estado naturaleza Estrategias	Costes cotizaciones [\$]		Propiedades mecánicas [MPa]
	Torneado [2 bujes]	Suministro [kg]	Límite elasticidad
SAE 4140	20	5,45	655
SAE 4340	20	6,28	655
DIN 20 Mn V6	20	4,93	395

Para resolver la situación de incertidumbre, se hace empleando el criterio de Savage o Mínimo pesar. El método consiste en seleccionar los valores más altos de cada estado de naturaleza y luego restar entre los valores superiores e inferiores de la columna de cada estado de naturaleza, para hallar los costes más bajos y seleccionar el valor más alto de oportunidad, se debe elegir la mejor estrategia entre las peores.

En la Tabla 16, realizamos una matriz nueva en términos de Coste-Oportunidad, donde el resultado no serán beneficios, sino costos. Las asignaciones que recibe cada estado de la naturaleza es el producto de la resta entre el máximo valor seleccionado con los mínimos valores de cada columna de los estados de la naturaleza, tomando en cuenta que el máximo valor será siempre cero en su respectiva columna.

Tabla 16. Matriz de Coste / Oportunidad del Criterio Savage.

Estado naturaleza	Costes cotizaciones		Características mecánicas
	[\$]		[MPa]
Estrategias	Torneado 2 bujes	Suministro [1 kg]	Limite elasticidad
SAE 4140	0	0,83	0
SAE 4340	0	0	0
DIN 20 Mn V6	0	1,35	295

Fue seleccionado el acero DIN 20 MN V6, porque ofrece el menor coste de oportunidad entre los mínimos.

5.5 Selección del tratamiento térmico para los bujes de estudio.

En la Tabla 17, se muestra algunas características de los posibles tratamientos térmicos para el estudio. Para luego seleccionar la opción más favorable.

Tabla 17. Valores de tratamientos térmicos para el acero de estudio.

Tratamiento	Aportación	Espesor capa Endurecida (mm)	Durezas	
			HRC	HV
Temple	Ninguno	0.3 - 9	45 - 62	450 - 750
Cementación	C	0.2 - 1.5	55 - 65	660 - 900
Nitruración	N	0 - 0.05	65 - 75	800 - 1200

Para la selección del tratamiento térmico, se realiza mediante una matriz de decisión, para valorar las alternativas disponibles. En la Tabla 18, se indica el criterio de decisión, una situación de certeza que permite agrupar las estrategias, estados de la naturaleza y probabilidades que ocurra la naturaleza, para la obtención de un resultado esperado por cada estrategia dado una probabilidad y estado de la naturaleza.

La empresa BÖHLER brindó información de costes en una cotización verbal por vía telefónica realizada en las fechas 22/02/2021, cuando la empresa realizó una charla sobre los tratamientos térmicos para la carrera de ingeniería mecánica.

Las probabilidades se designan de acuerdo al peso de cada estado de la naturaleza, las puntuaciones fueron realizadas basándose a las características óptimas requeridas para lograr el resultado esperado, el 50% se designa a la dureza el estado de la naturaleza más importante y principal objetivo de estudio, seguido el 40% se designa a la cantidad de

capa endurecida que conserva la dureza requerida, por último 10% al tipo de tratamiento térmico que permitirá cumplir el objetivo.

Tabla 18. Matriz de decisión o situación de certeza para seleccionar el tratamiento térmico.

Probabilidad	10%	50%	40%	100%
Estado Naturaleza	Costes por 1Kg - sin IVA	Propiedades tratamientos térmicos		
Estrategias	Tratamiento térmico [€]	Dureza [HRC]	Capa endurecida [mm]	
Temple	6	45	9	26,7
Cementación	7	65	0,5	33,4
Nitruración	8	65	0,05	33,3

Para resolver la situación de riesgo, se hace empleando el criterio de valor esperado. El método consiste en multiplicar la probabilidad y estado de naturaleza para sumar con cada estrategia, para hallar el valor esperado los valores más altos de cada estrategia

Fue seleccionado el tratamiento de Cementación, mediante el criterio valor esperado, porque el tratamiento térmico ofrece mayor beneficio.

5.5.1 Diseño del tratamiento de Carburización (cementación)

Una vez seleccionados el acero y tratamiento térmico, consideramos los parámetros de diseño para la Carburización partir de las condiciones iniciales del acero seleccionado y las características finales requeridas por el producto. Para ello se utilizarán los modelos de difusión representada en la segunda ley de Fick.

5.5.2 Segunda ley de Fick.

En la Tabla 19, se indica los valores de entrada para el estudio de la Segunda Ley de Fick, se usa la Ecu. (8) para calcular el tiempo que permanecerá en el horno y obtener una capa bonificada en carbono (cementada) de 0.5 mm de profundidad, propuesta a criterio por motivos de mecanizado después el tratamiento. Teniendo una concentración inicial de carbono de 0.2% del acero DIN 20 Mn V6.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D * t}} \right) \quad (8)$$

Con la ecuación 8, se calcula la concentración de átomos de carbono (C_x) para lograr la capa cementada propuesta de 0.05 mm , en un determinado tiempo a una temperatura constante.

La función error se realiza igualando la ecuación 8, con los datos de concentración de carbono obtenidos por catálogo o analíticamente. Con este valor vamos a las tablas ya establecidas, caso de no encontrar el valor exacto se debe interpolar.

La profundidad de capa cementada es propuesta por el usuario, esto depende del diseño y funcionalidad de la pieza.

Para la capa cementada se considera a criterio una profundidad de 0.8 mm , en el tratamiento térmico el buje sufre una leve deformación, después es mecanizado hasta 0.2 mm sobre la superficie de la capa cementada, esto depende de las tolerancias aplicadas y como resultado se obtendrá 0.3 mm de capa cementada la superficie del buje

Tabla 19. Resumen de la segunda ley de Fick [10].

Descripción	Símbolo	Datos.	Unidad
<i>Profundidad de capa cementada (mm)</i>	x	<i>0,8</i>	<i>mm</i>
<i>Concentración constante de carbono en la atmósfera (carbón activo 1,2%)</i>	C_s	<i>1,2</i>	<i>%</i>
<i>Concentración inicial de carbono en el acero (norma EN10294-Ibarra perforada 0,2%)</i>	C_0	<i>0,2</i>	<i>%</i>
<i>Concentración requerida de átomos en la capa cementada a una distancia en un tiempo (s)</i>	C_x	<i>0.80</i>	<i>%</i>
<i>Función de error Gaussiana</i>	erf	<i>0,31</i>	
<i>Coefficiente de difusión del acero (D)</i>	D	<i>3,01948E-06</i>	<i>cm²/s</i>
<i>Tiempo para obtener la concentración de carbono (h)</i>	t	<i>5631,47</i>	<i>s</i>

En la Tabla 20, se indica el símbolo, datos y unidades del coeficiente de difusión térmica. El coeficiente de difusión es calculado por la Ecu. (9) y permite saber la facilidad que tiene el acero para compartir moléculas de carbono a determinadas temperaturas.

$$D = D_0 * e^{-\frac{Q}{R*T}} \quad (9)$$

La temperatura absoluta se propone a criterio basándose en gráficas.

Tabla 20. Coeficiente de difusión

Descripción	Símbolo	Datos.	Unidad
Constante universal de los gases	R	1,987	cal / mol* K
Temperatura absoluta	T	1473	K
Energía de activación	Q	32900	cal / mol
Constante independiente del tiempo y fusión del sistema 0,23	D ₀	0,23	cm ² / s

En la Figura 19, podemos apreciar el diseño del tratamiento térmico de cementación para el caso de estudio. Además, se puede seleccionar el par (tiempo – temperatura) para conseguir una cementación con las características deseadas. Utilizando dos probetas y un par de tiempo (4 ½ h) y temperatura (1050 ° C) seleccionado minuciosamente, se recolecta datos para observar el comportamiento de la profundidad de capa endurecida en función de la dureza.

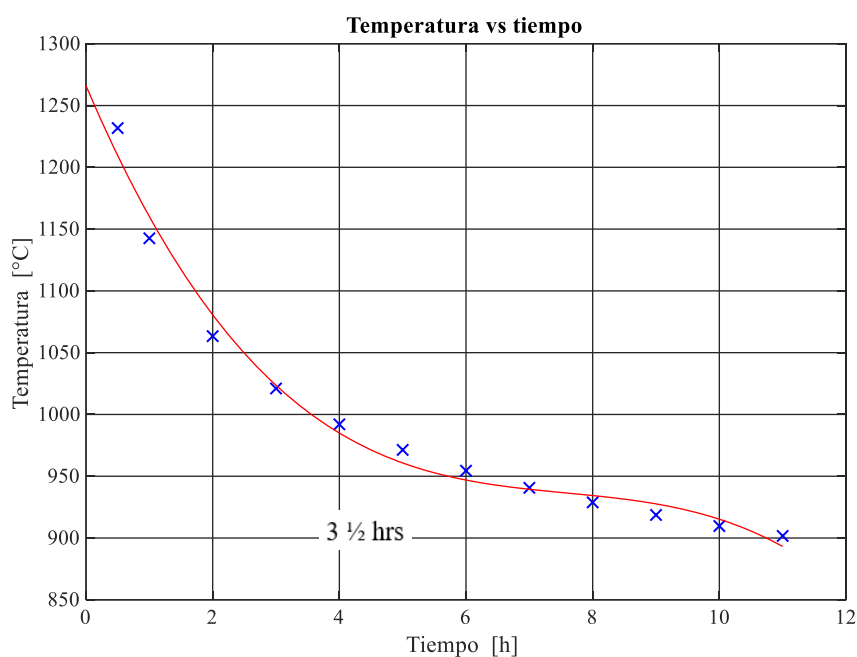


Figura 19. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.

La relación de tiempos cortos a temperaturas alta y viceversa, si dispone de un horno de gran capacidad térmica, lo más óptimo sería establecer una cementación a temperaturas altas y menor tiempo con las características apropiadas y si dispone de un horno de menor capacidad también sería aplicable un tratamiento de cementación a menor temperatura y con un lapso de tiempo muy prolongado, son opciones muy factibles dependiendo la circunstancia.

En las dos opciones se logra la cantidad de capa cementada, a mayor temperatura y tiempos cortos, existe mayor probabilidad de que la pieza sufra microfisuras ocasionando futuras fallas, por otra parte, a menor temperatura y tiempos largos si bien no ocasiona daños en la pieza, genera gastos de producción. El objetivo es generar un tratamiento térmico con buenas características a un costo moderadamente competitivo en el mercado nacional.

Como se puede apreciar en la Figura 19 se pueden considerar dos casos de estudio; El primero elevadas temperaturas entre 1000 °C a 1250 °C y tiempos desde 1 hora hasta 4 horas. El segundo caso se consideraría tiempos prolongados entre 4 horas y 10 horas en un rango de temperaturas de 900 °C a 1000 °C. Para obtener una capa cementada de aproximadamente 0.8 mm de espesor.

5.6 Descripción de materiales y equipos.

5.6.1 Equipos

5.6.1.1 Medidor de dureza.

Medidor de Dureza Rockwell marca Wilson de procedencia americana (Figura 20). Permite realizar ensayos de durezas en escalas Rockwell A, B y C con un indentador de cono de diamante de penetración (ángulo 120 °) y una carga total de 1471 N (150 kgf).

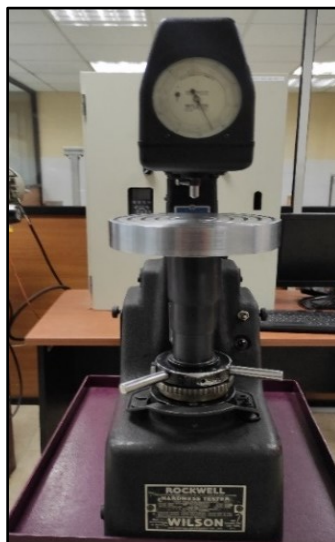


Figura 20. Medidor de Dureza Rockwell

5.6.1.2 Sistema de templado.

Sistema de Templado MHS17 marca Nabertherm de procedencia alemana (Figura 21). Dispone de una cámara interna de 0.007 m³, la temperatura máxima de trabajo es 1280 °C.

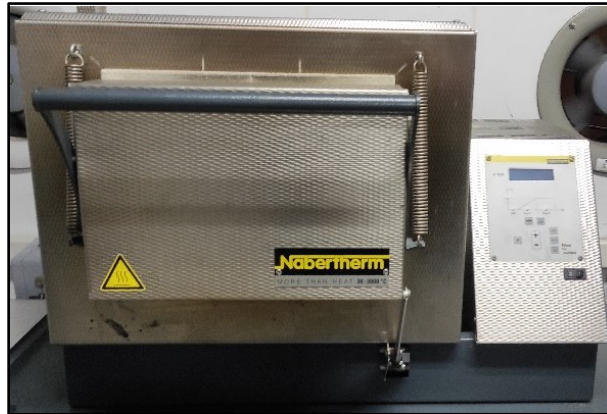


Figura 21. Sistema de templado N 7/H.

5.6.1.3 Horno de cementación.

Horno de cementación de procedencia nacional (Figura 22). Dispone de un controlador On – OFF la temperatura máxima de trabajo es de 1200 °C, la cámara interna es de 0.00625 m³.



Figura 22. Horno de cementación.

5.6.1.4 Torno paralelo

Torno paralelo L-1/300 marca Pinacho de procedencia española (Figura 23). Dispone de una gama de 8 velocidades altas de 106 a 1500 rpm y 8 velocidades bajas de

70 a 1000 rpm. Avance longitudinal mínimo de 0.078 mm/min y un avance máximo de 4.704 mm/min.



Figura 23. Torno paralelo.

5.6.1.5 Rectificadora

Rectificadora Plana FSG – 1224 AD III marca Falcon Machine Tools CO., LTD., de procedencia Taiwán (Figura 24). Equipado con un motor de 5 hp, mesa de trabajo magnética de 400 mm x 1000 mm, los 3 ejes automáticos son controlados por Servo Motores. Profundidad máxima de rectificado 0.3 mm.



Figura 24. Rectificadora Plana GSG – 1224 AD III.

5.6.1.6 Foto Espectrómetro de chispa.

Espectrómetro Foundry Master Xpert marca Oxford Instruments de procedencia alemana (Figura 25). Espectrómetro de emisión óptica para control de calidad en metalurgia y control de procesos para fundiciones.



Figura 25. Espectrómetro Foundry Master Xpert

5.6.2 Materiales y herramientas

En la Tabla 21, se realiza una descripción de los equipos y materiales que se utilizaron en el proceso de fabricación de bujes, así como también se indica la designación y una característica de cada uno de los materiales.

Tabla 211. Descripción de los materiales y herramientas.

Material / herramienta	Designación	Característica
Placa	TNMG220408 – MA VP15TF	Placa negativa triangular, sin ángulo de incidencia. Velocidad de corte: 150 – 105 m/min Avance: 0.50 – 0.20 mm/rev
Barra de mandrinar	S25R-STFCRT22	Herramienta de mango de acero, fijación por tornillo. Placa triangular.
Torneado exterior	MTJNR2525M22	Herramienta de doble fijación. Placa triangular.
Granulado de cementación	KG 6 – Granulado	Para aceros aleados
Manta cerámica	Durablanket	Resistencia a la temperatura de 1260 °C

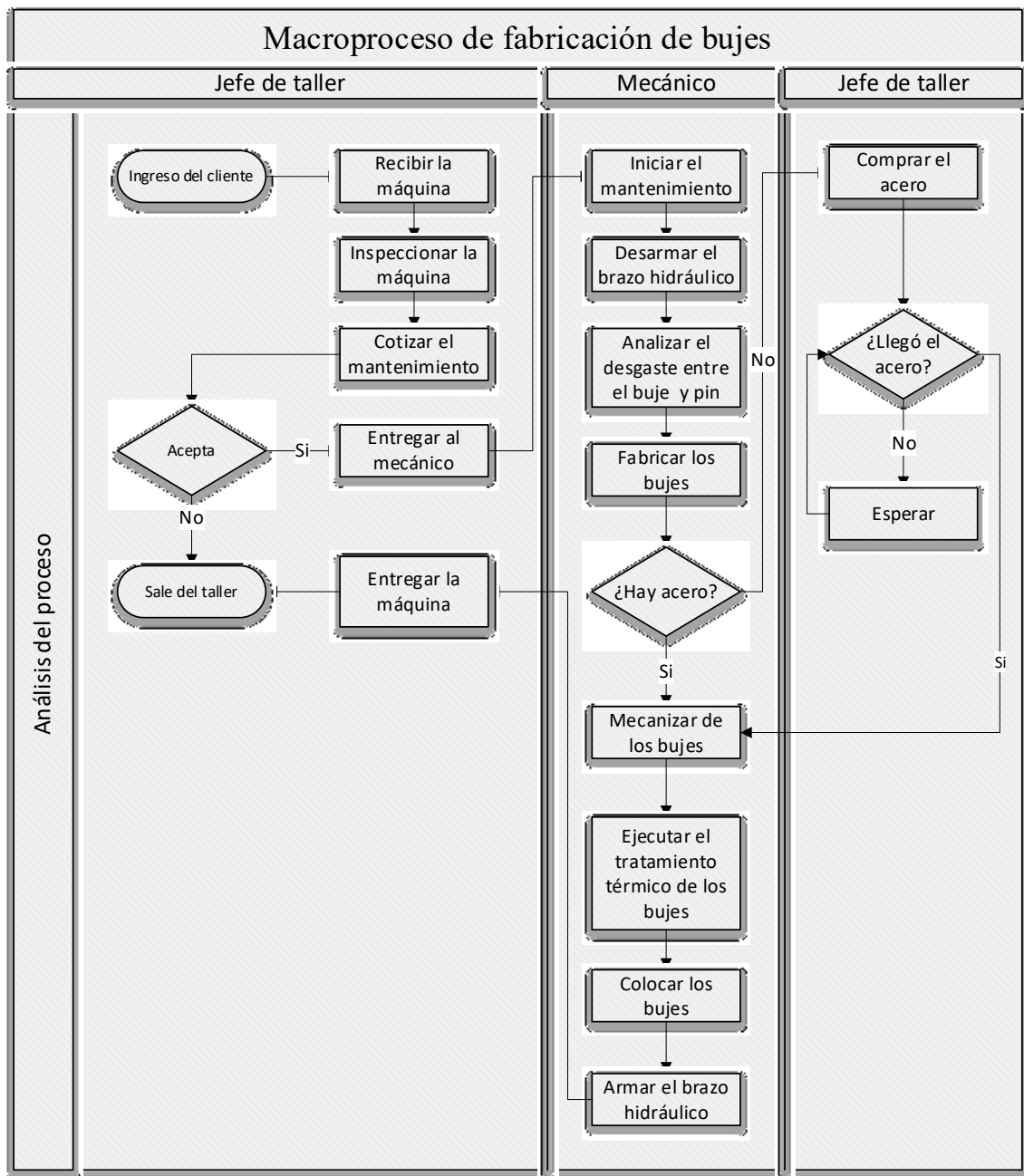
5.7 Proceso de manufactura para la producción de bujes

Para definir el proceso de manufactura se tomó en cuenta las dimensiones finales del buje y las dimensiones en stock del acero DIN 20Mn V6 que permitan reducir los

tiempos de mecanizados, además las tolerancias geométricas y dimensionales que deben garantizar la redondez y cilindridad.

En la Figura 26 se presenta un esquema del macroproceso previo a la fabricación de los bujes en el que se analiza desde de llegada de la retroexcavadora, el estado del brazo hidráulico y se realiza una inspección del buje y el pin para analizar el desgaste. Cada barra de acero se la adquiere con proyección a fabricar de 2 a 4 bujes.

Figura 26. Proceso de fabricación de los bujes.



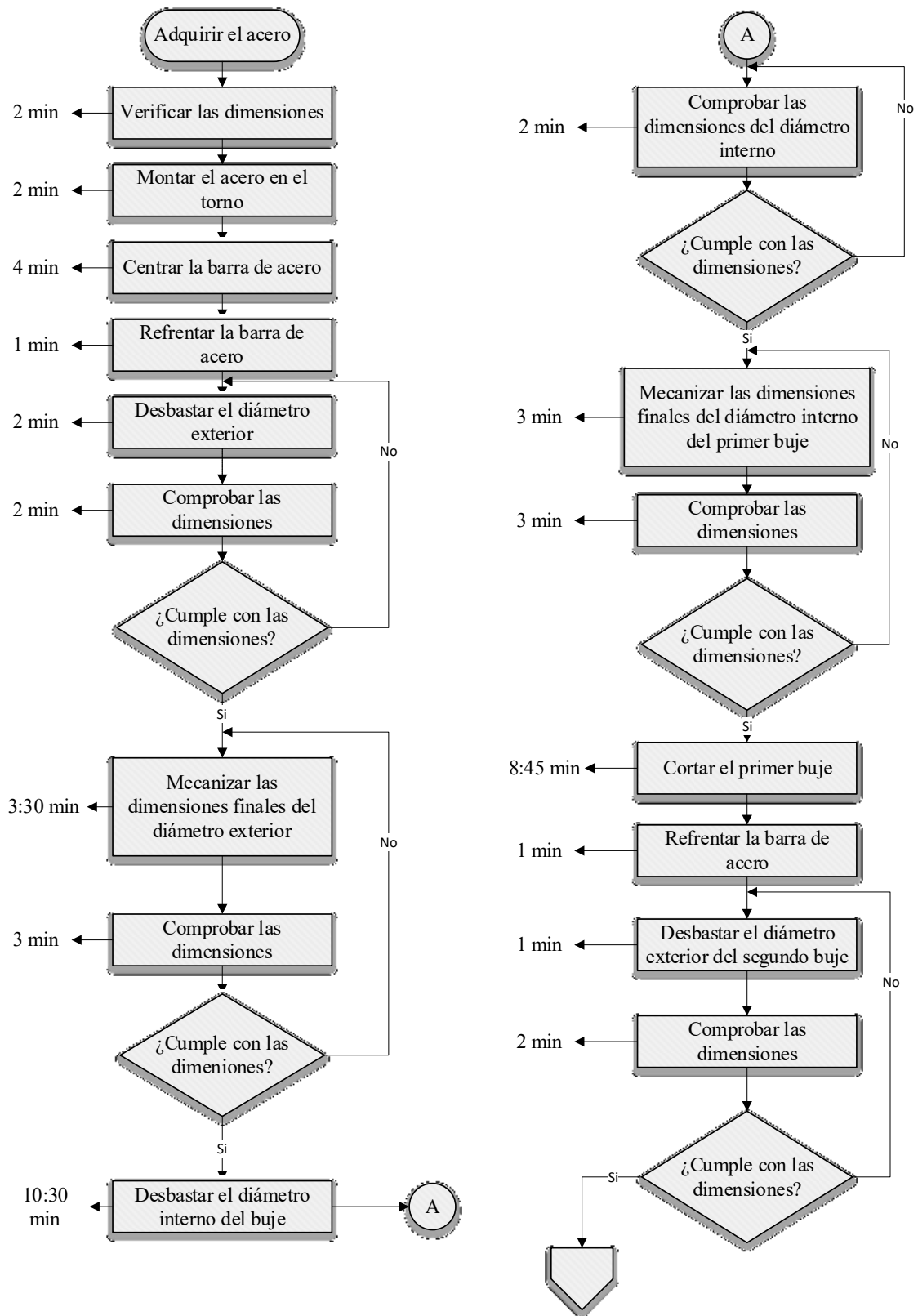
En la Tabla 22. Se presenta los parámetros para proceso de manufactura de los bujes con los valores iniciales de la velocidad de corte para luego determinar las revoluciones por minuto (rpm), el avance por revolución y el tiempo estimado de mecanizado considerando las revoluciones por minuto de máquina. Se detalla las operaciones de mecanizado empleadas como el refrentado, desbastado, el acabado, el tronzado y por último el mecanizado de los chaflanes.

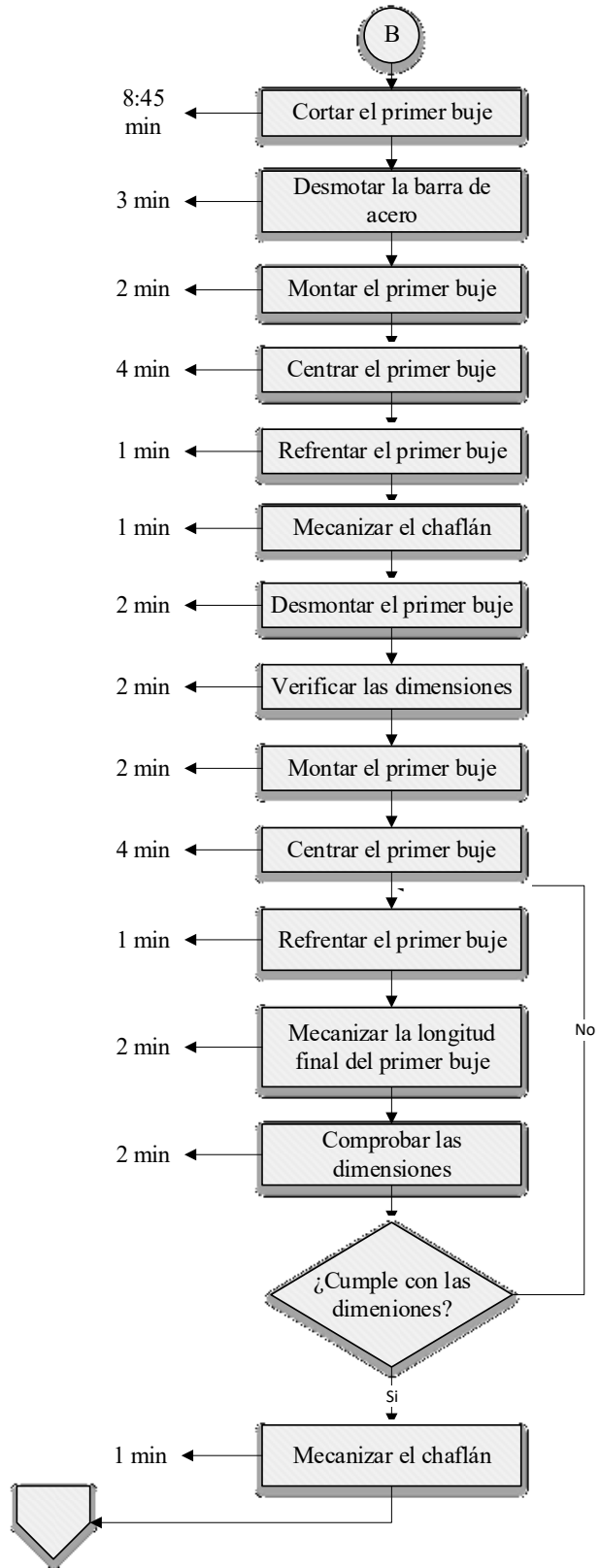
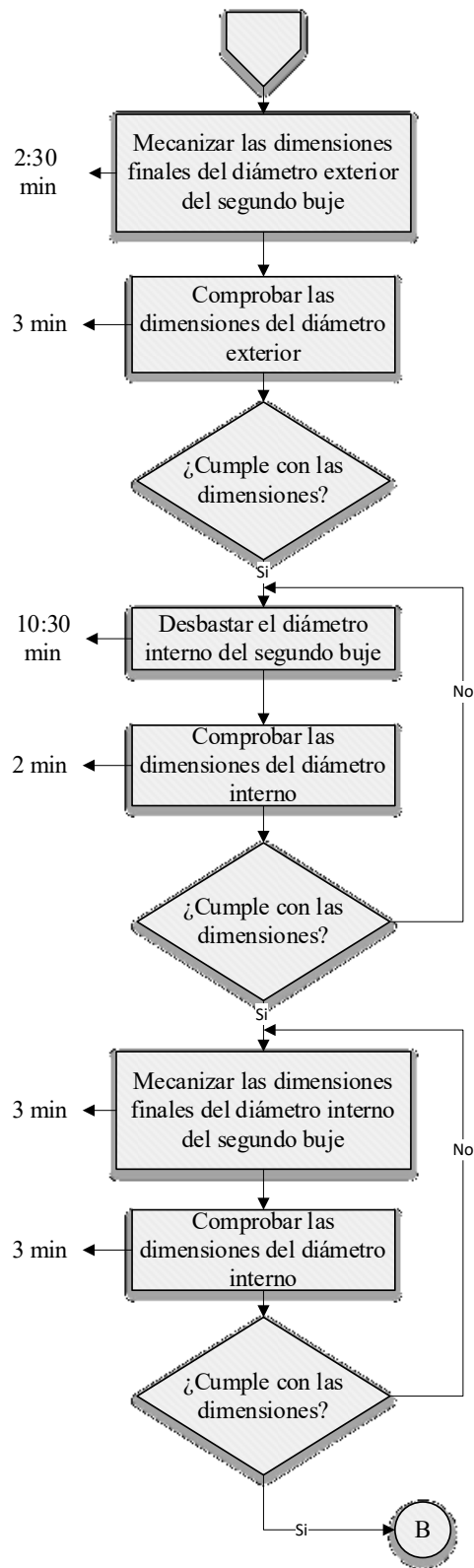
Tabla 22. Parámetros para el mecanizado de los bujes.

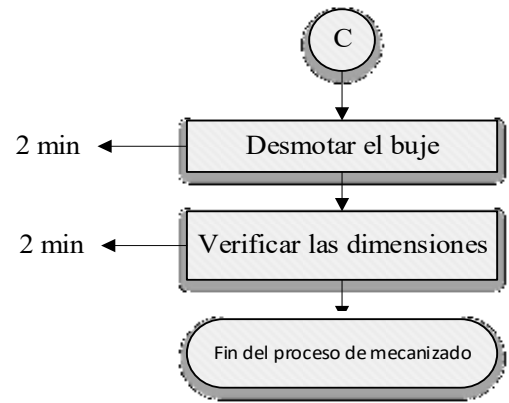
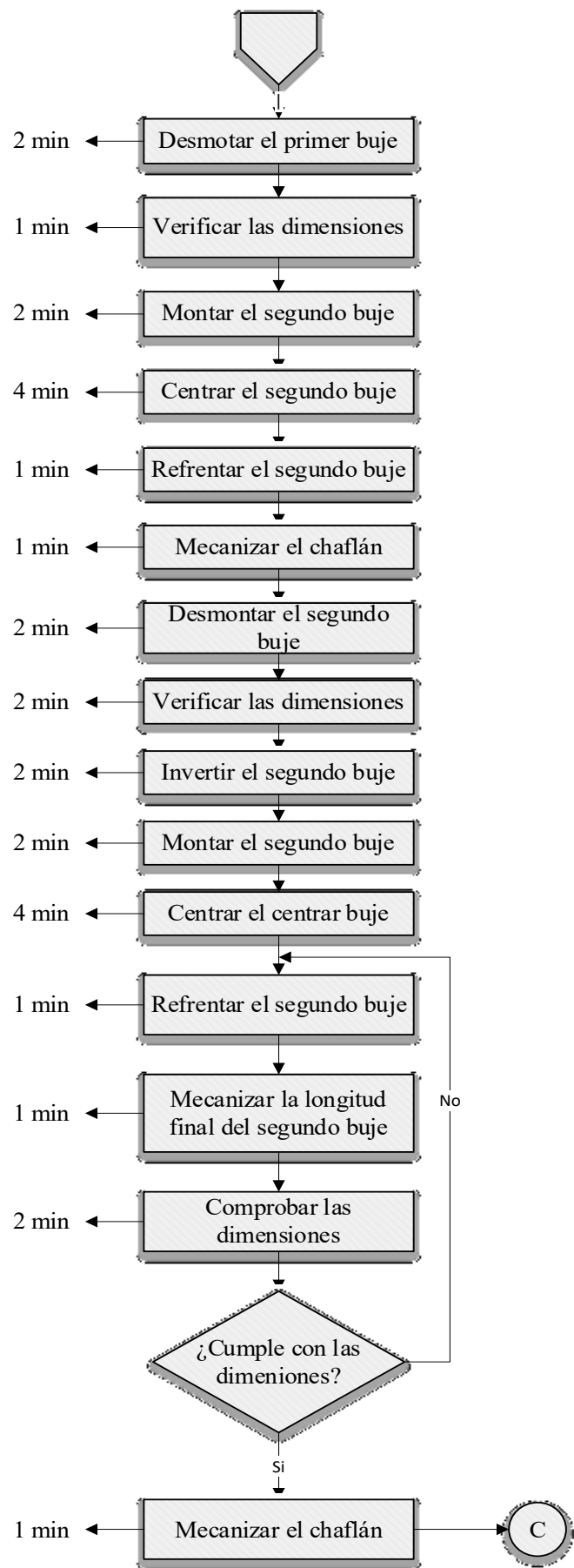
Tipo mecanizado	v_c (m/min)	f_n (mm/r)	D_m (mm)	l_m (mm)	a_p (mm)	a_t (mm)	n (rpm)		t_{mt} (min)
							cal.	maq.	
Refrentado	105	0.2	35	20	1	2	954.93	800	1
Desbastado diámetro exterior	105	0.2	63	120	2	2	530.52	574	1:10
Acabado diámetro exterior	150	0.15	62.2	60	0.4	0.8	762.72	800	2:30
Desbastado diámetro interior	90	0.2	49	120	2	14	584.64	574	10:30
Acabado diámetro interior	140	0.15	52.2	60	0.4	1.2	853.70	800	3:00
Tronzado	15	0.01	50	6	1	12	95.49	80	8:45

En la Figura 27, se presenta un diagrama de flujo para el proceso de fabricación de los bujes, para cada proceso se ha designado un tiempo de trabajo con base en las revoluciones por minuto de la máquina, la longitud de acero mecanizada y el avance por revolución. El tiempo estimado de mecanizado con base en el diagrama de flujo se determinó en 2 horas 24 minutos y 30 segundos.

Figura 27. Diagrama del proceso de fabricacion de los bujes.







6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1.1 Características del buje.

Para la fabricación del buje se utilizó el acero hipo eutectoide DIN 20 Mn V6 distribuido a nivel nacional por la empresa Ivan Bohman el cual tiene un contenido de carbono del 0.16 - 0.22 % y es suministrado como barra perforada. La Figura 28, muestra dimensionado y características del buje, su diámetro exterior permite el ajuste mecánico de clase prensado y no necesita un seguro para bloquear el giro. En cuanto al diámetro interior el ajuste es de clase deslizante.

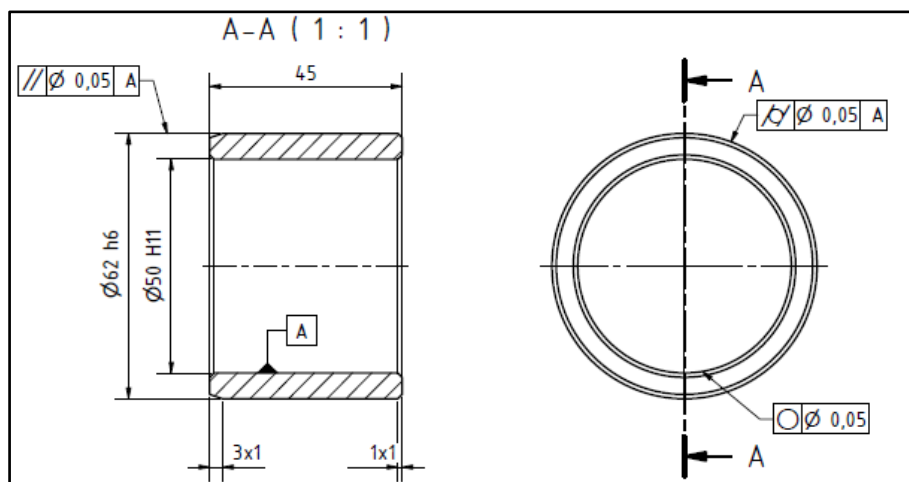


Figura 28. Dimensionado del buje.

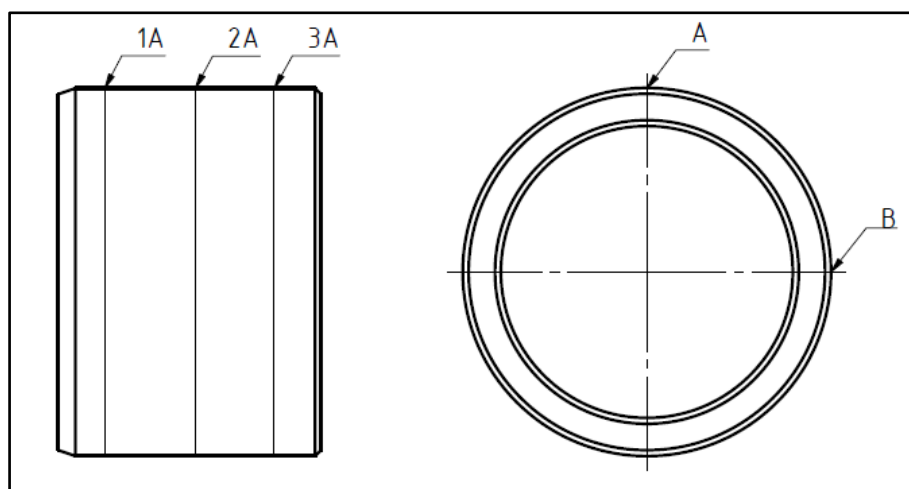


Figura 29. Puntos para el control dimensional del buje.

Para el control dimensional del buje antes de realizar el tratamiento térmico se marcaron tres posiciones a lo largo del buje y dos posiciones en la parte cilíndrica del buje para controlar la cilindridad y redondez como se muestra en la Figura 29.

En la Tabla 23, se caracteriza al buje antes de ser sometido al tratamiento térmico de cementación, se indica la composición química y las dimensiones del buje.

Tabla 23. Caracterización y dimensionado del buje antes del tratamiento térmico.

Nomenclatura del acero.	Descripción			
<i>Norma</i>	DIN 20Mn V 6/EN 10294-1			
<i>Dureza de suministro</i>	220 HB			
<i>Estado de suministro</i>	Barra perforada			
<i>Medida de plano</i>	Izquierda (mm)	Centro (mm)	Derecha (mm)	
Medida ideal antes del TT	vint.	$50^{+0.20}_{+0.15}$	$50^{+0.20}_{+0.15}$	$50^{+0.20}_{+0.15}$
	vext.	$62^{+0.25}_{+0.20}$	$62^{+0.25}_{+0.20}$	$62^{+0.25}_{+0.20}$
	Long.	45 mm		
4 iteraciones de medida en las superficies	Izquierda (mm)	Centro (mm)	Derecha (mm)	
Medida real antes del TT	vint.	50.15	50.095	50.12
	vext.	62.235	62.225	62.215
	Long.	45 mm		
Medida en el mecanizado	Izquierda (mm)	Centro (mm)	Derecha (mm)	
Medida límite antes del TT	vint.	50.20	50.20	50.20
	vext.	62.20	62.20	62.20
	Long.	45 mm		

6.2 Resultados de la Dureza del buje cementado.

El estudio de la dureza se lo realizó con la finalidad de determinar la variación de la dureza en función de la profundidad del buje cementado. Para ello se utilizó un medidor de dureza Rockwell C con un indentador de cono de diamante. Los valores que se muestran en la Figura 30, corresponden a un promedio de 5 mediciones de dureza que se hicieron en el buje cementado a diferentes profundidades con capas de 0.05 mm de profundidad con una dureza en la superficie de 64.60 HRC y a 1 mm de profundidad de 61 HRC.

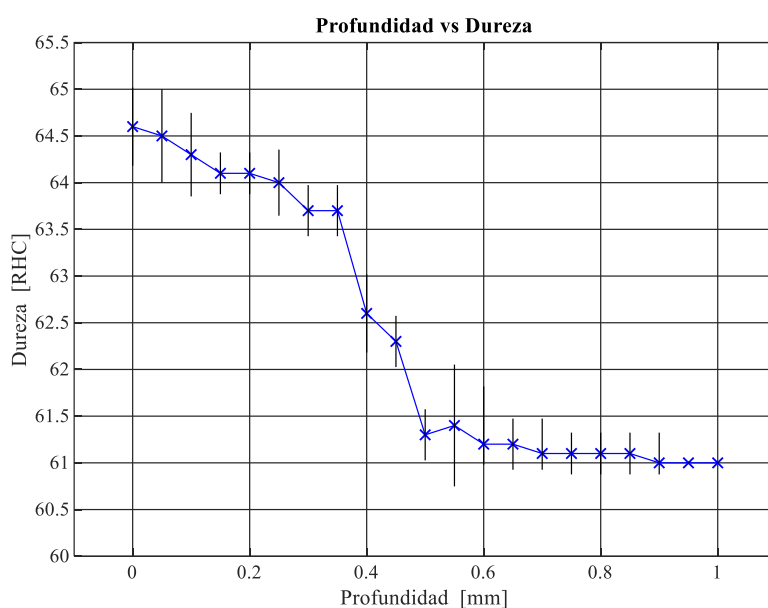


Figura 30. Dureza obtenida después del tratamiento térmico de cementación.

El comportamiento de la dureza en el buje cementado decrece de 64.4 HRC hasta 63.7 HRC desde la superficie hasta una profundidad de 0.35 mm, a partir de esta profundidad la dureza decrece considerablemente hasta 61.2 HRC a una profundidad de 0.6 mm y luego se mantiene constante de 61 HRC. Esta variación de la dureza desde la superficie del buje hacia la parte interna se debe a la difusión del carbono a altas temperaturas.

6.3 Resultados del estudio revenido.

El estudio de la dureza final del buje se lo realizó con un tratamiento térmico de revenido para ello se utilizó un horno de laboratorio Nobertherm. Se usaron tres muestras de unos de los bujes, las cuales fueron expuestas a diferentes temperaturas para determinar la curva de revenido con un tiempo constante de 2 horas a temperaturas de 200 °C, 300 °C y 400 °C. En la Tabla 24, se muestran los resultados de la dureza después del revenido, los valores obtenidos son un promedio de cinco mediciones por cada probeta.

Tabla 24. Dureza del acero después del revenido.

Tiempo (cte.)	T (°C)	Dureza (HRC)
2 h	200	56,90
2 h	300	53,10
2 h	400	47,00

Se determinó la expresión matemática que permite estimar la dureza en función de la temperatura, para ello se hizo un ajuste mediante mínimos cuadrados a base de los datos experimentales para establecer la fórmula que mejor se aproxima. Ver la Figura 31.

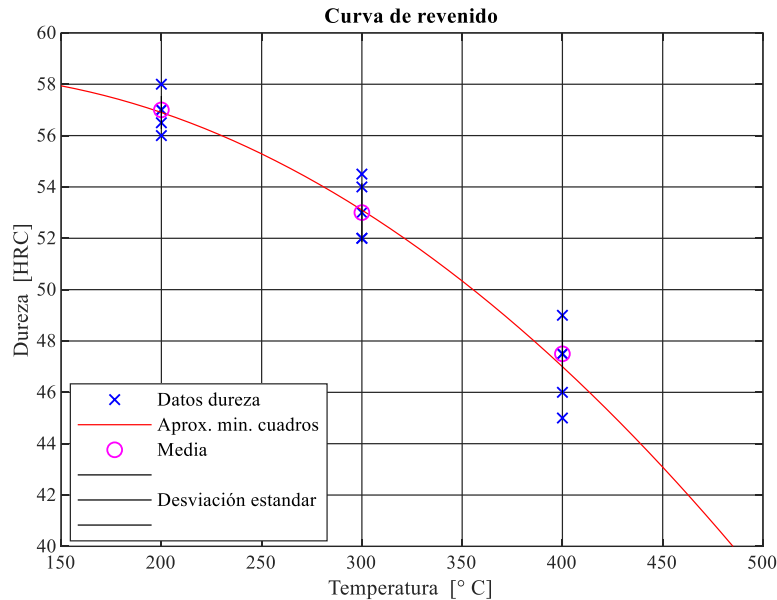


Figura 31. Variación de la dureza en función de la temperatura, para acero DIN 20 Mn V6 cementado revenido a 200 °C, 300 °C y 400 °C durante 2 horas.

En la curva de revenido se puede apreciar una reducción de la dureza correspondiente al incremento de la temperatura obteniendo una dureza de 57 HRC a una temperatura de 200 °C y una dureza mínima de 47 HRC a una temperatura de 400 °C.

La ecuación 13, representa la variación de la dureza en función de la temperatura, la misma se utilizó para determinar la temperatura de revenido para obtener una dureza de 56 HRC.

$$y(x) = -0.0001x^2 + 0.0195x + 57.6 \quad (13)$$

6.3.1 Resultados de la dureza del buje cementado – revenido.

El revenido del acero permite variar la dureza del buje con base en los resultados de la dureza obtenida después del estudio del revenido de las probetas y la ecuación número 13 se determinó la temperatura de 250 °C por un tiempo constante de dos horas para obtener una dureza de 57 HRC en la superficie del buje cementado. En la Figura 32 se muestra los valores de dureza obtenidos después del revenido a diferentes

profundidades y corresponden al promedio de 5 iteraciones realizadas por cada capa rectificadora.

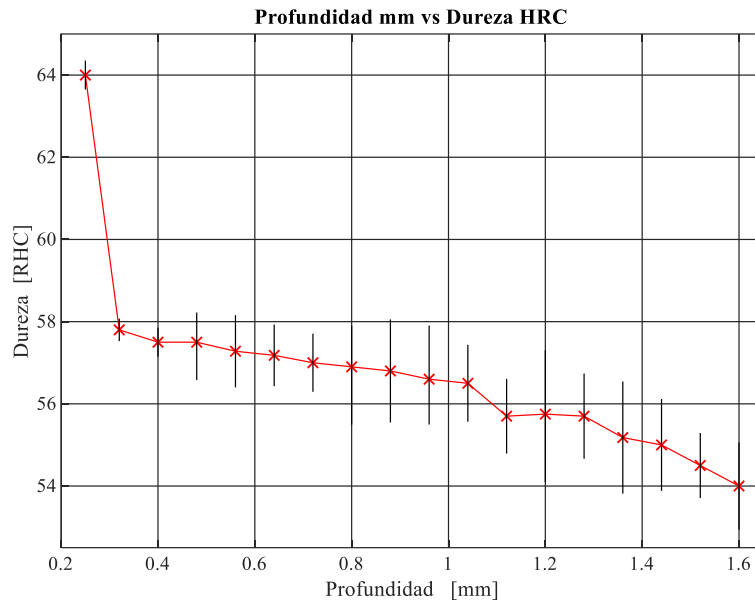


Figura 32. Dureza obtenida después del tratamiento térmico de Revenido.

En la figura 32 del buje cementado – revenido como dato inicial de la dureza tenemos 64 HRC del buje antes de ser revenido, luego tenemos una reducción de la dureza en la superficie de 57 HRC hasta una profundidad de 1 mm después de haber realizado el tratamiento térmico de revenido y por último podemos apreciar una dureza de 54 HRC a una profundidad de 1.6 mm.

El tratamiento térmico de revenido es necesario para reducir la dureza y la resistencia a la ruptura en el buje, para disminuir las tensiones internas después de llevar a cabo el cementado a elevadas temperaturas. Además, permite aumentar la ductilidad y la tenacidad.

6.3.2 Resultados del estudio de espectrometría.

En la Figura 33, se indican los resultados del estudio de espectrometría para el buje cementado, el original y el buje alterno.

La gráfica de color azul representa el contenido de carbono del buje cementado con un porcentaje de 1.54 en la superficie y en la parte interna un valor de 0.33 por ciento de carbono a una profundidad de 2.5 mm. La gráfica de color rojo representa el contenido

de carbono del buje original que en la superficie contiene 1.03 de carbono y se mantiene constante con un valor de 1.09 hasta una profundidad de 2 mm.

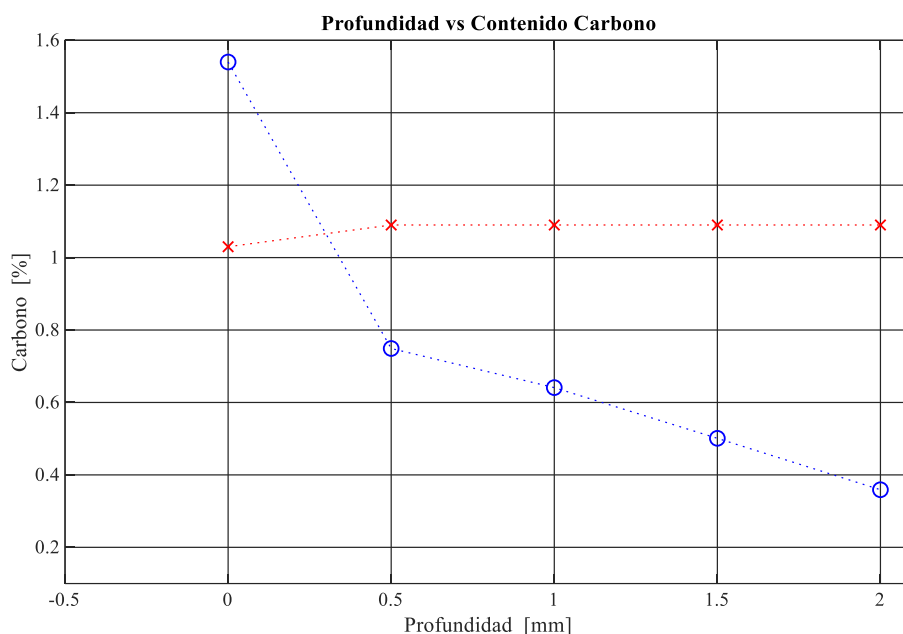


Figura 33. Porcentaje de carbono del buje cementado y original.

Los valores correspondientes al estudio de espectrometría se muestran en la Tabla 25, corresponden a los principales elementos de elección del acero DIN 20 Mn V6 hasta una profundidad de 2.5 mm con capas de 0.5 mm, en estado de suministro y después de haber realizado los tratamientos térmicos de cementado y revenido. Los valores corresponden a un promedio de 3 iteraciones en el estudio de espectrometría, se puede apreciar un incremento 1.40 % de contenido de carbono en la superficies del buje cementado, mientras que el buje en estado de suministro presenta un contenido de 0.14 % de carbono.

Tabla 25. Resumen del estudio de espectrometría del buje cementado.

		Buje de acero DIN 20 Mn V6 / EN 10294 – 1 Cementado 4.5 h – 1050 °C						
		Composición química						
		C	Mn	Si	P	S	V	Al
Estado de Suministro	Catálogo	0.16 – 0.20	1.30 – 1.70	0.10 – 0.50	≤ 0.03	0.015– 0.05	0.80 – 0.15	≥ 0.010
	Espectrometría	0.14	2.06	0.271	0.017	0.0402	0.105	0.0205
0.00 mm	Espectrometría A	1.54	2.01	0.443	0.0352	0.0676	0.113	0.0309
0.50 mm	Espectrometría B	0.74	2.04	0.260	0.0183	0.0403	0.105	0.0197
1.00 mm	Espectrometría C	0.64	2.09	0.267	0.0197	0.0503	0.106	0.0204
1.50 mm	Espectrometría D	0.50	2.06	0.270	0.0193	0.0473	0.105	0.0195
2.00 mm	Espectrometría E	0.35	2.10	0.272	0.0199	0.0476	0.105	0.0213
2.50 mm	Espectrometría F	0.33	2.07	0.277	0.0210	0.0497	0.107	0.0202

En la Tabla 26, se indican los valores del contenido de carbono y la dureza en función de la profundidad, en la Figura 34 se muestran en una gráfica los valores obtenidos.

Tabla 26. Los resultados de la dureza y contenido de carbono del acero DIN 20 Mn V6 cementado – revenido.

Profundidad (mm)	% C	HRC
0.00	1.540	59.00
0.50	0.749	57.50
1.00	0.641	56.50
1.50	0.501	54.00
2.00	0.359	54.00
2.500	0.333	52.00

En la figura 34, se muestran los valores de dureza y el contenido de carbono en función de la profundidad del buje cementado – revenido. Los puntos de color azul corresponden a los valores de dureza y los puntos de color rojo corresponden al porcentaje de carbono en función a la profundidad.

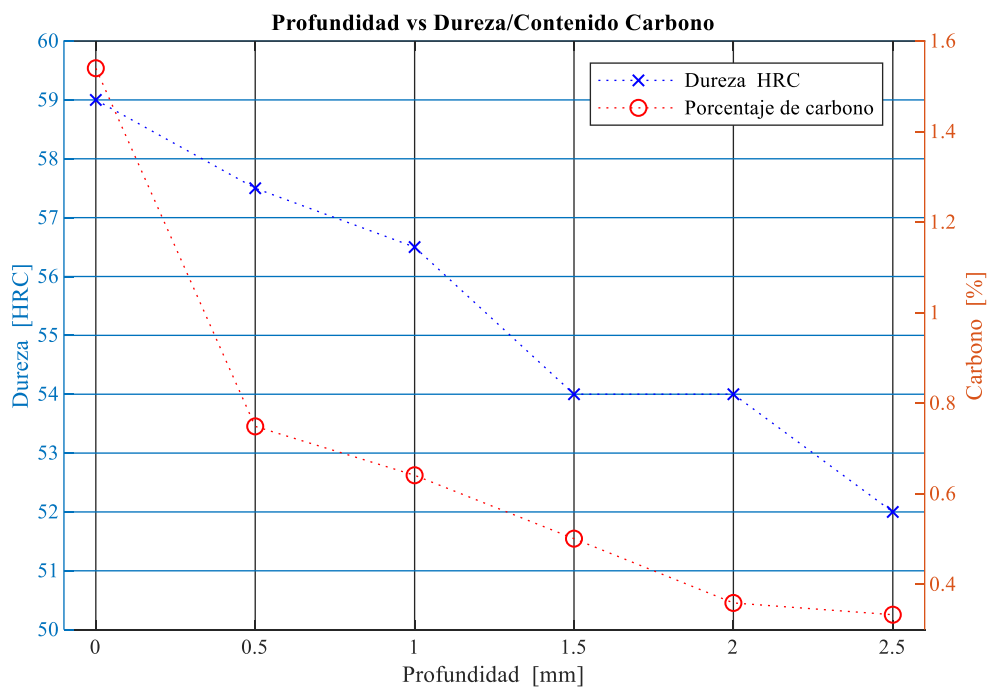


Figura 34. Comparación de la dureza y el contenido de carbono en función de la profundidad.

Con los resultados del estudio de espectrometría y dureza analizamos el comportamiento en relación con la profundidad, en la cual podemos apreciar un decrecimiento de desde la superficie a la parte interna del buje. En la superficie se obtiene

una dureza de 59 HRC con un contenido de carbono de 1.54, conforme avanzamos en la profundidad se reduce la dureza y el contenido de carbono en valores de 57.5 HRC y 0.75 por ciento de carbono en 0.5 mm respectivamente, desde 0.5 mm hasta 1.5 mm los valores de la dureza y contenido de carbono disminuyen hasta 54 HRC y 0.5 respectivamente. Por último, a una profundidad de 2.5 mm la dureza se mantiene de 54 HRC y el contenido de carbono se reduce hasta 0.33 por ciento.

Considerando la sobremedida 0.06 mm que tiene que ser removida por el rectificado el contenido de carbono es superior al 0.5 % desde la superficie hasta una profundidad 1.5 mm manteniendo una capa endurecida de 54 HRC, y en la superficie una dureza de 59 HRC.

En la Tabla 27, se muestran los resultados del estudio de espectrometría del buje Caterpillar, el buje alterno y del acero que se utilizó para fabricar los bujes. Como se puede apreciar en la Tabla 27 la diferencia en el contenido de carbono es de 0.884 % de contenido entre el acero DIN 20Mn V6 y el buje alterno y original.

Tabla 27. Estudio de espectrometría del buje Caterpillar

	Comparación de los elementos de aleación								
	Composición química								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Al
Buje Caterpillar	1.030	0.434	0.235	0.0177	0.0308	1.41	0.0364	0.008	0.0275
Buje Alterno	1.030	0.442	0.215	0.0193	0.0170	1.43	0.0062	0.0058	0.006
Acero DIN 20Mn V6	0.146	2.06	0.271	0.017	0.0402	0.21	0.0010	0.105	0.0205

En la Figura 35, se muestran los resultados del estudio espectrometría, en el eje x se indica los elementos de aleación con el número 1 al C, con el número 2 al Mn, con el número 3 al Si, con el número 4 al P, con el número 5 al S, con el número 6 al Cr, con el número 7 al Mo, con el número 8 al V y con el número 9 al Al. Los puntos de la gráfica de negro corresponden a los elementos de aleación del acero DIN 20 Mn V6 en estado de suministro, los puntos de color azul corresponden a los elementos de aleación del buje original y los puntos de color rojo corresponde a los elementos de aleación del buje alterno.

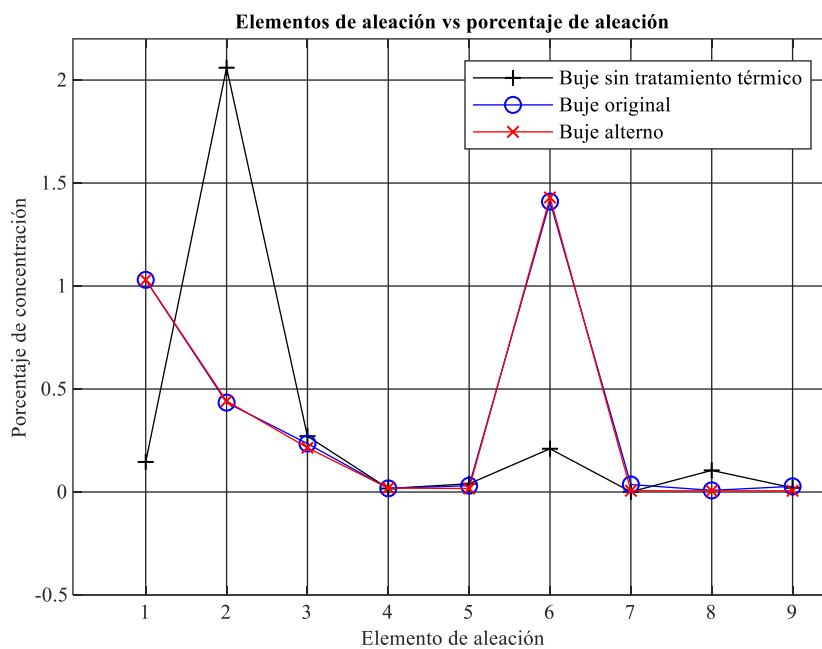


Figura 35. Comparación de los elementos de aleación del buje original, del buje alterno y del acero Din 20Mn V6.

En la Figura 35, podemos observar que el contenido de carbono (punto 1) es similar en el buje original con en el alterno, mientras que el acero DIN 20 Mn V6 presenta un contenido de 0.14 % de carbono una diferencia de 0.84 por ciento de carbono. En elementos con el Si, P, S, Mo, V, Al, se obtienen valores similares en porcentajes de concentración en el acero DIN 20Mn V6 se puede apreciar un ligero incremento en el porcentaje de aleación del vanadio elemento que permite incrementar la resistencia y la tenacidad.

El elemento que mayor concentración de aleación presenta en el buje original y alternos es el cromo con un valor de 1.4 en porcentaje de concentración, mientras que en el buje de acero DIN 20 Mn V6 se tiene una concentración de 0.21 por ciento, el cromo en los aceros permite incrementar la capa dura, incrementa la resistencia al desgaste y la corrosión.

6.4 Resultados del ensayo no destructivo por tintas penetrantes.

Con el ensayo no destructivo por de tintas penetrantes se encontraron dos fisuras en la superficie interna y una fisura en la superficie externa a lo largo del buje, en la figura 36 se pueden apreciar los resultados del estudio.

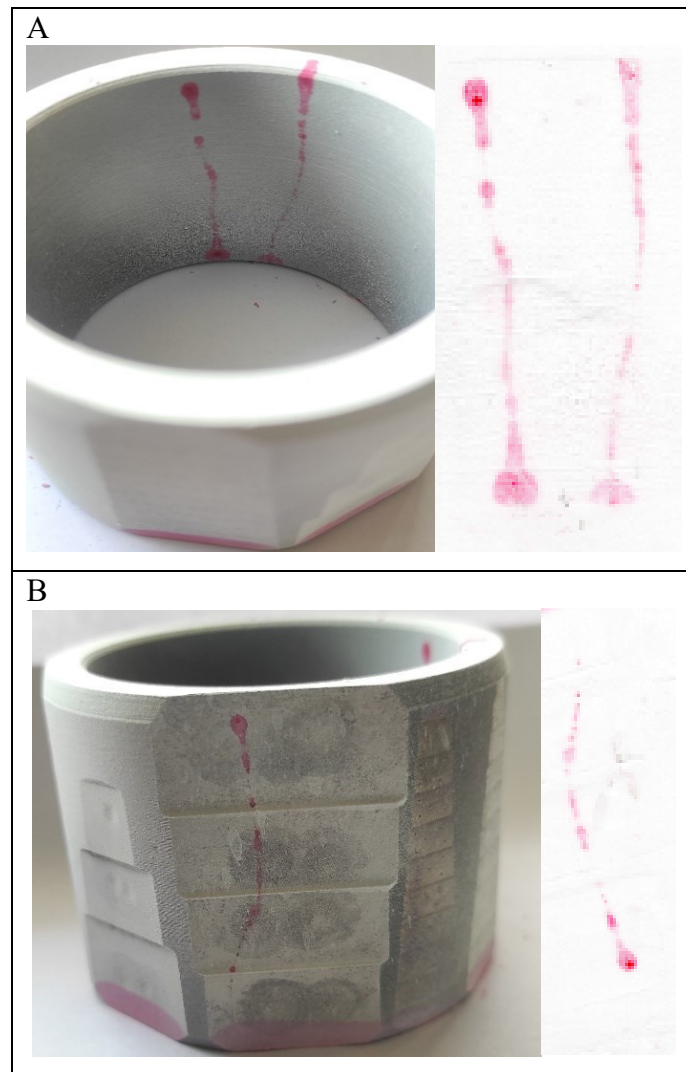


Figura 36. A; Fisuras en la superficie interna del buje. B; Fisura en la superficie externa del buje.

Las fisuras se deben a que el tratamiento térmico se lo realizó a un par de tiempo y temperatura extremo de 1050°C de exposición y a un tiempo de exposición de 4 horas y 30 minutos. Obteniendo de esta forma un rango de temperaturas y tiempos máximo para ejecutar el tratamiento térmico.

6.5 Resultados del estudio de nitruración.

El estudio se realizó en el acero SAE 4140 con un 0.41 por ciento en contenido de carbono en su estado de suministro, la nitruración en baño de sales por medio de difusión de nitrógeno el cual forma compuestos con elementos de aleación del acero obteniendo elementos como nitruros de hierro, nitruros de cromo, nitruros de tungsteno que forman una capa altamente resistente al desgaste y a la corrosión. El proceso de nitrurado se lo

realiza a una temperatura de 580 °C por un tiempo de 6 horas. La capa nitrurada tiene un espesor de aproximado de 50 micras con una dureza superficial de 60 HRC. En la Figura 37 se indica la variación del contenido de carbono del buje nitrurado.

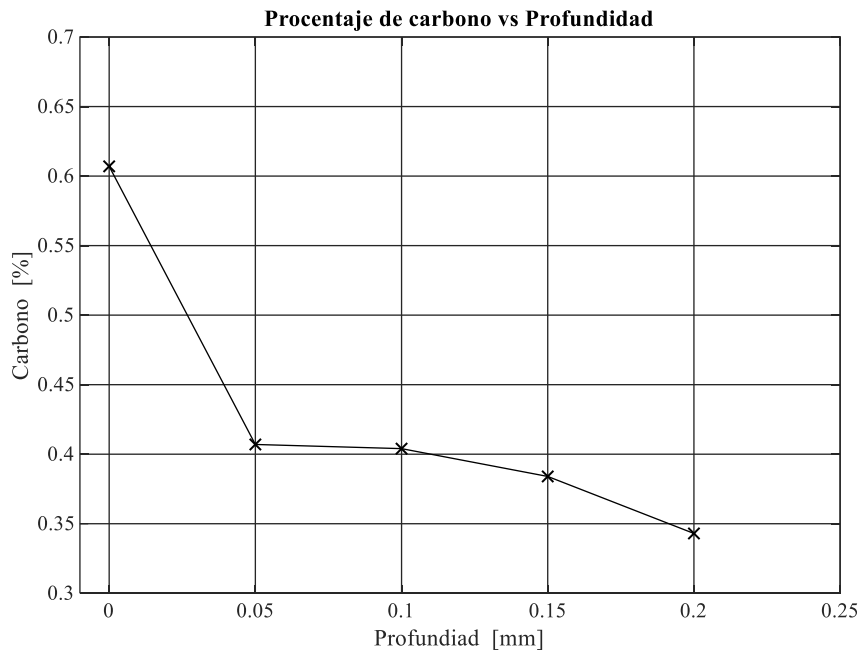


Figura 37. Variación del contenido de carbono del buje nitrurado.

En la Figura 36, podemos observar en la superficie un incremento del porcentaje de carbono de 0.607, a una profundidad de 0.05 mm decrece el porcentaje de carbono hasta un valor de 0.41 % esto se debe a que la nitruración se lo realiza a una temperatura máxima de 580 ° C.

6.6 Análisis técnico-económico del proceso de manufactura.

En las Tablas 28 - 32 se presenta el análisis de precios unitarios para el proceso de fabricación de bujes empleando una utilidad de 20 %, para el mecanizado de los bujes, caja de cementación, manta cerámica y tratamiento térmico. Analizando equipos y herramientas, materiales, transporte y mano de obra.

Tabla 28. Análisis de precios unitarios del “Buje”.

EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	Tarifa Hora B	Rendimiento Horas/U	Costo Total D=A*B*C	
Herramienta menor	3%MO			0,30	
Torno	1	5,00	4	20,00	
Insertos de carburo	1	12,00	0,16	1,92	
Cuchilla HSS de corte	1	60,00	0,05	3,00	
PARCIAL M				25,22	
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Precio/U	Costo Total C=A*B	
Acero DIN 20 Mn V6	cm	20,00	1,04	20,83	
PARCIAL N				20,83	
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Tarifa/U B	Distancia C	Costo Total D=A*B*C
Transporte	U	1	3,50	1	3,50
PARCIAL O				3,50	
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	S.R.H. B	RENDIMIENTO HORAS/U	COSTO TOTAL D=A*B*C	
Tornero	1	2,50	4	10,00	
PARCIAL P				10,00	
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)				59,55	
INDIRECTOS Y UTILIDAD			20,00%	11,91	
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO				71,46	

Tabla 29. Análisis de precios unitarios de la “Caja de cementación”.

EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	Tarifa Hora B	Rendimiento Horas/U	Costo Total $D=A*B*C$	
Herramienta menor	3%MO			0,10	
Soldadora	1	4,00	1	4,00	
Amoladora	1	2,00	1	2,00	
PARCIAL M				6,10	
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Precio/U	Costo Total $C=A*B$	
Plancha de acero A36	m2	0,20	193,00	38,60	
PARCIAL N				38,60	
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Tarifa/U B	Distancia C	Costo Total $D=A*B*C$
Transporte	u	1	5	1	3,5
PARCIAL O				3,50	
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	S.R.H. B	Rendimiento Horas/U	Costo Total $D=A*B*C$	
Soldador	1	2,71	0,5	1,355	
Ayudante mecánico	1	2,59	0,8	2,072	
PARCIAL P				3,43	
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)				51,63	
INDIRECTOS Y UTILIDAD			20,00%	10,33	
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO				61,96	

Tabla 30. Análisis de precios unitarios de la “Manta cerámica”.

EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	Tarifa Hora B	Rendimiento Horas/U	Costo Total D=A*B*C	
Herramienta menor	3%MO			0,02	
PARCIAL M				0,02	
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Precio/U	Costo Total C=A*B	
Manta cerámica	m	0,02	140	2,80	
PARCIAL N				2,80	
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Tarifa/U B	Distancia C	Costo Total D=A*B*C
Transporte	u	1	5	1	3,5
PARCIAL O				3,50	
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	S.R.H. B	Rendimiento Horas/U	Costo Total D=A*B*C	
Ayudante	1	2,71	0,3	0,813	
PARCIAL P				0,81	
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)				7,14	
INDIRECTOS Y UTILIDAD			20,00%	1,43	
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO 				8,56	

Tabla 31. Análisis de precios unitarios del “Tratamiento térmico”.

EQUIPO Y HERRAMIENTA						
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	Tarifa Hora B	Rendimiento Horas/U	Costo Total D=A*B*C		
Herramienta menor	3%MO					0,02
Horno de tratamientos térmicos	1	6,50	4,5			29,25
PARCIAL M						29,27
TRANSPORTE						
DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad A	Tarifa/U B	Distancia	C	Costo Total D=A*B*C
Transporte	u	1	5	1		3,5
PARCIAL O						3,50
MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	Cantidad A	S.R.H. B	Rendimiento Horas/U	Costo Total D=A*B*C		
Ayudante mecánico	2	2,71	0,3			0,813
PARCIAL P						0,81
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)						33,59
INDIRECTOS Y UTILIDAD				20,00%		6,72
COSTO TOTAL DEL RUBRO						
VALOR PROPUESTO						40,30

En la tabla 33 se indican los costos totales del proceso de manufactura para la fabricación de bujes con un tratamiento térmico para los 4 bujes es el costo total es 182.29 dólares americanos el costo individual de cada buje es de 45.57. El precio del buje tiene un incremento de 15.57 dólares en comparación con el buje que actualmente se fabrica TMG. En comparación con los bujes originales y el buje de estudio se obtiene una diferencia de 1,43 dólares. Comparando el precio del buje de estudio con el precio del buje alterno es obtiene una diferencia de 20.57 dólares americanos.

Tabla 32. Costo total del proceso de fabricación de bujes.

ANÁLISIS DE COSTOS TOTALES					
PROYECTO: Proceso de fabricación de bujes.					
N.º	Descripción	Unid.	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1	Buje	u	1	71,46	71,46
2	Caja de cementación	u	1	61,96	61,96
3	Manta cerámica	u	1	8,56	8,56
4	Tratamientos térmicos	u	1	40,30	40,30
TOTAL					182,29

En la tabla 33, se indica los porcentajes de variación de los bujes original, alterno, el fabricado por (TMG) y la propuesta del buje con base en este estudio, el buje original presenta un incremento de 3.13 % en el costo en relación al propuesto, el buje alterno reduce su costo en un valor de menos 45.13 % y el buje que se fabrica en la actualidad en TMG tiene un costo en relación a un porcentaje menor al propuesto en este estudio de menos 34.16 %.

El buje propuesto en este estudio representa una ventaja para TMG debido a que se pueden fabricar bujes personalizados en cuanto a dimensiones y tratamiento térmico, optimizando recursos (tiempo y materiales), teniendo en cuenta que el proceso para colocar bujes estándar implica soldadura de relleno y mecanizado a la medida del buje.

Tabla 33. Análisis comparativo de los bujes.

	Buje de estudio	Buje original	Buje alterno	Buje fabricado (TMG)
Costo [\$]	45.57	47.00	25.00	30.00
Porcentaje de variación		+ 3.13 %	- 45.13 %	- 34.16 %

7 CONCLUSIONES.

Se observó que efectivamente si existe una concentración de esfuerzos en los bujes situados en el punto A y se verificó que los esfuerzos analíticos de compresión (467.2 MPa) y simulado de compresión (454.3 MPa) y como Von Mises respectivamente, están por debajo del límite de elasticidad 200 GPa del acero en estado de suministro DIN 20 MN V6. Cumpliendo con el objetivo de demostrar un esfuerzo máximo existente en los bujes situados en el punto A.

Para la selección de la materia prima aplicamos un criterio Savage eligiendo el acero DIN 20 MN V6, que permite tener menores costos de oportunidad en mecanizados por su forma de suministro en barra perforada y dimensiones en stock.

Para la selección del tratamiento térmico, aplicamos un criterio de valor esperado, donde las ponderaciones máximas se concentran en la dureza y capa endurecida. La cementación con un puntaje de 33.4 y la nitruración con 33.3, eligiendo como tratamiento de estudio la Cementación la cual permite obtener la dureza requerida en un porcentaje de capa cementada.

Los parámetros para obtener bujes sometidos a un tratamiento térmico de cementación – temple son la temperatura de $1050 \text{ }^\circ \text{C}$ por un tiempo de 4 horas 30 minutos y un tratamiento térmico de revenido a una temperatura de $250 \text{ }^\circ \text{C}$ con un tiempo de permanencia de 2 horas obteniendo una dureza de 59 HRC en la superficie del buje.

El buje cementado presenta una capa endurecida mayor a 0.5 % de carbono hasta una profundidad de 1.5 mm con una dureza promedio de 54 HRC, en la superficie se obtuvo una dureza 59 HRC con un contenido de carbono de 1.54 % de carbono, estos valores son ideales para el trabajo al que están destinados ya que el buje va a estar en contacto con un eje tratado térmicamente que tiene una dureza superficial de 56 HRC.

Precio del buje de estudio tiene un costo de total de 45,57 dólares americanos se incrementa de un 52 % en comparación con el buje fabricado actualmente en el TMG, mientras que el costo en comparación con el buje alternativo se incrementa un 82 % y costo del buje en comparación con el buje original se reduce 4 por ciento.

La implementación de una línea de fabricación para bujes personalizados debe estar enfocada en la reducción de tiempos de mecanizado y del proceso del tratamiento térmico para de esta manera obtener bujes que su precio pueda mantenerse en valores comerciales.

8 RECOMENDACIONES

Para venideras investigaciones realizar un estudio sobre impacto, para determinar que esfuerzos genera y actúan en los bujes, adema realizar estudios sobre la vida útil del buje.

Debido a una fisura encontrada en el buje cuando se rectificaba escalonadamente para medir la dureza. Es necesario un estudio sacrificando el tiempo a menor temperatura para una segunda fase. Los pares de tiempos y temperaturas del buje no deben exceder los 1050 ° C y 4 h 30 min para evitar las fisuras en el buje.

9 REFERENCIAS

- [1] Caterpillar, «Cat 416F2 Retroexcavadora cargadora». ©2014 Caterpillar.
- [2] I. Molina y D. Vilaña, «SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CONTACTO ENTRE SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO PARA PREDICCIÓN DE DESGASTE EN COJINETES DE FRICCIÓN DE ALEACIÓN DE ALUMINIO», Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.
- [3] N. Farzaneh, «Failure Analysis and Design of a Heavily Loaded Pin Joint», Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [4] C. Li, «Wear and Wear Mechanism», *Surface Engineering*. http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_and_wear_mechanism.htm (accedido jul. 27, 2020).
- [5] W. P. Castillo Herrera y O. G. Toapanta Cunalata, *Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica*, 1.ª ed. Editorial Científica 3Ciencias, 2019.
- [6] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 8a ed. McGraw-Hill, 2008.
- [7] M. G. Palafox, «Modelación de la carburización y temple en aceros», Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 1996.
- [8] M. Gualoto y J. Panchi, «DETERMINACIÓN DE DUREZA EN EL MATERIAL AISI 5115 SOMETIDO A TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO Y NITRURADO.», Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2019.
- [9] M. Gualoto y J. Panchi, «Determinación de dureza en el material AISI 5115 sometido a tratamiento térmico de cementado y nitrurado.», Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2019.
- [10] P. Molera, *Tratamientos térmicos de los metales*. 1991.

10 ANEXOS

Anexo 1. Descripción de la placa de mecanizado.

IDENTIFICACIÓN

Simbolo	Forma de placa
H	Hexagonal
O	Octagonal
P	Pentagonal
S	Escuadra
T	Triangular
C	Rómbica 80°
D	Rómbica 55°
E	Rómbica 75°
F	Rómbica 50°
M	Rómbica 86°
V	Rómbica 35°
W	Trigona
L	Rectangular
A	Paralelogramo 85°
B	Paralelogramo 82°
K	Paralelogramo 55°
R	Redonda
X	Diseño especial

c Símbolos según tolerancias						
Simbolo	Tolerancia cota m (mm)	Tolerancia del círculo inscrito øD1 (mm)	Tolerancia de espesor S1 (mm)	Detalles de tolerancia en placas clase "M"		
				● Tolerancia cota m (mm)		
D.I.C.	Triangular	Escuadra	Rómbica 80°	Rómbica 55°	Rómbica 35°	Redonda
6.35	e 0.08	e 0.08	e 0.08	e 0.11	e 0.16	—
9.525	e 0.08	e 0.08	e 0.08	e 0.11	e 0.16	—
12.70	e 0.13	e 0.13	e 0.13	e 0.15	—	—
15.875	e 0.15	e 0.15	e 0.15	e 0.18	—	—
19.05	e 0.15	e 0.15	e 0.15	e 0.18	—	—
25.40	—	e 0.18	—	—	—	—
31.75	—	e 0.20	—	—	—	—
				● Tolerancia del círculo inscrito (mm)		
D.I.C.	Triangular	Escuadra	Rómbica 80°	Rómbica 55°	Rómbica 35°	Redonda
6.35	e 0.05	e 0.05	e 0.05	e 0.05	e 0.05	—
9.525	e 0.05	e 0.05	e 0.05	e 0.05	e 0.05	e 0.05
12.70	e 0.08	e 0.08	e 0.08	e 0.08	—	e 0.08
15.875	e 0.10	e 0.10	e 0.10	e 0.10	—	e 0.10
19.05	e 0.10	e 0.10	e 0.10	e 0.10	—	e 0.10
25.40	—	e 0.13	—	—	—	e 0.13
31.75	—	e 0.15	—	—	—	e 0.15


z Símbolos para tipo de placa				c Símbolos según tolerancias			
C	N	M	G	C	N	M	G

x Símbolos según ángulo de incidencias	
Simbolo	Ángulo de incidencia
A	3°
B	5°
C	7°
D	15°
E	20°
F	25°
G	30°
N	0°
P	11°
O	Otros ángulos de incidencia
	Mayor ángulo de incidencia

v Símbolos según fijación y rompevirutas									
Métrica									
Simbolo	Agujero	Configuración Agujero	Viruta Rompevirutas	Figura	Simbolo	Agujero	Configuración Agujero	Viruta Rompevirutas	Figura
W	Con agujero	Agujero cilíndrico + Avellanado (40-60°)	No		A	Con agujero	Agujero cilíndrico	No	
T	Con agujero	Agujero cilíndrico + Avellanado (40-60°)	Una cara		M	Con agujero	Agujero cilíndrico	Una cara	
Q	Con agujero	Agujero cilíndrico + Cilíndrico cónico dos caras (40-60°)	No		G	Con agujero	Agujero cilíndrico	Doble cara	
U	Con agujero	Agujero cilíndrico + Cilíndrico cónico dos caras (40-60°)	Doble cara		N	Sin agujero	—	No	
B	Con agujero	Agujero cilíndrico + Avellanado (70-90°)	No		R	Sin agujero	—	Una cara	
H	Con agujero	Agujero cilíndrico + Avellanado (70-90°)	Una cara		F	Sin agujero	—	Doble cara	
C	Con agujero	Agujero cilíndrico + Cilíndrico cónico dos caras (70-90°)	No		X	—	—	—	Diseño especial
J	Con agujero	Agujero cilíndrico + Cilíndrico cónico dos caras (70-90°)	Doble cara						

Símbolo							Diámetro del círculo inscrito (mm)
R	W	V	D	C	S	A	
	02		04	03	03	06	3.97
	L3	08	05	04	04	08	4.76
	03	09	06	05	05	09	5.56
06							6.00
	04	11	07	06	06	11	6.35
	05	13	09	08	07	13	7.94
08							8.00
09	06	16	11	09	09	16	9.525
10							10.00
12							12.00
12	08	22	15	12	12	22	12.70
15	10		19	16	15	27	15.875
16							16.00
19	13		23	19	19	33	19.05
20							20.00
			27	22	22	38	22.225
25							25.00
25			31	25	25	44	25.40
31			38	32	31	54	31.75
32							32.00

b Símbolos según medidas



*Espesor entre cara-base altura-filo de corte.

Símbolo	Espesor (mm)
S1	1.39
O1	1.59
T0	1.79
O2	2.38
T2	2.78
O3	3.18
T3	3.97
O4	4.76
O6	6.35
O7	7.94
O9	9.52

n Símbolos según espesor

b n /
12 04 08 (E) (N)-MP

m Símbolos para placas según radio de la punta

Símbolo	Ángulo del radio (mm)
00	Radio
V3	0.03
V5	0.05
01	0.1
02	0.2
04	0.4
08	0.8
12	1.2
16	1.6
20	2.0
24	2.4
28	2.8
32	3.2

00 : Inch
M0 : Métrica

Placa redonda

Símbolo según el filo de corte

Figura	Filo de corte	Símbolo
	Filo vivo	F
	Redonda Filo de corte	E
	Filo de corte chafanado	T
	Filo de corte redondeado y chafanado	S

Mitsubishi Materials omite el símbolo del filo de corte.

Símbolo de dirección de corte

Figura	Mano	Símbolo
	Derecha	R
	Izquierda	L
	Neutro	N

/ Símbolo para rompevirutas

LP	MP	RP
LM	MM	RM
LK	MK	RK
LS	MS	RS
FP	LP	MP
MA	SW	MW
HZ	HX	HV

IDENTIFICACIÓN

CODIGO ISO-Herramientas para mecanizado exterior

Tipo LL
 Tipo DOBLE FIJACIÓN
 Tipo WP
HERRAMIENTA DE COPIADO
 Tipo SP
 Tipo AL

D	M	C	D	R	S
Tipo Doble Fijación	Tipo Cuña / Brida Tipo Doble Fijación	Rómbica80°	Rómbica55°	Redonda	Cuadrada
P	S	T	V	W	X
Tipo de fijación por palanca	Tipo de fijación por tornillo	Triangular	Rómbica35°	Trigona	Diseño especial
z Clase de fijación		x Forma de placa			

X • Z : Diseño especial

A	B	D	E
90°	75°	45°	60°
F	G	H	J
90°	90°	107°30'	93°
K	L	N	P
75°	95°	62°30'	117°30'
Q	S	T	V
15°	45°	60°	72°30'

P	C	L	N	R	25	25	M	16
z	x	c	v	b	n	m	,	.

v Ángulo de incidencia

C	D
7°	15°
N	E
0°	20°

n, m Dimensión de la herramienta (Alto (Ht) y ancho (B)) (mm)

n	08	10	12	16	20	25	32	40
m	8	10	12	16	20	25	32	40

Longitud herramienta (L1) (mm)

D	E	F	H	K	M	N	P	R	S	T	U
60	70	80	100	125	150	160	170	200	250	300	350

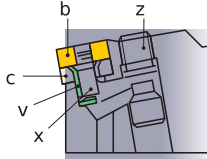
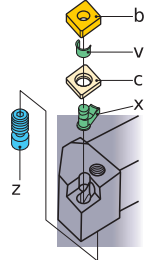
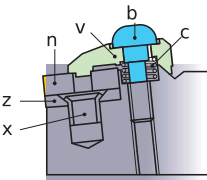
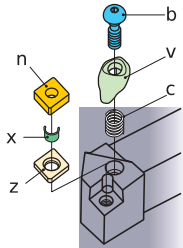
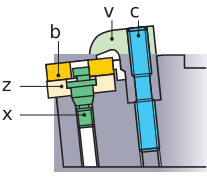
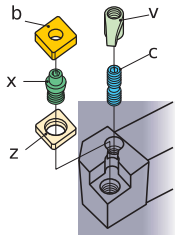
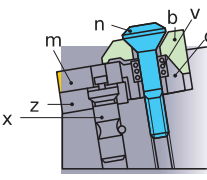
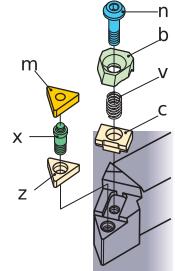
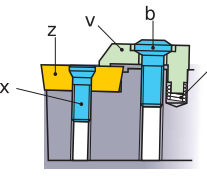
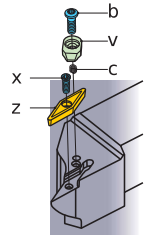
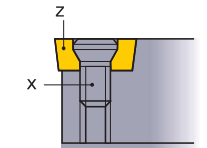
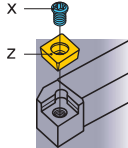
b Dirección de la herramienta

R	L	N

Tamaño de placa

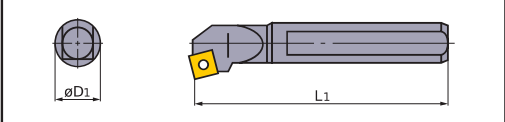
Círculo inscrito de la placa (mm)	4.76	5.56	6.35	7.94	9.525	12.7	15.875	19.05	25.4
	08	09	11	13	16	22	27	33	44
			06	07	09	12	15	19	25
			04	05	06	08	10	13	
80°					09	12	16	19	25
55°						11	15	19	23
35°			11		16				

CLASE DE FIJACIÓN

Tipo (Portaherramientas)	Estructura	
Palanca (PORTAHERRAMIENTAS LL)		<ul style="list-style-type: none"> z Tornillo x Palanca c Placa asiento v Pasador b Placas 
Doble Fijación (PORTAHERRAMIENTAS DOBLE FIJACIÓN)		<ul style="list-style-type: none"> z Placa asiento x Pasador c Muelle v Brida superior b Tornillo n Placas 
Doble Fijación (PORTAHERRAMIENTAS DOBLE FIJACIÓN) (Para corte pesado)		<ul style="list-style-type: none"> z Placa asiento x Pasador c Tornillo v Brida superior b Placas 
Cuña / Brida (PORTAHERRAMIENTAS WP)		<ul style="list-style-type: none"> z Placa asiento x Pasador c Plato v Muelle b Brida superior n Tornillo m Placas 
Dos bridas de doble fijación (HERRAMIENTA DE COPIADO)		<ul style="list-style-type: none"> z Placas x Tornillo (1) c Muelle v Brida superior b Tornillo (2) 
Por tornillo (PORTAHERRAMIENTAS SP) (PORTAHERRAMIENTAS AL)		<ul style="list-style-type: none"> z Placas x Tornillo 

IDENTIFICACIÓN

■ CODIGO ISO - Barras de mandrinar para mecanizado interior



A ● Portaherramientas con agujeros para refrigerante ● Mango de acero C ● Mango de metal duro E ● Portaherramientas con agujeros para refrigerante ● Mango de metal duro S ● Mango de acero	08	& 8	F	80
	10	&10	H	100
	12	&12	K	125
	16	&16	M	150
	20	&20	Q	180
	25	&25	R	200
	32	&32	S	250
	40	&40	T	300
	50	&50	U	350
			V	400

M	
P	
S	

z Material del mango

x Diámetro de mango &D1 (mm)

c Longitud herramienta L1 (mm)

v Clase de fijación

S_z
16_x
M_c
S_v
C_b
L_n
C_m
R
09

b Forma de placa	n Tipo herramienta	m Ángulo de incidencia	Longitud de arista de corte						
			Circulo inscrito (mm)	C	D	S	T	V	W
C	F	C							02
D	K	E							
S	L	N					09	11	L3
T	Q	P		06	07		11	11	04
V	U	Dirección de corte R L							
W	Z								
			3.97						
			4.76						
			5.56				09		
			6.35	06	07		11	11	04
			7.94	08					
			9.525	09	11	09	16	16	06
			12.70	12	15	12	22		08
			15.875	16					
			19.05	19		19			

Anexo 4. Datos del acero 20 DIN Mn V6 / EN 10294 – 1

Información general

Nuestra barra perforada proviene de las acerías más importantes de Europa principales productores de barra perforada de alta calidad.

El tubo mecánico que importamos es analizado con precisión y posee un bajo contenido de inclusiones no metálicas que permiten obtener:

- SPIRAFORT[®] se mecaniza, 2 veces más rápido que el MECAPLUS 470 (material producido por Vallourec & Mannesmann que fue reemplazado por SPIRAFORT[®]).
- Elevada resistencia a la fatiga.
- Propiedades uniformes de tratamiento térmico.
- Elevada soldabilidad.
- Bajo peso por metro.

Análisis típico %	C	Si	Mn	V	P	S	Al
SPIRAFORT [®]	0,16 - 0,22	0,10 - 0,50	1,30 - 1,70	0,08 - 0,15	≤ 0,030	0,015 - 0,050	≥ 0,010
Código de color	Verde / Blanco						

Aplicaciones

La barra perforada se puede utilizar en la fabricación de bocines, pistas, para empatar funda de eje trasero de los automotores, columnas de taladros, ejes estirados huecos, anillos, etc.

Tratamiento térmico

Normalizado: 900 - 920 °C. Enfriamiento a laire.
Alivio de tensiones: 550 - 600 °C. Mantenimiento durante 2 horas. Luego enfriamiento en el homo o al aire libre.
Temple y revenido: 900 - 920 °C en agua y luego revenido a 500 °C por una hora.
Cementación: 850 - 950 °C. Temperatura de endurecimiento 780 - 830 °C. Enfriamiento en aceite.
Dureza logradas: 58 - 60 HRC.
Revenido: Entre 150 y 200 °C.

Propiedades mecánicas

Diámetro, mm	
Esfuerzo de cedencia (kg/mm ²)	40 - 47
Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	66 - 81
Elongación, longitudinal, %	215
Dureza (HB)	

4140 tipo 7 (Barra perforada)

Diámetro exterior x interior (mm)	Peso (kg/m)
120 x 43	91,3
141 x 75	103,7
171 x 69	178,1

Medidas en stock

Barra Perforada

Diámetro (mm) exterior x interior	Peso (kg/m)	Diámetro (mm) exterior x interior	Peso (kg/m)	Diámetro (mm) exterior x interior	Peso (kg/m)	Diámetro (mm) exterior x interior	Peso (kg/m)
30 x 15	5,3	70 x 45	20,9	100 x 60	46,6	140 x 105	62,4
30 x 20	3,9	75 x 45	26,2	100 x 65	42,0	140 x 75	101,7
35 x 20	6,5	75 x 50	22,7	100 x 80	26,2	150 x 85	111,2
40 x 20	9,4	75 x 60	14,7	105 x 55	58,2	160 x 95	120,6
40 x 25	7,7	80 x 40	34,9	105 x 65	49,5	170 x 125	96,6
45 x 30	8,8	80 x 45	31,8	110 x 60	61,9	180 x 130	112,8
50 x 30	12,6	80 x 50	28,4	110 x 80	41,5	190 x 100	189,9
50 x 35	10,0	85 x 45	37,8	110 x 90	29,1	200 x 150	127,4
55 x 30	16,7	85 x 50	34,4	115 x 65	65,5	210 x 170	119,4
55 x 40	11,2	85 x 55	30,6	115 x 80	49,7	230 x 190	132,0
60 x 35	17,3	90 x 50	40,8	120 x 70	69,1	250 x 150	314,3
60 x 40	14,6	90 x 55	36,9	125 x 70	78,0	250 x 170	264,0
65 x 35	21,8	95 x 50	47,5	125 x 90	54,8	250 x 190	207,4
65 x 40	19,1	95 x 55	43,7	130 x 110	34,9		
70 x 40	24,0	95 x 60	39,5	130 x 75	82,1		