

**DESARROLLO DEL PROCESO DE REINGENIERÍA PARA LA MANUFACTURA
DE LA BIELA DE UN MOTOR DE DOS TIEMPOS DE PEQUEÑA CILINDRADA
DE APLICACIÓN AGRÍCOLA**

**JOSÉ HERNANDO VILLAMIZAR VILLAMIZAR
FABIÁN ANDRÉS LIZCANO VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DESARROLLO DEL PROCESO DE REINGENIERÍA PARA LA MANUFACTURA
DE LA BIELA DE UN MOTOR DE DOS TIEMPOS DE PEQUEÑA CILINDRADA
DE APLICACIÓN AGRÍCOLA**

JOSÉ HERNANDO VILLAMIZAR VILLAMIZAR

FABIÁN ANDRÉS LIZCANO VILLAMIZAR

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director:

Ph. D. JORGE LUIS CHACÓN VELASCO

Co-Director:

Ms. C. RICARDO ALFONSO JAIMES ROLÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

...al Ingeniero de ingenieros...

Soli Deo Gloria

AGRADECIMIENTOS

“Toda nuestra vida es de gracia, nosotros vivimos, respiramos y hacemos lo que hacemos porque Dios nos capacita para hacerlo.” Por tanto, todo en esta vida debe agradecerse: cada oportunidad, cada consejo, cada regaño, cada caída, cada amigo, cada profesor, cada familiar, cada amanecer...

Muchas gracias a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación, desde los más cercanos, nuestros padres, amigos y compañeros hasta los más lejanos, como los técnicos, ingenieros y gerentes de cada empresa que colaboraron en la realización de este encargo.

Al profesor Jorge Luis Chacón, director del proyecto por la confianza depositada, su disposición, colaboración y apoyo en la ejecución de esta empresa investigativa. A la profesora Luz Amparo Quintero Ortiz y los profesores Ricardo Jaimes y Omar Armando Gélvez además a los ingenieros Gustavo Adolfo Mutis y Giovani Arturo Parra por su asistencia, acompañamiento y sabios consejos.

A la Universidad Industrial de Santander, entidad estatal precursora de la formación profesional y de excelencia académica pero sobretodo ¡Gracias a Dios! “...Porque de Él, y por Él, y para Él, son todas las cosas. A Él sea la gloria por los siglos. Amén.”

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
1. OBJETIVOS INVESTIGACIÓN	21
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIELA	23
2.1 GENERALIDADES	23
2.2 ESPECIFICACIONES MOTOR SHINDAIWA S450EC1	26
2.3 METROLOGIA BIELA MOTOR SHINDAIWA S450EC1	27
2.4 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	39
2.4.1 Ensayo de tintas penetrantes.	40
2.4.2 Ensayo de partículas magnéticas.....	44
2.4.3 Ensayo de radiografía industrial.	46
2.4.4 Exploración superficial por microscopio 3D.....	49
2.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS	51
2.5.1 Ensayo Metalográfico.	53
2.5.1.1 Examen macrográfico.....	53
2.5.1.2 Examen micrográfico.....	57
2.5.2 Ensayo de dureza y microdureza.....	61
2.5.3 Ensayo de compresión.....	68
2.5.4 Ensayo de composición química del acero por la técnica de chispa.	73
2.6 ANÁLISIS SECCIÓN TRANSVERSAL BIELA.....	77
2.7 INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA BIELA	86
3. PROCESO DE DISEÑO BIELA	92
3.1 ANÁLISIS DEL CICLO TERMODINAMICO	93
3.1.1 Temperatura de admisión.	95
3.1.2 Presión de compresión.....	96

3.1.3	Temperatura de compresión.....	98
3.1.4	Temperatura de explosión.....	98
3.1.5	Presión de explosión.....	99
3.2	GENERALIDADES DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA.....	101
3.2.1	Cinemática del mecanismo Manivela-Biela-Corredera.....	101
3.2.2	Cinética del mecanismo manivela-biela-corredera.....	109
3.3	FUERZAS DE INERCIA DEBIDO A MASAS OSCILANTES Y ROTATIVAS.....	111
3.3.1	Modelo dinámico equivalente para la biela.....	113
3.3.2	Modelo dinámico equivalente para el cigüeñal.....	114
3.4	FUERZA MÁXIMA DEL MECANISMO CIGÜEÑAL-BIELA-ÉMBOLO.....	121
3.5	DISEÑO DE LA BIELA PROTOTIPO MEDIANTE SOFTWARE CAD.....	125
3.6	ANÁLISIS BIELA ORIGINAL Y PROTOTIPO POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	134
3.6.1	Modelo CAD biela original.....	135
3.6.2	Mallado del modelo.....	137
3.7	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	143
3.8	SIMULACIONES APLICADAS AL MODELO CAD PROTOTIPO BIELA.....	147
3.9	ANÁLISIS DE FATIGA PROTOTIPO BIELA.....	152
4.	PROCESO DE MANUFACTURA PROTOTIPO BIELA.....	163
4.1	SELECCIÓN DE LOS METODOS DE MANUFACTURA DE LA BIELA.....	166
4.2	FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS.....	181
4.2.1	Selección de la materia prima.....	182
4.2.2	Proceso básico de manufactura.....	184
4.2.3	Proceso para el mejoramiento de las propiedades.....	188
4.2.4	Operaciones de acabado.....	191
4.2.5	Proceso secundario de manufactura.....	194
4.3	COMPROBACIÓN DE DIMENSIONES Y PROPIEDADES FÍSICAS BIELA PROTOTIPO.....	211
4.4	PRUEBA DE INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO.....	221
5.	DOCUMENTACION MANUFACTURA BIELA.....	230
5.1	COMPRA DE MATERIA PRIMA.....	240

5.2 CORTE POR CHORRO DE AGUA.....	242
5.3 TRATAMIENTO TÉRMICO.....	243
5.4 RECUBRIMIENTO.....	244
5.5 RECTIFICADO.....	245
5.6 CONTROL DE CALIDAD.....	247
6. CONCLUSIONES.....	268
7. RECOMENDACIONES.....	270
BIBLIOGRAFÍA.....	271
ANEXOS.....	273

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de ingeniería inversa aplicado en la presente investigación.	25
Figura 2. Partes y dimensiones fundamentales de la biela.....	28
Figura 3. Metrología biela original.	29
Figura 4. Biela motor Shindaiwa S450EC1.	30
Figura 5. Imagen modelo CAD biela motor Shindaiwa.	31
Figura 6. Montaje medición centro de gravedad biela.	32
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre biela.	33
Figura 8. Vista frontal experimento.	34
Figura 9. Variables de un disco que rueda por un plano inclinado.	35
Figura 10. Rugosidad diámetro interno biela.....	38
Figura 11. Líquidos MAGNAFLUX limpiador, penetrante y revelador.....	41
Figura 12. Procedimiento para aplicación de tintas penetrantes.	42
Figura 13. Resultados del ensayo de líquidos o tintas penetrantes sobre la biela.	42
Figura 14. Resultado ensayo de tintas penetrantes fluorescentes (bajo luz UV).	44
Figura 15. Procedimiento para aplicación de partículas magnéticas.	45
Figura 16. Resultados del ensayo de partículas magnéticas.....	45
Figura 17. Procedimiento para aplicación de partículas magnéticas.	47
Figura 18. Montaje de la prueba.	48
Figura 19. Radiografía de la biela.	48
Figura 20. Imágenes de la superficie de la biela a 280X de aumento.	50
Figura 21. Ensayos destructivos aplicados a la biela original.....	52
Figura 22. Biela seccionada transversalmente.....	54
Figura 23. Segmento transversal del cuerpo de la biela en baquelita.	55
Figura 24. Segmento del cuerpo de la biela visto bajo el estereoscopio Olympus.	56
Figura 25. Segmento de la cabeza de la biela visto bajo el estereoscopio Olympus.	56
Figura 26. Procedimiento ensayo metalográfico.	57
Figura 27. Probeta cuerpo biela vista a 1000X, ataque NITAL.....	58
Figura 28. Probeta cabeza biela vista a 200X, ataque NITAL, zona de transición.....	59
Figura 29. Probeta cabeza biela 500X, ataque NITAL. Centro.....	60
Figura 30. Probeta cabeza biela 500X, ataque NITAL. Borde.....	60
Figura 31. Espesor del recubrimiento visto bajo el microscopio.	61
Figura 32. Pantalla de visualización software INNOVAVIEW VECTOR.	65
Figura 33. Perfil de dureza cabeza de la biela.	67
Figura 34. Biela cortada para ensayo de compresión junto con sus dos apoyos.....	69
Figura 35. Biela puesta sobre los dos apoyos lista para ensayo de compresión.	70
Figura 36. Mordazas de la maquina MTS de ensayos universales.....	70

Figura 37. Diagrama fuerza contra desplazamiento ensayo compresión biela.	72
Figura 38. Estado final de la biela luego de aplicar el ensayo de compresión.	72
Figura 39. Composición química aceros al cromo según designación AISI.	75
Figura 40. Propiedades físicas de los aceros AISI/SAE 5120.	76
Figura 41. Aplicación de fuerzas sobre la biela.	79
Figura 42. Tipos de apoyos para columnas.	79
Figura 43. Tabla de longitudes equivalentes para análisis de columnas.	80
Figura 44. Sección transversal biela original.	80
Figura 45. Falla de la biela por pandeo luego de la aplicación de la carga.	85
Figura 46. Pendiente curva fuerza contra desplazamiento.	85
Figura 47. Imagen de ambas bielas usadas en la presente investigación.	87
Figura 48. Secuencia típica de procesos requeridos en la fabricación de piezas.	89
Figura 49. Secuencia de procesos aplicados en la manufactura de la biela original.	90
Figura 50. Requerimientos de diseño biela.	92
Figura 51. Cálculos fundamentales aplicados al diseño.	93
Figura 52. Ciclo ideal presión-volumen para motores de dos tiempos.	94
Figura 53. Diagrama geométrico mecanismo Cigüeñal-Biela-Émbolo.	102
Figura 54. Pantallazo hoja de cálculos de Microsoft Excel®.	107
Figura 55. Posición del émbolo.	107
Figura 56. Velocidad del émbolo.	108
Figura 57. Aceleración del émbolo.	108
Figura 58. Presión relativa contra volumen relativo.	109
Figura 59. Presión de los gases contra volumen.	110
Figura 60. Fuerza de presión de los gases.	111
Figura 61. Requerimientos para un modelo dinámicamente equivalente.	112
Figura 62. Geometría mecanismo Manivela-Biela-Corredera.	112
Figura 63. Modelo dinámico biela.	113
Figura 64. Modelo dinámico cigüeñal.	116
Figura 65. Comportamiento dinámico de la fuerza en el émbolo a diferentes r.p.m.	117
Figura 66. Fuerza que siente el pie de la biela a distintas velocidades.	119
Figura 67. Fuerza que siente la cabeza de la biela a distintas velocidades.	120
Figura 68. Fuerza en el pie de la biela en la dirección axial.	120
Figura 69. Efecto de la fuerza en la cabeza de la biela.	121
Figura 70. Esquema simplificado del mecanismo Cigüeñal-Biela-Émbolo.	122
Figura 71. Diagrama de flujo proceso de diseño.	126
Figura 72. Sección transversal biela.	127
Figura 73. Perfil geométrico de la biela original.	129
Figura 74. Primera propuesta de diseño del perfil geométrico biela.	129
Figura 75. Segunda propuesta de diseño del perfil geométrico biela.	130
Figura 76. Análisis de deformación del perfil.	131
Figura 77. Iteraciones en base al diseño del perfil geométrico de la biela.	132
Figura 78. Proceso de análisis FEM aplicado a la caracterización y al diseño.	135

Figura 79. Modelo CAD - 3D biela original.....	136
Figura 80. Propiedades físicas y geométricas modelo CAD.....	136
Figura 81. Mallado típico de un elemento mecánico.	138
Figura 82. Curva convergencia esfuerzo contra número elementos finitos.	140
Figura 83. Modelo CAD simplificado de la biela original.....	141
Figura 84. Mallado del modelo CAD simplificado de la biela original.....	141
Figura 85. Máximo esfuerzo Von Mises simulación estudio estático biela original.	142
Figura 86. Resultado simulación pandeo modelo CAD simplificado.....	143
Figura 87. Comparación de la simulación y ensayo de compresión biela original.	146
Figura 88. Mallado del modelo CAD simplificado de la biela prototipo.	147
Figura 89. Solución malla planteada.	148
Figura 90. Curva resultante de los datos de simulación biela prototipo.....	149
Figura 91. Resultado simulación prototipo biela por pandeo.....	150
Figura 92. Superposición y alineación de los datos de ensayos de compresión.	151
Figura 93. Falla común en bielas de motores de guadañadora.....	152
Figura 94. Eliminación de concentradores de tensión.....	155
Figura 95. Carga cíclica que experimenta la biela en su trabajo en el motor.....	157
Figura 96. Diagrama S-N para la biela prototipo.	160
Figura 97. Curva de fatiga construida para ciclos de vida infinitos.	161
Figura 98. Factor de seguridad por fatiga del modelo CAD.....	162
Figura 99. Total ciclos de vida soportados a fatiga por el modelo CAD.....	162
Figura 100. Maquina FLOW MACH 3 de corte en frio por chorro de agua.	169
Figura 101. Costo relativo entre la forja y la fundición.....	170
Figura 102. Costo relativo forjado por número de piezas.....	171
Figura 103. Esquema tiempo de respuesta (takt time) línea de producción.	173
Figura 104. Partes principales de un molde en arena.	175
Figura 105. Montaje utilizado en fundición de bielas.....	175
Figura 106. Costos relativos fundición.	176
Figura 107. Lista de precios empresa METALGREEN S.A.S.....	177
Figura 108. Ficha técnica acero anti-desgaste (ver anexos).	183
Figura 109. Ficha técnica acero AISI 4140.	184
Figura 110. Esquema del proceso de maquinado por chorro de agua.	185
Figura 111. Esquema prototipo biela.	186
Figura 112. Resultado final corte chorro de agua prototipos biela.....	187
Figura 113. Tratamiento térmico típico de temple.	189
Figura 114. Dureza del acero al carbono en función del contenido de carbono.	190
Figura 115. Resultado final cementación y temple localizados.	191
Figura 116. Esquema del proceso de electrodeposición.	193
Figura 117. Resultado final recubrimiento biela.	194
Figura 118. Resultado final rectificación alojamientos biela.	195
Figura 119. Resultado final rectificación cabeza y pie de biela prototipo.....	197
Figura 120. Proceso de torneado (a) y taladrado (b).....	198

Figura 121. Herramienta de una sola punta (a) y de múltiples filis (b).....	199
Figura 122. Velocidad de corte, avance y profundidad de corte en el torneado.	200
Figura 123. Temperaturas de corte medidas experimentalmente.....	201
Figura 124. Dureza de varios materiales para herramientas de corte.	203
Figura 125. Geometría estándar broca helicoidal.....	204
Figura 126. Agujero pasante.....	205
Figura 127. Perforado, operación diferente al torneado realizada en el torno.	209
Figura 128. Barra perforadora hecha de carburo cementado (WC-Co).....	209
Figura 129. Tolerancias dimensionales en diversos procesos de mecanizado.....	211
Figura 130. Procedimientos aplicados para comprobación prototipo biela.	212
Figura 131. Biela prototipo deformada luego del ensayo de compresión aplicado.	213
Figura 132. Resultado ensayo compresión fuerza-desplazamiento prototipo biela.	214
Figura 133. Curvas de simulación y ensayo de compresión biela prototipo.	218
Figura 134. Resultados ensayo dureza prototipo biela.....	219
Figura 135. Resultados metrología prototipo biela.	220
Figura 136. Prototipo biela con sus respectivos rodamientos.....	222
Figura 137. Montaje y balanceo prototipo biela en cigüeñal.....	222
Figura 138. Motor en el que se instaló la biela.....	223
Figura 139. Motor en el que se instaló la biela, sin cubierta.	224
Figura 140. Motor de prueba sin culata, junto a él la biela prototipo y el cigüeñal.	225
Figura 141. Instalación biela en el motor.....	226
Figura 142. Instalación émbolo.	226
Figura 143. Motor ensamblado con el prototipo de biela.	227
Figura 144. Maleza sobre el andén de una calle del centro de Bucaramanga.....	228
Figura 145. Instalación caña de corte en el motor.....	228
Figura 146. Remoción del prototipo de biela del motor.	229
Figura 147. Secuencia típica de procesos requeridos en la fabricación de piezas.	232
Figura 148. Secuencia de procesos para la fabricación de prototipo biela.	237
Figura 149. Modelo de una hoja de ruta.....	238
Figura 150. Imagen hoja de ruta para manufactura prototipo biela.	239
Figura 151. Imagen orden de compra materia prima.....	241
Figura 152. Imagen de la hoja de operación corte en frío.	243
Figura 153. Imagen formato operación cementación y temple.	244
Figura 154. Imagen hoja de operación recubrimiento.	245
Figura 155. Imagen hoja de operación rectificado.....	246
Figura 156. Ejemplo carta puesta a punto/lista de chequeo.....	250
Figura 157. Procedimiento o rutina de medición de longitud o altura biela.	252
Figura 158. Relación general entre las tolerancias y el costo de manufactura.	257
Figura 159. Tamaño básico, desviación y tolerancia de acuerdo al sistema ISO.	261
Figura 160. Métodos para asignar tolerancias a una flecha.	261
Figura 161. Tabla de tolerancias ISO para orificios.....	262
Figura 162. Tolerancia radial rodamientos de agujas de rodillos cilíndricos.	264

Figura 163. Rodamiento agujas serie KZK..... 265
Figura 164. Rodamiento agujas serie KBK. 266
Figura 165. Fin..... 267

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Medición del peso de la cabeza y pie de biela.	34
Tabla 2. Valores de dureza de diferentes zonas de la biela	63
Tabla 3. Resultados del ensayo de microdureza.....	66
Tabla 4. Datos prueba de compresión biela original.....	71
Tabla 5. Porcentajes de elementos encontrados en la prueba.....	74
Tabla 6. Tabla de datos geométricos motor.	106
Tabla 7. Variables dinámicas mecanismo motor.	114
Tabla 8. Variables cinéticas del motor.	117
Tabla 9. Numero FEM, Esfuerzo y FOS en COMSOL Multiphysics®.....	139
Tabla 10. Numero FEM, Esfuerzo y FOS en SOLIDWORKS®.	139
Tabla 11. Datos Esfuerzo/Deformación simulación modelo CAD biela original.	144
Tabla 12. Datos Esfuerzo/Deformación ensayo real compresión biela original.	144
Tabla 13. Datos Esfuerzo/Deformación simulación modelo CAD biela prototipo.	149
Tabla 14. Factores de corrección y variables del cálculo de fatiga prototipo biela.....	158
Tabla 15. Cotización fabricación bielas por forja.	172
Tabla 16. Cotización fabricación bielas por fundición.....	178
Tabla 17. Cuadro comparativo procesos de manufactura.	180
Tabla 18. Costo manufactura prototipos biela.	180
Tabla 19. Valores tabulados de fuerza, desplazamiento y tiempo.....	214
Tabla 20. Datos Esfuerzo/Deformación ensayo compresión biela prototipo.	216
Tabla 21. Resultados prueba instalación y funcionamiento prototipo biela.....	229
Tabla 22. Secuencias de procesos de fabricación típicos.	234
Tabla 23. Aspectos de la calidad.	248

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: FALLAS FRECUENTES EN BIELAS.....	274
ANEXO B: TEORÍA DEL TEMPLE POR INDUCCIÓN.....	289
ANEXO C: EJEMPLO REAL DE INGENIERÍA DE MANUFACTURA: FORCOL.....	300
ANEXO D: FICHA TÉCNICA ACERO ANTI-DESGASTE: HARDOX 450.....	310
ANEXO E: TABLA RUGOSIDADES SUPERFICIALES MECANIZADO.....	316
ANEXO F: REPORTE COMPLETO METROLOGÍA BIELA ORIGINAL.....	317
ANEXO G: REPORTE COMPLETO METROLOGÍA BIELA PROTOTIPO.....	318
ANEXO H: RECIBOS Y COTIZACIONES EMPRESAS DE MANUFACTURA.....	319
ANEXO I: FORMATOS Y PLANOS PARA MANUFACTURA.....	323

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DEL PROCESO DE REINGENIERIA PARA LA MANUFACTURA DE LA BIELA DE UN MOTOR DE DOS TIEMPOS DE PEQUEÑA CILINDRADA DE APLICACIÓN AGRICOLA.*

AUTORES: JOSE HERNANDO VILLAMIZAR VILLAMIZAR
FABIÁN ANDRÉS LIZCANO VILLAMIZAR **

PALABRAS CLAVES: Biela, reingeniería, FEM, dos, tiempos, motor, manufactura.

DESCRIPCIÓN:

En primer lugar se ofrece una visión general de las Máquinas Térmicas Alternativas (M.T.A.) de dos tiempos, especificando su aplicación agrícola y analizando su impacto en el mercado local. Se describen los componentes del mecanismo manivela-biela-émbolo, su operación y características principales. Además se presenta de manera general la tecnología de manufactura regional, exponiendo específicamente los procesos y métodos involucrados en el desarrollo de piezas mecánicas para motores. Se presenta también el análisis de un modelo estructural, cinemático y térmico del mecanismo cigüeñal-biela-émbolo de un motor genérico de dos tiempos de pequeña cilindrada, donde se efectuó un desarrollo matemático a partir de ecuaciones experimentales que rigen el comportamiento de sus variables. Además se realiza una serie de simulaciones de la pieza original y de la pieza prototipo utilizando COMSOL MULTIPHYSICS® y SOLIDWORKS® como descripción de su comportamiento mecánico. Con el resultado de ambos software se realiza una comparación para la validación del diseño del modelo final para las piezas prototipo. A partir de los procesos de manufactura encontrados se fabricaron dos ejemplares de biela para un motor Shindaiwa S450EC1, desarrollando y formalizando detalladamente el proceso de fabricación. Por último se realizaron pruebas de dureza, metrología y compresión a los prototipos de biela antes de instalar uno de ellos en el motor y realizar un trabajo de desmalezado en un andén lleno de maleza en la ciudad de Bucaramanga, documentando todos los procesos y ensayos desde los planos hasta las hojas de proceso y control de calidad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Dr. Ing. Jorge Luis Chacón Velasco, Co-Director M. Sc. Ing. Ricardo Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF THE REENGINEERING PROCESS OF THE CONNECTING ROD MANUFACTURE OF TWO-STROKE ENGINE OF SMALL DISPLACEMENT FOR AGRICOLA APPLICATION.*

AUTHORS: JOSE HERNANDO VILLAMIZAR VILLAMIZAR
FABIÁN ANDRÉS LIZCANO VILLAMIZAR **

KEY WORDS: connecting, rod, reengineering, fem, two, stroke, engine, manufacturing.

DESCRIPTION:

First it provides an overview of two strokes alternative thermal machines (A.T.M.), specifying their agricultural application and analyzing their impact on the local market. The components of the mechanism: Crank - Connecting Rod - Pistons are described as well as their operation and main features. In addition the regional manufacturing technology is presented in a general way, stating the processes and methods specifically involved in the development of the mechanical parts of the engines. The structural, kinetic and thermal analysis of the model of the crank-connecting rod-piston mechanism of a generic two-stroke engine of small displacement is also presented, where a mathematical development was performed from experimental equations governing the behavior of their variables. In addition a series of simulations of the original part and the prototype piece using COMSOL MULTIPHYSICS® and SOLIDWORKS® as a description of their mechanical behavior is performed. With the result of a comparison for two software designs validation of the final model for prototype parts is performed. From the processes of manufacturing found, two samples of crank for a SHINDAIWA S450EC1 engine were made developing and formalizing the manufacturing process in detail. Finally hardness, metrology and compression testing of rod prototypes were performed before installing one in the engine and do a job of weeding on a sidewalk full of weeds in the city of Bucaramanga by documenting all processes and trials from plans to process sheets and quality control.

* Bachelor thesis

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Mechanical Engineering School, Director Ph. D. Eng. Jorge Luis Chacon Velasco, Co-Director M. Sc. Eng. Ricardo Jaimes.

INTRODUCCIÓN

La reingeniería de la biela del motor de dos tiempos Shindaiwa S450EC1 se concibió para ofrecer una prueba real de la capacidad y calidad de la manufactura de la industria bumanguesa y para plantear la conveniente y necesaria articulación entre la industria y la academia en la proyección a mediano plazo de la construcción de un laboratorio de pruebas para motores de dos tiempos en el Parque Tecnológico de Guatiguara.

La tecnología y la materia prima que se encuentran en nuestro mercado local, permite la fabricación con los más altos estándares de calidad de elementos constructivos de motores de combustión interna. El presente trabajo de investigación se enfocó en el diseño, fabricación y desarrollo del proceso de manufactura de una biela para un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada.

Es evidente que existe un inestimable potencial científico en las diferentes universidades de nuestra ciudad y en sus convenios con otras universidades extranjeras como es el caso de nuestra Universidad y la Hochschule Bremen de Alemania; además del potencial tecnológico notorio en metalmecánica administrado por las diferentes empresas de mantenimiento, construcción y diseño de elementos mecánicos que encontramos en la escena local, como es el caso de Industrias Lavco, La Metalizadora del Oriente y otras medianas empresas de mecanizado, fundición y forjado con un significativo “know-how”. Hay que resaltar que el presente proyecto puede sentar las bases para el desarrollo de empresas dedicadas y especializadas en la fabricación de repuestos, piezas y motores de dos tiempos de pequeña cilindrada en esta región del País.

1. OBJETIVOS INVESTIGACIÓN

1.1 OBJETIVO GENERAL

Colaborar junto con la Universidad en el cumplimiento de su misión determinada en formar personas de alta calidad profesional, en la generación y adecuación de conocimientos; mediante el desarrollo del presente proyecto como antecedente de investigación, análisis, diseño, construcción y ensayo de piezas para motores de dos tiempos; hacia la potencial construcción de un laboratorio de pruebas para M. T. A. en el Parque Tecnológico de Guatiguara.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la biela del motor de dos tiempos Shindaiwa modelo S450EC1 o Dolmar PC-7314. Para lo cual se deberá: conocer sus dimensiones principales mediante metrología, realizar ensayos de dureza, metalografía y compresión para identificar el material, el proceso de manufactura y los valores máximos de esfuerzo y deformación bajo las cuales se fabricó la biela; finalmente efectuar un estudio mecánico teórico de esfuerzo, deformación y pandeo mediante el método de los elementos finitos, para comparar sus resultados con los datos obtenidos en la caracterización como validación del método a utilizar en el diseño.

- Diseñar la biela usando la metodología y la información adquirida en la caracterización de la biela original. Teniendo en cuenta: material a utilizar, perfil o sección del cuerpo, ubicación del centro de masa y el proceso de fabricación según las posibilidades que ofrece la industria y tecnología local.
- Producir dos prototipos del diseño de biela planteado, para comprobar: dimensiones principales, dureza y los valores máximos de esfuerzo y deformación; mediante metrología, ensayo de dureza y compresión respectivamente. Además de instalación y funcionamiento en el motor de dos tiempos Shindaiwa modelo S450EC1 o Dolmar PC-7314 para efectuar un trabajo normal de corte o desmalezado.
- Elaborar la documentación necesaria y suficiente para el proceso de manufactura del diseño de biela planteado. Teniendo en cuenta: maquinas a utilizar, procedimientos, tiempos de operación, planos, hojas de ruta y control de calidad.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIELA

2.1 GENERALIDADES

Los motores de dos tiempos de encendido por chispa de pequeña cilindrada de aplicación agrícola son máquinas térmicas alternativas formadas por elementos mecánicos móviles enlazados para realizar una única función específica: convertir la energía química de la combustión en potencia mecánica. Estos elementos deben ser diseñados y contruidos cuidadosamente para que soporten los embates de una ignición controlada, como lo es la combustión del aire y la gasolina en el pequeño recinto formado por el bloque del motor y el émbolo, cavidad conocida como volumen de compresión.

Entre todos los elementos que constituyen el mecanismo de accionamiento del motor conocido generalmente como mecanismo manivela-biela-corredera, existe uno, no de más importancia que los demás sino de especial cuidado en cuanto a su diseño y fabricación, ya que este elemento es el eslabón o la conexión entre la potencia química y mecánica; por lo cual debe poseer unas características particulares como tener gran resistencia a la deformación, ser lo más ligero posible inercialmente hablando, poseer alta resistencia al desgaste y a la corrosión. Este particular elemento del motor no es otro que la biela, la cual es el enlace que conecta el émbolo con el cigüeñal y por el que fluye toda la potencia producida.

En cuanto a la producción de piezas para motores, a lo largo de la historia de la Industria se ha hecho notorio que el desarrollo de un solo elemento mecánico consume gran cantidad de tiempo y dinero, razón por la cual las empresas han dotado a sus plantas de producción de departamentos encargados específicamente de la reingeniería de autopartes, repuestos e incluso motores

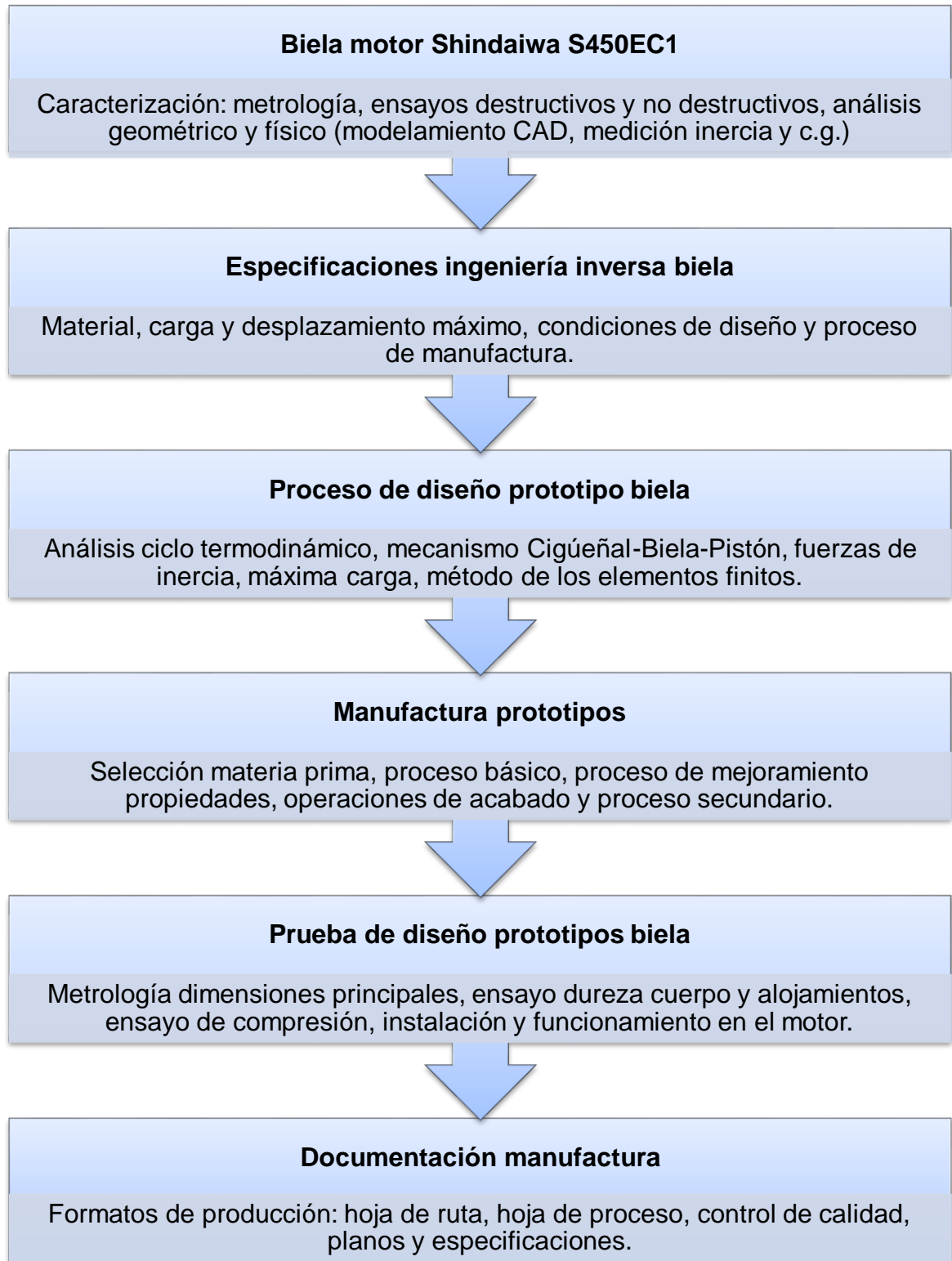
enteros, debido a que, por ejemplo, el desarrollo de un solo elemento mecánico de fuertes solicitaciones mecánicas como lo es una junta homocinética puede tomar alrededor de un año según la experiencia de los ingenieros de T. H. C. S. A.

En el caso específico de la biela del motor Shindaiwa S450EC1 (motor seleccionado para la presente investigación debido a que es uno de los más comerciales en contraposición a la marca DOLMAR que aún no existe en nuestro mercado)¹ se le han aplicado técnicas de caracterización de materiales como ensayos destructivos y no destructivos para conocer exactamente su composición química, los procesos de mecanizado, fabricación y tratamientos térmicos que fueron aplicados para su concepción además de un análisis geométrico para extraer las respectivas dimensiones con precisión y el muy conocido ensayo de compresión en la máquina universal a fin de extraer los límites de esfuerzo y deformación que realmente resiste.

Además de todo esto se utiliza como apoyo un análisis teórico enfocado a la proyección y validación de un procedimiento de diseño basado en el método de los elementos finitos. Alimentado y robustecido de los datos reales de los ensayos de caracterización y de ecuaciones empíricas empleadas en el análisis de Máquinas Térmicas Alternativas (MTA). En la figura 1 se muestran todos los procesos y procedimientos llevados a cabo en la presente investigación a manera de diagrama de flujo, como resumen y guía al mismo tiempo; a lo largo de cada uno de los capítulos y de cada una de las secciones se explicará al detalle cada paso realizado.

¹ CASTELLAR BUELVAS, Jairo Daniel y ROMERO MARTINEZ, Leonardo José. Desarrollo de una herramienta software para el diseño de motores de combustión interna de dos tiempos (fase I). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2014. p. 43.

Figura 1. Proceso de ingeniería inversa aplicado en la presente investigación.



2.2 ESPECIFICACIONES MOTOR SHINDAIWA S450EC1

Los valores reales tomados de un motor de dos tiempos Shindaiwa serie B450, se presentan a continuación²:

- Cilindrada = 41,5 [cm³]
- Diámetro = 40 [mm]
- Relación Carrera/Diámetro = 0,825
- $b_{mep} = 327,7$ [kPa]
- Potencia nominal= 1,7 [kW]
- Revoluciones por minuto nominales= 7500 [r.p.m.]
- Relación de compresión = 8:1
- Potencia por unidad de volumen = 41,0 [kW/L]
- Peso por unidad de potencia = 8,10 [kg/kW]
- Capacidad de depósito de combustible = 1000 [cm³]

Otros datos, adquiridos del manual del motor son:

- Ralentí = 2750 [r.p.m.]
- Máxima revoluciones = 11500 [r.p.m.]
- Potencia máxima = 2,3 [HP] = 1,7 [kW] @ 7500 [r.p.m.]

La presente investigación buscó realizar el diseño y la construcción (en base a la biela original) de un prototipo de biela que cumpliera con todas las solicitaciones que experimenta la biela original, pero que lograra ser fabricada con los materiales y la tecnología existente en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana (ver las especificaciones de diseño en el capítulo 3).

² *Ibíd.* p. 141.

2.3 METROLOGIA BIELA MOTOR SHINDAIWA S450EC1

Los principios y métodos de medición usados en ingeniería y en cualquier ciencia exacta son muchas veces el punto de partida y generalmente el de llegada para cualquier estudio, investigación o desarrollo que se pretenda realizar tanto a una pieza como a un fenómeno físico. “La metrología en ingeniería se define como la medición de dimensiones, entre ellas la longitud, espesor, diámetro, conicidad, ángulo, planicidad, perfil y otras.”³

La *metrología* según lo enuncia M. P. Groover: “es la ciencia de la medición, y se relaciona con seis cantidades fundamentales: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura y radiación luminosa. A partir de éstas, se derivan la mayoría de las otras cantidades físicas, tales como el área, el volumen, la velocidad, la aceleración, la fuerza, el voltaje eléctrico y la energía térmica. En la metrología de manufactura, nuestro principal interés es la medición de la longitud y sus diversas formas de manifestarse en una parte o producto. Éstas incluyen longitud, ancho, profundidad, diámetro, rectitud, igualdad de superficie y redondez; incluso la aspereza de una superficie se define en términos de longitud.”⁴

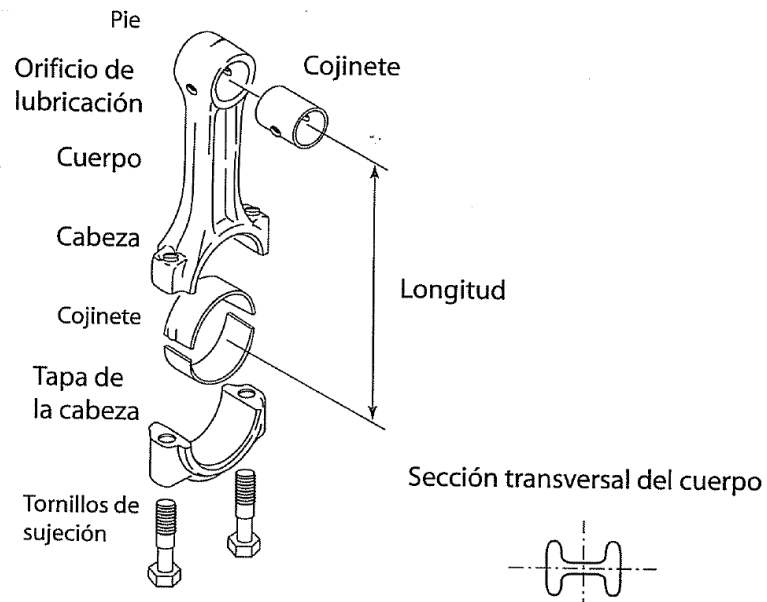
En el caso de un elemento mecánico como la biela que aparentemente no posee una geometría compleja podemos afirmar que sus dimensiones principales son: el diámetro de la cabeza y su espesor, el diámetro del pie y su espesor, la longitud (definida como la distancia entre el eje del pie y de la cabeza) y el espesor del

³ KALPAKJIAN, Serope. Manufactura, ingeniería y tecnología. Traducido: Jaime Espinosa Limón. 5 ed. México D.F.: Pearson education, 2008. p. 1085. ISBN 0-13-148965-8.

⁴ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 1007.

cuerpo.⁵ La figura 2 muestra las dimensiones principales de una biela convencional con sección transversal de su cuerpo en forma de **H**:

Figura 2. Partes y dimensiones fundamentales de la biela




Fuente: PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p. 886.

Por tanto al efectuar la correspondiente metrología de una de las bielas seleccionadas (durante la presente investigación se usaron dos bielas, una de ellas comprada en el mercado de repuestos y la otra se obtuvo de un motor Shindaiwa en operación) en un laboratorio de medición acreditado como lo es el que posee la empresa local Metalizadora del Oriente Limitada se obtuvieron tres de las seis dimensiones principales que aparentemente posee esta pieza del motor (según Payri, F.), debido a que esta empresa líder en el rectificado de piezas mecánicas únicamente pudo garantizar su trabajo con dichas mediciones, ya que son las más utilizadas en la industria (ver figura 3).

⁵ PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p. 886.

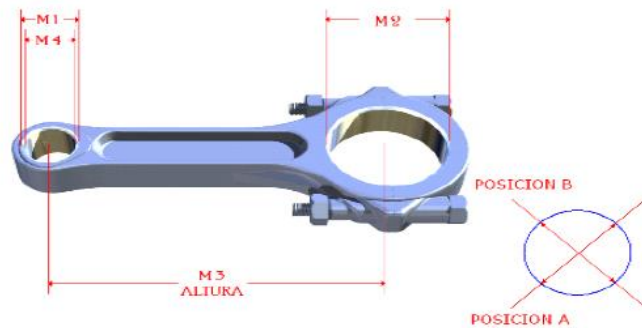
Figura 3. Metrología biela original.

	MANUAL DE PROCESOS PR-RP-080-ADM-000	Rev. No: 01	Fecha Lib.: 12/10/06
	FORMATO DE MEDICIONES INICIALES Y FINALES F-RP-070-ADM-002	Fecha Rev.:12/10/06	Aprobó: Gerente General
		Elaboró: Asistente De Calidad	

EVALUACION DE BIELAS

7

CLIENTE JOSE HERNANDO VILLAMIZAR
MOTOR
PEDIDO No.



BIELA No.	MEDIDA 1		MEDIDA 2		MEDIDA 3 ALTURA DE BIELA SIN BUJE	MEDIDA 4 ALTURA DE BIELA CON BUJE	
	A	B	A	B			
1	511	512	787	788	2.438		
2							
3							

Fuente: Metalizadora del Oriente Ltda.

Estas mediciones fueron realizadas en milésimas de pulgadas por la empresa METALIZADORA DEL ORIENTE LTDA. Utilizando como instrumentos de medición un micrómetro telescópico para interiores y con la máquina rectificadora de bielas SCLEDUM RB650; al hacer la conversión a milímetros tenemos: para la Medida 1, diámetro pie de biela: A = **12,9794 [mm]** y B = **13,0048 [mm]**. Para la Medida 2, diámetro cabeza biela: A = **19,9898 [mm]** y B = **20,0152 [mm]**. Para la Medida 3, conocida como altura, longitud o distancia entre centros: **61,9252 [mm]**. En el caso de las restantes medidas: el espesor de la cabeza y pie de la biela y el espesor del cuerpo se realizó mediante instrumentos precisos (como calibrador

digital pie de rey) pero no certificados ni acreditados; por tanto dichas medidas se tomaran como aproximaciones. Las medidas de la biela original se muestran en su respectivo plano consignado en los anexos de esta investigación.

La figura 4 muestra dos fotografías de una de las bielas que fue empleada para el presente estudio, una tomada por el anverso y otra por el reverso de la misma. De ambas imágenes se puede observar (a simple vista) que el elemento seleccionado no tiene ningún defecto, falla, fractura o deterioro, debido a que fue comprado nuevo en el mercado de repuestos para motores Shindaiwa exclusivamente para su análisis en la presente investigación.

Figura 4. Biela motor Shindaiwa S450EC1.



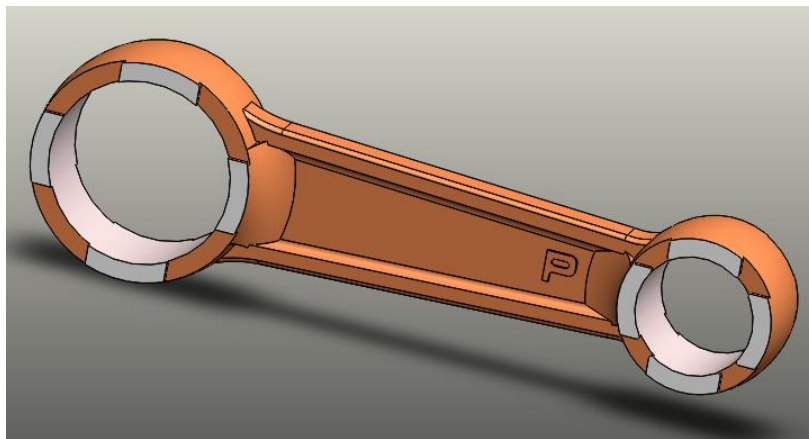
(a)



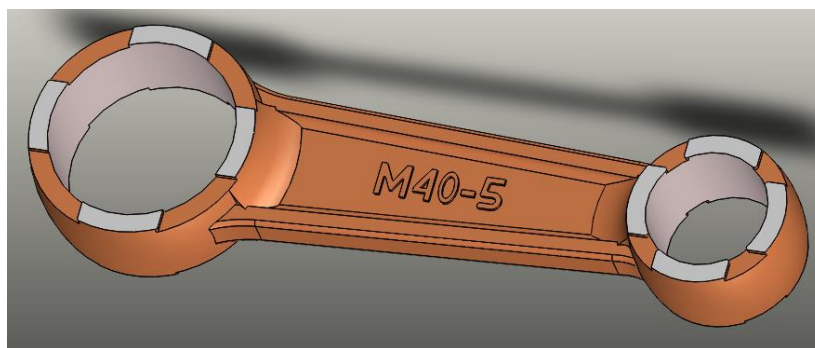
(b)

El modelo CAD de la biela (mostrado en la figura 5) se realizó teniendo en cuenta que iba a ser utilizado para el levantamiento de planos de la biela original; para el estudio mediante el método de los elementos finitos de su comportamiento a compresión y pandeo, además de las propiedades físicas y geométricas como la inercia y el centro de gravedad proporcionadas por el software.

Figura 5. Imagen modelo CAD biela motor Shindaiwa.



(a)



(b)

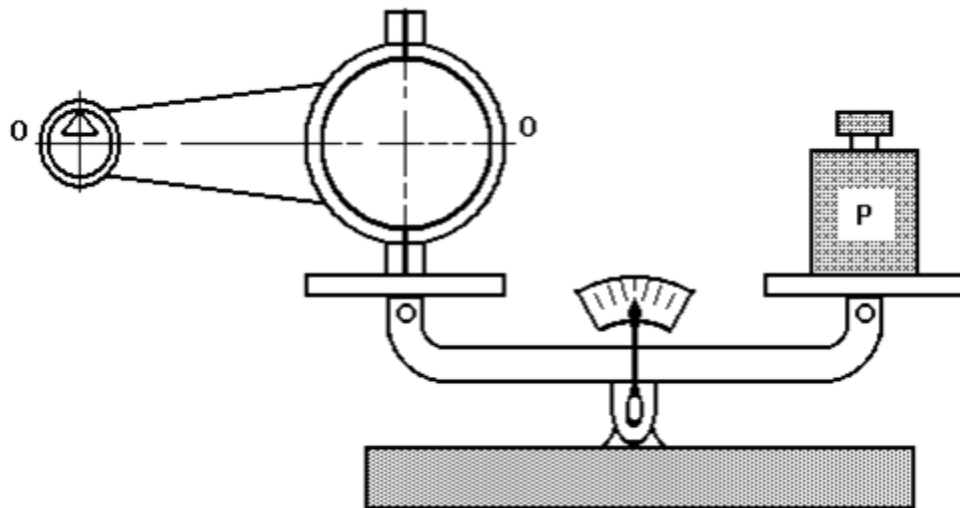
Fuente: Software SolidWorks®.

Al utilizar la metrología como fuente de información, esta ciencia no se limita solamente a la lectura de medidas de longitud, sino que también abarca la medición incluso de unidades derivadas de las fundamentales como la presión, el caudal, el esfuerzo, etc. Por tal motivo a la pieza de estudio se le realizaron otras mediciones como: la de su centro de gravedad, la rugosidad de los diámetros internos del pie, de la cabeza, su peso e inercia.

Para conocer el peso de la biela, esta fue llevada a uno de los laboratorios del tercer piso de la planta de aceros de la Escuela de Metalurgia y Ciencias de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander, donde en una balanza calibrada marca AINSWORTH se realizó la medición de su peso con una precisión de cinco cifras significativas, la cual dio como resultado: **34,72067 gramos**.

En cuanto a la medición del centro de gravedad, se realizó un montaje especial usando la misma balanza calibrada Ainsworth, como muestra la figura 6.

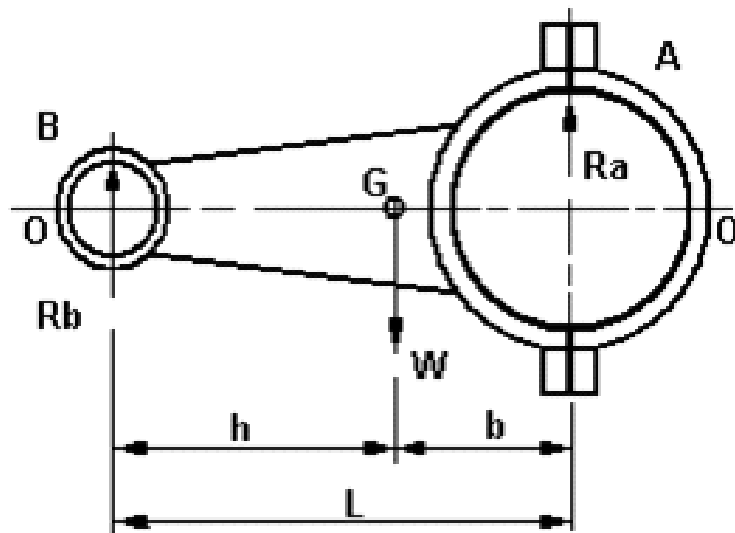
Figura 6. Montaje medición centro de gravedad biela.



Fuente: GONZALEZ URRUTIA, Eusebio, et al. Técnicas operatorias para la determinación de las propiedades geométricas de los cuerpos. [Online]. En:<
<http://www.monografias.com/trabajos31/propiedades-geometricas/propiedades-geometricas.shtml#ixzz2tu15thzR> >. p. 1-3.

Dicho montaje facilita la medición del centro de gravedad de cualquier biela mediante la aplicación de la ecuación de equilibrio estático de suma de momentos, en la cual se pesa la cabeza de la biela, dejando fuera de dicha medición mediante un apoyo externo el pie de la biela, luego se realiza la misma medición invirtiendo la posición de la biela, es decir, se pesa el pie de la biela dejando fuera de la medición la cabeza mediante un apoyo externo y por último se aplica la ecuación de equilibrio estático de momentos en el punto B.

Figura 7. Diagrama de cuerpo libre biela.



Fuente: GONZALEZ URRUTIA, Eusebio, et al. Técnicas operatorias para la determinación de las propiedades geométricas de los cuerpos. [Online]. En:<
<http://www.monografias.com/trabajos31/propiedades-geometricas/propiedades-geometricas.shtml#ixzz2tu15thzR> >. p. 1-3.

Luego de efectuar una serie de medidas, mostradas en la tabla 1, se procedió a realizar el cálculo del centro de gravedad de la biela, teniendo en cuenta que:

$$R_a * L = W_{biela} * h \quad (1)$$

$$h = \frac{R_a * L}{W_{biela}}$$

Tabla 1. Medición del peso de la cabeza y pie de biela.

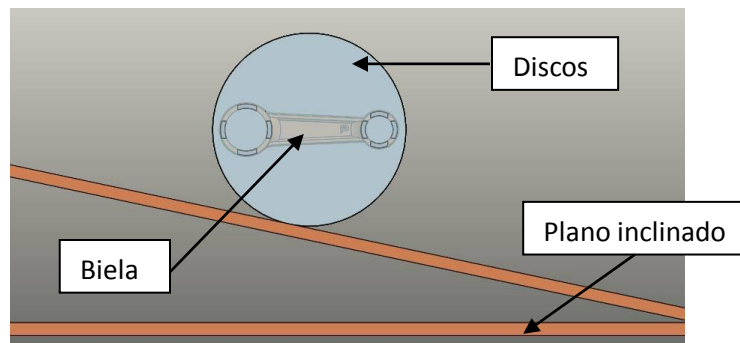
Reacción en A (Ra), peso de la cabeza de la biela en gramos	Reacción en B (Rb), peso del pie de la biela en gramos
19,10176	15,88940
19,15091	15,77952

Fuente: Balanza de precisión marca Ainsworth del Laboratorio Planta Aceros UIS.

Tomando el promedio de ambos valores obtenidos y efectuando el cálculo del centro de gravedad al despejar la incógnita **h** de la ecuación (1) luego de hacer sumatoria de momentos en el punto B (ver figura 7), se tiene que: **h = 34,1123 [mm] = 1,3430 [in]**.

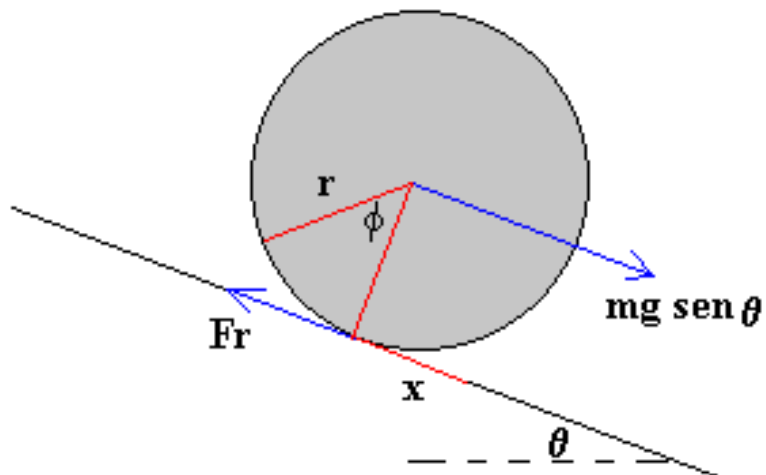
Otra propiedad física importante que tiene que ver con la geometría de la biela y que se hace indispensable conocer para el estudio de la cinética y cinemática de la misma en su movimiento en el mecanismo del motor, es la inercia rotacional, ésta tuvo que medirse por medio de un ensayo experimental en el cual la biela se hace rodar en un plano inclinado (por medio del acoplamiento de dos discos de acrílico) y al medir el tiempo que tarda en rodar, la distancia conocida de un metro (1 [m]). Ver figuras 8 y 9.

Figura 8. Vista frontal experimento.



Por la conservación de la energía mecánica despreciando la fricción y teniendo en cuenta la energía rotacional de los discos de acrílico es posible hallar la inercia.

Figura 9. Variables de un disco que rueda por un plano inclinado.



A continuación se muestra el cálculo, sabiendo que el diámetro de los discos es de 9 [cm] = 90 [mm], la inclinación del plano fue de 4,1° y el tiempo que recorrió el montaje discos-biela la distancia de 1 m fue de 1,4 segundos (se utilizó un Smartphone y una aplicación llamada NIVEL BRUJULA para medir el tiempo y la inclinación precisa del plano inclinado), con una velocidad final de 0,979034 [m/s] (sabiendo que el conjunto discos-biela tiene un movimiento uniformemente acelerado). De la ecuación de la conservación de la energía mecánica:

$$Em1 = Em2 + Pfr \quad (2)$$

$$Ek1 + Epg1 + Ekr1 = Ek2 + Epg2 + Ekr2 + Pfr$$

Donde:

$Em1$ = energía mecánica en la posición 1

$Em2$ = energía mecánica en la posición 2

Pfr = energía mecánica perdida por fricción

$Ek1 = 0$ = energía cinética en la posición 1

$Epg1 = mg d \text{sen}(\theta)$ = energía potencial en la posición 1

$Ekr1 = 0$ = energía cinética rotacional en la posición 1

$Ek2 = \frac{mv^2}{2}$ = energía cinética en la posición 2

$Epg2 = 0$ = energía potencial en la posición 2

$Ekr2 = \frac{I_{CG}\omega^2}{2}$ = energía cinética rotacional en la posición 2

I_{cg} = momento de inercia del centro de gravedad

m = masa

v = velocidad

ω = velocidad angular

g = aceleración de la gravedad

d = distancia

Reemplazando, se tiene:

$$mg d \text{sen}(\theta) = \frac{mv^2}{2} + \frac{I_{CG}\omega^2}{2} + Pfr$$

$$\frac{2 mg d \operatorname{sen}(\theta) - mv^2}{\omega^2} = I_{CG}$$

$$I_{CG} = \frac{2 mg d \operatorname{sen}(\theta) - m\omega^2 r^2}{\omega^2} \quad (3)$$

Reemplazando los valores obtenidos del experimento en la ecuación (3) se tiene:

$I_{CG} = 101354,6996$ [g-mm²] es la inercia del centro de gravedad del conjunto, resultado al que hay que restarle la inercia de ambos discos la cual es igual a:

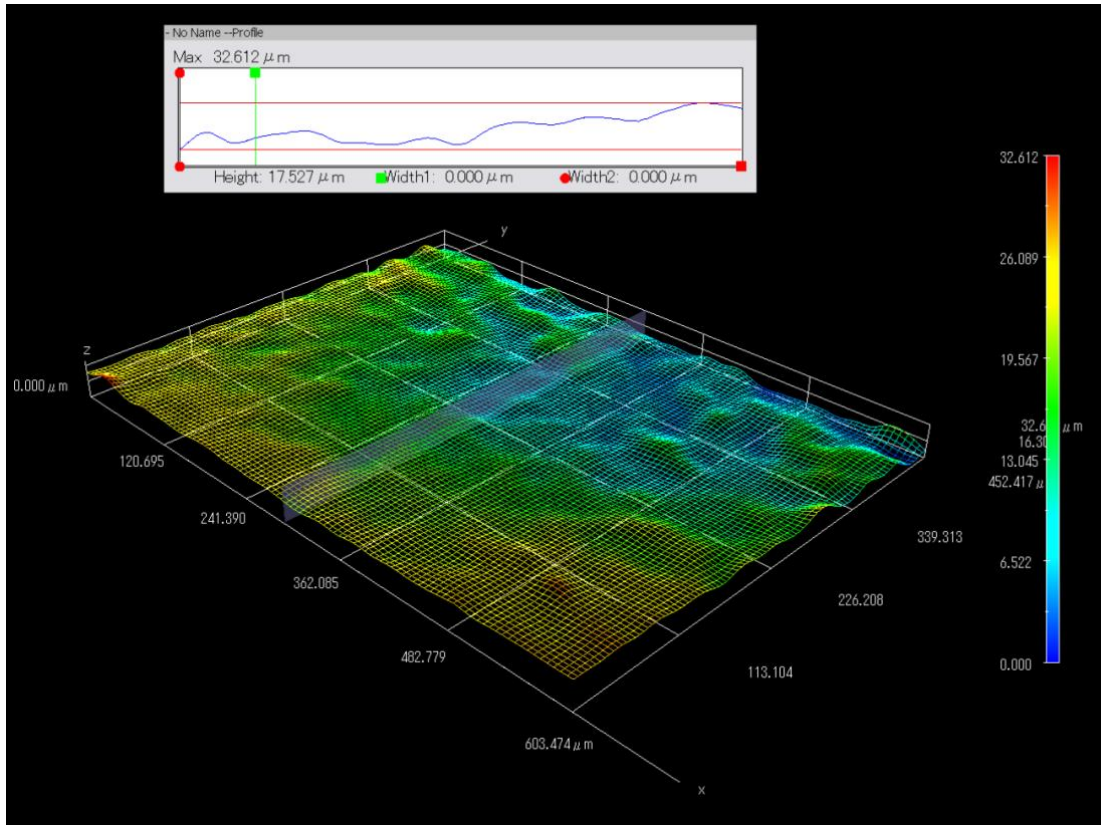
$I_D = 75937,5000$ [g-mm²]; por tanto la inercia experimental de la biela es:

$I_B = I_{CG} - I_D = 25417,1996$ [g-mm²]. Este resultado puede compararse con el que se obtuvo del modelo CAD de la pieza (ver sección 2.8.1).

La medición de la rugosidad de los diámetros internos del pie de biela y de la cabeza de la biela se realizó mediante un microscopio para observación en tres dimensiones (3D) marca HIROX perteneciente al laboratorio de pruebas del grupo de investigación GIMAT de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales.

La biela original fue seccionada para su estudio en el ensayo destructivo de metalografía (que se muestra en la sección 2.5.1.1), un pedazo o casquete de la cabeza de biela fue tomado, limpiado y preparado para su observación, a través del microscopio para exponer el valor de rugosidad (el cual es una distancia) con el cual fue manufacturada esta zona de la pieza; el resultado de la observación se muestra en la figura 10.

Figura 10. Rugosidad diámetro interno biela.



Fuente: Microscopio HIROX grupo de investigación GIMAT.

La medida que efectuó el equipo en el segmento de casquete tomado de la biela fue a lo largo y ancho de un fragmento representativo (alrededor de unos 270000 [μm²]) del área total de la muestra (como se evidencia en la figura anterior), en esa superficie el equipo ejecutó una medición a lo largo de dicha área en una zona igualmente representativa de la misma, resultando el valor promedio entre la altura de las crestas y de los valles medidos en dicho perfil. Por tanto el equipo calculó la rugosidad del diámetro interno de la cabeza de la biela (como se muestra en la figura 10) utilizando este perfil que posee un pico máximo de **32,612 [μm]** y un mínimo de referencia de **0 [μm]**, estableciendo como promedio la medida de rugosidad según el perfil examinado por el microscopio para esta zona de la biela en: **17,527 [μm]**.

2.4 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los procedimientos que bajo norma son catalogados como ensayos no destructivos y se realizaron a la pieza de la presente investigación (a la biela adquirida en el mercado de repuestos Shindaiwa) se ejecutaron con el fin de realizar el ensayo de compresión (prueba destructiva) en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón de Ingeniería Civil con la plena seguridad de que los datos adquiridos no fueran adulterados debido a fisuras, porosidades o grietas producto de un incorrecto maquinado o defectos de fabrica. Los ensayos no destructivos aplicados se explican a continuación:

a. Tintas (o líquidos) penetrantes (norma ASTM E165/E165M 2012): este ensayo permite descubrir discontinuidades como grietas, hendeduras, porosidades o incrustaciones en la superficie de materiales metálicos no ferromagnéticos, aceros inoxidables, cobres, bronce, latones y materiales no metálicos. Al aplicar el líquido sobre la superficie de la muestra, este penetra en todas las imperfecciones superficiales y luego de remover el exceso, el líquido que queda remanente gracias a dichas discontinuidades se hace evidente con la ayuda de la aplicación del revelador. El procedimiento de este ensayo es sencillo y no necesita de operaciones engorrosas ni equipos sofisticados.

b. Partículas magnéticas (norma ASTM E709 2008): Este ensayo solo es apropiado para materiales ferromagnéticos que tienen entre sus propiedades físicas la de cambiar la orientación de sus dipolos magnéticos para convertirse en imán; radica en la utilización de una corriente eléctrica que crea un campo magnético en la pieza (que en nuestro caso es acero o hierro + carbono) que al aplicársele un polvo especial hecho de partículas magnéticas (de ahí su nombre) resulta en la formación de una figura que sigue las líneas de campo magnético y

que en dado caso de que exista una distorsión de dichas líneas es una muestra de las discontinuidades que posee el material en estudio; una ventaja de este ensayo es que puede mostrar discontinuidades sub-superficiales de más de 6 mm de profundidad.

c. Radiografía industrial: Al igual que las placas radiográficas que son tomadas en el área de las ciencias de la salud para examinar pacientes que, por ejemplo, poseen huesos fracturados de la misma manera puede realizarse el mismo examen no invasivo a una pieza de material metálico como el acero (no olvidemos que el calcio que compone nuestros huesos es también un elemento metálico) aunque utilizando una mayor potencia de penetración de esta radiación ionizante, puede develarse imperfecciones de cualquier tipo en cualquier nivel de profundidad sin importar la forma de la pieza en estudio. Las normas ASTM asociadas con este procedimiento no destructivo, que a diferencia de los anteriores si necesita de equipos sofisticados y montajes especiales, son: E 94, E 746, E 801, E 999, E 1030, E 1032, E 1254, E 1316, E 1742 y E 1815.

d. Exploración superficial por microscopio 3D: Este procedimiento fue un plus que muy amablemente ofreció el grupo de investigación GIMAT de la Escuela de Metalurgia e Ingeniería de Materiales para revisar palmo a palmo, minuciosamente, la superficie de la biela en busca de discontinuidades e imperfecciones; esta técnica puede decirse es realizada empleando la “fuerza bruta” y una gran cantidad de tiempo. El resultado fue interesante ya que se pudo mirar detalladamente la fabricación y acabado de la pieza de estudio de la presente investigación.

3.2.1 Ensayo de tintas penetrantes. A continuación se muestran los resultados de este ensayo no destructivo aplicado a la biela que fue comprada en el mercado original de repuestos Shindaiwa exclusivamente para ser destruida en el ensayo

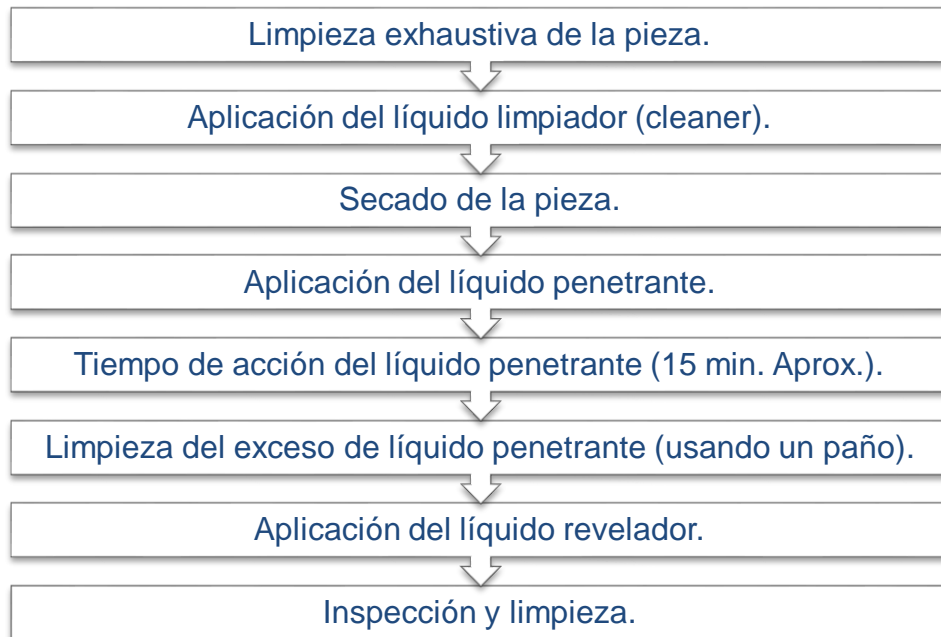
de compresión con el propósito de conocer la fuerza máxima y el desplazamiento máximo que debía alcanzar según los parámetros de diseño con que fue concebida, para ello se necesitaron productos especiales conocidos como: líquido limpiador (cleaner en Inglés), líquido penetrante y líquido revelador. Se aplicó más de un tipo de tintas penetrantes, también se usó tintas penetrantes fluorescentes, esto debido a que la biela del motor Shindaiwa S450EC1 instalado en la guadañadora B450 y otras, cuenta con un recubrimiento especial de Cobre, conocido como “cobrizado” para evitar la corrosión en el agresivo ambiente de un motor de dos tiempos, esto hizo que este recubrimiento actuara a manera de “pantalla” interfiriendo en la aplicación efectiva de las tintas penetrantes, debido a que tras él pueden esconderse muchas imperfecciones. La figura 11 muestra los diferentes productos usados para el ensayo de tintas penetrantes: Líquido limpiador (SKC-5), penetrante (SKL-SP2) y revelador (SKD-S2) todos de la marca MAGNAFLUX.

Figura 11. Líquidos MAGNAFLUX limpiador, penetrante y revelador.



Este procedimiento está muy bien explicado en la norma ASTM E165/E165M 2012 y se resume en la figura 12.

Figura 12. Procedimiento para aplicación de tintas penetrantes.



Debido a que estos productos son derivados del petróleo y poseen características químicas especiales es necesario el uso de guantes, gafas, mascarillas de seguridad y de una cabina de extracción especial de gases.

Figura 13. Resultados del ensayo de líquidos o tintas penetrantes sobre la biela.



(a)



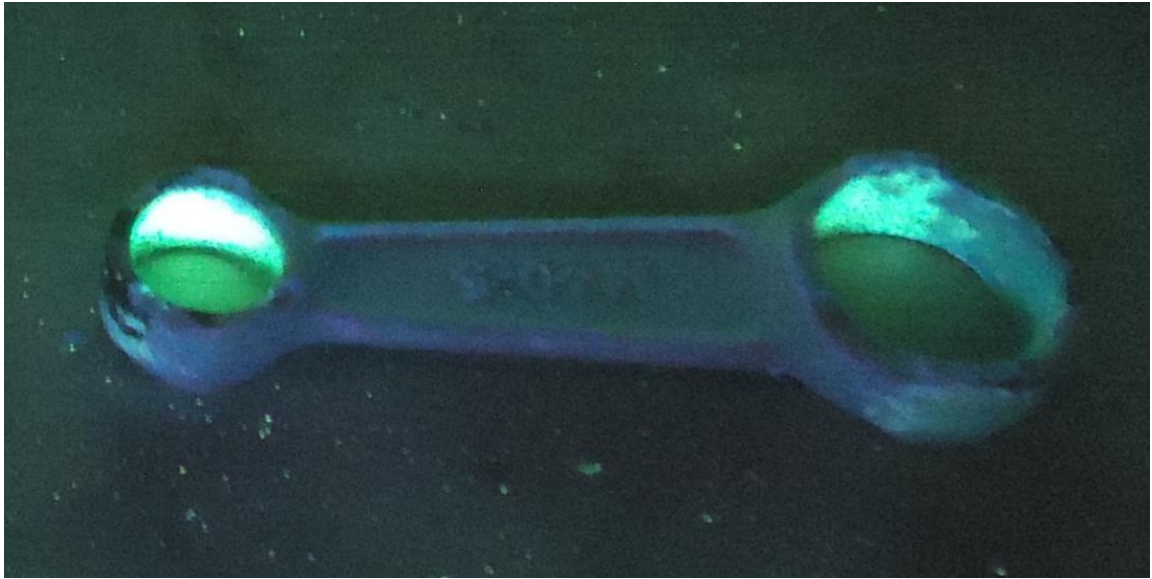
(b)

La conclusión de este ensayo no destructivo es que la biela estaba apta para el ensayo destructivo de compresión, y no poseía ningún defecto superficial estimable, como porosidades, grietas, incrustaciones o cualquier otra imperfección superficial que hiciera las veces de un concentrador de esfuerzo disminuyendo así la capacidad de carga con que la pieza fue fabricada y terminara por debajo de los parámetros de diseño, lo que hubiera invalidado la prueba y los datos de carga y desplazamiento que se obtuvieron. En la figura 13 se muestra, por el anverso (a) y el reverso (b) de la biela, que no se encontró ningún defecto apreciable luego de aplicar la técnica; cualquier defecto superficial de los que ya se nombró aparecería de color rojo encendido en contraste al color blanco del líquido revelador aplicado.

De la misma manera, en el mismo laboratorio, usando por seguridad la cabina de extracción de gases, con el mismo procedimiento, cuidado y tiempo de espera y usando los mismos líquidos para limpiar y revelar pero con la diferencia de que se aplicó un líquido penetrante fluorescente de referencia ZL-27A de la marca MAGNAFLUX y de que la inspección final se realizó bajo luz ultravioleta usando una lámpara de la marca BLACK-RAY modelo UVL-21, se aplicó la técnica de las tintas penetrantes fluorescentes. En la figura 14 se puede ver que de igual manera

que con el ensayo anterior no se encontró ningún tipo de discontinuidad o defecto superficial, el cual aparecería de color verde fluorescente.

Figura 14. Resultado ensayo de tintas penetrantes fluorescentes (bajo luz UV).



3.2.2 Ensayo de partículas magnéticas. Para la realización de esta prueba lo primero a tener en cuenta fue la limpieza de la pieza para que ningún tipo de grasa o suciedad pudiera intervenir con los resultados, aunque esta limpieza era más importante en el anterior ensayo que en éste, debido a que los defectos e imperfecciones que se buscan con esta técnica no son superficiales sino que pueden llegar a detectarse discontinuidades sub-superficiales a una profundidad de $\frac{1}{4}$ de pulgada (6,35 [mm]) en materiales ferromagnéticos como el hierro o en el caso de la biela, el acero, a este tipo de defectos fueron los que se pretendió descubrir, el procedimiento que se efectuó se muestra en la figura 15.

Figura 15. Procedimiento para aplicación de partículas magnéticas.

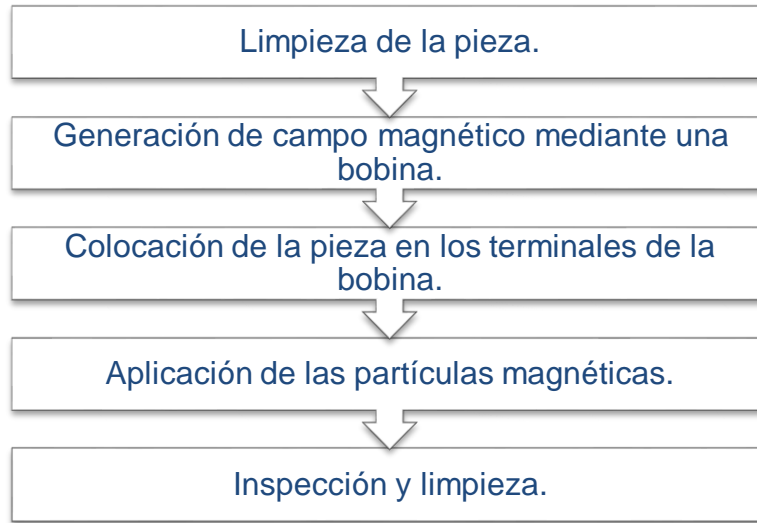
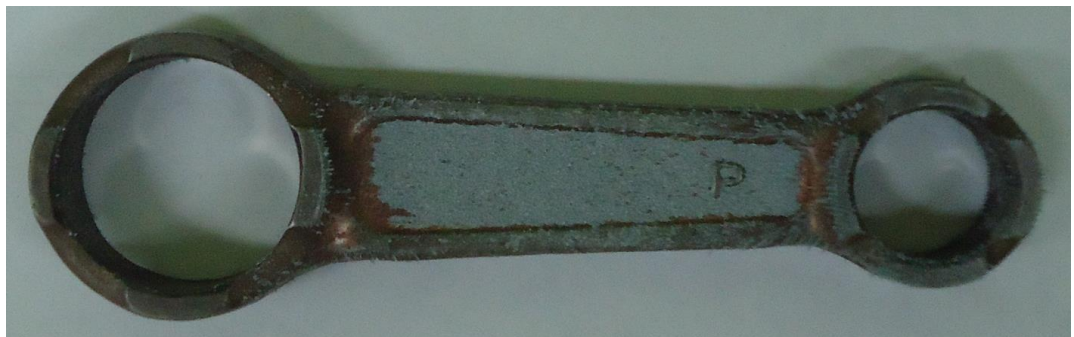


Figura 16. Resultados del ensayo de partículas magnéticas



(a)



(b)

Se hizo evidente que la pieza no poseía defectos sub-superficiales como fisuras, grietas, porosidades, etc. Que llegasen a afectar la prueba de compresión como concentradores de esfuerzo, como puede verse en la anterior figura, si existiera algún defecto en la pieza éste hubiera aparecido como una discontinuidad (un hueco o espacio) del campo magnético uniforme seguido por las partículas magnéticas como lo muestran las figuras 16-(a) y 16-(b).

En este ensayo se uso una bobina o equipo generador de campo magnético de la marca MAGNAFLUX modelo Y-7 AC/DC y partículas magnéticas en polvo seco color gris también de la marca MAGNAFLUX las cuales cumplen las normas ASTM sobre ensayos no destructivos para el método de partículas magnéticas no húmedas.

3.2.3 Ensayo de radiografía industrial. La aplicación de esta técnica de inspección no destructiva necesita de equipos sofisticados de radiación ionizante como el equipo modelo CF 2000 de la marca BALTEAU NDT, además de un montaje especial (mostrado en la figura 18) bajo ciertos parámetros preestablecidos conseguidos a prueba y error (debido a que se realizaron dos tomas de prueba antes de alcanzar un resultado satisfactorio, siendo corregidos los desfases de los primeros ensayos, evidentes en la poca nitidez de la imagen almacenada en la película radiográfica, por medio de densitómetros; para la presente investigación se uso el modelo TD902 de la marca MACBETH) y de insumos delicados y costosos como la película radiográfica ROLLPAC Pb de la marca FUJIFILM la cual no puede ser expuesta a la luz y necesita de un estudio fotográfico para su revelado. El procedimiento que se siguió se presenta en la figura 17.

Figura 17. Procedimiento para aplicación de partículas magnéticas.

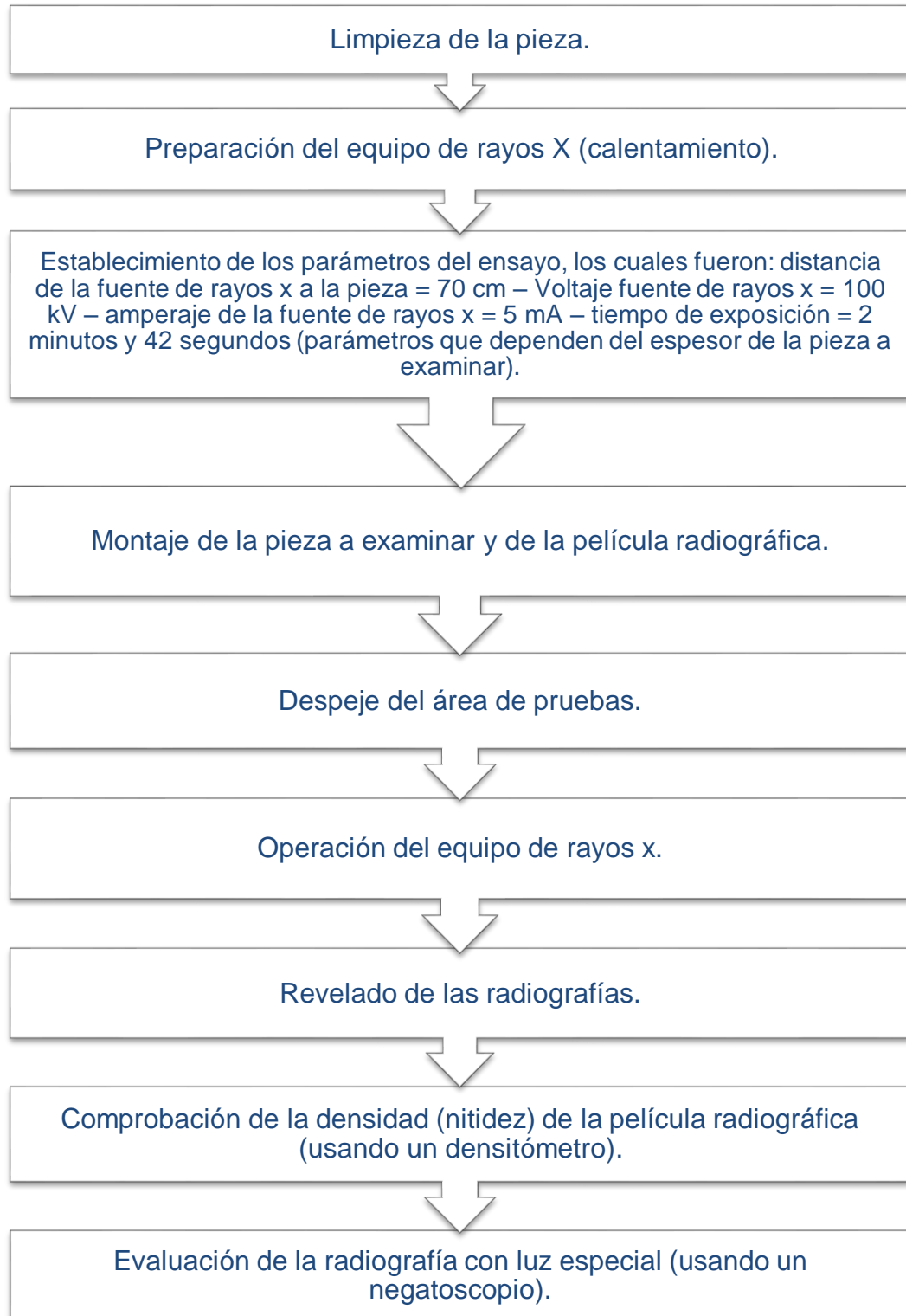


Figura 18. Montaje de la prueba.

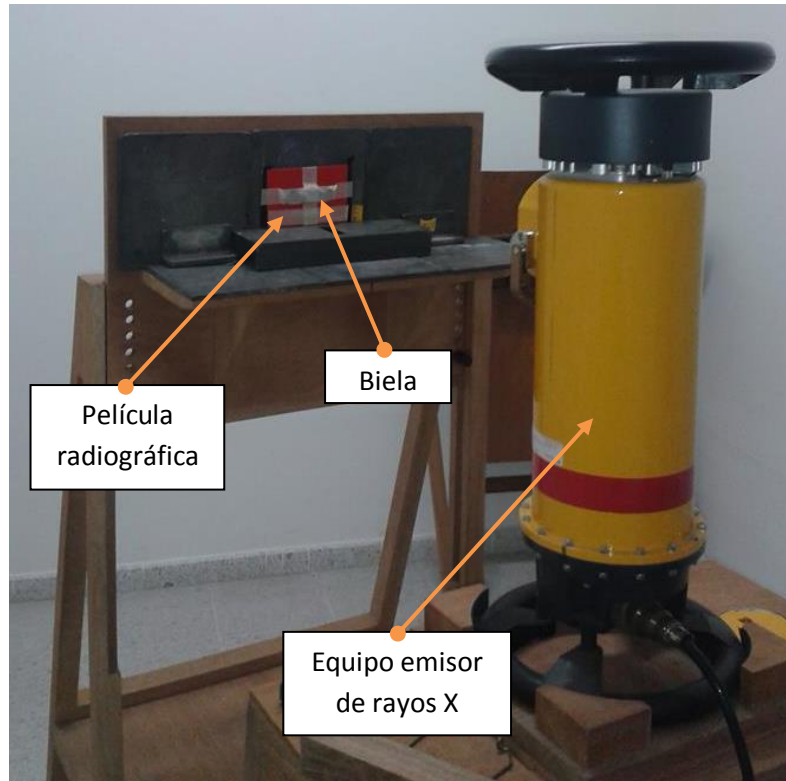
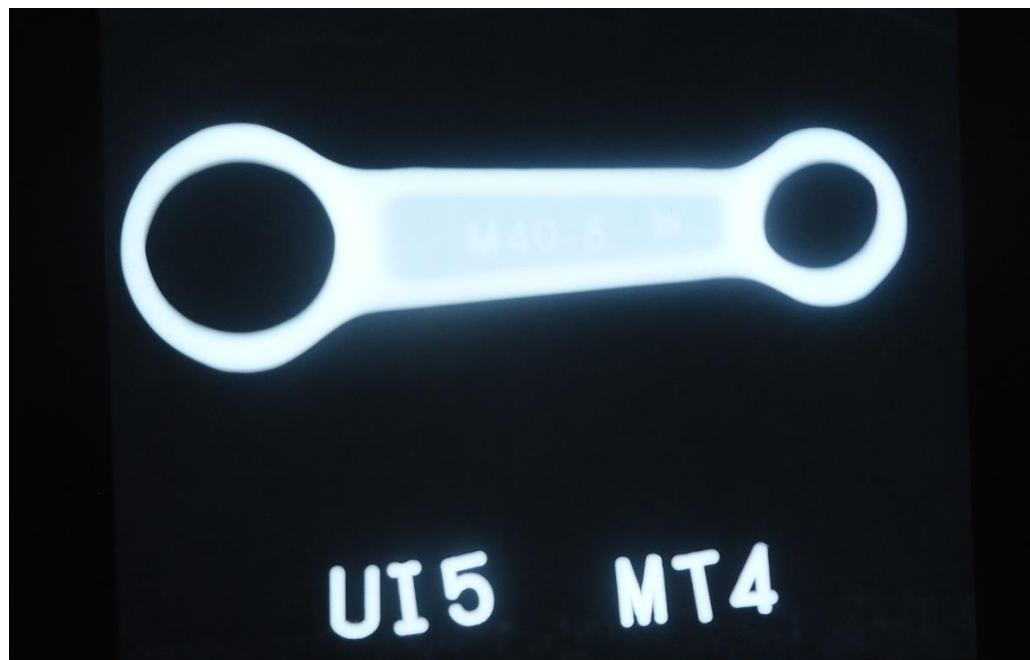


Figura 19. Radiografía de la biela.

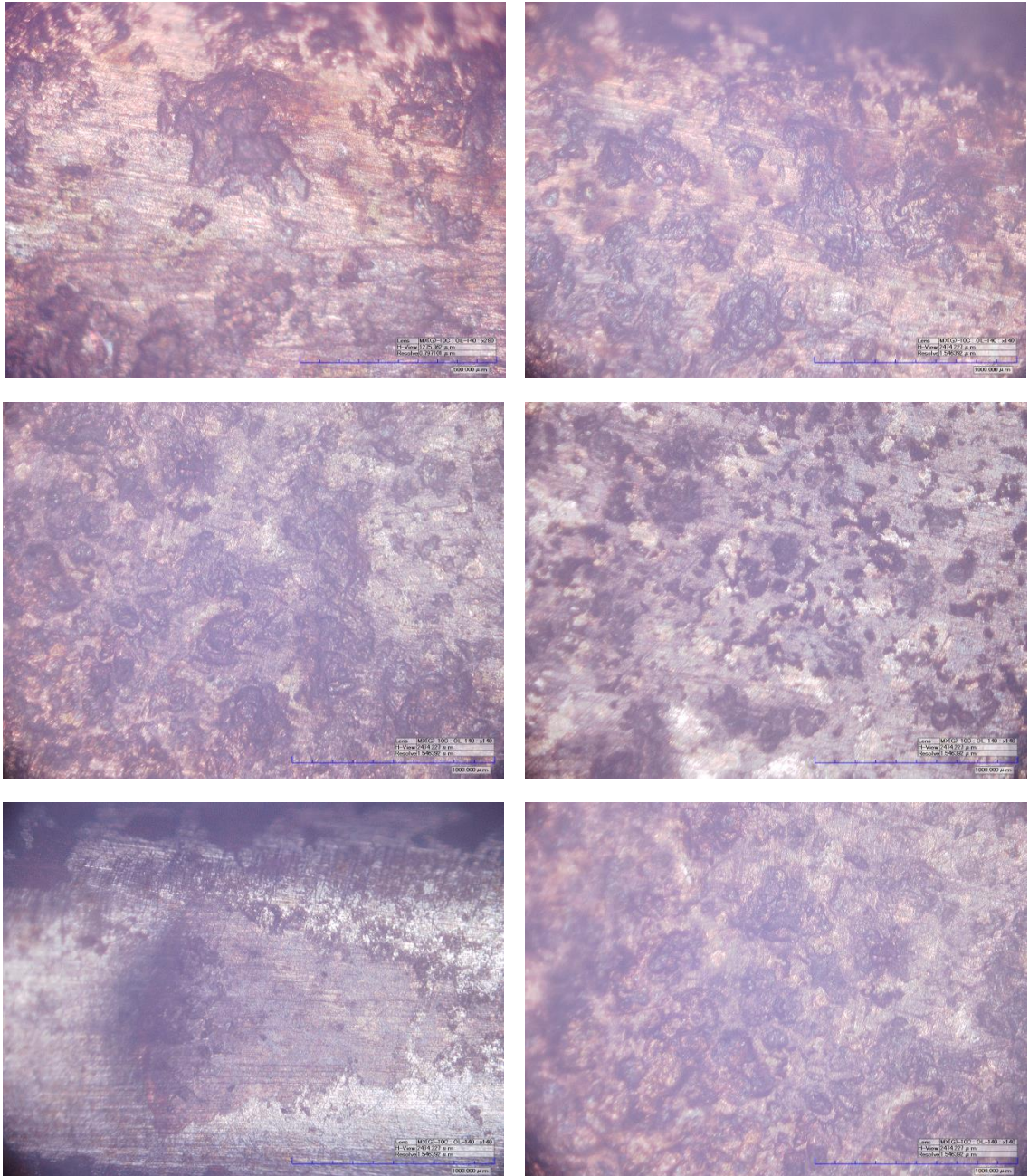


Como se hizo evidente durante todas las pruebas no destructivas que se le aplicaron a la biela que fue comprada en el mercado de repuestos para maquinaria Shindaiwa, el resultado no podía ser diferente ni salirse de lo normal a lo que ya había y se tenía previsto, es decir, que esta pieza en efecto no contiene en sí misma ningún defecto superficial, sub-superficial ni interno, algo que habla muy bien del proceso de fabricación que le fue aplicado y del control de calidad que emplea la empresa fabricante. Las figuras 18 y 19 muestran las imágenes del montaje del ensayo y del resultado final. En la radiografía puede verse que no existe ninguna discontinuidad, fisura o fractura interna en el material de la biela, la cual se vería como un surco o un hueco de color oscuro, por el contrario se ve la uniformidad de la estructura interna del acero forjado.

3.2.4 Exploración superficial por microscopio 3D. Como se indicó inicialmente, este examen fue un plus ofrecido muy amablemente por el grupo de investigación GIMAT de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales en cabeza de su Directora la Profesora Luz Amparo Quintero, aprovechando la tecnología que ofrecen los microscopios HIROX, para despejar cualquier duda sobre la integridad de la pieza elegida para el ensayo de compresión; partiendo del hecho de que los anteriores estudios fueron en cierta medida indirectos, con este examen superficial por microscopio se obtiene una visión directa y minuciosa de toda la superficie de la pieza.

En la figura 20 se pueden ver seis (6) tomas representativas de exploración a un aumento de 280X de la superficie del cuerpo de la biela como conclusión de este procedimiento. El cual consistió en recorrer el cuerpo de la biela por el anverso y el reverso en busca de fisuras, fracturas, grietas, incrustaciones o porosidades; las cuales evidentemente no se encontraron, únicamente se encontró oxidación ligera, producto de la limpieza efectuada a la pieza con agua y aire caliente.

Figura 20. Imágenes de la superficie de la biela a 280X de aumento.



Fuente: Microscopio HIROX.

Las anteriores imágenes se obtuvieron como tomas fotográficas utilizando el mismo principio de la fotografía aérea pero a nivel microscópico, recorriendo las diferentes zonas del cuerpo (ver figura 4) de la pieza a una altura predeterminada para generar aumentos de 280X, usando el software de reconocimiento fotográfico del equipo HIROX.

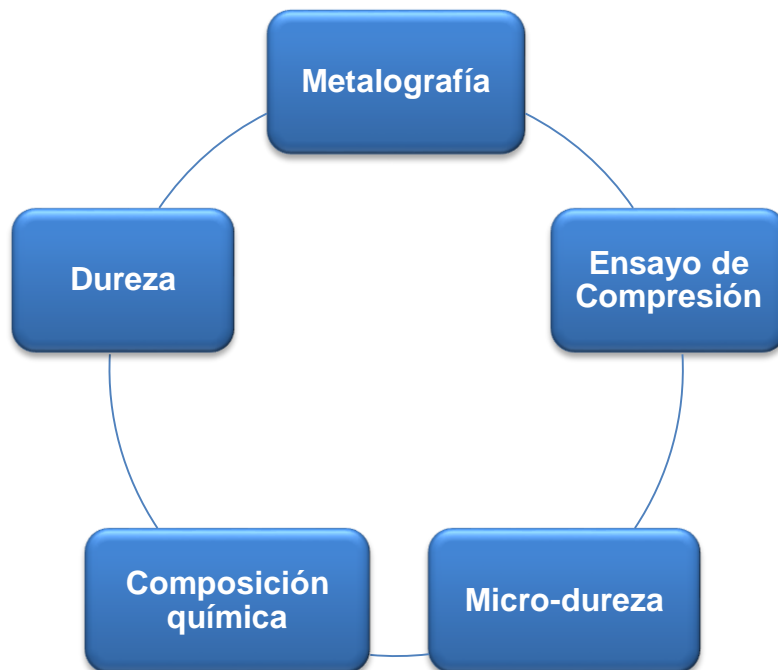
La conclusión de todos los ensayos no destructivos a los que la biela fue sometida es que se hallaba apta para la realización de la prueba de compresión en la máquina de ensayos universal (ver sección 2.5.3), es decir, que los resultados obtenidos en dicha prueba de fuerza contra desplazamiento son totalmente válidos y confiables, debido a que con toda seguridad no influyeron en ellos ningún tipo de discontinuidad o variable externa o interna a la pieza que pudiera haber afectado el comportamiento de los mismos.

2.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Para la completa caracterización de la biela del presente estudio hubo que realizar ensayos destructivos necesarios para conocer las propiedades internas e intrínsecas del material de fábrica de la biela, propiedades que no pueden conocerse a simple vista y que son las que le dan el valor agregado y su particularidad a esta pieza-motor. Se realizaron cinco pruebas: 1) metalografía, 2) composición química, 3) dureza, 4) micro-dureza y 5) compresión. Se usaron dos bielas, como ya se comentó, una fue comprada en el mercado de repuestos exclusivamente para esta investigación y la otra se obtuvo de un motor en uso; a esta última biela se le hicieron los ensayos destructivos de dureza, micro-dureza, metalografía y de composición química por chispa.

Los ensayos destructivos como su nombre lo indican son aquellos que al ser aplicados a una pieza o componente la destruyen, al cambiar o modificar su geometría o integridad estructural con el propósito de obtener la suficiente información. En el caso del ensayo de metalografía hubo que seccionar la biela en cuatro partes, suficientes para obtener dos muestras donde se pudiera observar los tratamientos térmicos que el fabricante le aplicó al material y la estructura interna resultado de los mismos, este procedimiento es evidentemente irreversible. En el caso de los ensayos no destructivos, estas son operaciones que solamente alcanzan un nivel de profundidad mínimo, sub-superficial cuando mucho, que solo son utilizados para buscar grietas, porosidades o hendiduras; aunque existen pruebas de este tipo que pueden develar irregularidades internas aunque son muy costosos tanto en equipo como procedimiento e insumos, como el ensayo de rayos X o el de ultrasonido. A continuación se muestra un esquema que presenta las pruebas realizadas, véase figura 21.

Figura 21. Ensayos destructivos aplicados a la biela original.



2.5.1 Ensayo Metalográfico. La metalografía consiste en el análisis de la estructura y constitución de los metales y las aleaciones. Con estos ensayos se determina el tamaño de grano, la forma, las segregaciones o irregularidades⁶. Si este estudio se realiza a simple vista o mediante un estereoscopio se está haciendo referencia a un examen macrográfico donde se puede obtener alguna información sobre los procesos mecánicos de fabricación de la pieza en cuestión, si fue forjada, fundida, mecanizada, etc. En cambio si a la pieza de estudio se le aplica un ensayo micrográfico, éste puede revelar los tratamientos térmicos, la estructura interna e incluso la naturaleza del material usado para fabricar la pieza; para el cual se necesita de un desbaste y acabado muy fino del espécimen, del ataque de un ácido especial (como el NITAL) y de un microscopio de grandes aumentos.

2.5.1.1 Examen macrográfico. Este tipo de prueba usualmente se lleva a cabo sin tener en cuenta la preparación de la pieza a estudiar, es decir, que no necesita de un desbaste o acabado muy fino ni del ataque de un ácido para poder llevar a cabo el análisis, simplemente la muestra de la pieza en cuestión se lleva a un estereoscopio o se mira bajo la lupa y se buscan posibles irregularidades, patrones o formas conocidas que por medio de la destreza un observador experimentado puede develar. Para este examen, dependiendo de la pieza, se le realiza un corte que puede ser transversal, longitudinal o ambos dependiendo de la geometría y del estudio que se quiera aplicar. El corte transversal puede mostrar si la pieza es homogénea o tiene algún defecto producto de la fabricación como impurezas, grietas, hendiduras perceptibles a simple vista. En cuanto al

⁶ IMBAQUINGO NAVARRETE, Rommel Paúl y PUENTE CHILUISA, Edgar Fabián. Determinación de la capacidad mecánica de carga de diferentes bielas utilizadas en los vehículos Kia Río, Corsa Evolution y Volkswagen Gol mediante análisis de esfuerzos experimental y por elementos finitos con un análisis metalográfico de las mismas. Trabajo de grado Ingeniero Automotriz. Latacunga, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica. Carrera de Ingeniería Automotriz. 2011. P 7.

corte longitudinal este puede exponer claramente el proceso de fabricación al que fue sometido la pieza.

Figura 22. Biela seccionada transversalmente



La biela tomada directamente del motor Shindaiwa S450EC1 que hace parte de la guadañadora de la serie B450, fue seccionada transversalmente como lo muestra la figura 22, en tres partes, utilizando una máquina de corte marca BUEHLER con disco abrasivo, para que a partir de dos de estas partes se pudieran obtener las dos muestras representativas del cuerpo y de la cabeza de la biela.

Una vez realizado el procedimiento de corte, se seleccionaron dos pedazos de biela para obtener específicamente dos muestras representativas del cuerpo y de la cabeza para su posterior montura en base cilíndrica de baquelita, por medio de una prensa manual marca METASERV perteneciente a los laboratorios de la Escuela de Metalurgia y Ciencias de los Materiales de la UIS, el resultado se presenta en la figura 23.

Se realizaron dos montajes en baquelita debido a que en un ensayo preliminar de dureza se hizo considerable la diferencia entre el valor de endurecimiento existente en la parte interna de los diámetros de la cabeza y pie de biela y la

localizada en el cuerpo, lo que hacía pensar que muy probablemente se le había aplicado un tratamiento térmico especial en la parte más dura de la biela que evidentemente resulta siendo la zona que más trabajo y desgaste soporta, pero solo era posible comprobarlo realizando el examen micrográfico en detalle.

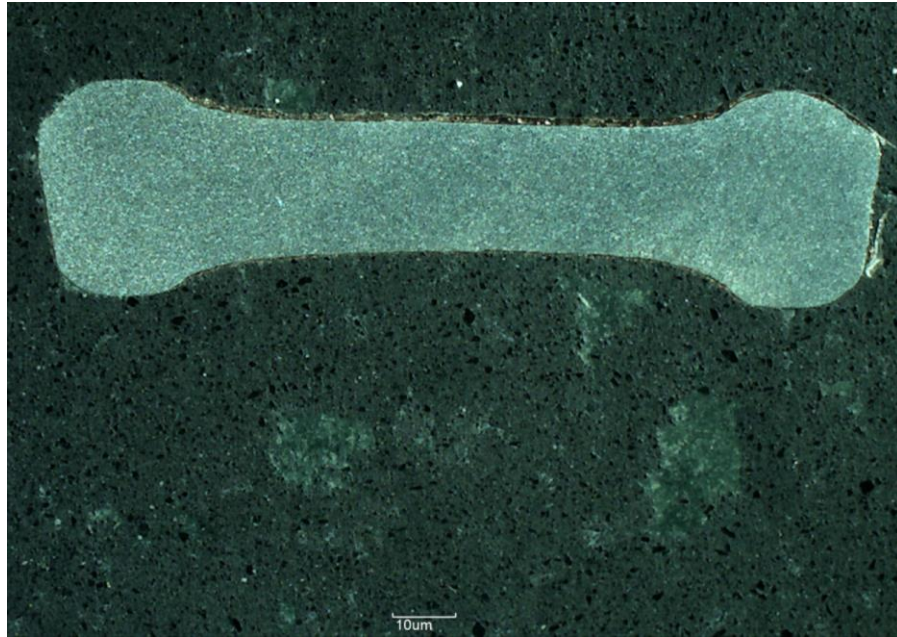
Figura 23. Segmento transversal del cuerpo de la biela en baquelita.



Capturados ambos segmentos del material en resina sintética se procedió a pasarlos bajo la luz de un estereoscopio de la marca OLYMPUS. Se hace evidente que el material de las muestras es isotrópico y no presenta fisuras, porosidades, impurezas ni segregaciones. También se puede notar un recubrimiento totalmente visible en la periferia de ambas muestras, ver figuras 24 y 25. En la figura 25 se expone igualmente la existencia de un tratamiento térmico superficial aplicado a la cabeza de la biela, éste se puede ver nítidamente al distinguir el límite del contraste que se observa entre la zona superior e inferior de la muestra, se nota claramente la existencia de dos tipos de estructuras internas bien diferenciadas. La forma⁷ en que el acero está distribuido en ambas muestras confirma de igual manera a la forja como técnica de fabricación aplicada a toda la pieza.

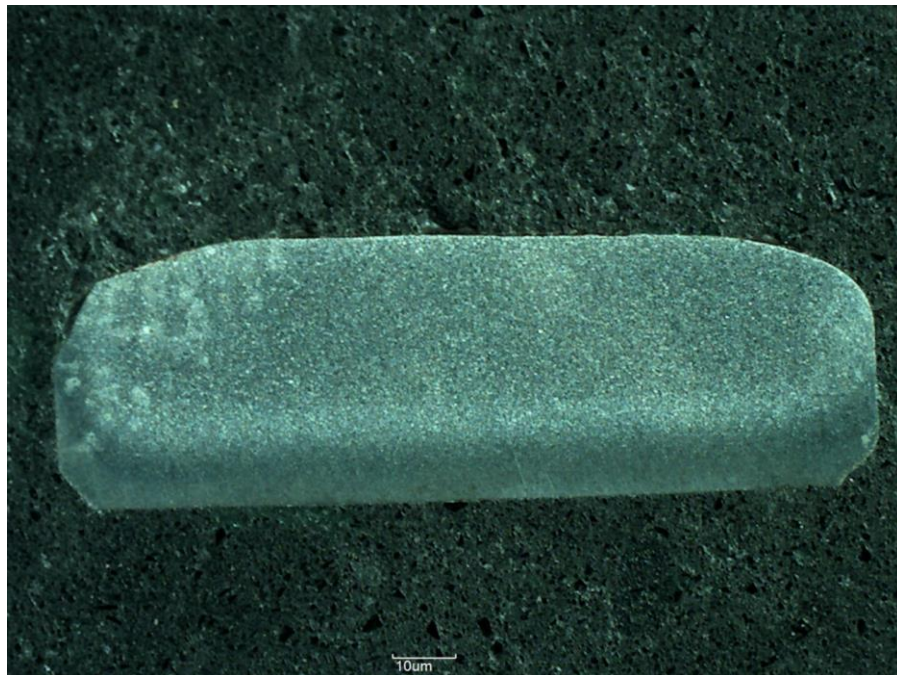
⁷ ASTM Handbook. Vol. 09. Metallography and Microstructures. P. 592-594.

Figura 24. Segmento del cuerpo de la biela visto bajo el estereoscopio Olympus.



Fuente: Estereoscopio Olympus.

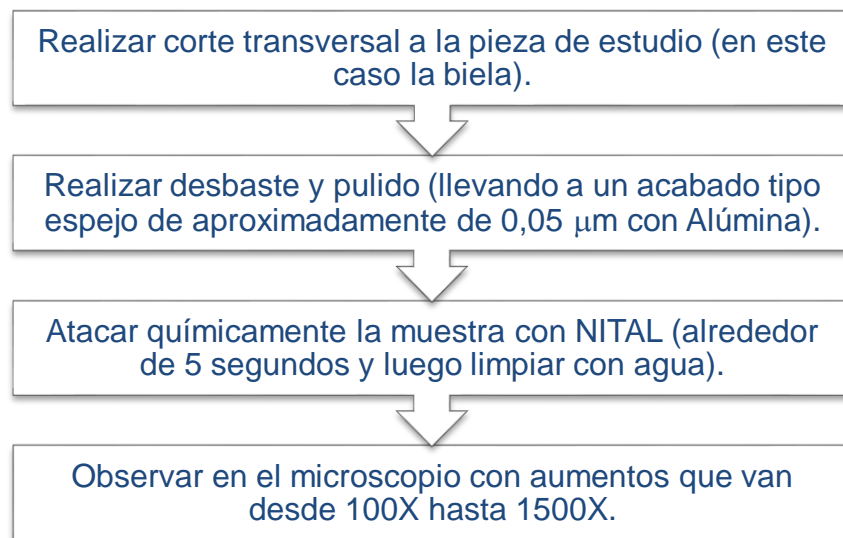
Figura 25. Segmento de la cabeza de la biela visto bajo el estereoscopio Olympus.



Fuente: Estereoscopio Olympus.

2.5.1.2 Examen micrográfico. Este tipo de examen es más detallado que el anterior y demanda el uso de un microscopio de grandes aumentos, que pueden ir desde los 100X hasta los 1500X y de un reactivo especial conocido como NITAL que es una solución de alcohol y ácido nítrico, que la norma ASTM E407 identifica con el número 74 y cuya composición indica como: 1 [ml] - 5 [ml] de HNO₃ y 100 [ml] de etanol (95%) o metanol (95%). La velocidad de ataque se incrementa agregando más ácido nítrico, reduciendo en consecuencia la sensibilidad del mismo.⁸ Para realizar correctamente este examen es necesario tener en cuenta el siguiente procedimiento presentado a modo de diagrama de flujo en la figura 26:

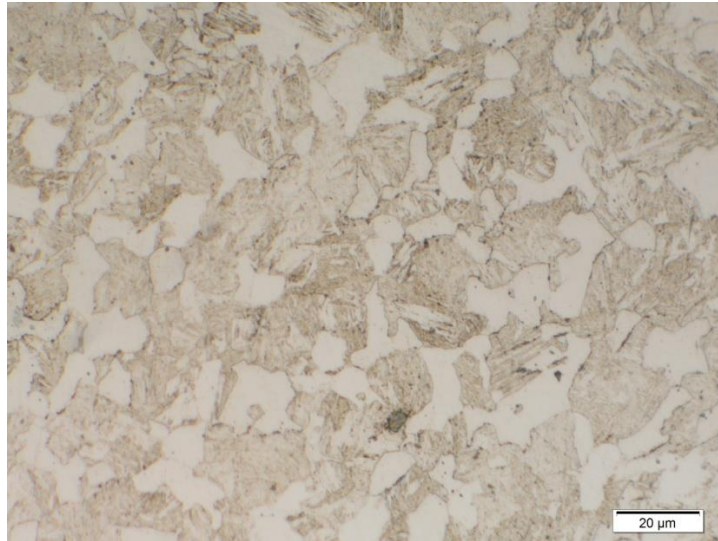
Figura 26. Procedimiento ensayo metalográfico.



Al final de todo este procedimiento se obtuvo una superficie totalmente expuesta (ver figura 27) que revela la microestructura del acero del cual está hecha la biela, los tratamientos térmicos y el proceso de fabricación que le fue aplicado.

⁸ AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM E407 – 07. West Conshohocken, USA: ASTM, 2003. 23 p.

Figura 27. Probeta cuerpo biela vista a 1000X, ataque NITAL.

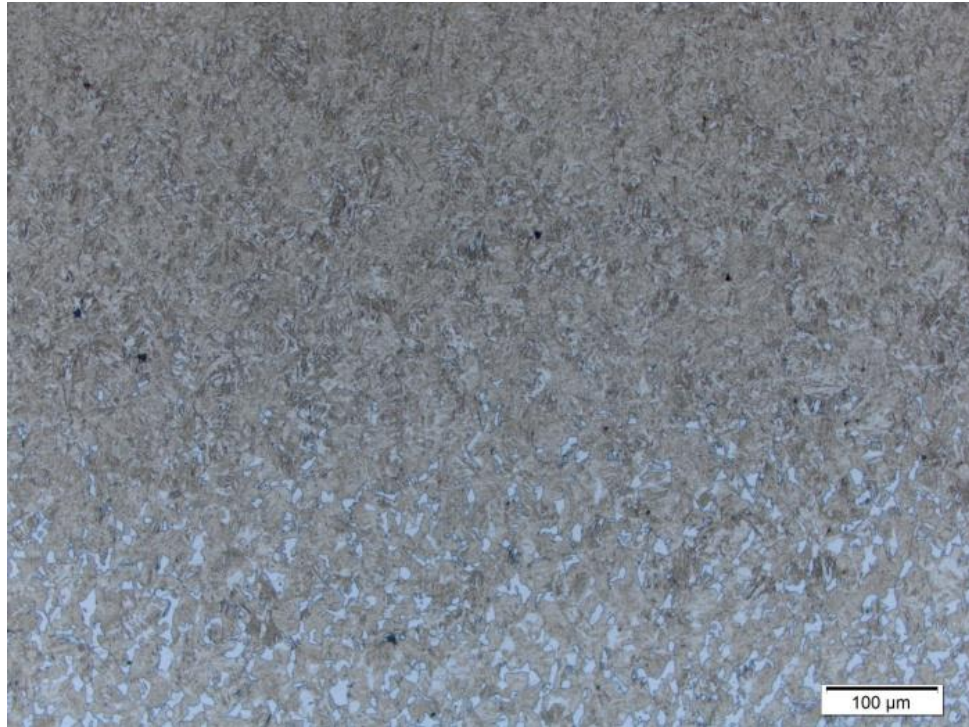


Fuente: Microscopio Olympus.

La figura 27 muestra los resultados del examen, luego de haber pulido ambas muestras con lija de agua desde la más gruesa (P180) hasta la más fina (P800) y de un proceso de pulido final con Alúmina AL0030 en suspensión de 0,05 [μm] aplicada en un paño húmedo montado en una máquina pulidora metalográfica modelo FORCIPOL 2V marca METKON de 2 platos de \varnothing 200/250 [mm] a una velocidad de giro de 246 [r.p.m.]. Se utilizó para los análisis de microestructura de las muestras de un microscopio OLYMPUS.

La muestra extraída del cuerpo, figura 27, de la biela revela con claridad el procedimiento de fabricación que le fue aplicado a la pieza, el forjado, debido a que la microestructura aparece comprimida, por una gran fuerza, formando una estructura semejante a “agujas” o filamentos que dan evidencia de ello; además hay certeza de un tratamiento térmico de austenización al aire, en atmosfera controlada aplicado presumiblemente para normalizar, pues la microestructura no está deformada; pueden apreciarse estructuras del tipo ferrita y perlita fina.

Figura 28. Probeta cabeza biela vista a 200X, ataque NITAL, zona de transición.



Fuente: Microscopio Olympus

En cuanto a la muestra obtenida de la cabeza de la biela, en la figura 28 claramente se advierte la existencia de dos tipos de microestructuras, nítidamente diferenciadas por una zona de transición, es decir, que se tiene la prueba concluyente de que a esta zona de la pieza le fue aplicado un tratamiento térmico conocido como temple por inducción, que no es otra cosa que el rápido (alrededor de 5 segundos) calentamiento hasta una temperatura aproximadamente de 1000[°C] y de un posterior enfriamiento por agua de una zona específica de la pieza, tratamiento que alcanza profundidades de ± 500 [μm] por medio de una resistencia eléctrica donde fluye corriente de alta frecuencia.⁹

⁹ Ver en Anexos ampliación de la teoría sobre este tratamiento térmico.

Figura 29. Probeta cabeza biela 500X, ataque NITAL. Centro.



Fuente: Microscopio Olympus

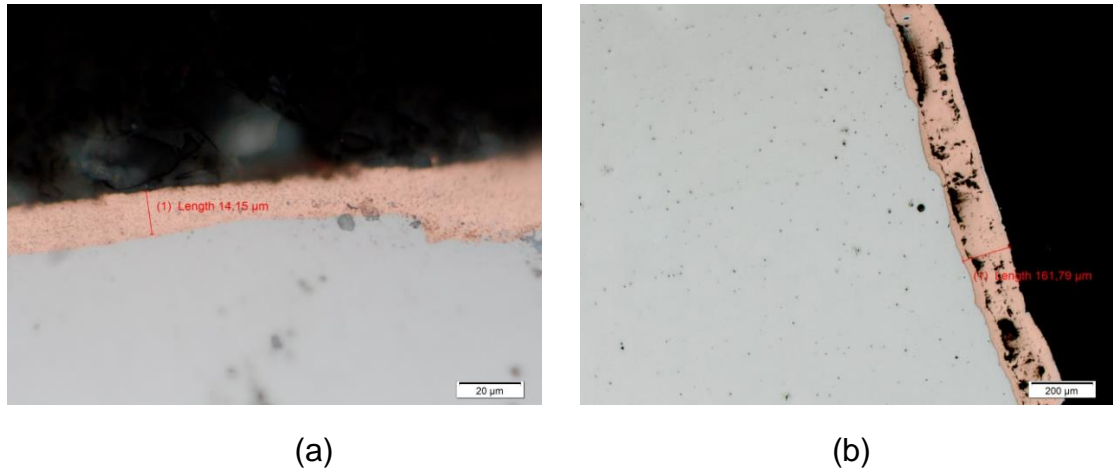
La figura 29 muestra una microestructura idéntica a la del cuerpo de la biela (ferrita-perlita), esta zona corresponde a la cabeza de la biela pero está en el centro. En cambio la zona endurecida (figura 30) tiene una microestructura diferente, conocida como martensita.

Figura 30. Probeta cabeza biela 500X, ataque NITAL. Borde.



Fuente: Microscopio Olympus.

Figura 31. Espesor del recubrimiento visto bajo el microscopio.



Fuente: Microscopio Olympus.

Gracias a la capacidad del microscopio Olympus y del acabado de las muestras obtenidas de la biela se pudo comprobar la existencia de un recubrimiento (que se presumía, había sido aplicado a toda la pieza), evidentemente como lo muestra la figura 31 se puede ver dicho “cobrizado” y el tamaño de la capa aplicada para combatir la corrosión latente en el agresivo ambiente dentro de la cámara de combustión de un motor de dos tiempos. En la figura 31-(a) se observa que el recubrimiento tiene en promedio un espesor de **14,15 [μm]** y corresponde a la cabeza de la biela; en cambio la figura 31-(b) muestra que el espesor del recubrimiento es de aproximadamente **161,79 [μm]** y corresponde a la zona del cuerpo de la biela.

2.5.2 Ensayo de dureza y microdureza. Antes de la ejecución de los ensayos de metalografía realizados a una de las dos bielas usadas en la presente investigación (la biela extraída del motor Shindaiwa) está fue puesta bajo la máquina de ensayos de dureza marca WILSON perteneciente al laboratorio de

Tratamientos Térmicos de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander. Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador ó penetrador), de determinada forma y dimensiones.¹⁰

El estándar ASTM E 18-03 define la dureza ROCKWELL como un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador cónico-esferoidal de diamante (penetrador de diamante), o una bola de acero endurecido (acero o carburo de tungsteno), bajo condiciones específicas contra la superficie del material a ser ensayado, en dos operaciones, y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga. El estándar ASTM E18-03 define el número de dureza Rockwell como un número derivado del incremento neto en la profundidad del indentador cuando la fuerza en el indentador es incrementada desde una fuerza previa (preliminar específica) hasta una fuerza total (específica) y luego retornada al valor de fuerza previa.¹¹

El ensayo de dureza de esta investigación se hizo usando la escala Rockwell-C, la cual utiliza un cono de diamante como indentador y una carga de 150 kg. Se realizaron en total 3 rondas de medida de dureza en diferentes zonas de la biela que fueron escogidas así: cuerpo, diámetro interior (ver figura 22) de la cabeza y la zona interna de transición o “cuello” que une la cabeza con el cuerpo de la biela, aprovechando uno de los cortes transversales que se realizaron a la pieza.




¹⁰ Fuente: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Dureza Rockwell. [online]. [citado 31 Mayo 2014]. En: <<http://www.utp.edu.co/~gcalles/DUREZAROCKWELL.pdf>>.

¹¹ Ibid.

Se escogieron estas zonas de la pieza por ser las más representativas, con el objetivo de empezar a determinar el tipo de material de que estaba hecha la pieza, los posibles tratamientos térmicos que tenía y el proceso de fabricación usado; pues se sabe que los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela cuentan con grandes desgastes al soportar las fuerzas provenientes del pistón luego del ciclo de combustión y al convertir el movimiento alternativo en rotativo, razón por la cual estas zonas de la pieza deben ser lo más duras posible para evitar deformaciones y tener un mínimo de rugosidad para evitar la excesiva fricción, calentamiento y deterioro de las demás partes del motor como lo es el bulón del pistón y la muñequilla del cigüeñal.

Por otro lado el cuerpo de la biela no puede tener alta dureza sino una gran elasticidad y resiliencia para soportar y transmitir las altas cargas provenientes de la combustión del combustible sin quebrarse; en base a estos hechos se hizo la selección de estas zonas de la pieza, los datos de dureza aparecen en unidades **HRC** (HARDNESS ROCKWELL C) en la tabla 2:

Tabla 2. Valores de dureza de diferentes zonas de la biela

Zona de la biela		Valor dureza [HRC]	Valor promedio [HRC]
	<i>Cuerpo</i>	34	33,67
		37	
		30	
	<i>Diámetro interior de la cabeza</i>	61	61,5
		62	
		61,5	
	<i>Zona interna de transición o cuello</i>	33	34,33
		34	
		36	

Fuente: Durómetro WILSON.

De los anteriores datos encontrados es posible concluir que efectivamente la pieza de la presente investigación posee una dureza uniforme de **± 30 [HRC]** en toda su extensión producto de un proceso de fabricación por forja, temple y revenido (hipótesis confirmada al analizar las imágenes de la metalografía), dureza que le permite soportar grandes cargas a diferencia de la dureza encontrada en el diámetro interior de la cabeza y del pie, con un valor promedio de **± 60 [HRC]** lo que demuestra la existencia de un temple por inducción localizado que le permite soportar grandes desgastes y cargas.

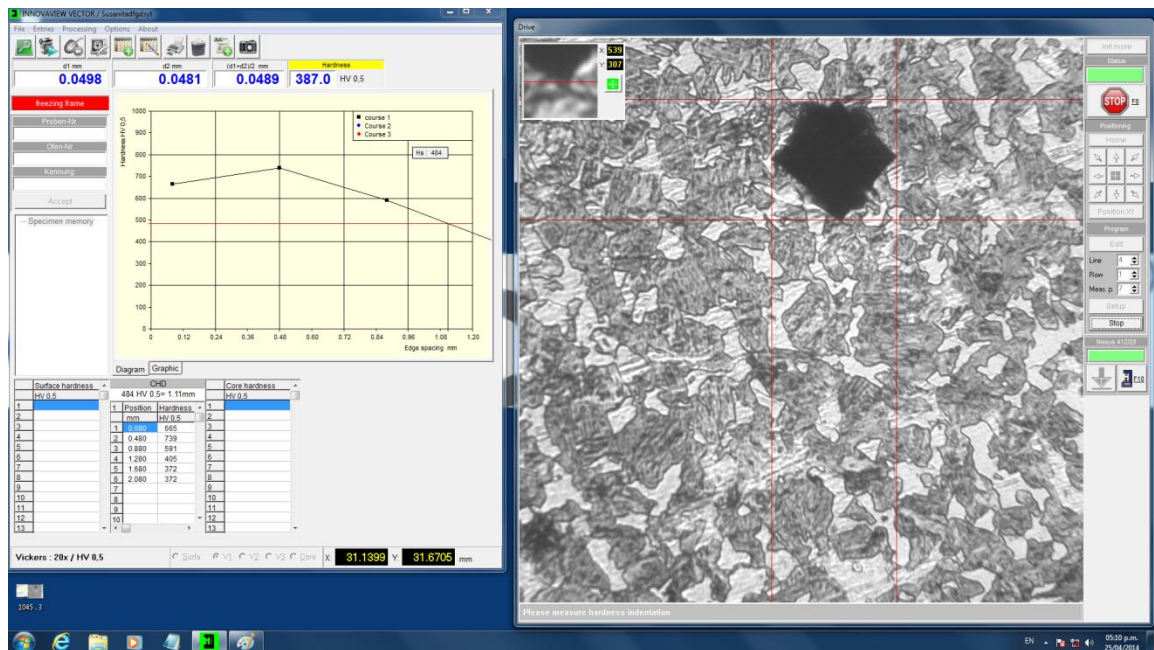
Una vez hechos los ensayos propuestos dentro de los objetivos específicos en el plan de proyecto se hizo evidente y necesario la realización de ensayos y pruebas adicionales que en un principio no se tuvieron en cuenta pero que resultaron ineludibles para una correcta y completa caracterización de los materiales y de los procesos que fueron aplicados en la fabricación de la pieza de estudio, entre esos está el ensayo de microdureza que se presentará a continuación y los ensayos de radiografía, microscópico en 3D y análisis de composición química utilizando un espectrómetro de chispa para análisis de metales.

La norma E384 de la ASTM, es el método de prueba para medir la dureza KNOOP y VICKERS de una muestra. La norma está bajo la jurisdicción del Subcomité E04.05 de la ASTM International sobre pruebas de dureza por micro-indentación, que forma parte del Comité E04 de la ASTM sobre metalografía. En el pasado, las pruebas de dureza solían estar pensadas para realizar pruebas de microdureza (E384) o de macro-dureza (E92). La diferencia principal entre las dos es que las fuerzas de prueba usadas con microdureza es de 1 [kg] o menos y con macro-dureza 1 [kg] o más. Sin embargo, los equipos de pruebas más nuevos tienen un mayor margen de fuerza. Los principales usuarios de este procedimiento son todos los que tengan que endurecer un material mediante un proceso de

tratamiento térmico y esta norma E384 con frecuencia es el mejor método para verificar si funciona bien el tratamiento térmico.¹²

Este procedimiento fue realizado en el laboratorio del grupo de investigación GIC de la Escuela de Metalurgia y Ciencias de los Materiales que se encuentra localizado en el Parque Tecnológico de Guatiguará mediante el equipo INNOVATEST EUROPE BV, microdurómetro de alta precisión, el cual trabaja con una carga de prueba de 0,5 kilogramo-fuerza y arroja los resultados en dureza VICKERS utilizando un indentador rombo punta de diamante; para ello se vale de un software llamado INNOVAVIEW VECTOR. En la figura 32 se puede ver un pantallazo de visualización de la prueba, realizada con este útil programa.

Figura 32. Pantalla de visualización software INNOVAVIEW VECTOR.



Fuente: Microdurómetro INNOVATEST Europe BV

12 Fuente: ASTM International. La dureza por microindentación. [online]. [citado 31 Mayo 2014]. En: <http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ10/e0405_spmj10.html>.

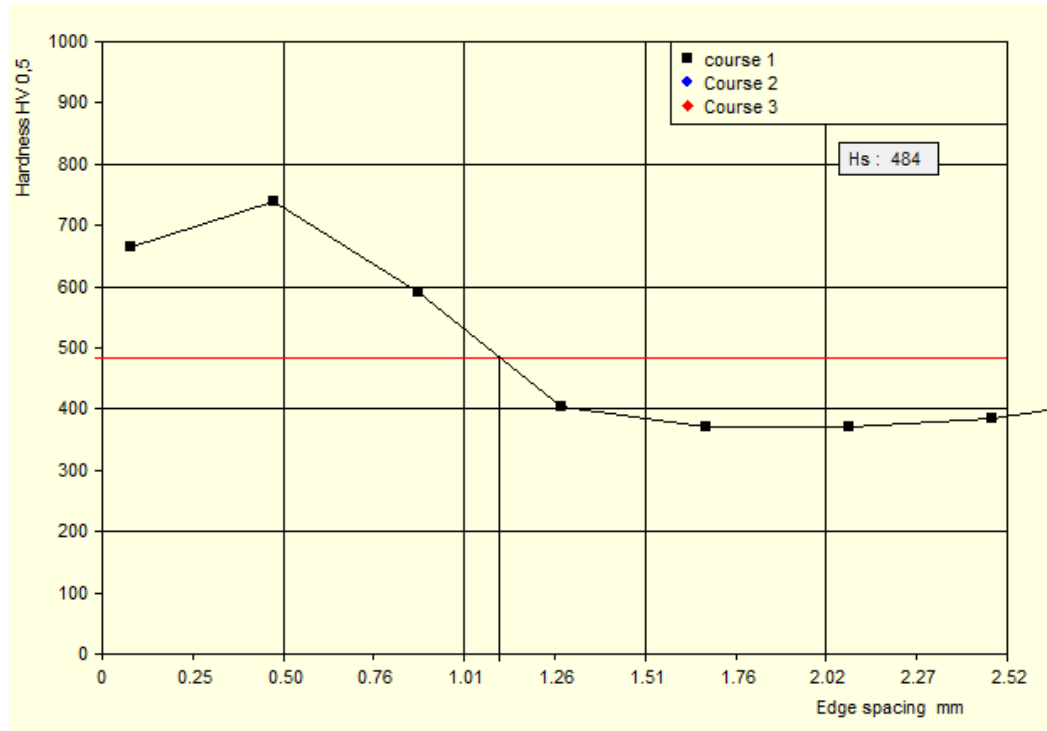
Todo esto con el propósito de obtener el perfil de dureza de la muestra embebida en baquelita obtenida de la cabeza de la biela, y con el fin de conocer exactamente la profundidad a la que se le aplicó el temple por inducción y el valor de dureza al que se llegó con este tratamiento térmico. La prueba consistió en la toma de dureza a lo ancho de la muestra de la cabeza de biela registrando la dureza y la distancia en cada una de las diez medidas que se realizaron para crear el perfil de dureza. En la figura 32 se puede ver hacia la parte derecha la huella de indentación en forma de rombo hecha por la punta de diamante del microdurómetro sobre la muestra y en la parte izquierda algunos valores de microdureza en unidades VICKERS y el perfil de dureza además de algunos datos del ensayo como la distancia y la carga aplicada. En la Tabla 3 se pueden ver los resultados del ensayo de microdureza realizado y en la figura 33 el perfil de microdureza de la muestra.

Tabla 3. Resultados del ensayo de microdureza.

N.	Posición [mm]	d1	d2	$\frac{d1 + d2}{2}$	Dureza VICKERS
1	0,080	0,0378	0,0369	0,0373	665
2	0,480	0,0357	0,0352	0,0354	739
3	0,880	0,0395	0,0397	0,0396	591
4	1,280	0,0481	0,0476	0,0479	405
5	1,680	0,0498	0,0500	0,0499	372
6	2,080	0,0503	0,0495	0,0499	372
7	2,480	0,0498	0,0481	0,0489	387
8	2,880	0,0469	0,0467	0,0468	423
9	3,280	-	-	-	7991
10	3,680	-	-	-	1413

Fuente: Software INNOVAVIEW VECTOR.

Figura 33. Perfil de dureza cabeza de la biela.



Fuente: Software INNOVAVIEW VECTOR.

Los resultados obtenidos del ensayo de microdureza comprueban que al diámetro interno de la cabeza y al del pie de la biela le fue aplicado un tratamiento térmico de temple para incrementar su dureza, conservando su ductilidad interna y su resistencia al desgaste pero solamente en una delgada capa efectiva como lo muestra la figura 33 (+/- 600 [HV] @ 0,88 [mm]), producto de una técnica de temple conocida como temple por inducción, basada en los mismos principios que el temple convencional pero con la diferencia de ser un tratamiento local (sólo aplicado a una zona específica de la pieza).

Los datos que se encontraron luego del análisis de micro-dureza ofrecen una idea aproximada de los diferentes parámetros que fueron usados para realizar el

temple por inducción a la biela original, variables que muy seguramente son aplicados a toda la línea de producción del fabricante como política de calidad de sus productos para cumplir con los estándares de calidad de la industria. Por tanto el espesor del temple es de $\pm 0,88$ [mm]; para la penetración de dicho temple en los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela la frecuencia usada por el generador fue de ± 450 [kHz]; y el tiempo de calentamiento estimado fue de unos 35 segundos, utilizando una densidad de corriente de ± 150 [MW/m²]. Para profundizar en los principios físicos de esta técnica y de como se le aplicaron a la biela del motor Shindaiwa ver anexos.

2.5.3 Ensayo de compresión. Cuando una pieza se somete a este ensayo de naturaleza destructiva se hace para conocer a ciencia cierta la resistencia y deformación que dicha pieza puede soportar con el propósito, en este caso, de comparar estos resultados con los del análisis hecho por el método de elementos finitos, los cálculos teóricos del pandeo y para alimentar la información en el diseño prototipo.

Para llevar a cabo este procedimiento se utilizó la máquina de ensayos universales modelo **318.50B-01** de la marca **MTS** perteneciente al laboratorio de pruebas destructivas del edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la Escuela de Ingeniería Civil. Para la correcta realización y análisis de los resultados de este ensayo la pieza tuvo que ser sometida primero que todo a un análisis superficial y sub-superficial en búsqueda de imperfecciones como grietas, incrustaciones, porosidades, irregularidades, etc. Que pudieran influir en los resultados del estudio por lo cual se aplicaron una serie de ensayos no destructivos como se mostro en la sección 2.4.

Para la realización de esta prueba, la biela fue acondicionada para tal efecto debido a que el montaje de la muestra debe permitir que una vez puesta en la máquina ésta quede vertical y fija con el fin de evitar desplazamientos de la pieza que provoquen la interrupción del experimento o un posible accidente. Para esto se le realizaron unos cortes en la cabeza y en el pie de la biela con el fin de adecuarle dos apoyos en forma de cilindros los cuales fueron torneados en acero AISI 4340, cortados por la mitad y con unos rebordes para darle una superficie de apoyo segura a la pieza a comprimir y al operario que realizó el experimento, los cuales pueden ser apreciados en la figura 34; donde además en la parte superior de la imagen se puede observar también la muestra rectangular tomada de la otra biela para el ensayo de composición química por chispa:

Figura 34. Biela cortada para ensayo de compresión junto con sus dos apoyos.



En las figuras 35 y 36 se puede observar la posición vertical de la pieza luego de ser puesta sobre los apoyos (figura 35) que se fabricaron teniendo en cuenta el material en que se fabricarían (se decidió utilizar el acero AISI 4340) para que pudiera soportar toda la carga de la máquina de ensayos universales sin deformarse y afectar así el experimento. También se muestra la maquina MTS en

que se realizo el ensayo destructivo (figura 36) con la biela y ésta (una vez deformada luego del experimento) puesta sobre las mordazas de la máquina de ensayos. En la sección 3.7 se confrontan los resultados de la prueba.

Figura 35. Biela puesta sobre los dos apoyos lista para ensayo de compresión.



Figura 36. Mordazas de la maquina MTS de ensayos universales.



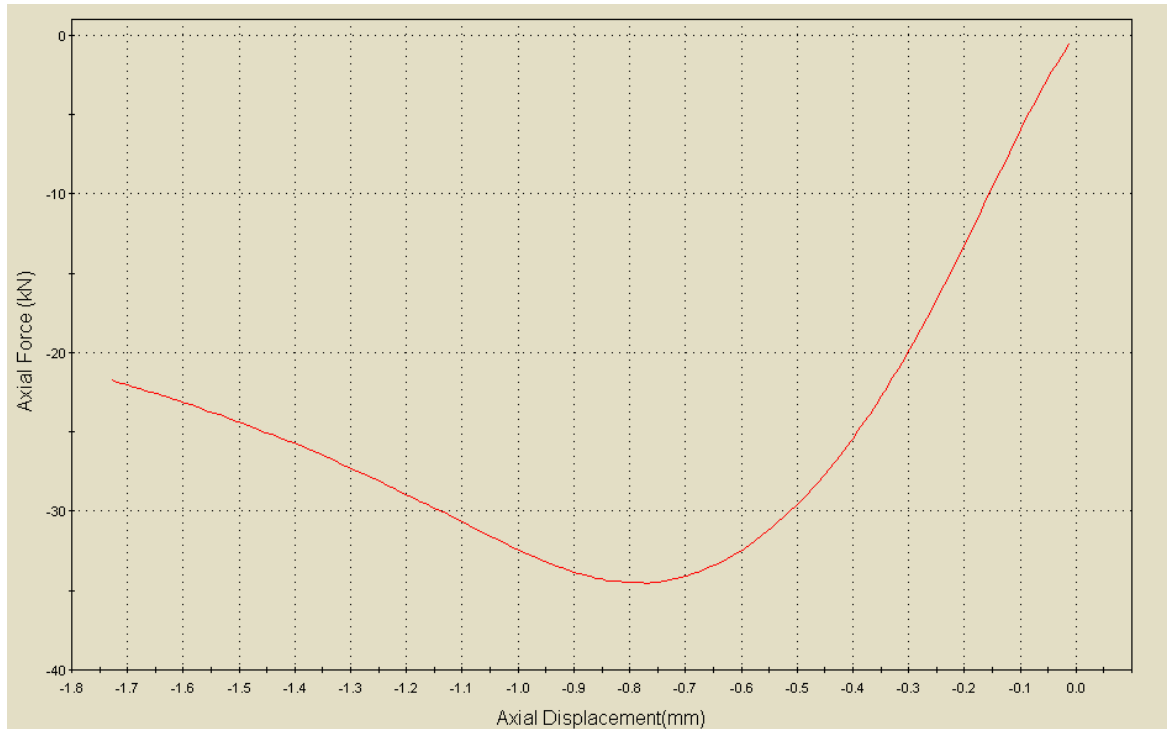
Luego de aplicar 35 [kN] de fuerza de compresión a la biela, ésta se deformó 1,7 mm evidenciándose el pandeo de la misma (figura 38), en la figura 37 se muestra la curva fuerza versus desplazamiento y en la tabla 4 los datos de la prueba.

Tabla 4. Datos prueba de compresión biela original.

Fuerza axial [kN]	Desplazamiento [mm]	Tiempo [s]
-2,9276268	-0,053085148	62,686523
-6,0314851	-0,098782547	63,686523
-9,6151361	-0,148918180	64,686523
-13,3002440	-0,199887020	65,686523
-16,8298550	-0,251603540	66,686523
-20,0471900	-0,301824630	67,686523
-23,0380570	-0,353646460	68,686523
-25,5505140	-0,402425590	69,686523
-27,7767790	-0,450768230	70,686523
-29,7273900	-0,503758250	71,686523
-31,2264230	-0,551794170	72,686523
-32,5533290	-0,603052320	73,686523
-33,4677770	-0,653378070	74,686523
-34,1202350	-0,700942220	75,686523
-34,4686700	-0,754543780	76,686523
-34,4933430	-0,802689430	77,686523
-34,2746160	-0,852232100	78,686523
-33,8277470	-0,900199650	79,686523
-33,1754650	-0,952336970	80,686523
-32,3867380	-1,003878400	81,686523
-31,5286790	-1,053492500	82,686523
-30,6331100	-1,102719700	83,686523
-29,7478070	-1,151622500	84,686523
-28,9062670	-1,202494100	85,686523
-28,0598070	-1,250341300	86,686523
-27,2763210	-1,299756200	87,686523
-26,4248450	-1,352575200	88,686523
-25,6494870	-1,404253800	89,686523
-24,9911350	-1,453648800	90,686523
-24,3584940	-1,502930900	91,686523
-23,6983260	-1,553112900	92,686523
-23,1031630	-1,603599100	93,686523
-22,5500600	-1,651024900	94,686523
-22,0416790	-1,700234900	95,686523

Fuente: Software máquina MTS.

Figura 37. Diagrama fuerza contra desplazamiento ensayo compresión biela.



Fuente: Software máquina MTS.

Figura 38. Estado final de la biela luego de aplicar el ensayo de compresión.



2.5.4 Ensayo de composición química del acero por la técnica de chispa.

Para este ensayo destructivo se contó con la colaboración del profesor Rafael Cabanzo de la Escuela de Física de la UIS y de los investigadores del Parque Tecnológico de Guatiguará pertenecientes al Grupo de Investigación en Corrosión (GIC). Se utilizó el equipo modelo Q4 TASMAN de la marca BRUKER especial para ensayos de composición química; el cual mediante la técnica de espectrometría por chispa utilizando un gas noble, en este caso Argón, crea un arco eléctrico entre dos electrodos, donde uno de los electrodos termina siendo la misma pieza a examinar. Se cortaron y perfilaron dos pedazos de forma rectangular de cerca de 2 [cm] por 3 [cm] de cada una de las bielas de la presente investigación, véase la figura 34.

Aunque es un equipo sofisticado no se necesita de un complicado montaje para llevar a cabo la prueba, sencillamente se monta la muestra en el equipo, se pone a funcionar y se obtiene un haz de luz por cada muestra, que dependiendo de los elementos que componen el material con el que se fabricó la pieza, emite en diferentes longitudes de onda consiguiendo de dicho fenómeno físico-químico las cantidades existentes de los mismos; esta huella de espectrometría termina siendo una especie de documento de identificación que caracteriza el material de estudio, estos porcentajes pueden variar de una pieza a otra, mínimamente, incluso en el caso de dos piezas pertenecientes a una misma máquina, debido a que dependiendo de la forma como se obtuvo el material, que en este caso es una aleación de acero, la composición química de la misma varía por diversos factores.

En la tabla 5 pueden apreciarse los resultados, en porcentaje, del ensayo de chispa aplicado a ambas muestras de ambas bielas, la que se obtuvo del motor Shindaiwa y la que se compró en el mercado de repuestos. El espectrómetro de emisión óptica está basado en la tecnología CCD (charge-coupled device).

Tabla 5. Porcentajes de elementos encontrados en la prueba.

Símbolo elemento	Biela tomada del motor			Biela comprada en el mercado		
	Medida1	Medida2	Promedio	Medida1	Medida2	Promedio
C	0,252	0,261	0,2565	0,218	0,216	0,217
Si	0,246	0,228	0,237	0,237	0,225	0,231
Mn	0,526	0,533	0,5295	0,480	0,484	0,482
P	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
S	<0,150	<0,150	<0,150	<0,150	<0,150	<0,150
Cr	0,925	0,920	0,9225	0,832	0,833	0,8325
Mo	0,157	0,150	0,1535	0,143	0,143	0,143
Ni	0,032	0,031	0,0315	0,019	0,017	0,018
Cu	0,162	0,104	0,133	0,040	0,039	0,0395
Al	0,0061	0,0053	0,0057	0,0061	<0,005	0,00555
As	0,011	0,0096	0,0103	0,0085	0,0088	0,00865
Bi	0,014	0,011	0,0125	<0,01	<0,01	<0,01
Ca	0,012	0,011	0,0115	0,0092	0,011	0,0101
Co	0,008	0,0077	0,00785	0,0052	0,0051	0,00515
Mg	0,011	0,0083	0,00965	0,0086	0,0085	0,00855
N	0,059	0,045	0,052	0,041	0,048	0,0445
Pb	0,023	0,018	0,0205	0,020	0,016	0,018
Sn	0,006	0,006	0,006	<0,005	<0,005	<0,005
Ti	0,0026	0,0026	0,0026	0,0027	0,0026	0,00265
V	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
W	0,013	0,013	0,013	0,01	<0,01	0,01
Zn	0,005	0,0043	0,00465	0,0049	0,0043	0,0046
Zr	0,0032	0,0031	0,00315	0,0022	0,0020	0,0021
Fe	97,37	97,46	97,415	97,73	97,74	97,735

Fuente: Software del equipo Q4 TASMAN del grupo de investigación GIC.

Comparando los resultados del porcentaje de elementos encontrados en el material de ambas bielas se puede notar la huella particular de cada una de las aleaciones usadas para la fabricación de las mismas, es decir, que es práctica y técnicamente imposible obtener dos piezas con idéntica composición química, incluso si estas fueron hechas en las mismas máquinas, con los mismos procedimientos y por una misma empresa, sin embargo, se puede notar la gran similitud entre los porcentajes de elementos de ambas piezas.

Por último, analizando los resultados de los porcentajes de elementos químicos encontrados y comparándolos con los mostrados en la figura 39 es razonable indicar que, aproximadamente, las bielas fueron fabricadas usando acero al cromo según la designación AISI/SAE 5120, según la composición de los diferentes tipos de aceros al cromo y el rango de las diferentes cantidades de aleación.

Figura 39. Composición química aceros al cromo según designación AISI.

Designación AISI	C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Ni	Cr	Mo
5117	0,15 - 0,20	0,70 - 0,90	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90	
5120	0,17 - 0,22	0,70 - 0,90	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90	
5130	0,28 - 0,33	0,70 - 0,90	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,10	
5132	0,30 - 0,35	0,60 - 0,80	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,75 - 1,10	
5135	0,33 - 0,38	0,60 - 0,80	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,80 - 1,05	
5140	0,38 - 0,43	0,70 - 0,90	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90	
5150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90	
5155	0,51 - 0,59	0,70 - 0,90	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90	
5160	0,56 - 0,64	0,75 - 1,00	0,035	0,040	0,15 - 0,35		0,70 - 0,90	
E51100	0,98 - 1,10	0,25 - 0,45	0,025	0,025	0,15 - 0,35		0,90 - 1,15	
E52100	0,98 - 1,10	0,25 - 0,45	0,025	0,025	0,15 - 0,35		1,30 - 1,60	

Fuente: <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/tabla2-2.html>

Las propiedades de resistencia a la tensión encontradas para el acero AISI 5120 dependen del tratamiento térmico que le haya sido aplicado, por ejemplo el σ_y (esfuerzo a la fluencia) es de 333,4 [MPa], si es laminado en caliente o 843,37 MPa si se trata de un acero con T. T. (revenido a 450[°C]); ver figura 40.

Figura 40. Propiedades físicas de los aceros AISI/SAE 5120.

Propiedades Físicas de los Aceros S.A.E.									
Acero		Tratamiento Térmico			Propiedades Físicas				
S.A.E. N°	Estado	Calentado a °C	Enfriando en	Revenido a °C	Limite de Rotura Kg/mm ²	Limite de Fluencia Kg/mm ²	Alarga- miento %	Estricción %	N° de dureza Brinell
4820	TT	820	Aceite	315	140	126	15	61	390
5120	LC				58	34	28	61	
5120	LF				55		25		165
5120	TT		Agua	450	109	86	12	46	335
5120	TT	870	Agua	500	70	50	21	67	210
5130	LC				74	46	24	63	207
5130	N	900			73	47	24	63	201
5130				430	136	118	12	49	375

Fuente: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi2000/santa-fe-sur/ensayodemateriales/tabla.htm>

En el análisis micrográfico que se le aplicó a la biela original se puede apreciar el tipo de tratamiento térmico que le fue operado, un temple y revenido a +/- 480 [°C] el cual le da una resistencia a la fluencia de 843,37 [MPa]. Por otra parte, de acuerdo a la dureza que ostenta el acero AISI 5120 (335 [HB]) el límite a la fluencia es igual que para el encontrado en la biela original según el ensayo de compresión aplicado, lo que confirma definitivamente que el tipo de material usado en la fabricación de la biela original es un acero al cromo.

2.6 ANÁLISIS SECCIÓN TRANSVERSAL BIELA.

El análisis del cuerpo de la biela original como columna¹³ se realizó como parte de la modelización matemática y física de la pieza para su caracterización. Según R. L. Mott: “Para realizar el análisis de falla por pandeo se empieza por determinar la longitud efectiva L_e ésta se define matemáticamente como¹⁴:

$$L_e = K * L \quad (4)$$

Donde L es longitud de la columna y K es una constante que depende del mecanismo de fijación en los extremos.

A continuación se calcula el radio de giro mediante la siguiente expresión:

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5)$$

Donde I es el momento de inercia mínimo y A es el área de la sección transversal. Para analizar columnas con carga central se tienen dos métodos, el de Euler para columnas largas y esbeltas y el de J. B. Johnson para columnas cortas. El criterio que se utiliza para usar uno de los métodos es la comparación entre la relación de esbeltez de transición también conocida como la constante de columna C_c con el valor de la expresión kL/r .

La figura 42 muestra el procedimiento a seguir para determinar la carga crítica de pandeo dependiendo del tipo de columna que se esté estudiando.

¹³ HIRU. Sistemas de ecuaciones lineales y matrices. [online]. [citado 28 febrero 2013]. En: <<http://www.hiru.com/maticas/sistemas-de-ecuaciones-lineales-y-matrices>>.

¹⁴ MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Traducido: Virgilio González y Poso. 4 ed. México D.F.: Pearson educación, 2006. p. 234. ISBN 970-26-0812-0.

El valor de C_c se calcula de la siguiente manera:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (6)$$

Donde S_y es la resistencia de fluencia del material.

Teniendo en cuenta el factor de seguridad N , se puede establecer la siguiente relación:

$$P_a = \frac{P_{cr}}{N} \quad (7)$$

Donde P_a es la carga que puede soportar la columna sin que ésta falle por pandeo.

Se tiene:

- Material de la biela = Acero Aleado
- Modulo de elasticidad = 210 [GPa]
- Resistencia a la fluencia = 843,3 [MPa]

Área de sección transversal mínima (ver figura 44):

$$A = 2 \text{ [mm]} * 6,5 \text{ [mm]} + 2 * 3,5 \text{ [mm]} * 2,5 \text{ [mm]}$$

$$A = 30,5 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Longitud real de la columna = 61,92 [mm]

Otra propiedad física importante para tener en cuenta en una columna es la inercia de la sección transversal, la cual depende de la geometría, en las figuras 41 y 42 se muestra el comportamiento de las cargas sobre la biela y los diferentes tipos de apoyo sobre los que se puede situar una columna; respectivamente:

Figura 41. Aplicación de fuerzas sobre la biela.

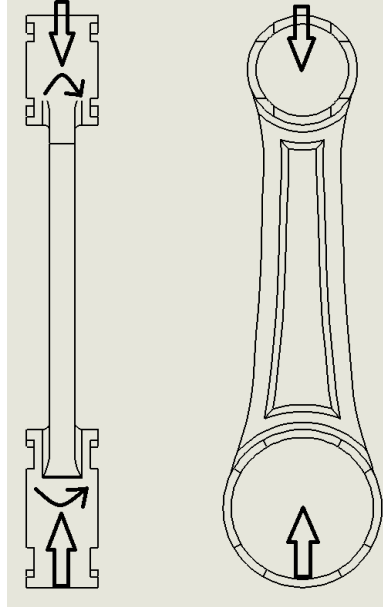
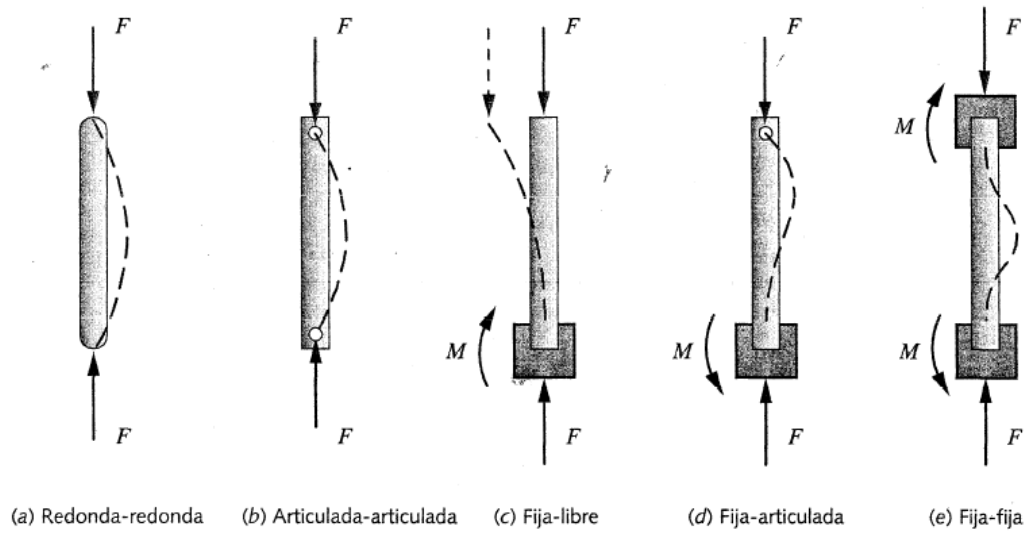


Figura 42. Tipos de apoyos para columnas.



Fuente: MOTT, Robert. Diseño de máquinas.

Los valores de longitud equivalente se obtienen de la figura 43 teniendo en cuenta que el comportamiento de la biela de la presente investigación es del tipo fija-fija:

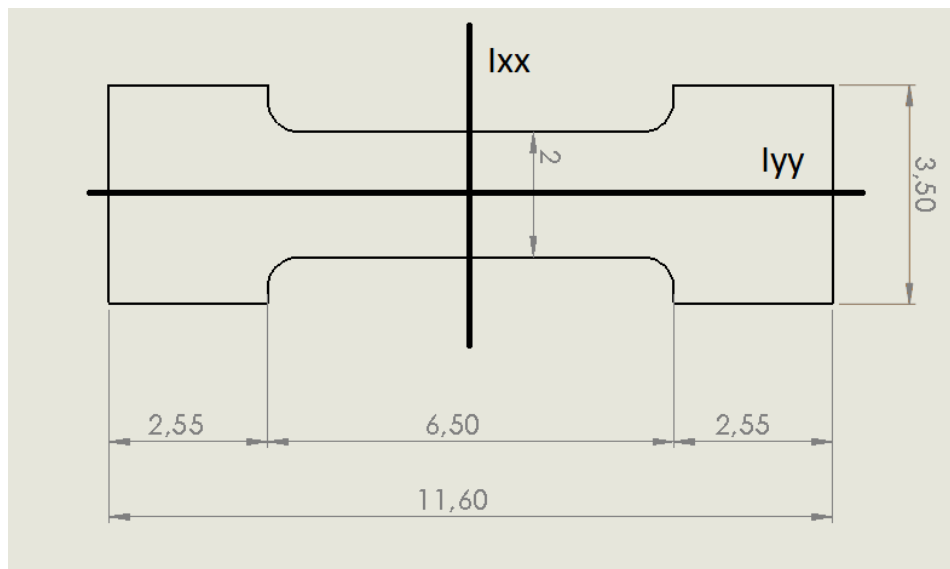
Figura 43. Tabla de longitudes equivalentes para análisis de columnas.

TABLA 4-7 Factores de longitud efectiva, según la condición terminal de la columna			
Condiciones terminales	Valor teórico	Recomendado por AISC*	Valor conservador
Redonda-redonda	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$
Articulada-articulada	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$
Fija-libre	$l_{eff} = 2l$	$l_{eff} = 2.1l$	$l_{eff} = 2.4l$
Fija-articulada	$l_{eff} = 0.707l$	$l_{eff} = 0.80l$	$l_{eff} = l$
Fija-fija	$l_{eff} = 0.5l$	$l_{eff} = 0.65l$	$l_{eff} = l$

* El American Institute of Steel Construction, en su *Manual of Steel Construction*.

Fuente: MOTT, Robert. Diseño de máquinas.

Figura 44. Sección transversal biela original.



De la figura 44 se calcula como sigue para el eje I_{xx} :

$$I_{xx} = \left(\frac{ba^3}{12}\right) + 2 \left(\frac{ba^3}{12} + b * a * d^2\right) \quad (8)$$

$$I_{xx} = \left(\frac{(2 \text{ [mm]})(6,5 \text{ [mm]}^3)}{12}\right) + 2 \left(\frac{(3,5 \text{ [mm]})(2,5 \text{ [mm]}^3)}{12} + (2,5 \text{ [mm]}) * (3,5 \text{ [mm]}) * (4,5 \text{ [mm]})^2\right)$$

$$I_{xx} = 417,1791 \text{ [mm]}^4$$

Cálculo de la inercia utilizando el teorema de Steiner en el eje I_{yy} :

$$I_{yy} = \left(\frac{ba^3}{12}\right) + 2 \left(\frac{ba^3}{12} + b * a * d^2\right) \quad (9)$$

$$I_{yy} = 2 * \left(\frac{(2,5 \text{ [mm]})(3,5 \text{ [mm]}^3)}{12}\right) + \left(\frac{(6,5 \text{ [mm]})(2 \text{ [mm]}^3)}{12}\right)$$

$$I_{yy} = 22,1979 \text{ [mm]}^4$$

Cálculo del radio de giro en el eje I_{xx} :

$$r_{xx} = \sqrt{\frac{I_{xx}}{A}} \quad (10)$$

$$r_{xx} = \sqrt{\frac{417,1791 \text{ [mm]}^4}{30,5 \text{ [mm]}^2}}$$

$$r_{xx} = 3,698378 \text{ [cm]}$$

Cálculo del radio de giro en el eje I_{yy} :

$$r_{yy} = \sqrt{\frac{I_{yy}}{A}} \quad (11)$$

$$r_{yy} = \sqrt{\frac{22,1979 \text{ [mm}^4\text{]}}{30,5 \text{ [mm}^2\text{]}}}$$

$$r_{yy} = 0,8531119 \text{ [cm]}$$

Cálculo de la longitud efectiva de columna L_e para el tipo articulada-articulada:

$$L_e = KL \quad (12)$$

$K=1$ ya que es de tipo articulada-articulada (figura 42) en la dirección, por tanto:

$$L_e = L$$

Cálculo de la longitud efectiva de columna L_e para empotrada-empotrada:

$$L_e = KL \quad (13)$$

$K=0,5$ ya que es de tipo empotrado-empotrado (figura 42) en la dirección:

$$L_e = 0,5 * L$$

La razón de esbeltez en el tipo articulada-articulada es:

$$S_r = \frac{l_{ef}}{r_{xx}} \quad (14)$$

$$S_r = \frac{6.192 \text{ [cm]}}{3,698378 \text{ [cm]}}$$

$$S_r = 1.674247$$

La razón de esbeltez en el tipo empotrada-empotrada es:

$$S_r = \frac{l_{ef}}{r_{yy}} \quad (15)$$

$$S_r = \frac{0,5 * 6.192 \text{ [cm]}}{0,8531119 \text{ [cm]}}$$

$$S_r = 3.62906$$

Cálculo de la razón de esbeltez:

$$(S_r)_D = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (16)$$

$$(S_r)_D = \sqrt{\frac{2\pi^2 (210 * 10^9 \text{ [} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\text{]})}{(843,4 * 10^6 \text{ [} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\text{]})}}$$

$$(S_r)_D = 70,11$$

Analizando si la biela se comporta como una columna corta o una columna larga para conocer si es posible aplicar la ecuación de Euler o la ecuación de Johnson para el caso articulada-articulada se usa la ecuación de columna corta:

$$P_{cr} = AS_y \left(1 - \frac{S_y \left(\frac{KL}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right) \quad (17)$$

$$P_{cr} = \left(30,5 \text{ [mm}^2] * \frac{1 * 10^{-6} \text{ m}^2}{1 \text{ mm}^2} \right) 843 * 10^6 \text{ N/m}^2 \left(1 - \frac{843 * 10^6 \text{ N/m}^2 (1.674247)^2}{4\pi^2 * 210 * 10^9 \text{ N/m}^2} \right)$$

$$P_{cr} = 25704,1715 \text{ [N]}$$

Analizando de nuevo, pero en dirección ortogonal a la anterior, si es columna corta o columna larga para saber si aplica la ecuación de Euler o la ecuación de Johnson para el caso empotrada-empotrada se usa la ecuación de columna corta:

$$P_{cr} = AS_y \left(1 - \frac{S_y \left(\frac{KL}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right)$$

$$P_{cr} = (30,5 \text{ mm}^2 * \frac{1 * 10^{-6} \text{ m}^2}{1 \text{ mm}^2}) 843 * 10^6 \text{ N/m}^2 \left(1 - \frac{843 * 10^6 \text{ N/m}^2 (3.62906)^2}{4\pi^2 * 210 * 10^9 \text{ N/m}^2} \right)$$

$$P_{cr} = 25677,0678 \text{ [N]}$$

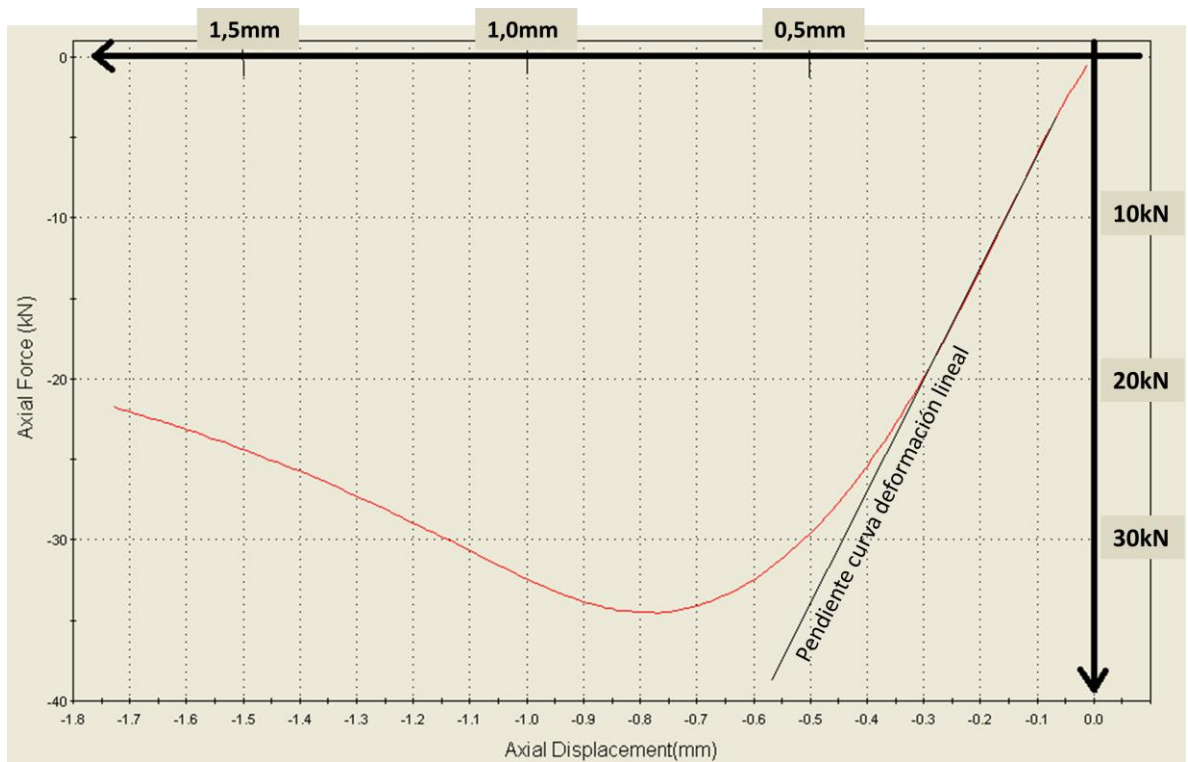
Teniendo en cuenta que la biela tiene su límite elástico aproximadamente a 25 [kN] y a partir de allí comienza el pandeo, como lo muestra la prueba de compresión hecha en la máquina de ensayos universales, ver figura 37, se confirma lo previsto en la teoría anterior, revisar ecuación (17).

La siguiente imagen, figura 45, muestra el tipo de falla que experimentó la biela al ser sometida al ensayo de compresión; al confrontar dicho comportamiento con el último tipo de apoyo (tipo e) que muestra la figura 42 se hace evidente que son de la misma clase:

Figura 45. Falla de la biela por pandeo luego de la aplicación de la carga.



Figura 46. Pendiente curva fuerza contra desplazamiento.



Fuente: Software máquina MTS de Ensayos Universales.

La forma en que la biela original se deforma luego de aplicado el ensayo de compresión y la pendiente de la curva fuerza-desplazamiento (figura 46) muestran que la biela fue diseñada para soportar ± 18 [kN] antes de sobrepasar el límite elástico cuya pendiente está alrededor de los 75 [kN/mm].

2.7 INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA BIELA

Una vez fueron caracterizadas ambas bielas (la que se extrajo del motor y la que se compro en el mercado de repuestos) y analizados los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos, la metrología y los demás ensayos aplicados y explicados al detalle en las secciones anteriores, solo queda por definir la rutina de manufactura que fue aplicada a la biela, el proceso de fabricación que más se ajusta a los datos encontrados que muestran como la empresa o empresas pasaron de tener un tocho de acero del tipo AISI 5120 a una definida biela para un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada de aplicación agrícola.

Comenzando por la apariencia física externa que a simple vista mostraban las bielas una vez se recibieron: éstas tenían un aspecto rustico e irregular superficialmente hablando (véase figuras 4 y 20), considerando que en su zona media longitudinal ambas piezas exhibían una rebaba de material sobrante que únicamente un proceso de forja puede dejar debido a la técnica de matrices y compresión por golpe como se lleva a cabo (véase figuras 47).

Investigando en la literatura técnica de manufactura otro punto a favor de la forja como medio de producción de ambas piezas es el estudio realizado por la

Universidad Politécnica Timisoara¹⁵ donde afirma concluyentemente que más del noventa por ciento (90%) de las bielas que se fabrican en la actualidad se crean mediante el método de forja en caliente (hot forging), debido a que es más ventajosa económicamente y concede las mejores propiedades mecánicas en comparación que los otros dos métodos que siguen en la lista, que son: la sinterización de polvos (powder forging) y la fundición (casting).

Figura 47. Imagen de ambas bielas usadas en la presente investigación.



(a)



(b)

¹⁵ PLANCAK, Miroslav et al. A review of the possibilities to fabricate connecting rods. Annals of Faculty Engineering Hunedoara. University Politehnica Timisoara. Faculty of Engineering Hunedoara, Tome XI. 2013. 4 p.

Se concluye que efectivamente ambas bielas fueron fabricadas por el método de la forja al observar las muestras metalográficas (ver figuras 24 y 25) que hace evidente la macrografía (asimismo puede verse en la micrografía) de las muestras tomadas del cuerpo y de la cabeza de la biela, donde la estructura interna revela que la pieza fue presionada mediante una gran fuerza debido a que no existen porosidades ni incrustaciones sino que aparecen líneas de flujo de material con una granulometría uniforme únicamente alcanzada con la forja.¹⁶

El proceso básico que el fabricante le aplicó a ambas bielas (y, que indudablemente aplica a toda su línea de producción) es la forja, es el primer paso que lleva a un pedazo de acero informe a tomar las dimensiones y propiedades que el diseñador de la pieza asignó en los planos en un principio. Sin embargo la pieza aún necesita de operaciones adicionales que mejoren sus propiedades mecánicas y superficiales; por ello el siguiente paso en el proceso de fabricación que fue aplicado a la biela fue descubierto estudiando las imágenes de micrografía (véase figuras 27 a 30) que revelan la estructura metalográfica interna del cuerpo y de la zona del pie y de la cabeza de la biela que el ensayo de dureza y microdureza practicado a las muestras en un primer momento hicieron evidente por cuanto mostraban que eran diferentes (véase figuras 32 y 34; tablas 2 y 3) lo que indicaba la aplicación de una operación de endurecimiento en la zona del cuerpo y de temple localizado por inducción en la zona de los alojamientos (diámetros internos del pie y de la cabeza de la biela), lo cual confirmó el ensayo de composición química por chispa (ver tabla 5) al revelar los porcentajes exactos de elementos químicos que hacen parte del acero utilizado en la pieza, que es equivalente a un acero AISI 5120 (ver figura 39) el cual posee una dureza natural que oscila entre 4 HRC y 20 HRC; lo cual confirma que a la pieza además del proceso básico o primario de manufactura le fue aplicado un proceso para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, además teniendo en cuenta la

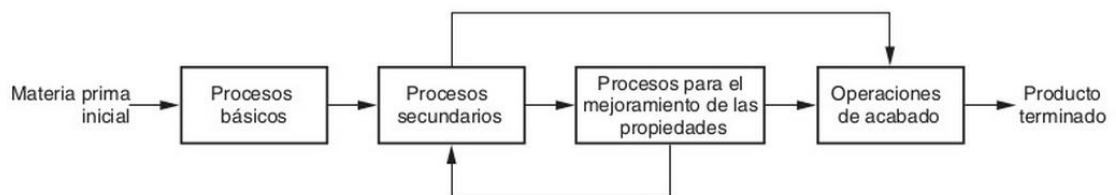
¹⁶ ASTM Handbook. Vol 09. Metallography and Microstructures. P. 592-594.

diferencia exhibida entre las superficies externas burdas de la biela y las superficies internas rectificadas de los alojamientos (ver figura 10) es claro que se le aplico un proceso secundario de maquinado a la biela para obtener las tolerancias (tipo **CN**) y los acabados (tipo **N6**) que demandan el uso de rodamientos (ver sección 5.6), proceso que se conoce como rectificado y se lleva cabo en un centro de mecanizado, en un torno, una fresadora o en una maquina rectificadora de bielas.

Por último y no menos importante se encuentran las operaciones de acabado que proporcionan un recubrimiento a las superficies de trabajo para evitar daños como la corrosión o proteger la pieza del envejecimiento como la pintura, en el caso de la biela le fue aplicado un recubrimiento de cobre mediante electrodeposición como lo confirman las micrografías obtenidas en el microscopio Olympus a un aumento de 100X (ver figura 31) para protegerla del agresivo ambiente (H₂O, CO₂, CO, NO_x, gasolina, aceite, etc.) que se vive dentro de un motor de dos tiempos.

Para la manufactura de un elemento mecánico (ver figura 48): “una secuencia típica de procesamiento para fabricar una pieza separada consiste en: 1) un proceso básico, 2) uno o más procesos secundarios, 3) operaciones para mejorar las propiedades físicas y 4) operaciones de terminado...”¹⁷

Figura 48. Secuencia típica de procesos requeridos en la fabricación de piezas.

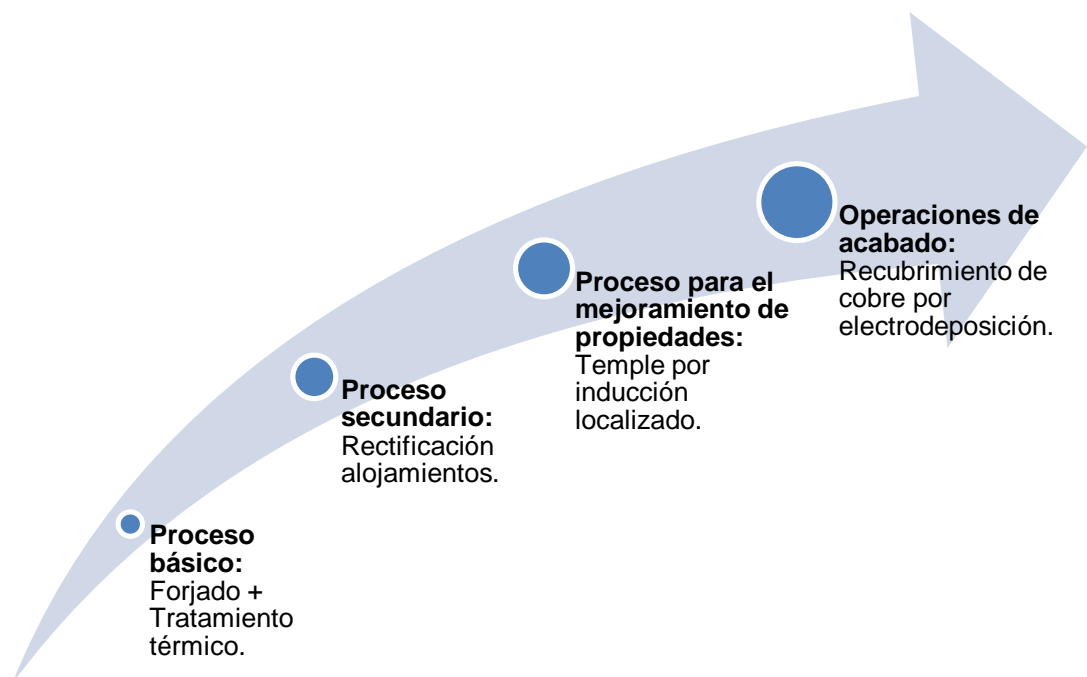


Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 940.

¹⁷ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 939.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones y en base a las recomendaciones del Dr. Ing. M. P. Groover, es posible afirmar que muy seguramente el proceso de manufactura utilizado para la fabricación de ambas bielas es el que se muestra en el siguiente diagrama (figura 49):

Figura 49. Secuencia de procesos aplicados en la manufactura de la biela original.



La anterior rutina de procesos no es una “camisa de fuerza” ni es algo que este “escrito sobre piedra”, es decir, es un buen indicio de los procesos y de la secuencia que la empresa fabricante de las bielas para los motores Shindaiwa pudo efectuar para producir las piezas, pero hay que tener en cuenta otra de las observaciones que el Dr. Ing. M. P. Groover hace en su libro: “En algunos casos, después de los procesos de mejoramiento de propiedades se aplican operaciones secundarias adicionales antes de proceder al acabado, como lo sugiere el ciclo de retorno... Un ejemplo es una pieza maquinada que se endurece mediante

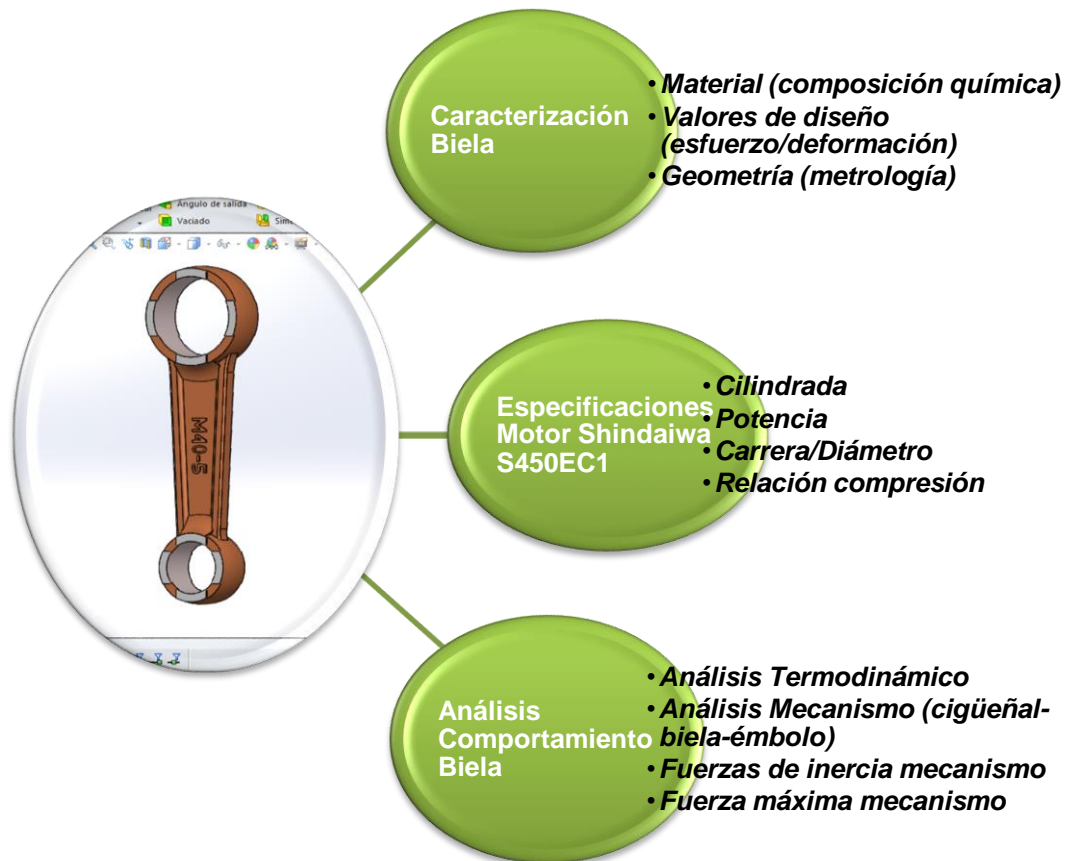
tratamiento térmico; antes de éste, la pieza se deja con un tamaño más grande de lo ideal para permitir la distorsión. Después del endurecimiento, se reducen al tamaño y a la tolerancia finales mediante acabado por esmerilado.”¹⁸ Lo que quiere decir que la secuencia que empleo el fabricante para realizar la pieza pudo ser otra a la sugerida en la presente investigación.

¹⁸ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 940.

3. PROCESO DE DISEÑO BIELA

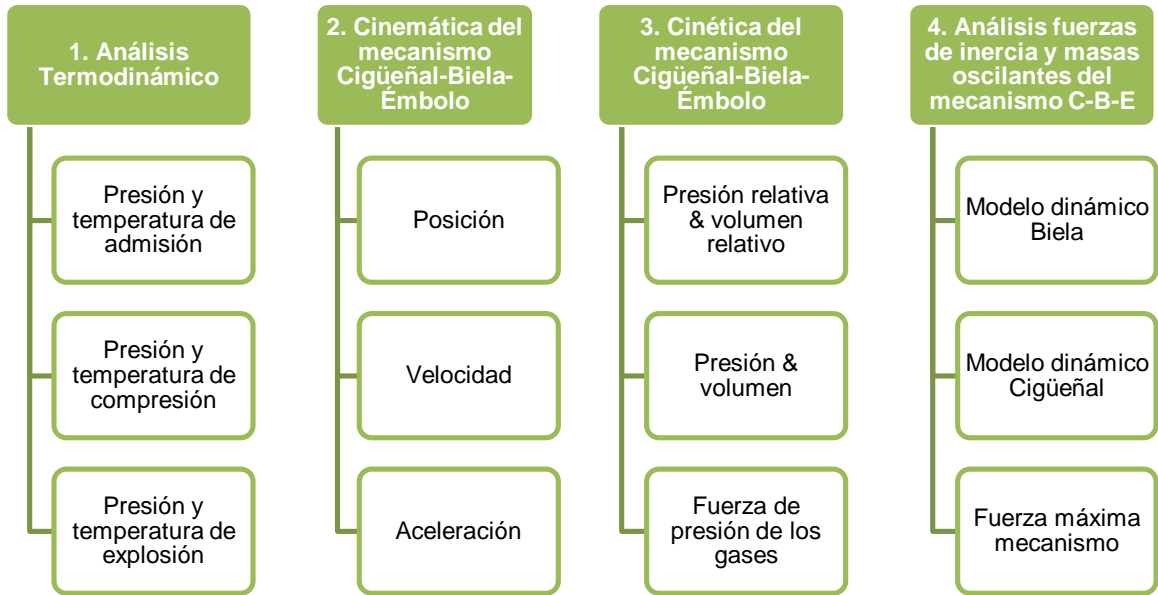
Los requerimientos de diseño para la biela se presentan en la figura 50:

Figura 50. Requerimientos de diseño biela.



Los anteriores requerimientos de diseño surgen de los mismos resultados de caracterización de la biela original (capítulo 2); de las especificaciones que maneja el motor Shindaiwa S450EC1 (sección 2.2) y de los cálculos que se exponen en el presente capítulo, los cuales se resumen en la figura 51 mediante una lista de jerarquías.

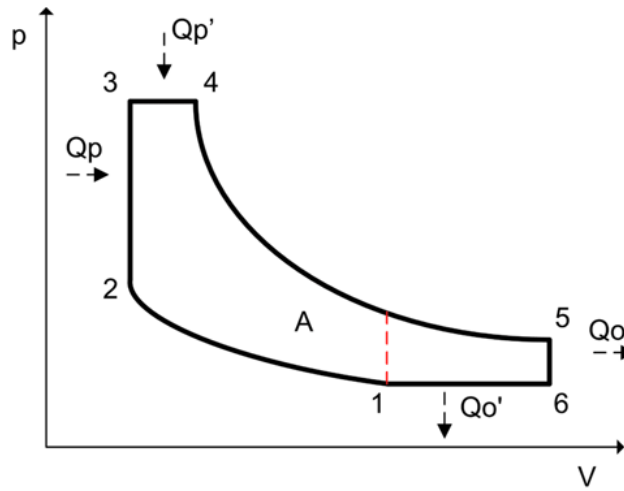
Figura 51. Cálculos fundamentales aplicados al diseño.



3.1 ANÁLISIS DEL CICLO TERMODINAMICO

La siguiente gráfica, mostrada en la figura 52, es considerada como el comportamiento ideal de la presión de los gases conforme varía el volumen; de allí se puede encontrar la presión máxima del ciclo, esto debido a que el diseño de la biela demanda del valor de fuerza máxima que puede llegar a generar el ciclo termodinámico dentro del motor, la cual se obtiene al multiplicar dicha presión máxima por la sección transversal del émbolo.

Figura 52. Ciclo ideal presión-volumen para motores de dos tiempos.



Fuente: Libro de Heywood página 163.

Se calculó la presión mínima del sistema que es la presión de admisión:

$$Pa = 1,05pk \quad (18)$$

$$Pa = 1,05 * 90659 \text{ [Pa]}$$

$$Pa = 95191 \text{ [Pa]}$$

Donde, Pa es la presión de alimentación; pk que es la presión a la entrada (admisión); po es igual a la presión atmosférica (como no hay sobre-alimentación $po = pk$) para la ciudad de Bucaramanga a 960 [msnm] la presión atmosférica es igual a 90,6 [kPa]. El anterior resultado, que equivale a 0,95 [bar], se encuentra en el rango de presión de 0,8 [bar] – 1,6 [bar] para un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada que trabaja entre las 3500 rpm a 7500 [rpm].¹⁹

¹⁹ CLIMENT, Héctor. Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña cilindrada. Editorial Reverté. Barcelona. 2004. p. 70-71.

3.1.1 Temperatura de admisión. Se procedió al cálculo de la temperatura de admisión como se encuentra definido en el libro de Jovaj (página 93), como sigue:

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \varphi \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \quad (19)$$

En donde:

T_a = Temperatura del Ciclo de admisión en kelvin.

T_o = Temperatura inicial en kelvin.

ΔT = Incremento de Temperatura en el proceso.

φ = Relación entre los calores específicos de la carga y la mezcla.

γ_r = Coeficiente de Gases Residuales.

T_r = Temperatura de los gases residuales.

Por tanto:

$T_o = 295,15 [K]$ (Temperatura promedio en la ciudad de Bucaramanga)

$\varphi = 1$ Ya que se desprecia la relación entre los calores específicos de la carga fresca y los gases residuales $cp'' = \varphi cp$ (ver Jovaj p. 93).

$\Delta T = 20 [^{\circ}C] = 20 \text{ Kelvin}$ (Ver Jovaj p. 92).

En motores diesel el coeficiente de presión de los gases residuales γ_r varia entre 0,03 y 0,06 tomamos el valor que hace que la fuerza sea máxima $\gamma_r = 0,06$ (adimensional).

T_r Para motores a gasolina varía entre 700 [K] y 900 [K] se toma el valor de temperatura máxima.

Reemplazando en la ecuación (19):

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \phi \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}$$

$$T_a = \frac{295,15 K + 20 K + (1)(0,06)(900K)}{1 + 0,06}$$

$$T_a = 348,24 K$$

La Temperatura del Ciclo de admisión será 348,24 [K] este resultado se encuentra en el rango de temperatura común para un motor de dos tiempos que va desde 250 [K] – 2500 [K] en el rango de giro de 0° a 45°. ²⁰

3.1.2 Presión de compresión. Se procedió al cálculo de la presión luego de terminado el ciclo de compresión, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_c = P_a \epsilon^{n_1} \quad (20)$$

Fuente: libro de Jovaj, p.112.

²⁰ FERGUSON, Colin R. Internal Combustion Engine. Editorial John Willy & Sons, Inc. New York. 2001. p. 44.

Donde:

P_c = Presión en el ciclo de compresión [MPa].

P_a = Presión en el ciclo de admisión [MPa].

n_1 = Exponente Politrópico medio de compresión (Adimensional).

ϵ = Relación de Compresión.

Reemplazando:

$$P_c = P_a \epsilon^{n_1}$$

$$P_c = 95191 \text{ Pascales } (8)^{1,36}$$

$$P_c = 1609897,669 \text{ Pascales}$$

$$P_c = 1,61 \text{ [MPa]}$$

La presión anterior equivale a ± 16 [bar], ésta se encuentra en el rango de presión promedio entre los 0 [bar] y 40 [bar] en los que opera un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada que trabaja entre 3500 [rpm] y 9000 [rpm].²¹

²¹ CLIMENT, Héctor. Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña cilindrada. Editorial Reverté. Barcelona. 2004. P. 204-206.

3.1.3 Temperatura de compresión. Se procede a calcular la temperatura del ciclo de compresión con la siguiente ecuación:

$$T_c = T_a \epsilon^{n1-1} \quad (21)$$

Fuente: libro de Jovaj, página112.

Donde: T_c =Temperatura del ciclo de compresión en [K]; reemplazando en (21):

$$T_c = T_a \epsilon^{n1-1}$$

$$T_c = (348,24 K) (8)^{1,36-1}$$

$$T_c = 736,19 \text{ kelvin}$$

Una temperatura de compresión de este tipo equivale a ± 463 [°C], ésta se encuentra en el rango de temperatura inicial para un motor típico de dos tiempos que opera a 9600 [rpm].²²

3.1.4 Temperatura de explosión. Esta temperatura resulta luego de la explosión del combustible dentro del volumen de compresión. Los siguientes datos fueron tomados del libro de Jovaj:

²² CLIMENT, Héctor. Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña cilindrada. Editorial Reverté. Barcelona. 2004. P. 204-206.

T_z = Temperatura del ciclo de la explosión [K].

U_z = La energía interna de los productos de combustión.

$$U_z = 68600 \left[\frac{KJ}{Kmol} \right]$$

Esta energía de los productos de la combustión corresponde a una temperatura de: $T_z = 2615 [K] = 2341,85 [^{\circ}C]$ la cual es una temperatura de explosión que se encuentra dentro del valor límite de temperatura máxima en el cilindro para un motor típico de combustión interna.²³

3.1.5 Presión de explosión. La presión máxima del ciclo de combustión está dada por la siguiente ecuación:

$$P_z = \mu_r \frac{T_z}{T_c} P_c \quad (22)$$

Fuente: libro de Jovaj, p. 640.

Donde:

P_z = Presión en la explosión [MPa].

μ_r = Coeficiente real de variación molecular (adimensional).

μ_o = Es el coeficiente teórico de variación molecular.

$\mu_o = 1.08$ (Adimensional).

²³ FERGUSON, Colin R. Internal Combustion Engine. Editorial John Wiley & Sons, Inc. New York. 2001. p. 123.

Reemplazando:

$$\mu_r = \frac{\mu_o + Yr}{1 + Yr} \quad (23)$$

$$\mu_r = \frac{(1,08) + (0,06)}{1 + (0,06)}$$

$$\mu_r = 1,075$$

Reemplazando de nuevo:

$$P_z = \mu_r \frac{T_z}{T_c} P_c$$

$$P_z = 1,075 * \frac{2615 K}{736,19 K} * 1,6 [MPa]$$

$$P_z = 6,11 [MPa]$$

Esta presión equivale a ± 886 [psi] la cual raya en el límite de los 640 [psi] para un motor típico de combustión interna²⁴, así mismo esta presión determina la fuerza máxima en la cabeza del pistón, que se demostrará más adelante, y será la fuerza máxima en el ciclo.

²⁴ FERGUSON, Colin R. Internal Combustion Engine. Editorial John Willy & Sons, Inc. New York. 2001. p. 122.

3.2 GENERALIDADES DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA.

Uno de los mecanismos más conocidos y aplicados en la industria y en el mundo es el denominado mecanismo de manivela-biela-corredera, este es usado como principio de funcionamiento en motores de combustión interna, en compresores, bombas y en diferentes accionamientos mecánicos como puertas automáticas y muchas otras aplicaciones. Por tanto el análisis geométrico, cinemático y cinético de dicho dispositivo es fundamental para la presente investigación y se presenta a continuación:

3.2.1 Cinemática del mecanismo Manivela-Biela-Corredera. La cinemática del motor Biela-Manivela (Biela-Cigüeñal) es función de la posición, la velocidad y la aceleración del motor. A continuación se enuncia la nomenclatura que se manejará en el presente libro:

R = Radio de la manivela (Cigüeñal)

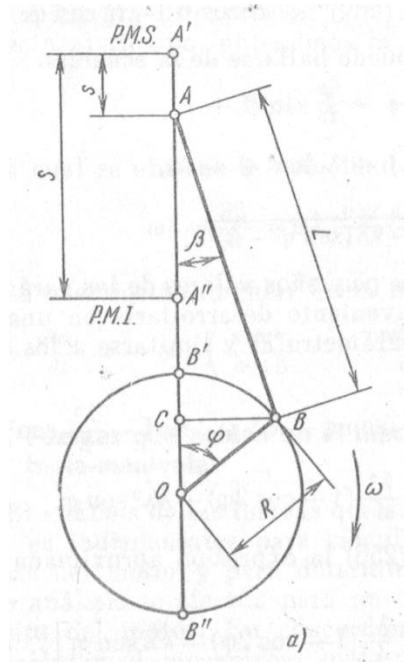
L =Longitud de la biela

θ =Angulo de la manivela (Cigüeñal)

\emptyset =El Angulo que forma la biela con el eje X

ω =Velocidad Angular

Figura 53. Diagrama geométrico mecanismo Cigüeñal-Biela-Émbolo.



Fuente: JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Editorial MIR, 1982.

De la geometría anterior se construyen los triángulos: OBC y ABC donde la distancia BC está representada por las siguientes dos ecuaciones las cuales se han igualado para obtener una relación entre β y φ :

$$BC = R \operatorname{sen}(\varphi) = l \operatorname{sen}(\beta) \quad (24)$$

Donde: $\varphi = \omega t$

Entonces:

$$R \operatorname{sen}(\omega t) = l \operatorname{sen}(\beta)$$

$$\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t) = \text{sen}(\beta)$$

Ahora:

$$OC = R \cos(\omega t) \quad (25)$$

$$AC = l \cos(\beta) \quad (26)$$

Sumando:

$$AO = OC + AC = R \cos(\omega t) + l \cos(\beta) \quad (27)$$

Donde:

$$\cos(\beta) = \sqrt{1 - \text{sen}(\beta)^2} \quad (28)$$

$$\cos(\beta) = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2}$$

Por tanto:

$$x = AO = R \cos(\omega t) + l \sqrt{1 - \left(\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (29)$$

Derivando, suponiendo a ω constante, se obtiene la ecuación de la velocidad:

$$\dot{x} = -\omega R * \text{sen}(\omega t) + l * \frac{-R^2 \text{Sen}(\omega t) * \text{Cos}(\omega t) * \omega}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2}} \quad (30)$$

Derivando nuevamente y suponiendo ω constante se obtiene la ecuación de la aceleración, pero las expresiones resultantes son muy extensas y complejas. De ahora en adelante se trabajaran las ecuaciones de una manera más sencilla para poder ver el efecto de la relación r/l . Para esto aplicamos el teorema del binomio para expandir el radical de la expresión:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (31)$$

Por tanto:

$$(a + b)^n = a^n + n a^{n-1} b + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2} b^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} a^{n-3} b^3 + \dots \quad (32)$$

Donde:

$$a = 1 \quad b = -\left(\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2 \quad n = 1/2 \quad (33)$$

Queda entonces:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^4 - \frac{1}{16} \left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^6 \dots \quad (34)$$

Lo útil de esta última expresión es que cada término contiene la relación r/l a una cierta potencia:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{R}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2} = 1 - \frac{R^2}{2l^2} \text{sen}^2(\omega t) + \frac{R^4}{8l^4} \text{sen}^4(\omega t) - \frac{R^6}{16l^6} \text{sen}^6(\omega t) \dots \quad (35)$$

La relación (r/l) oscila entre $(1/3)$ y $(1/5)$ por eso es posible eliminar todos los términos después del segundo término con un mínimo de error como se muestra en la siguiente ecuación:

$$x = R \cos(\omega t) + l \sqrt{1 - \left(\frac{R}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (36)$$

$$x = R \cos(\omega t) + l \left(1 - \frac{R^2}{2l^2} \operatorname{sen}^2(\omega t) + \frac{R^4}{8l^4} \operatorname{sen}^4(\omega t) \dots\right)$$

$$x = R \cos(\omega t) + l - \frac{R^2}{2l} \operatorname{sen}^2(\omega t) \dots$$

Utilizando propiedades de ángulos dobles:

$$x = R \cos(\omega t) + l - \frac{R^2}{2l} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2}\right) \dots \quad (37)$$

$$x = R \cos(\omega t) + l - \frac{R^2}{4l} + \frac{R^2 \cos(2\omega t)}{4l} \dots$$

Después de haber aplicado las matemáticas se tiene una expresión más simple la cual se puede derivar más fácilmente las veces que sea necesario:

$$\dot{x} = -\omega R \operatorname{sen}(\omega t) - \frac{R^2 \operatorname{sen}(2\omega t) 2\omega}{4l} \dots \quad (38)$$

Derivando nuevamente se alcanza la expresión aproximada para la aceleración:

$$\ddot{x} = -\omega^2 R \cos(\omega t) - \frac{R^2 \cos(2\omega t) 4\omega^2}{4l} \dots \quad (39)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 R \cos(\omega t) - \frac{R^2 \cos(2\omega t) \omega^2}{l} \dots$$

Las anteriores ecuaciones que fueron aplicadas para el análisis de los parámetros internos del motor se deben graficar utilizando valores de parámetros convencionales de las máquinas térmicas alternativas de dos tiempos monocilíndricas, parámetros que se han tomado de la experiencia y de los datos entregados por los fabricantes, como sigue:

Tabla 6. Tabla de datos geométricos motor.

Variable	Valor	Unidad
L	61,95	mm
R	16,5	mm
B	40	mm
S	33	mm

Fuente: Manual motor Shindaiwa®.

Graficando las anteriores ecuaciones mediante un software de manejo de datos como Microsoft Excel® y realizando las aproximaciones necesarias para obtener las curvas de posición velocidad y desplazamiento (la figura 54 muestra un pantallazo de la hoja de cálculos, el archivo se entrega en los anexos); por su parte la figura 55 muestra que la carrera máxima que alcanza el émbolo es de 3,30 [cm]; en la figura 56 se presenta que la velocidad máxima en el mecanismo es de 22,50 [m/s] alcanzada a una velocidad angular de 11500 [rpm] y finalmente en la figura 57 se observa que el valor de aceleración máxima es de 33000 [m/s²].

Figura 54. Pantallazo hoja de cálculos de Microsoft Excel®.

The screenshot shows a detailed Excel spreadsheet for engine calculations. The formula bar at the top displays a complex trigonometric formula: $=SE10*SE13*SENO(C20*3.141592654/180) - SE13*SE13*SENO(2*C20*3.141592654/180) * SE10*2/(4*SE12)$. The spreadsheet is organized into columns for different engine parameters and forces, with rows numbered 1 through 36. The data includes values for pressure, forces, kinematics, and various geometric parameters.

Figura 55. Posición del émbolo.

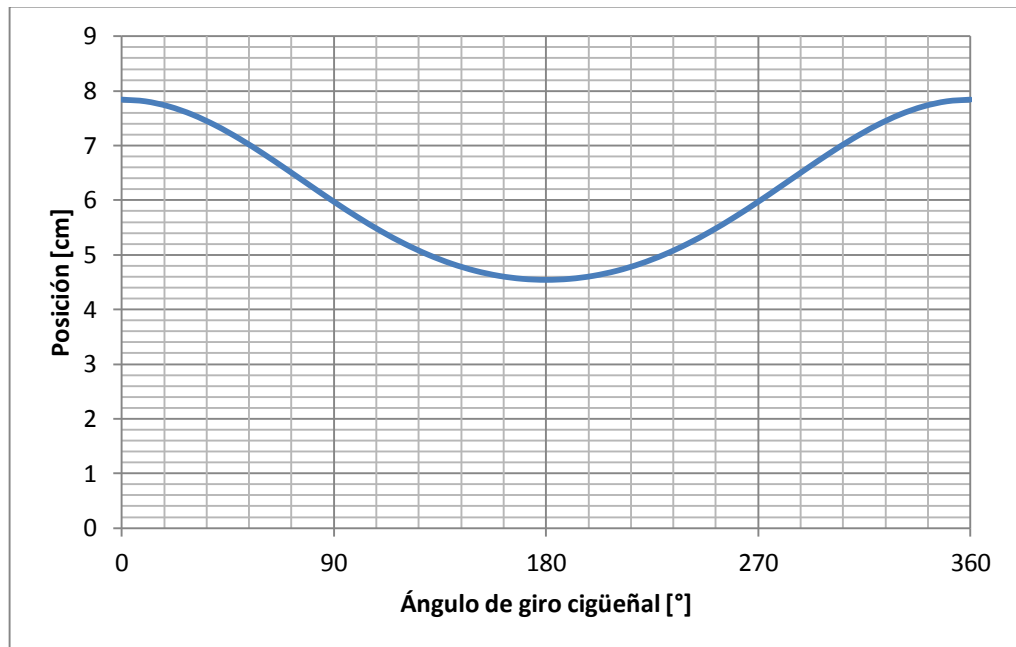


Figura 56. Velocidad del émbolo.

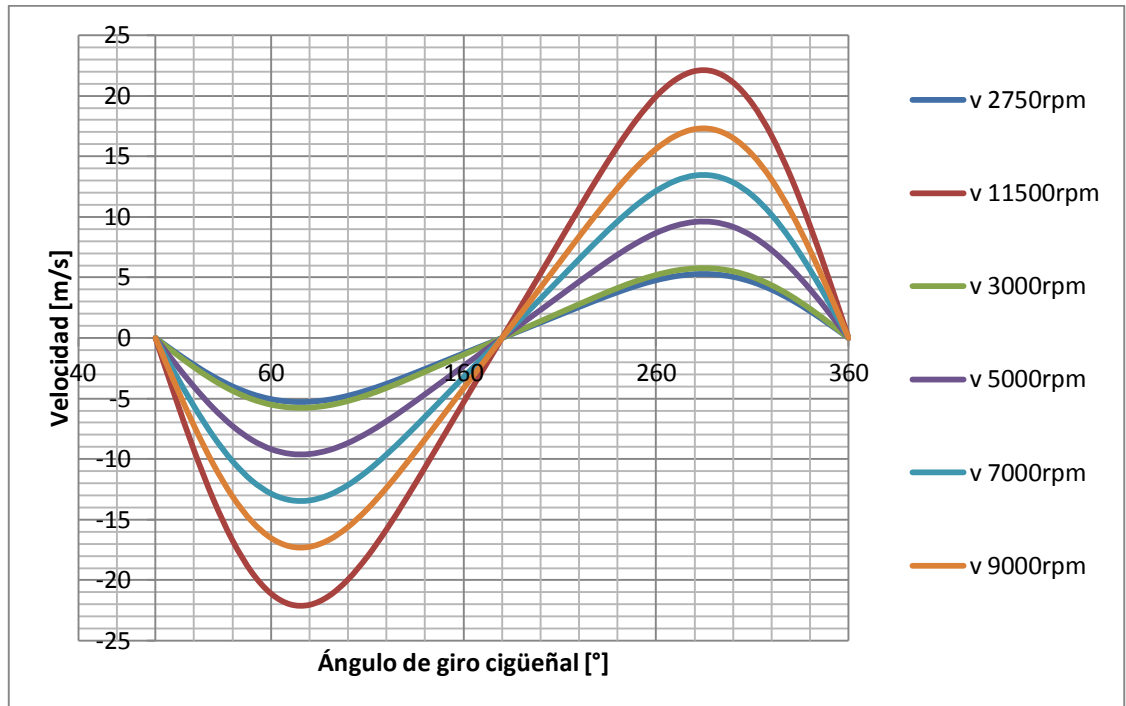
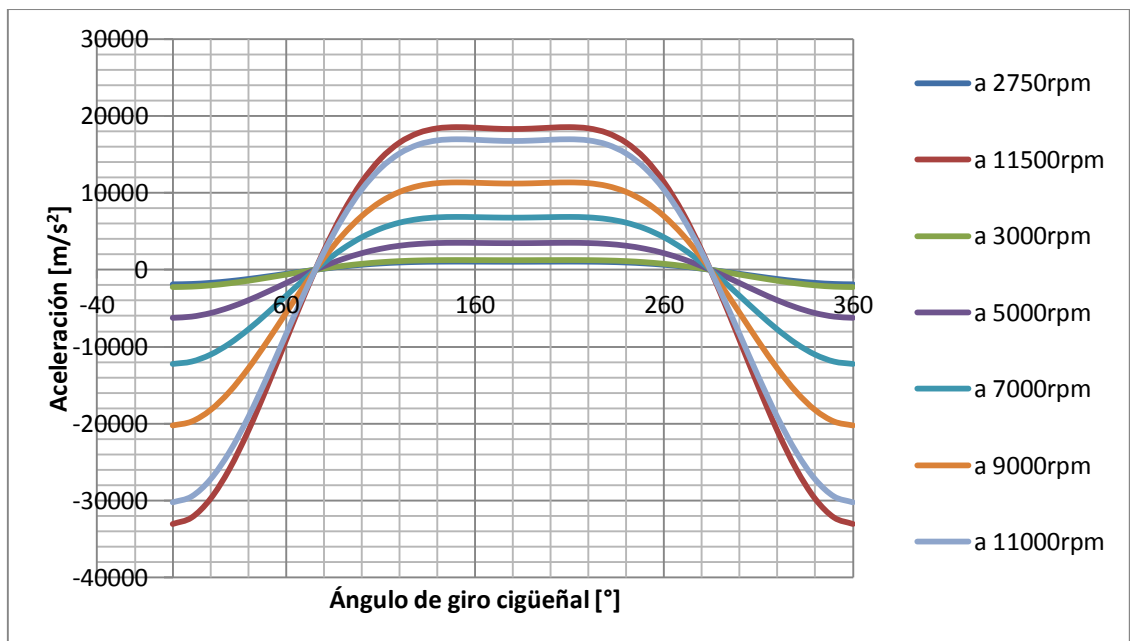


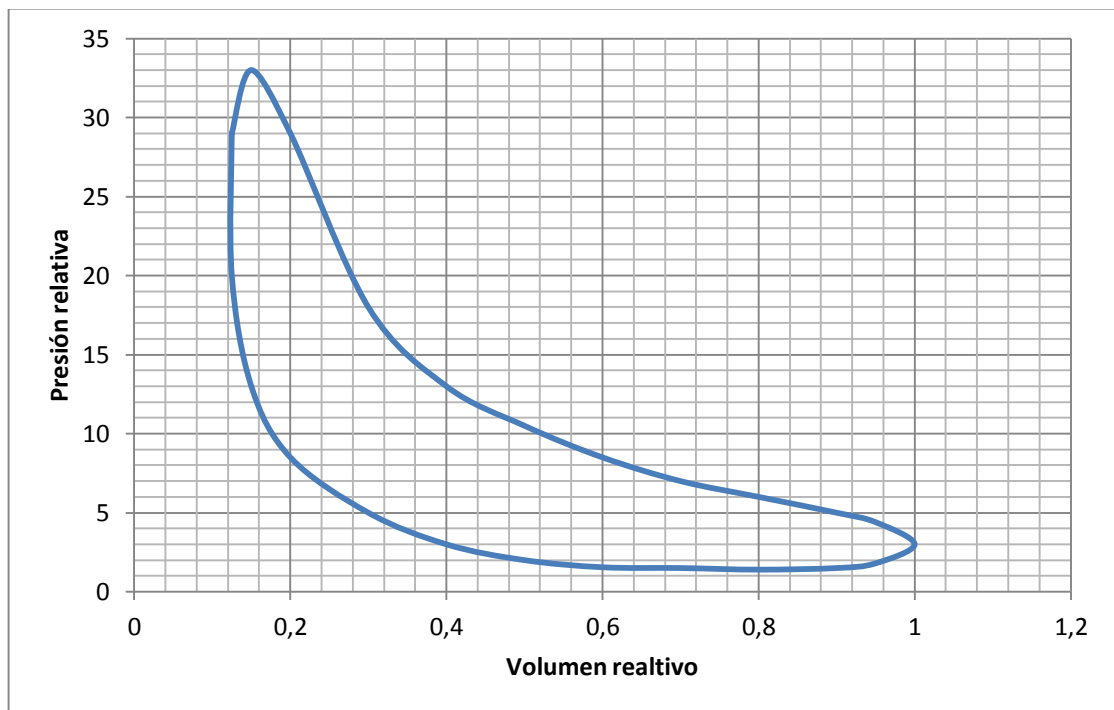
Figura 57. Aceleración del émbolo.



3.2.2 Cinética del mecanismo manivela-biela-corredera. En el análisis de la cinética del mecanismo cigüeñal-biela-émbolo del motor se analizará la fuerza de presión de los gases, las fuerzas inerciales, la fuerza en el pie y en la cabeza de la biela; comenzando por la fuerza de presión de los gases que se expondrá cómo se comporta dicha presión en el ciclo de potencia a medida que el pistón avanza.

La curva de presión de los gases relativa ($p_r = p/p_{adm}$) contra el volumen relativo ($V_r = V/V_{max}$) para un ciclo de dos tiempos típico con una relación de compresión $r = 8$ es la que se muestra en la figura 58:

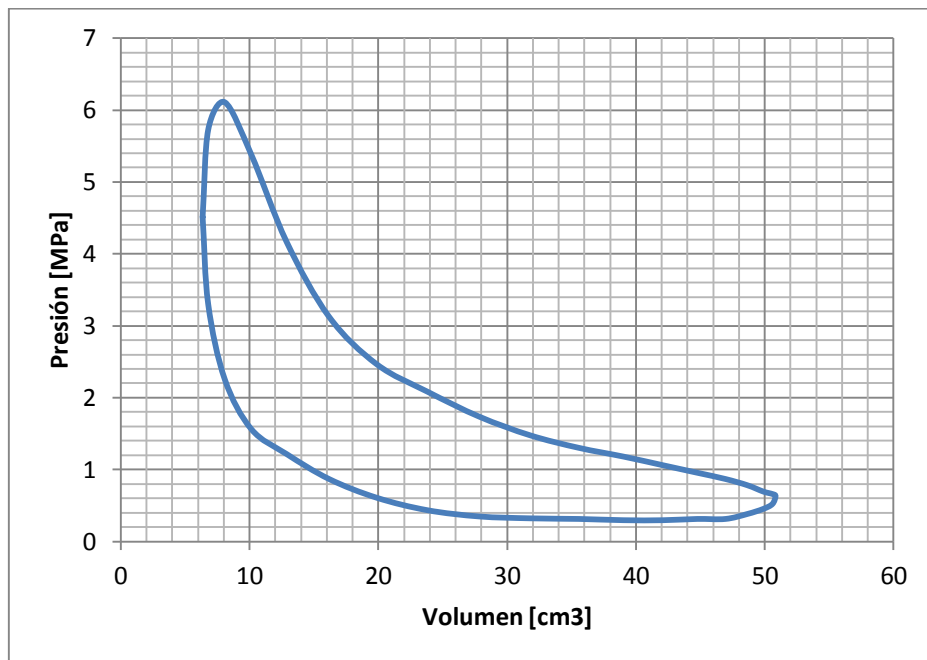
Figura 58. Presión relativa contra volumen relativo.



Fuente: HEYWOOD. Internal Combustion Engine. Página 162.

De los cálculos termodinámicos se obtiene la presión máxima de: 6,11 [MPa]; y como se conoce la relación de compresión: $r_c = 8$ y el volumen de la cámara de combustión: 47,39 [cm³] mediante Microsoft Excel® se obtienen las curvas que se exponen en las figuras 59 y 60:

Figura 59. Presión de los gases contra volumen.



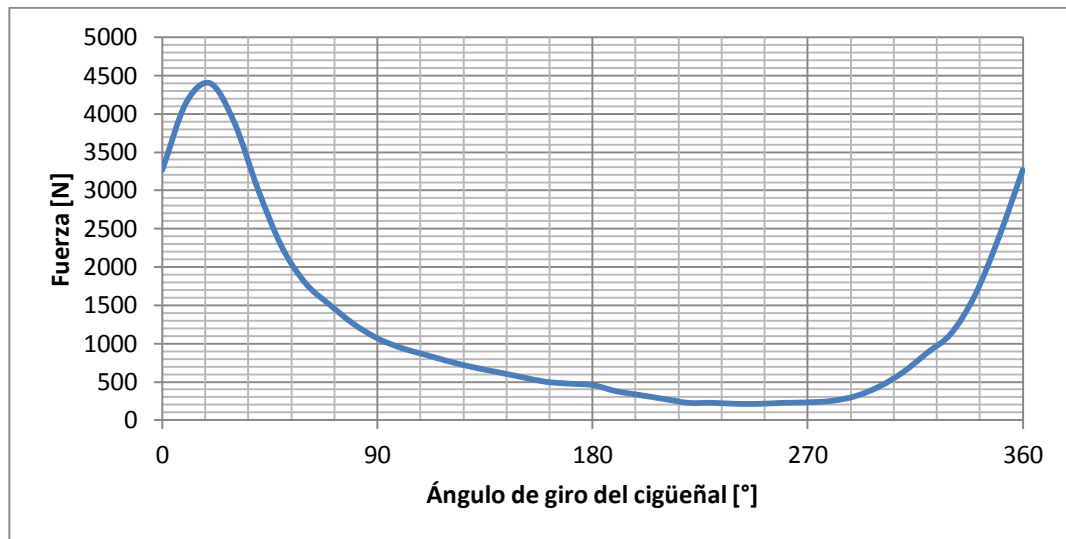
Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P 569-609.

La curva de presión de los gases es idéntica a la curva de fuerza de presión de los gases solo se diferencian en un multiplicador constante que es el área del pistón:

$$A_{pistón} = \frac{\pi \cdot \phi_{pistón}^2}{4} \quad (40)$$

Su valor máximo ocurre cuando ϕ es cercano a cero (según Jovaj).

Figura 60. Fuerza de presión de los gases.



Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P 569-609.

3.3 FUERZAS DE INERCIA DEBIDO A MASAS OSCILANTES Y ROTATIVAS.

Para esta parte del análisis se hace indispensable conocer cómo se comportan las fuerzas de inercia con respecto a la velocidad angular, para ello se necesita un modelo dinámico del mecanismo biela-cigüeñal. Según Robert L. Norton: “Para realizar un análisis de fuerzas dinámicas completo en cualquier mecanismo se deben conocer las propiedades geométricas (masa, centro de gravedad, momento de inercia de masa)... En el caso de este mecanismo de manivela-corredera, la manivela está en rotación pura y el pistón en traslación pura. La biela está en movimiento complejo. Para realizar un análisis dinámico exacto, se debe determinar la aceleración lineal de su CG en todas las posiciones. Para ‘elevar el potencial’ del diseño, se requiere un modelo simplificado de esta biela (los requerimientos para un modelo dinámicamente equivalente se muestran en la figura 61); es posible diseñar la biela si se modela como dos masas puntuales

concentradas, una en el pasador de la manivela (ver punto A figura 62) y otra en el pasador del pistón (ver punto B figura 62) así podría determinarse cuáles son los movimientos de estas masas concentradas. La masa concentrada en A estaría en rotación pura como parte de la manivela, y la masa concentrada en el punto B estaría en traslación pura como parte del pistón.”²⁵

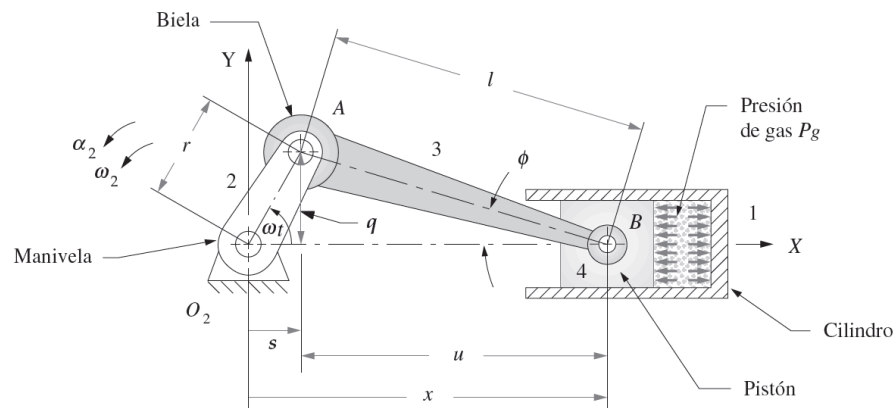
Figura 61. Requerimientos para un modelo dinámicamente equivalente.

TABLA 13-1 Requerimientos para la equivalencia dinámica

- 1 La masa del modelo debe ser igual a la del cuerpo original.
- 2 El centro de gravedad debe estar en el mismo lugar que el del cuerpo original.
- 3 El momento de inercia de masa debe ser igual al del cuerpo original.

Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P. 583.

Figura 62. Geometría mecanismo Manivela-Biela-Corredera.



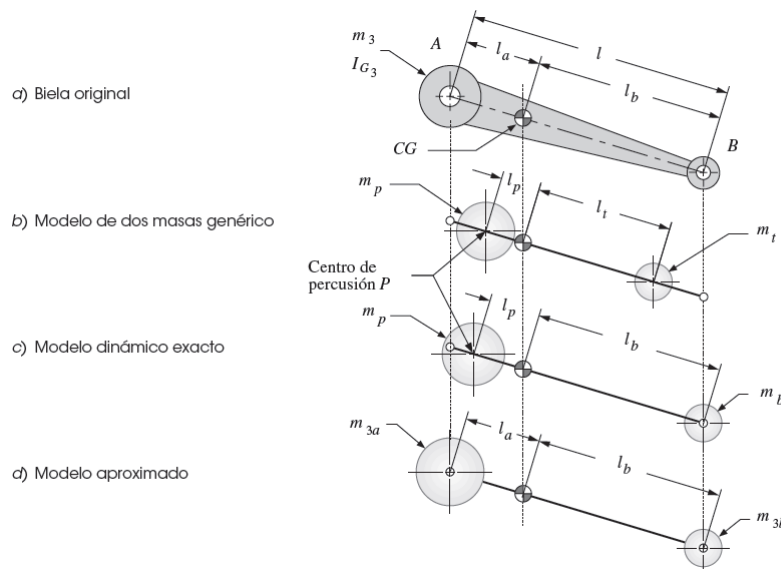
Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P. 576.

²⁵ NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. 747 p.

3.3.1 Modelo dinámico equivalente para la biela. Para obtener un sistema dinámico equivalente hay que respetar las condiciones que se muestran en la figura 61 Según Robert L. Norton, una biela típica como la que se muestra en la figura 63 es un modelo genérico de dos masas de la biela. Una masa m_t se localiza a una distancia l_t del CG de la biela original, y la segunda masa m_p a una distancia l_p del CG. La masa de la pieza original es m_3 , y su momento de inercia con respecto a su CG es I_{G3} . Si se expresan matemáticamente los tres requisitos para la equivalencia dinámica se obtiene:

- 1) Constancia de la masa total ($m_p + m_b = m_3$)
- 2) Posición invariable de centro de gravedad. $m_b L_b = m_p L_p$
- 3) El momento de inercia debe ser constante con respecto al centro de gravedad. $I_{CG} = m_p L_p^2 + m_b L_b^2 = m_3 L_p L_b$

Figura 63. Modelo dinámico biela.



Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P. 584.

Con la ayuda de una hoja de formulas programada en Microsoft Excel® para la biela de la presente investigación estas variables fueron tabuladas en la tabla 7:

Tabla 7. Variables dinámicas mecanismo motor.

Nombre	Variables	Valor	Unidad
masa del émbolo	m embolo	77	g
distancia al centro de percusión	lp	27,82	mm
distancia del CG al centro del alojamiento del émbolo	lb	34,11	mm
masa de la biela	m3	34,72067	g
masa de la biela concentrada en a	mp	19,12356	g
masa de la biela concentrada en b	mb	15,59711	g
masa cigüeñal sin balancear	m2	135,77	g
masa cigüeñal sin balancear concentrada en a	m2a	74,741385	g
masa del rodamiento en b	m rodamiento b	5	g
masa del rodamiento en a	m rodamiento a	5	g
masa del bulón en el alojamiento del émbolo	m bulón b	15	g
masa del bulón en el alojamiento del lado del cigüeñal	m bulón a	15	g
masa para sobre-balancear el sistema biela manivela	mp	46,084	g
masa concentrada en a según el modelo dinámico	ma=m2a+m3a+mra+mba	113,86494	g
masa concentrada en b según el modelo dinámico	mb=m3b+m4+mrb+mbb	112,59711	g
masa concentrada en a' según el modelo dinámico	ma'=m2a+m3a+mra+mba+mp	159,94894	g
centro masa parte superior del cigüeñal	r2a	11,01	mm
centro masas parte inferior del cigüeñal	r2a'	12,92	mm
distancia entre el centro de rotación y a	ra	20	mm
distancia entre el centro de rotación y a'	ra'	20	mm

Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P 582-585.

3.3.2 Modelo dinámico equivalente para el cigüeñal. Utilizando el software SolidWorks® y los datos aproximados del cigüeñal original, se utilizaron las medidas aproximadas de estos valores los cuales se introducen en la plantilla de Microsoft Excel® para los cálculos. Cuando se haga la caracterización del cigüeñal

del motor Shindaiwa en un siguiente proyecto de grado, se podrán reemplazar estos valores por unos aún más exactos.

En la figura 64 se presenta este modelo dinámico, donde m_a es la masa perteneciente al cigüeñal sin balancear rodamiento de cabeza de biela y la masa de la biela concentrada en el alojamiento de la cabeza de biela:

$$m_a = m_{2a} + m_{3a} + m_{ra} + m_{ba} \quad (41)$$

Y m_b es la masa perteneciente al émbolo-bulón-rodamiento y la masa de la biela concentrada en el alojamiento del bulón:

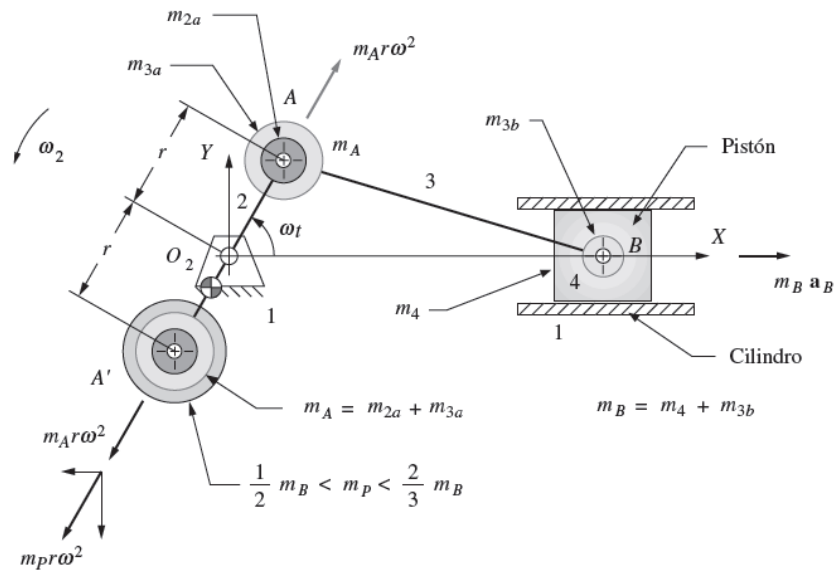
$$m_b = m_{3b} + m_4 + m_{rb} + m_{bb} \quad (42)$$

Ya conociendo estos modelos dinámicos se procede a calcular las fuerzas de inercia lineal y rotacional para este sistema émbolo-biela-cigüeñal:

$$P_i = -m_i a \quad (43)$$

Según esta ecuación las fuerzas de inercia provocadas por las masas alternantes están ligadas a la aceleración del émbolo estas fuerzas pueden llegar a tensionar la biela con una fuerza de magnitud semejante a las de la presión de los gases las curvas de las fuerzas de inercia son iguales a las de las curvas de la aceleración pero solo se diferencian en un multiplicador.

Figura 64. Modelo dinámico cigüeñal.



Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P. 599.

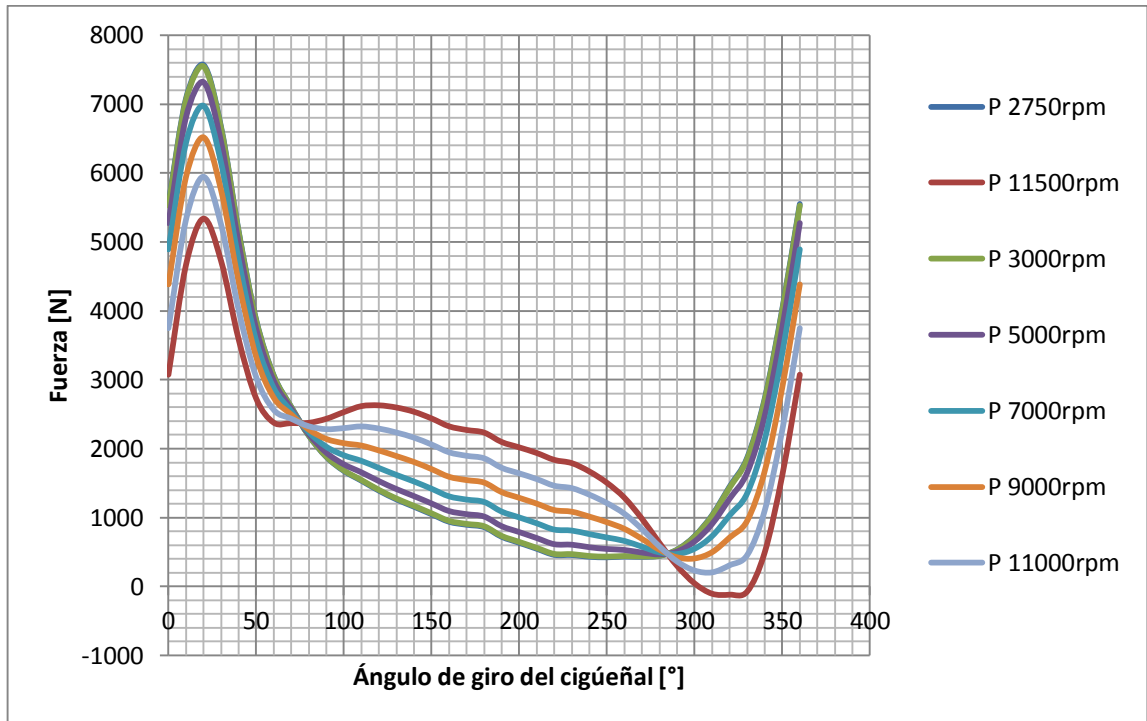
Con la ayuda de Microsoft Excel® se trazaron las curvas de la Fuerza P que actúa sobre el bulón del émbolo la cual está definida como a suma de la fuerza de la presión de los gases P_g y la fuerza de inercia debido a la masa alternante P_i :

$$P = P_g + P_i \quad (44)$$

$$P = f(\varphi, \omega) \quad (45)$$

La figura 65 presenta el comportamiento dinámico del cigüeñal y la suma de las fuerzas de presión de los gases en la superficie del émbolo, sumadas con las fuerzas de inercia a diferentes revoluciones; en este sentido se observa que a elevadas revoluciones las fuerzas de inercia igualan a las fuerzas de presión.

Figura 65. Comportamiento dinámico de la fuerza en el émbolo a diferentes r.p.m.



Teniendo en cuenta las variables mostradas en la tabla 8:

Tabla 8. Variables cinéticas del motor.

<i>P</i>	Presión de los Gases
<i>P_g</i>	Fuerza de Presión de los Gases
<i>P_i</i>	Fuerzas de Inercia
<i>P = P_g + P_i</i>	Fuerza que actúa sobre el pie de la biela

Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008.

Y en base a la figura 64 (modelo dinámico del cigüeñal); es posible escribir las ecuaciones que rigen el comportamiento de las fuerzas en los diferentes componentes del sistema:

La fuerza que realiza el pistón al cilindro:

$$F_A = -P_g A_p \tan(\phi) \hat{j} - m_4 \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} - m_{3b} \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} \quad (46)$$

La fuerza que experimenta el bulón:

$$F_B = P_g A_p \hat{i} - P_g A_p \tan(\phi) \hat{j} + m_4 \vec{a}_b \hat{i} - m_4 \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} - m_{3b} \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} \quad (47)$$

La fuerza que experimenta el pie de la biela:

$$F'_B = P_g A_p \hat{i} - P_g A_p \tan(\phi) \hat{j} + m_4 \vec{a}_b \hat{i} - m_4 \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} - m_{3b} \vec{a}_b \hat{i} - m_{3b} \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} \quad (48)$$

La fuerza que experimenta la cabeza de la biela:

$$F_C = P_g A_p \hat{i} - P_g A_p \tan(\phi) \hat{j} + m_4 \vec{a}_b \hat{i} - m_4 \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} + m_{3b} \vec{a}_b \hat{i} - m_{3b} \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} + m_{3a} r \omega^2 (\cos(\omega t) \hat{i} + \text{sen}(\omega t) \hat{j}) \quad (49)$$

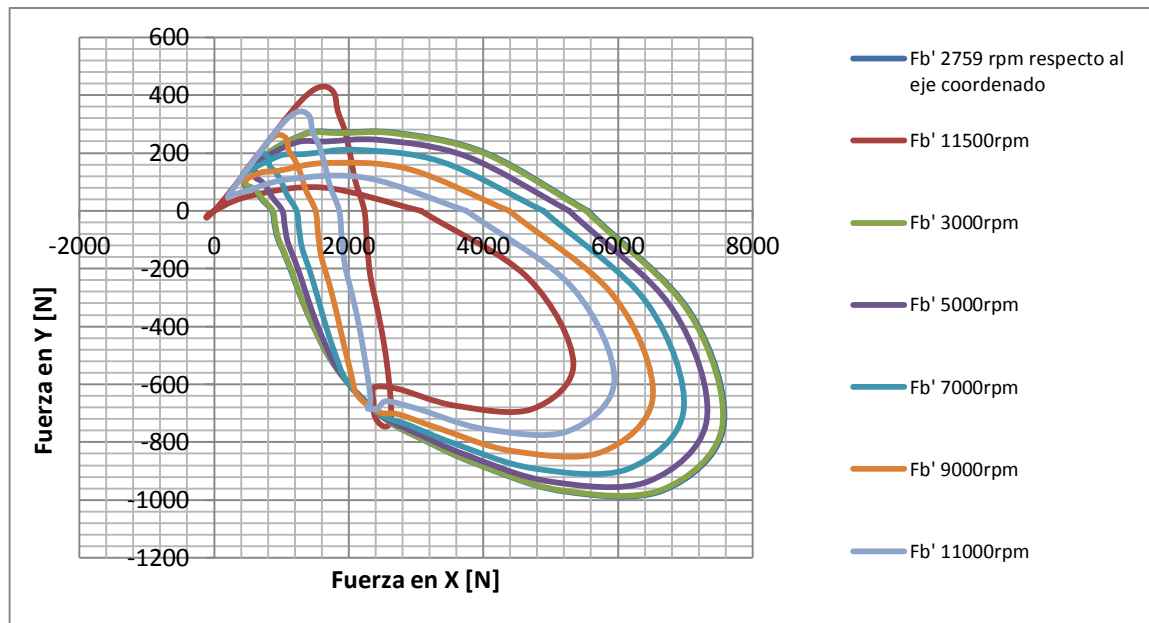
La fuerza que experimenta el pasador principal del cigüeñal:

$$F_D = P_g A_p \hat{i} - P_g A_p \tan(\phi) \hat{j} + m_4 \vec{a}_b \hat{i} - m_4 \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} + m_{3b} \vec{a}_b \hat{i} - m_{3b} \vec{a}_b \tan(\phi) \hat{j} + m_{3a} r \omega^2 (\cos(\omega t) \hat{i} + \text{sen}(\omega t) \hat{j}) - m_{3a} r \omega^2 (\cos(\omega t) \hat{i} + \text{sen}(\omega t) \hat{j}) +$$

$$+ m_{2a}r\omega^2(\cos(\omega t)\vec{i} + \text{sen}(\omega t)\vec{j}) - m_{2a}r\omega^2(\cos(\omega t)\vec{i} + \text{sen}(\omega t)\vec{j}) - m_p r \omega^2 (\cos(\omega t)\vec{i} + \text{sen}(\omega t)\vec{j}) \quad (50)$$

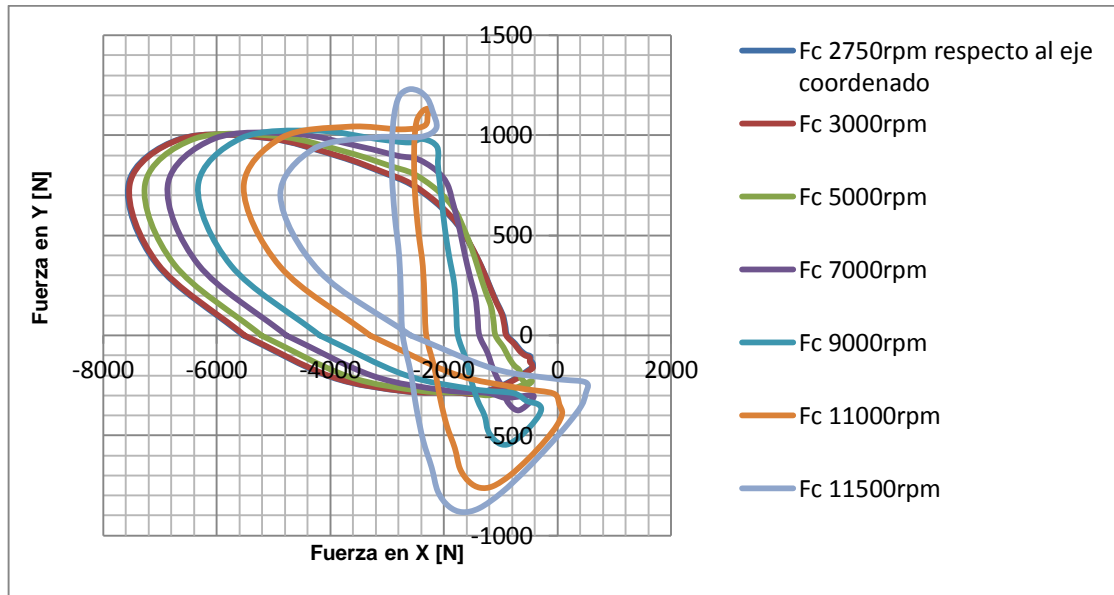
Se confirma que la fuerza en la biela no sobrepasa los 7680,27 [N] fuerza que se calculó para hallar el valor mínimo que soporta la biela original y que soportará la biela prototipo una vez instalada en el motor. La figura 66 muestra el comportamiento cartesiano de como varia la fuerza F'_B en función del ángulo y de las distintas velocidades angulares.

Figura 66. Fuerza que siente el pie de la biela a distintas velocidades.



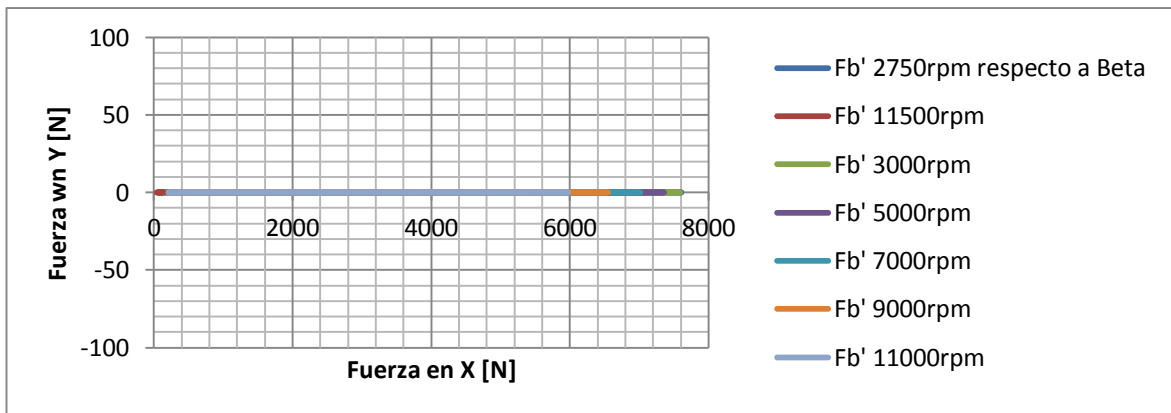
El comportamiento de las fuerzas en el pie de la biela con respecto a los ejes coordenados las cuales disminuyen a medida que aumentan las revoluciones debido al efecto de las fuerzas de inercia, la figura 67 muestra la gráfica de dicha fuerza expresada como F_C .

Figura 67. Fuerza que siente la cabeza de la biela a distintas velocidades.



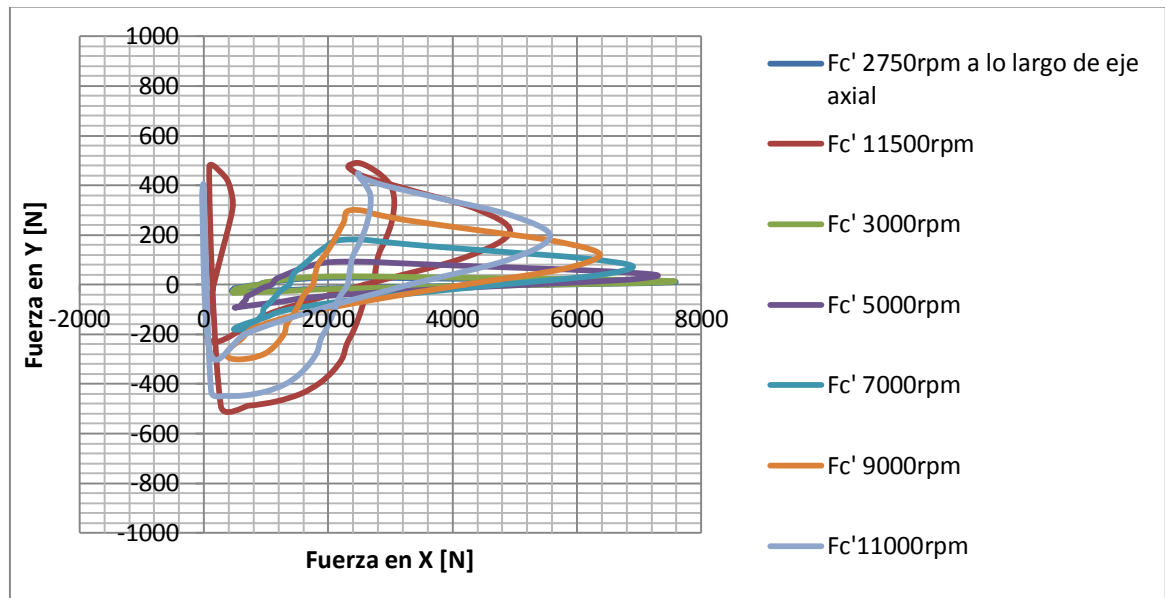
Para entender mejor las cargas que siente el pie de la biela, se ha graficado esta fuerza en la dirección del eje axial de la misma, con lo cual se obtuvo la siguiente grafica (véase figura 68) que muestra que esta fuerza siempre estará en la dirección axial del eje de la biela.

Figura 68. Fuerza en el pie de la biela en la dirección axial.



Se ha hecho lo mismo para la fuerza que siente la cabeza de la biela (véase figura 69), donde se nota que la biela no es un elemento que está trabajando a dos fuerzas, ya que tiene masa y esta rotando a elevadas revoluciones.

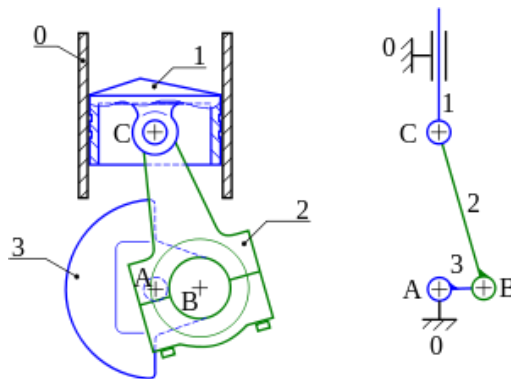
Figura 69. Efecto de la fuerza en la cabeza de la biela.



3.4 FUERZA MÁXIMA DEL MECANISMO CIGÜEÑAL-BIELA-ÉMBOLO.

En esta sección se muestra el análisis y el cálculo de la fuerza máxima que soportará la biela prototipo si ésta quedará atascada en el punto muerto superior; en la figura 70 se presenta un esquema simplificado del mecanismo Cigüeñal-Biela-Émbolo.

Figura 70. Esquema simplificado del mecanismo Cigüeñal-Biela-Émbolo.



Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008.

Las variables involucradas en este análisis son:

Diámetro el émbolo: $\varnothing = 4$ [cm]

Carrera: $S = 3.3$ [cm]

Cilindrada Unitaria: 41.5 [cm³]

Relación de Compresión: $r = 8:1$

Ya identificados estos valores pasamos a reemplazar en la fórmula del cálculo de la cilindrada:

$$VH = Z * \frac{\pi \varnothing^2 S}{4} \quad (51)$$

Donde:

$Vh =$ Cilindrada Unitaria [cm³]

$Z = 1$ (Adimensional)

$\phi =$ Diámetro del Émbolo [cm]

$S =$ Carrera del Émbolo [cm]

Resolviendo:

$$VH = (1) * \frac{\pi(4 \text{ [cm]})^2 * 3,3 \text{ [cm]}}{4} \quad (52)$$

Por tanto la cilindrada total de la guadaña: $VH = 41,47 \text{ [cm}^3\text{]}$

Con la cual seguidamente se calcula el volumen de la cámara:

$$Vc = \frac{Vh}{\epsilon - 1} \quad (53)$$

Ver Jovaj, página 96.

Donde:

$Vc =$ Volumen de la cámara [cm^3]

$\epsilon = 8$ Relación de Compresión (adimensional)

Reemplazando:

$$V_c = \frac{41,46 [cm^3]}{8-1}$$

$$V_c = 5,92 [cm^3]$$

Ahora, el volumen total del cilindro es:

$$V_a = 5,92 [cm^3] + 41,46 [cm^3] \quad (54)$$

$$V_a = 47,38 [cm^3]$$

Se sabe que el área del émbolo es:

$$A = \frac{\pi \phi^2}{4} \quad (55)$$

$$A = \frac{\pi(4 [cm])^2}{4}$$

$$A = 12,56637 [cm^2]$$

$$A = 12,57 [cm^2]$$

Por lo tanto la fuerza producida en la parte superior del émbolo es:

$$F_e = P_z * Area_{\text{émbolo}} \quad (56)$$

$$F_e = P_z * 12,57 [cm^2] * \frac{1 [m^2]}{100^2 [cm^2]}$$

$$F_e = 6,11 [MPa] * \frac{12,57}{10000} [m^2]$$

$$F_e = 7680,27 [N]$$

Con este valor de la fuerza se trabajó el análisis de diseño del prototipo de biela a compresión estática y a la fatiga debido a que es la máxima carga a la que está expuesta la pieza durante su funcionamiento en el motor.

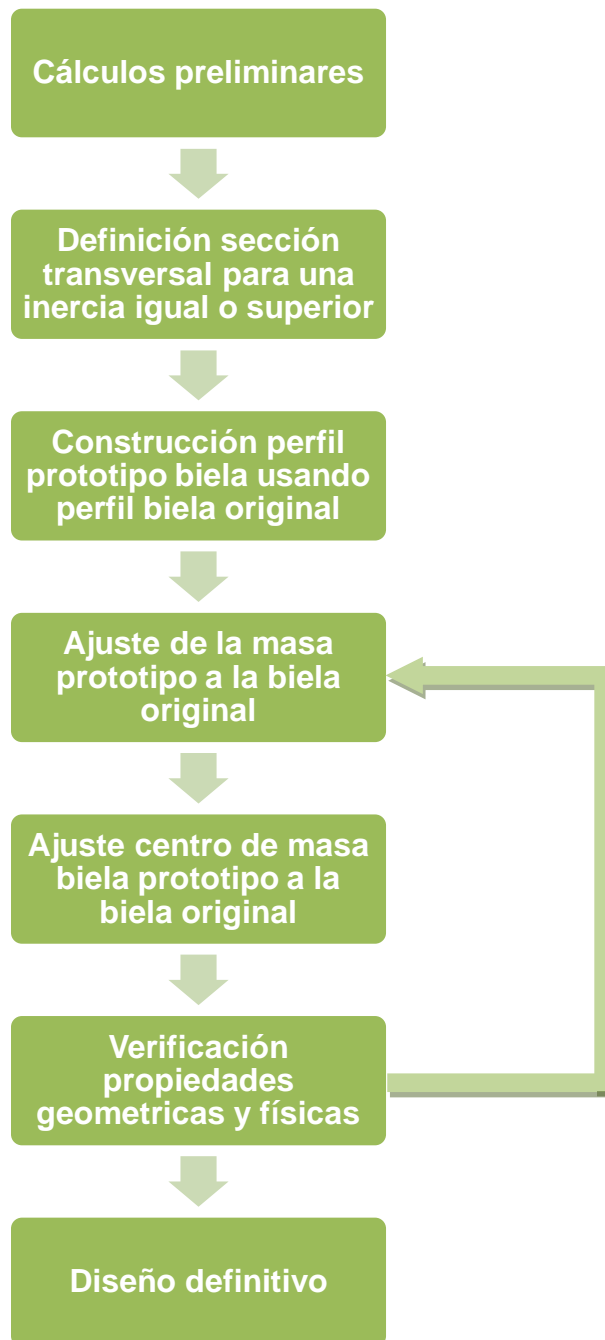
3.5 DISEÑO DE LA BIELA PROTOTIPO MEDIANTE SOFTWARE CAD.

El diseño del prototipo de la biela comienza con las siguientes consideraciones:

La pieza debe soportar alrededor de 18000 [N] según los resultados del ensayo de compresión aplicado a la biela original, esta fuerza equivale a un valor de factor de seguridad igual o superior a 2,34 ($FOS \geq 2,34$), factor que según la teoría aplicada a la biela está basada en una fuerza máxima teórica soportada por la misma que debe alcanzar los 7680 N, así es que en las simulaciones realizadas con el software mediante el método de los elementos finitos, como se verá, arrojaron factores de seguridad mayores a: 2,34; teniendo en cuenta que se usó un acero más robusto y se aplicaron mejoras al diseño original.

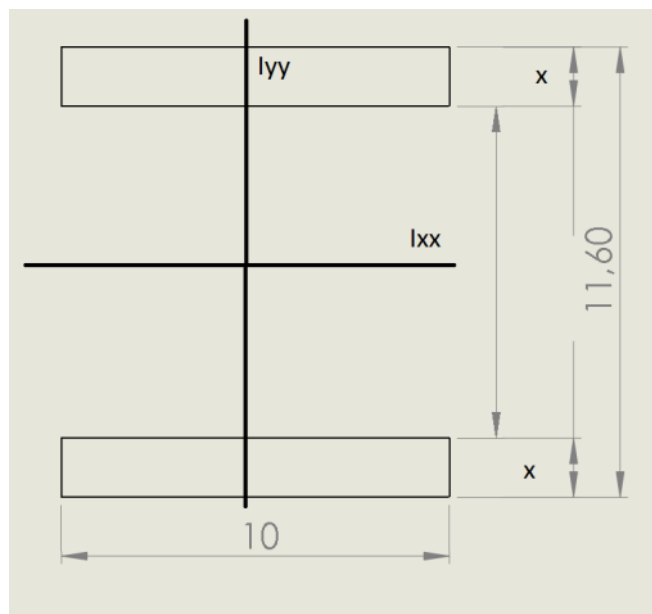
Inicialmente se dejó la misma área mínima de sección transversal y se distribuyó todo el material en la periferia del perfil propuesto para generar un diseño bidimensional con la mayor inercia posible. El proceso de diseño aplicado se muestra a manera de diagrama de flujo en la figura 71.

Figura 71. Diagrama de flujo proceso de diseño.



Por tanto, siendo x el mínimo espesor de diseño, especificado en la figura 72, se calcula aquella distancia mínima x en la ecuación (57) con la que se puede trabajar para distribuir todo el material en la periferia del prototipo de biela que garantice que el área mínima se mantenga en $A_{min} = 30,5 [mm^2]$ la cual es el área mínima de la biela original.

Figura 72. Sección transversal biela.



Entonces:

$$30,5 [mm^2] = 10 [mm] * x * 2 \quad (57)$$

$$x = 1.525 [mm]$$

El valor de x que debería tener el diseño también debe como mínimo alcanzar para generar la inercia del diseño original, especificado en la ecuación (58):

$$I_{xx_{original}} = 417.1791 [mm^4] = \left(\frac{10 [mm] * x^3}{12} + 10 [mm] * x * \left(5.8 [mm] - \frac{x}{2} \right)^2 \right) * 2 \quad (58)$$

Ese mínimo valor de x que conserva la misma inercia que la sección mínima original es $x = 0.7015 [mm]$ (conseguido de la ecuación 58) por lo tanto se trabajó con $x = 1.525 [mm]$ para garantizar el área mínima, utilizando el software SolidWorks® se diseñó un perfil que se adapte a un proceso de fabricación en la industria ajustando su masa a la de la biela original procurando no mover el centro de masa y que su fallo por pandeo sea superior al del diseño original, luego utilizando simulación mediante elementos finitos se inspeccionó su efectividad.

Una importante aclaración antes de seguir con la exposición del proceso de diseño del prototipo de biela de la presente investigación, es que el proceso de fabricación primario o básico de este prototipo se hará por una técnica moderna de corte en frío por chorro de agua, esto debido a que es (como se mostrará en el siguiente capítulo) la mejor alternativa de manufactura encontrada en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana para un lote mínimo de dos piezas utilizando como materia prima un acero comercial anti-desgaste con un modulo de elasticidad mayor a los 843 [MPa] portados por el material de la biela original, como se pudo demostrar en el capítulo 2, de caracterización.

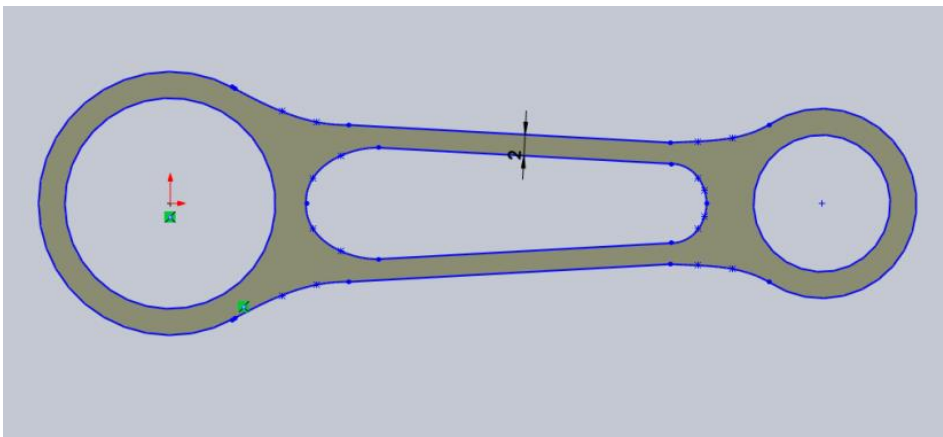
En un principio se partió del perímetro original (ver figura 73) del material de la biela original y se fue removiendo material de las partes simétricamente dispuestas, para evitar en lo posible que se corra el centro de masa; hasta obtener un FOS de $\pm 2,34$.

Figura 73. Perfil geométrico de la biela original.



Se retiró un $x = 2 [mm]$ para ser discreto con el peso de este diseño, pero (ver figura 74) esta biela entrega un peso de $42.17 [g]$ el cual no se ajusta a los $34.721375 [g]$ que debería pesar; así que se siguió modificando el perfil de diseño.

Figura 74. Primera propuesta de diseño del perfil geométrico biela.



Fuente: software SolidWorks®.

Puede que el anterior modelo haya cumplido especificaciones, pero se descartó porque su peso no se ajustaba al original. Luego se experimentó con un $x = 1.525$ [mm] como se muestra en la figura 75.

Figura 75. Segunda propuesta de diseño del perfil geométrico biela.

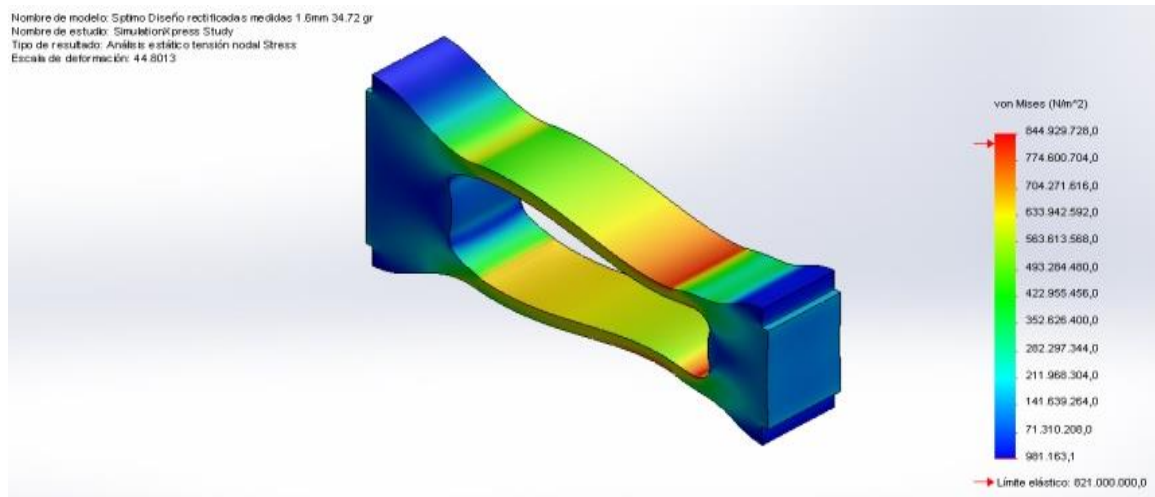


Fuente: software SolidWorks®.

Se quitó material hasta que el peso de ambas bielas fue el mismo: 34,72 [g] y el centro de masa corrió hasta: 27.813 [mm].

Verificando el factor de seguridad para la fuerza máxima de 7680 [N] mediante una simulación del tipo estático de compresión se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la figura 76:

Figura 76. Análisis de deformación del perfil.



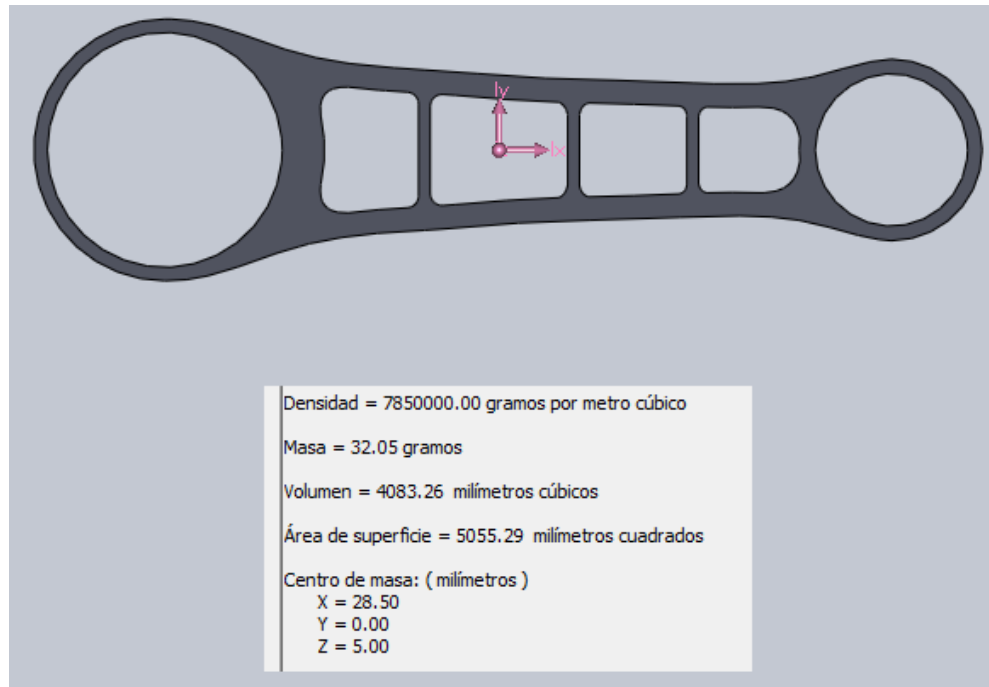
Fuente: software SolidWorks®.

Para este diseño se tiene un FOS²⁶ de 0,971678 al aplicar la carga de 18000 [N]. Reacomodando el diseño de la biela para que su centro de masa sea el mismo en la biela original, se debe iterar el proceso hasta obtener un diseño que cumpla con las especificaciones; y aunque pueda ser que no llegue a fallar por compresión, si probablemente lo hará por pandeo, así que se debió optimizar este diseño.

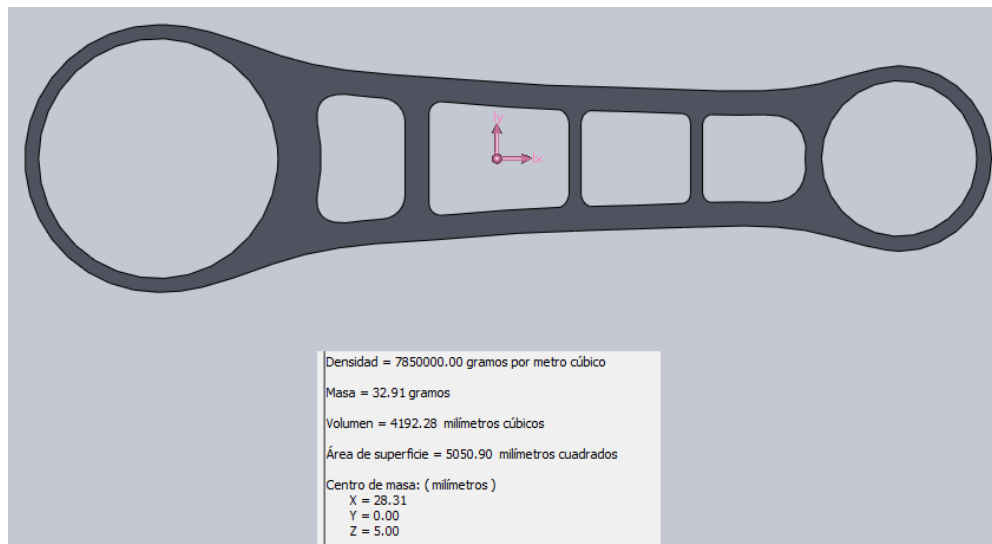
En un intento más por perfeccionar el diseño bidimensional, se quitó material de las zonas del pie y de la cabeza de la biela en donde no hay grandes cargas aplicadas y se agregó en las zonas críticas, redistribuyendo el material de manera más eficiente, las etapas del proceso se muestra en la figura 77 (a), (b) y (c).

²⁶ FOS, en inglés significa Factor of Security; en español se traduce como factor de seguridad.

Figura 77. Iteraciones en base al diseño del perfil geométrico de la biela.

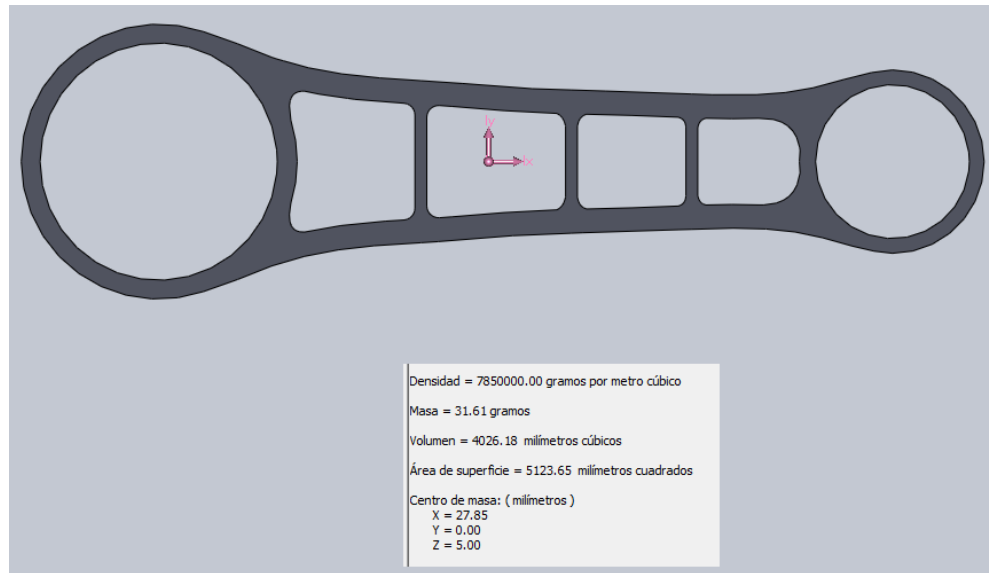


(a) Redistribución del material para correr el centro de masa.



(b) prueba y error, para correr el centro de masa.

Figura 77. (Continuación)



(c) Diseño final para la fabricación.

Fuente: software SolidWorks®.

Este último perfil de la figura 77-c resultante es el que se selecciona para la fabricación de la biela ya que es el más sencillo bidimensionalmente hablando y cumple con las condiciones de carga, pandeo, factor de seguridad y fatiga como más adelante se mostrará en las simulaciones.

En cuanto al material seleccionado para la fabricación de este prototipo, debe ser un acero que tenga una fluencia igual o superior a los 843 [MPa] para que su comportamiento sea el mismo o mejor que el de la biela original, pero un acero de este tipo no es muy comercial en láminas de menos de 10 [mm] de espesor, así que el acero que fue seleccionado para la fabricación es un acero anti-desgaste, que tiene un esfuerzo de fluencia de 1200 [MPa] el cual es bastante comercial en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana en este tipo de presentación (ver ficha técnica de este acero en los anexos).

3.6 ANÁLISIS BIELA ORIGINAL Y PROTOTIPO POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

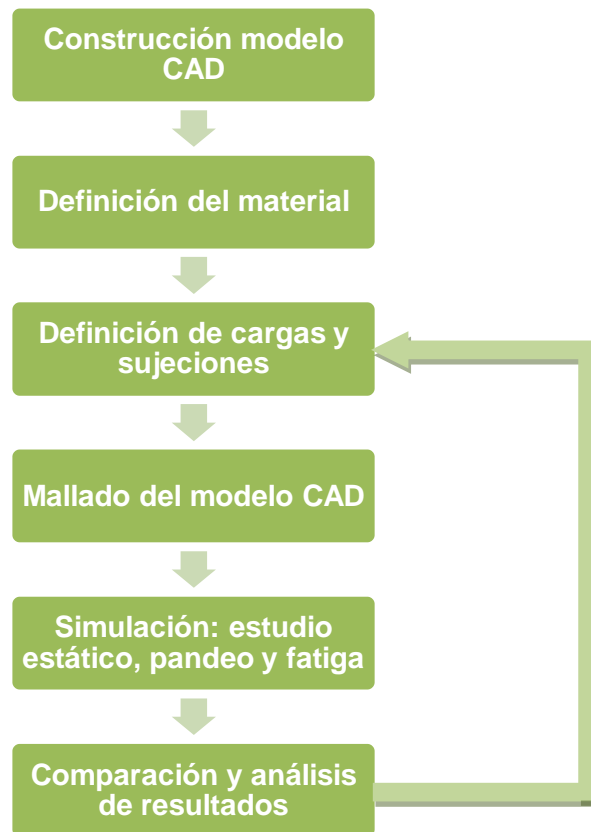
El método de análisis por elementos finitos, conocido internacionalmente en Inglés como FEM (finite element method) es el más avanzado de los métodos numéricos de solución de ecuaciones matemáticas aplicados a la ingeniería, su nombre que es muy descriptivo, quiere decir que es una técnica de solución netamente numérica que utiliza las diferencias finitas, diferenciales o elementos limitados para dividir y caracterizar la pieza en cuestión en miles, cientos de miles y hasta millones de fragmentos para su posterior análisis y solución, uno por uno, partiendo de esta manera el problema macro en pequeñas partes hasta un grado infinitesimal micro, dependiendo de la capacidad de computo que se tenga y se requiera, dándole una solución particular a cada una de aquellas diferencias sintetizando al final todos los resultados parciales en una gran matriz o base de datos que arroja el resultado final y global de todo el análisis referente a la pieza. Es por ello que entre más definido y acotado este un problema más tiempo y capacidad de computo demandará, por tanto, en cierta clase de modelos es mejor abordar un problema que en la realidad está en tres dimensiones y simplificarlo a solo dos dimensiones para un análisis más eficiente computacionalmente hablando.

Lo primero que se debe tener en cuenta al iniciar el proceso de simulación²⁷ es el tipo de estudio a realizar. Para la presente investigación se utilizaron los estudios de pandeo, compresión (estudio estático) y dinámico o de fatiga. El software utiliza el método de elementos finitos para la solución de las ecuaciones diferenciales, el primer paso para la resolución del modelo planteado en la presente investigación es el modelo estructural, a continuación, se realizó la simulación del modelo de

²⁷Se usaron versiones no comerciales de Comsol Multiphysics® y SolidWorks®. El grupo de investigación DICBOT está realizando el proceso de adquisición del software para la Escuela de Ingeniería Mecánica.

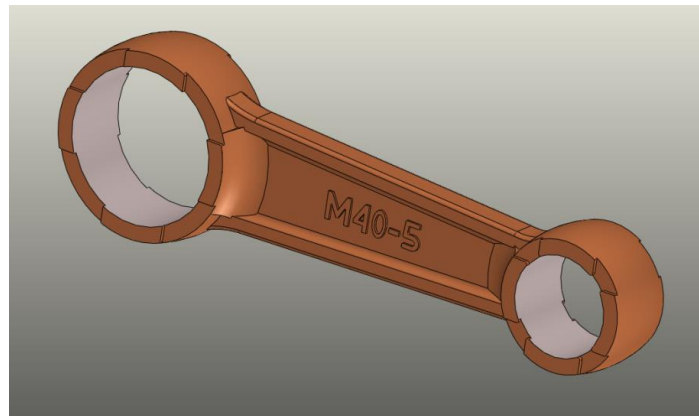
pandeo y, por último, un estudio de fatiga. En la figura 78 se presenta a modo de diagrama de flujo el análisis realizado.

Figura 78. Proceso de análisis FEM aplicado a la caracterización y al diseño.



3.6.1 Modelo CAD biela original. El modelo digital de la biela original se realizó en tres dimensiones utilizando el software CAD/CAE SolidWorks® que la Escuela de Ingeniería Mecánica ha adquirido con licencia académica, este modelo se muestra en la figura 79.

Figura 79. Modelo CAD - 3D biela original.



Fuente: Software SolidWorks®.

Del anterior modelo CAD se obtuvieron y compararon las propiedades físicas y geométricas de la biela original como la inercia, el centro de masa, etc. De los cuales interesa para la presente investigación el valor del momento de inercia con respecto al centro de masa. Las propiedades se muestran en la figura 80.

Figura 80. Propiedades físicas y geométricas modelo CAD.

Densidad = 0.00787400 gramos por milímetro cúbico		
Masa = 34.07671685 gramos		
Volumen = 4327.75169584 milímetros cúbicos		
Área de superficie = 4230.03636976 milímetros cuadrados		
Centro de masa: (milímetros)		
X = 27.82772651		
Y = 0.00057531		
Z = -0.00130838		
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)		
Medido desde el centro de masa.		
Ix = (1.00000000, 0.00002074, -0.00000300)	Px = 1466.70009453	
Iy = (-0.00002074, 1.00000000, -0.00001848)	Py = 23390.43590110	
Iz = (0.00000300, 0.00001848, 1.00000000)	Pz = 24523.64063660	
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)		
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.		
Lxx = 1466.70010416	Lxy = 0.45462370	Lxz = -0.06912442
Lyx = 0.45462370	Lyy = 23390.43589206	Lyz = -0.02094782
Lzx = -0.06912442	Lzy = -0.02094782	Lzz = 24523.64063601

Fuente: Software SolidWorks®.

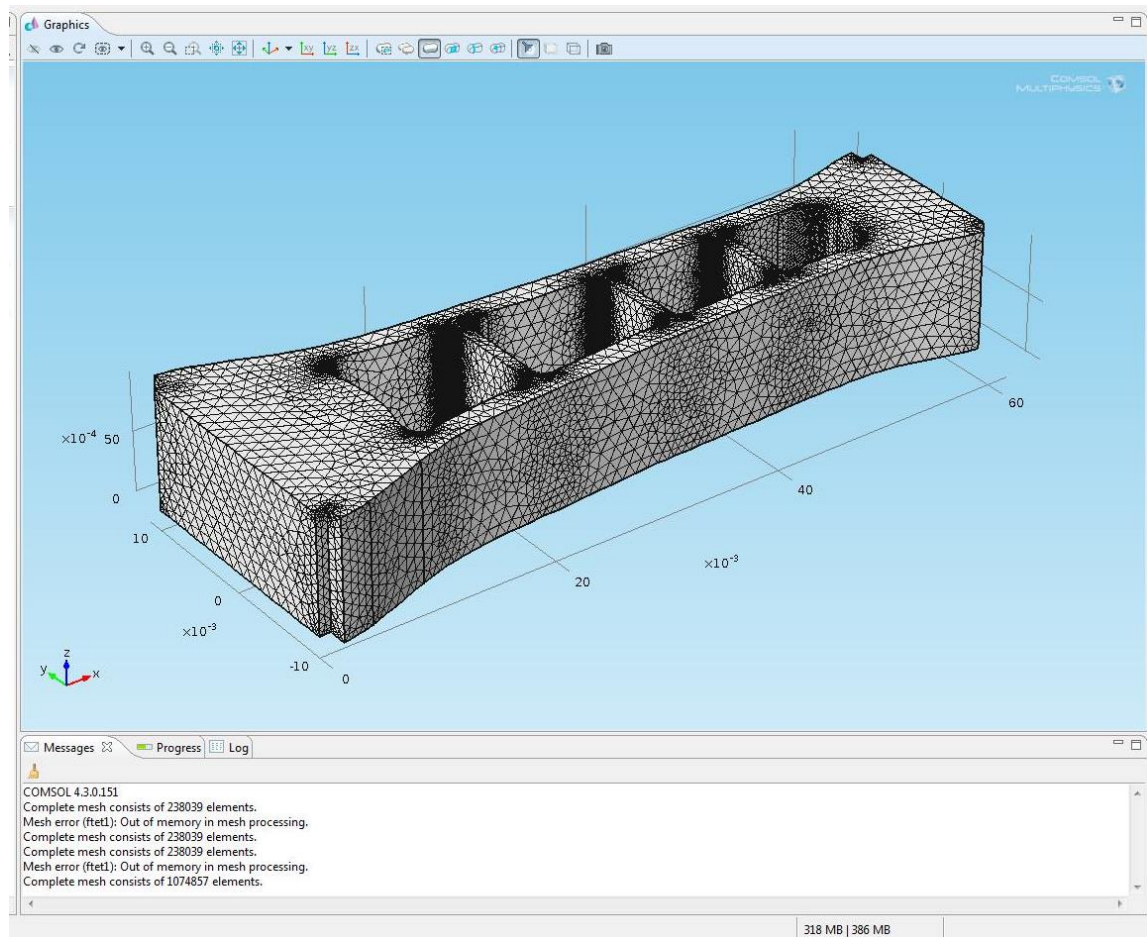
3.6.2 Mallado del modelo. Las herramientas FEM están destinadas a la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE) utilizando el método de los elementos finitos. El algoritmo de mallado libre que utiliza elementos tetraédricos es la técnica de mallado más general, y no plantea ninguna restricción en la estructura de la geometría. Por lo tanto puede ser utilizado para mallar cualquier objeto. Existen nueve conjuntos de parámetros predefinidos, que van desde “extremadamente fino” a “extremadamente grueso”. Estos ajustes dan como resultado una buena malla para la mayoría de geometrías y problemas de simulación²⁸.

Teniendo en cuenta la metrología aplicada en la primera parte de esta investigación a la biela original del motor Shindaiwa B450EC1 se elaboró un modelo detallado (mostrado en la figura 79) el cual se digitalizó usando el software CAD/CAE SolidWorks® para luego ser exportado y analizado en otro software de simulación más especializado como COMSOL Multiphysics® donde se estudiaron los esfuerzos con un mayor número de elementos finitos y de diferente tipo.

El tipo de elemento finito utilizado por el programa de simulación permite tener mejor apreciación del valor de esfuerzo máximo sin sacrificar el recurso de memoria del computador. En la figura 81 se muestra un ejemplo de lo que es el mallado y la cantidad de elementos finitos que puede existir para un modelo del nuevo diseño o prototipo del cuerpo de la biela de la presente investigación; la cual muestra una cantidad de más de un millón (1×10^6) elementos finitos los cuales se distribuyen de manera no uniforme dentro del modelo, donde las zonas oscuras muestran un mayor densidad de elementos donde la geometría se hace crítica.

²⁸ Tutoriales de Comsol Multiphysics sobre mallado. [online]. [citado 18 diciembre 2012]. En: <<http://www.addlink.es/news/98-comsol/2024-tutorial-mallado-comsol>>.

Figura 81. Mallado típico de un elemento mecánico.



Fuente: COMSOL Multiphysics®.

El tipo de elemento finito utilizado por COMSOL Multiphysics® permite tener mejor apreciación del valor de esfuerzo máximo sin sacrificar el recurso de memoria del computador. Se realizaron dos tablas (tabla 9 y 10) y una gráfica (figura 82) del número de elementos finitos contra el esfuerzo máximo para ambos software teniendo como parámetro de evaluación el esfuerzo en [MPa] para el modelo de la figura 81 en la cual se puede ver cómo influye la cantidad de elementos finitos en la convergencia de los resultados; para tener plena confiabilidad en los resultados.

Tabla 9. Numero FEM, Esfuerzo y FOS en COMSOL Multiphysics®.

COMSOL Multiphysics®			
	Numero FEM	Esfuerzo MPa	FOS
1	2216	509,42	2,35562012
2	3217	747,52	1,60530822
3	8354	1000,38	1,19954417
4	20914	818	1,46699267
5	38001	979,79	1,22475224
6	92112	990	1,21212121
7	238184	1000,5	1,1994003

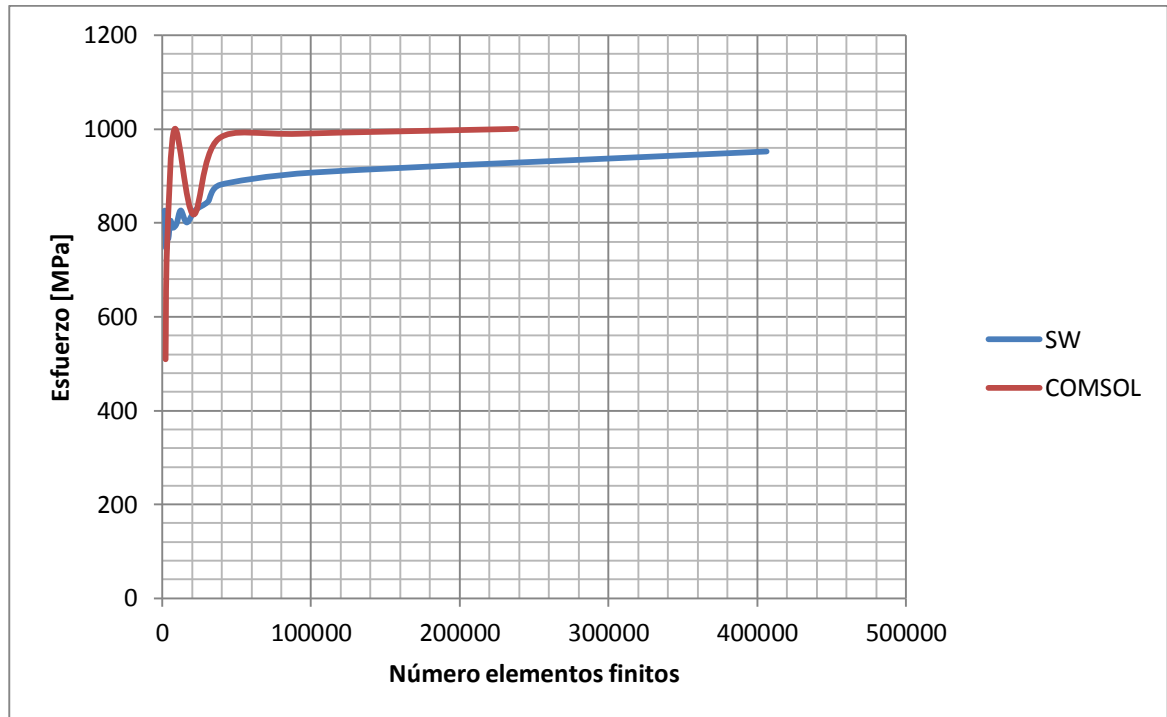
Fuente: COMSOL Multiphysics®.

Tabla 10. Numero FEM, Esfuerzo y FOS en SOLIDWORKS®.

SOLIDWORKS®				
	Numero FEM	Esfuerzo MPa	FOS	Nodos
1	1661	826,435	1,45202	3313
2	2385	767,506	1,56351	4543
3	2827	744,335	1,61218	5316
4	3272	784,237	1,53015	6086
5	4069	766,619	1,56531	7411
6	5420	804,544	1,49153	9549
7	6991	789,767	1,79716	12133
8	9522	797,662	1,5044	15913
9	12365	826,599	1,45173	20414
10	16461	801,036	1,49806	26789
11	22195	827,179	1,45071	35500
12	30822	845,709	1,41893	48485
13	39129	881,529	1,36127	60896
14	102336	907,649	1,3221	153537
15	406334	952,339	1,26006	588128

Fuente: Software SolidWorks®.

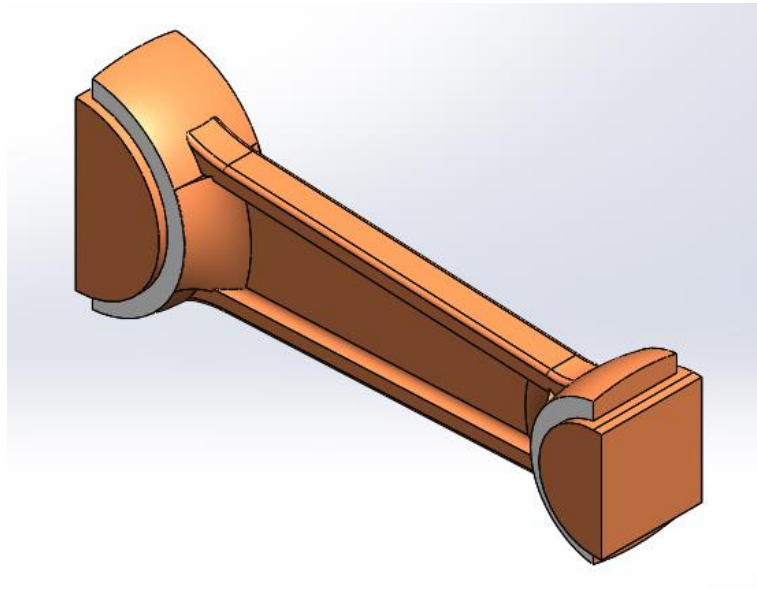
Figura 82. Curva convergencia esfuerzo contra número elementos finitos.



Fuente: Software CAD/CAE.

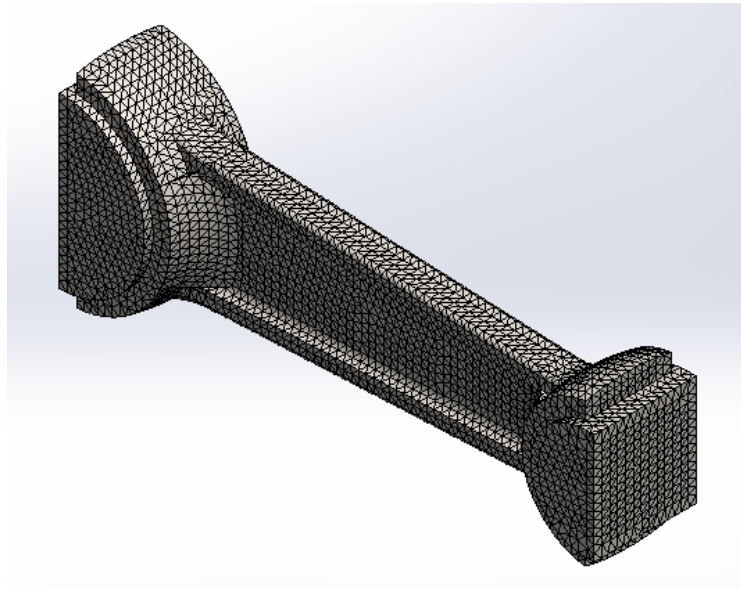
Una vez se tuvo claro el límite para el número mínimo de elementos finitos de convergencia (mostrado en la figura 82) donde se puede ver que uno de los software necesita de menos elementos finitos para alcanzar dicho valor a través de una simulación de prueba con la que se realizó dicha curva, se procedió a realizar la simulación de compresión y pandeo de un modelo CAD simplificado del modelo CAD de la biela original (ver figura 83) el cual es la versión digital de la biela original que se compró en el mercado de repuestos originales de motores Shindaiwa. El primer paso fue el mallado, se utilizó una malla solida estándar de cuatro puntos jacobianos de elementos cuadráticos de alto orden, como se muestra en la figura 84, esta densidad de malla ofrece una mejor definición de la pieza para la resolución de la matriz de ecuaciones de cargas y de grados de libertad de los elementos finitos dispuestos.

Figura 83. Modelo CAD simplificado de la biela original.



Fuente: Software SolidWorks ®.

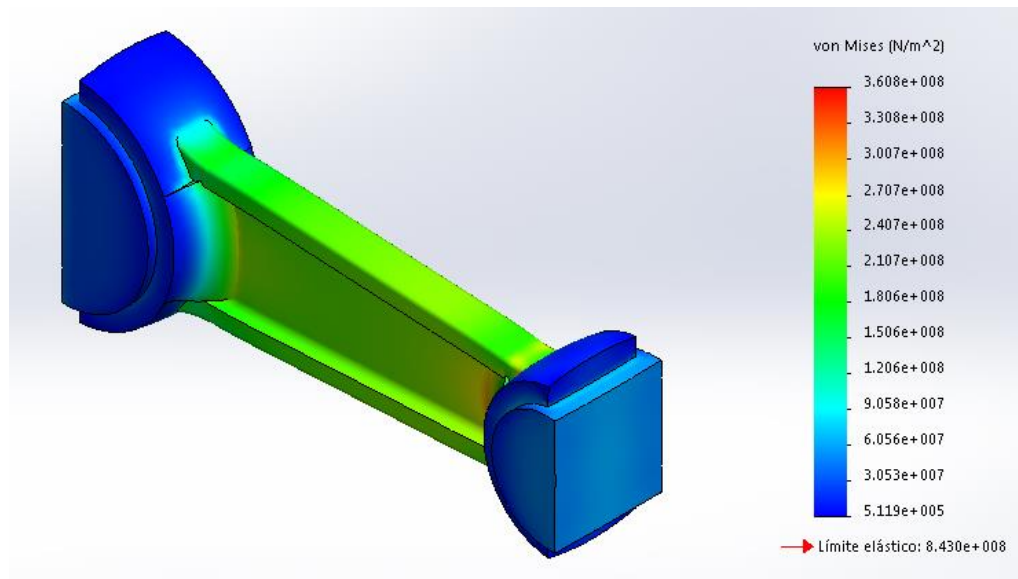
Figura 84. Mallado del modelo CAD simplificado de la biela original.



Fuente: Software SolidWorks ®.

El esfuerzo máximo Von Mises que puede soportar el modelo CAD simplificado de la biela original tiene un valor de 360,80 [MPa] en base a una condición de carga de 7680,27 [N] que según la teoría es la máxima fuerza que puede soportar (véase la figura 85); el límite elástico del material original de la biela es de 843 [MPa], lo que resulta en un FOS (Factor of safety) de 2,34 más que aceptable para este tipo de piezas mecánicas.

Figura 85. Máximo esfuerzo Von Mises simulación estudio estático biela original.

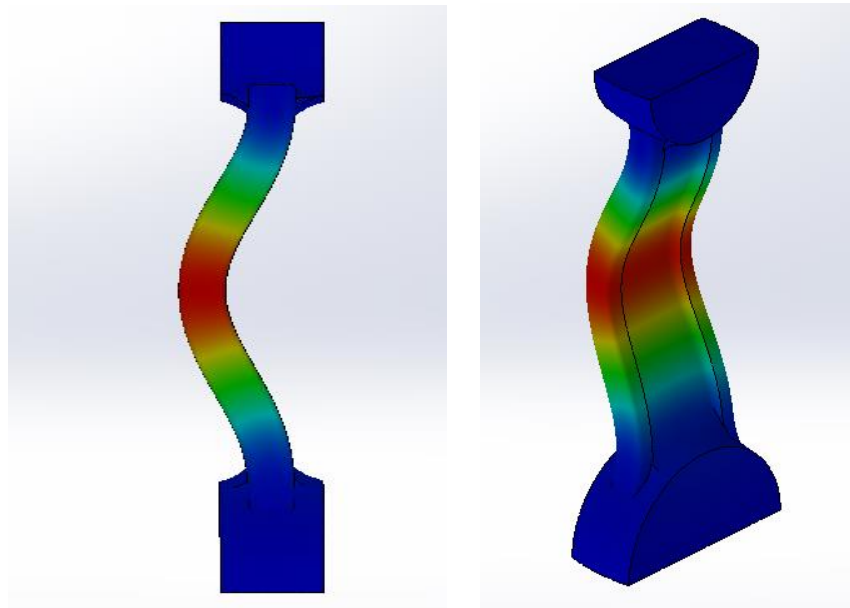


Fuente: Software SolidWorks ®.

El comportamiento por pandeo que tuvo el modelo CAD simplificado de la biela original en la simulación cotejado con la teoría y con el comportamiento físico real de la biela en el ensayo de compresión (compárese las figuras 42, 45 y 86), hace más que evidente la gran similitud que presentan ambas pruebas, la real y la virtual, acreditando el uso de la herramienta computacional (el informe completo se muestra en los anexos). En la siguiente sección se puede observar la

comparación de los resultados de la prueba de compresión real contra la simulación por el método FEM efectuada.

Figura 86. Resultado simulación pandeo modelo CAD simplificado.



Fuente: Software SolidWorks ®.

3.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Al realizar las simulaciones del estudio estático, de compresión y de pandeo utilizando el modelo CAD simplificado de la biela original, se obtuvieron una serie de datos de esfuerzo y deformación que se muestran en la tabla 11, teniendo en cuenta la geometría adquirida en la caracterización de la biela original, más exactamente su longitud (distancia entre centros) y su sección transversal o área.

Tabla 11. Datos Esfuerzo/Deformación simulación modelo CAD biela original.

Carga [N]	URES [mm]	FOS	Deformación	Esfuerzo [MPa]
-5000	-0,032240	3,66	0,001001	-163,93
-10000	-0,064470	1,83	0,002002	-327,87
-18000	-0,116064	1,01	0,003604	-590,16
-20000	-0,128900	0,90	0,004078	-655,74
-25000	-0,161200	0,72	0,005097	-819,67
-30000	-0,193400	0,60	0,006116	-983,61

Fuente: SolidWorks® y Microsoft Excel®

El ensayo real de compresión aplicado a la pieza entregó más de treinta valores de carga y desplazamiento (véase tabla 4 y figura 37) con los cuales se dedujeron los valores de esfuerzo y deformación que se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Datos Esfuerzo/Deformación ensayo real compresión biela original.

Deformación ϵ [mm/mm]	Esfuerzo σ [N/mm ²]
-0,000857246	-95,99
-0,001595191	-197,75
-0,002404807	-315,25
-0,003227878	-436,07
-0,004063023	-551,80
-0,004874019	-657,28
-0,005710865	-755,35
-0,006498576	-837,72
-0,007279237	-910,71
-0,008134947	-974,67
-0,008910656	-1.023,82
-0,009738399	-1.067,32
-0,010551085	-1.097,30

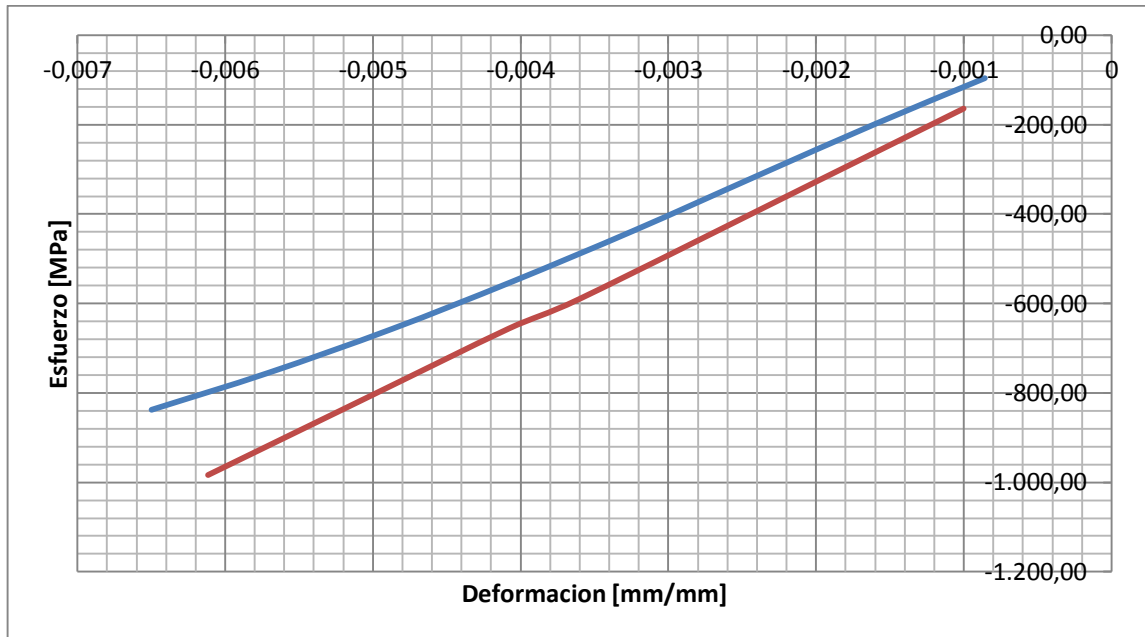
Tabla 12. (Continuación)

-0,011319176	-1.118,70
-0,012184761	-1.130,12
-0,012962242	-1.130,93
-0,013762283	-1.123,76
-0,014536887	-1.109,11
-0,015378828	-1.087,72
-0,016211145	-1.061,86
-0,017012339	-1.033,73
-0,017807285	-1.004,36
-0,018596993	-975,34
-0,019418494	-947,75
-0,020191155	-919,99
-0,020989132	-894,31
-0,02184208	-866,39
-0,022676613	-840,97
-0,023474269	-819,38
-0,024270102	-798,64
-0,025080466	-776,99
-0,025895744	-757,48
-0,0266616	-739,35
-0,027456268	-722,68

Fuente: Software máquina MTS y Microsoft Excel®.

Al evaluar los datos de las tablas 11 y 12, se buscó confrontar el comportamiento de la simulación y de la prueba real graficando los datos donde la biela se comporta elásticamente, según lo evidencia la curva de fuerza contra desplazamiento (véase figura 37), en la figura 87 se muestran ambas curvas.

Figura 87. Comparación de la simulación y ensayo de compresión biela original.



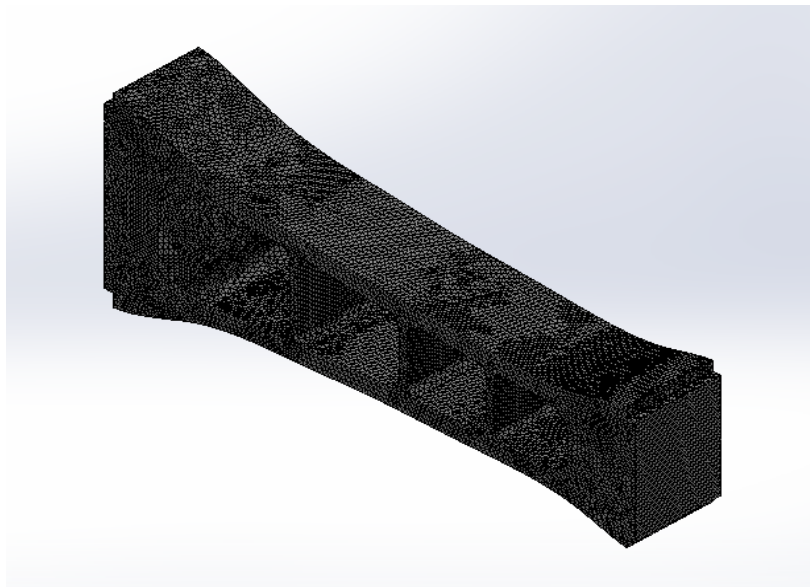
En la figura 87, la línea azul representa los datos de la región elástica del ensayo de compresión real, la cual posee una pendiente con valor igual a: 133517 [MPa]. Mientras que la línea roja representa los datos de la simulación, esta curva posee una pendiente de: 159823 [MPa]. Tomando como un dato experimental el valor de la pendiente del ensayo de compresión se puede concluir que existe un error cercano al 20%. Por tanto, en base a los anteriores resultados es posible afirmar que la simulación usando el método de los elementos finitos resulta ser una excelente técnica para predecir el comportamiento físico y modo de falla que tendrá el elemento mecánico que se está estudiando, pero no es un método concluyente al momento de tomar una decisión de diseño, debido a que según los datos adquiridos de las simulaciones el modelo virtual podría soportar cerca de 1,2 veces más carga y deformación que la pieza real, lo que quiere decir que aparenta ser un material más rígido, y al diseñar con dicha fuerza la biela prototipo se habría diseñado con una carga de falla por pandeo superior (véase figura 45).

3.8 SIMULACIONES APLICADAS AL MODELO CAD PROTOTIPO BIELA.

Las simulaciones se hacen teniendo en cuenta el “peor” de los casos de funcionamiento del elemento mecánico a evaluar, en el punto donde la fuerza llega a su valor máximo, que en el caso de la biela del presente estudio, dentro del mecanismo del motor alcanza un valor igual a: 7680,27 [N].

Para efectuar las simulaciones del prototipo de biela se utilizó nuevamente un modelo simplificado del modelo CAD original (véase figura 88) propuesto para este nuevo diseño de biela. Fueron realizadas igualmente simulaciones de compresión y pandeo, además de un estudio de fatiga; en la práctica se le aplicó un ensayo de compresión al prototipo que se manufacturó cuyos resultados se muestran en el siguiente capítulo.

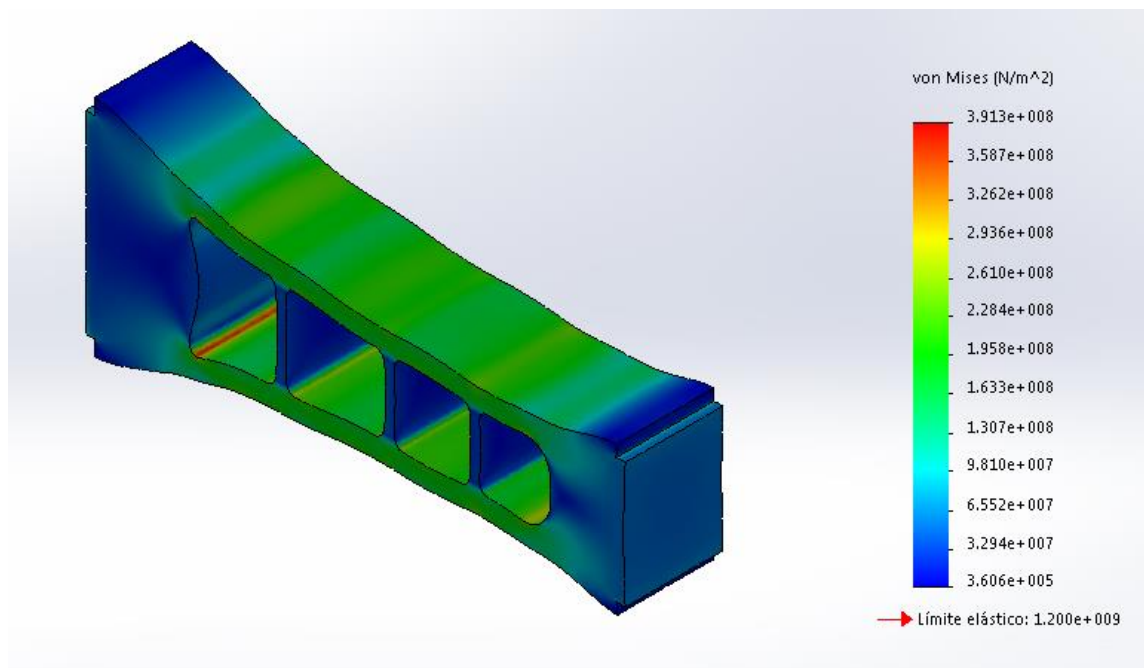
Figura 88. Mallado del modelo CAD simplificado de la biela prototipo.



Fuente: Software SolidWorks®.

En la figura 89 se observa el valor máximo del esfuerzo Von Mises que puede soportar el modelo de la biela prototipo, éste se ubica en la franja de color rojo mostrada en el modelo, el cual tiene un valor de 391,30 [MPa] de acuerdo a la condición de carga planteada de 7680,27 [N] en la simulación; este esfuerzo resultante no sobrepasa el límite elástico del material seleccionado para fabricación del prototipo que es de 1200 [MPa], lo que deriva en un factor de seguridad igual a 3,07 para este diseño; que es un valor aceptable para este tipo de piezas además la simulación revela que se hubiera podido utilizar un acero más económico y fácil de maquinar, como un AISI 4140 de 807 [MPa] de límite a la fluencia, para obtener un FOS (Factor of safety) de 2,06 también aceptable pero debido a que no es muy comercial en forma de láminas, se descartó su uso a causa del proceso manufactura que se seleccionó para la fabricación de la biela prototipo como se mostrará en el siguiente capítulo.

Figura 89. Solución malla planteada.



Fuente: software SolidWorks®.

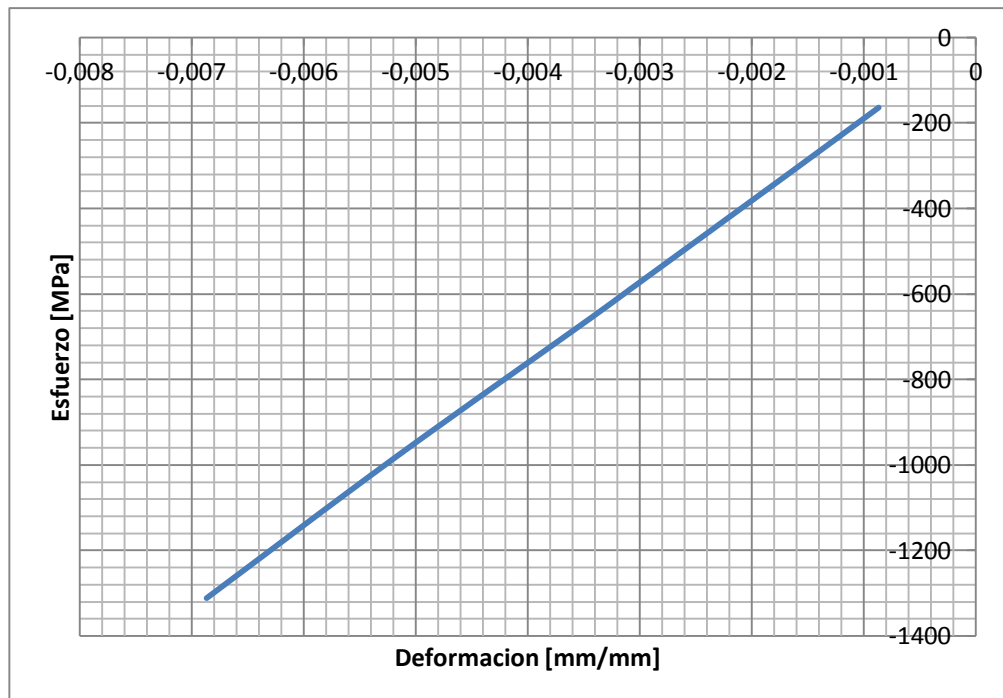
De la misma manera que se hizo con los datos de la simulación de la biela original se realizó un listado de los datos producto de las simulaciones aplicadas al prototipo de biela para tener una idea de su comportamiento y de cómo llega a fallar este diseño propuesto en la prueba de compresión real y una vez puesto en servicio, los datos aparecen en la tabla 13 y se grafican en la figura 90.

Tabla 13. Datos Esfuerzo/Deformación simulación modelo CAD biela prototipo.

Carga [N]	URES [mm]	FOS	Deformación	Esfuerzo [MPa]
-5000	0,029966	5,221	-0,0008644	-163,93
-10000	0,059970	2,592	-0,0017160	-327,87
-18000	0,107900	1,440	-0,0030890	-590,16
-20000	0,119900	1,296	-0,0034320	-655,74
-30000	0,179799	0,870	-0,0051870	-983,61
-40000	0,239900	0,648	-0,0068650	-1311,47

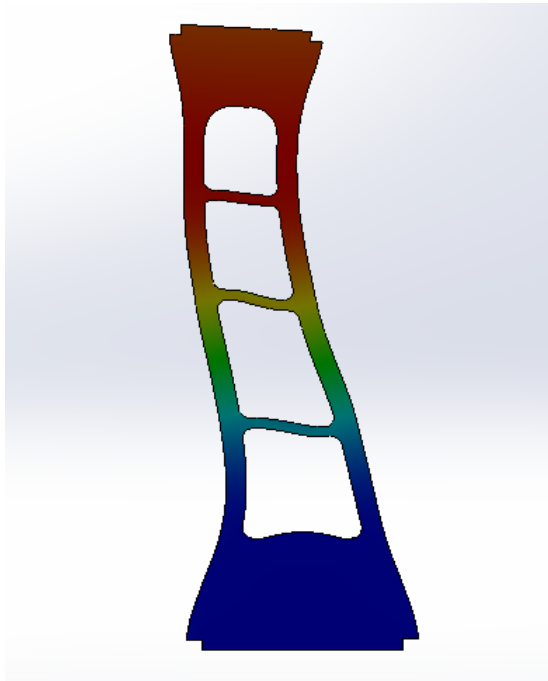
Fuente: SolidWorks® y Microsoft Excel®

Figura 90. Curva resultante de los datos de simulación biela prototipo.



La curva mostrada en la figura 90 resultó en una línea recta con un valor de pendiente de 190667 [MPa]. En cuanto a este modelo CAD simplificado del prototipo, para una fuerza de compresión axial el software muestra (véase figura 91) la forma física de falla en que la pieza se deformará por pandeo bajo una condición de carga crítica. Los anteriores resultados podrán ser comparados con el comportamiento real del diseño en el siguiente capítulo, en la sección 4.3.

Figura 91. Resultado simulación prototipo biela por pandeo.

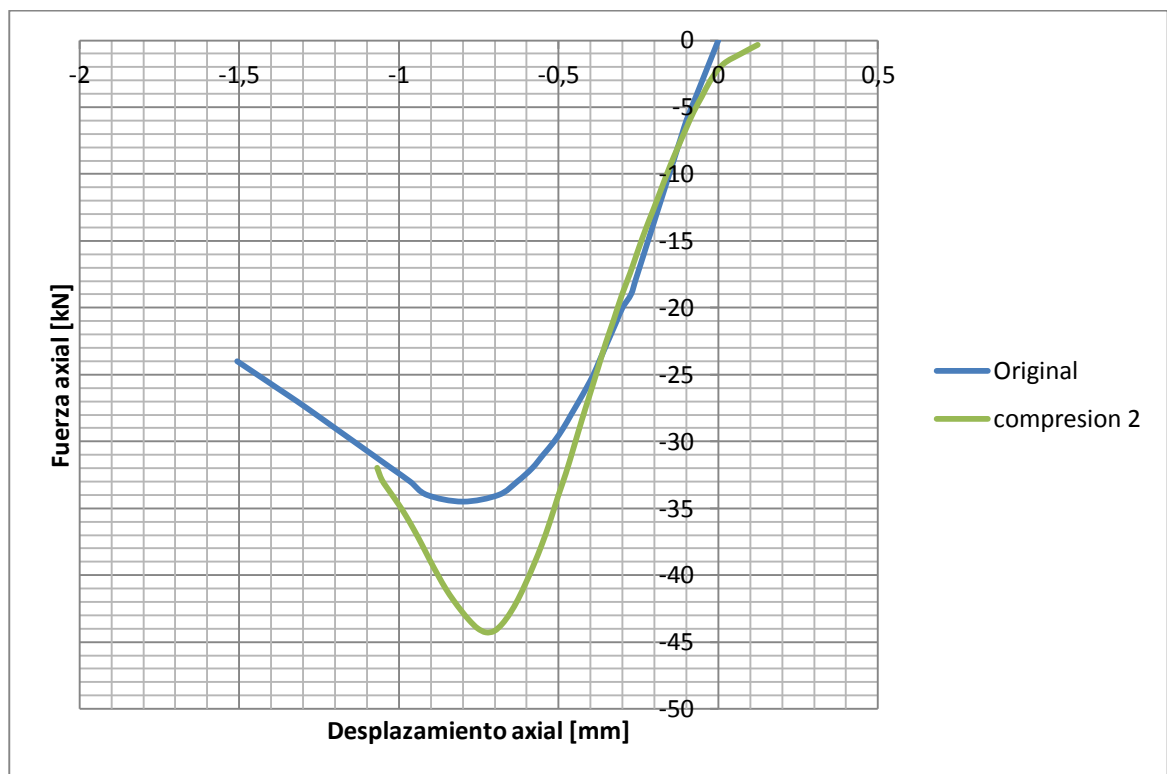


Fuente: software SolidWorks®.

Por ahora, para continuar con la validación de la etapa de diseño y la etapa de manufactura se muestra, en la figura 92, una superposición de los datos de los ensayos de compresión reales aplicados a la biela original y a la biela prototipo manufacturada, como verificación y comparación de los valores máximos de carga [kN], desplazamiento [mm] y falla.

La curva de color azul corresponde al comportamiento de la biela original según la fuerza [kN] aplicada y al desplazamiento [mm] resultante; la curva de color verde corresponde al comportamiento de la biela prototipo, donde se hace evidente que ambas curvas cuentan con una pendiente semejante en la zona elástica pero se nota la gran diferencia entre la biela original y la biela prototipo propuesta en el presente trabajo de investigación, en la que esta última alcanza cerca de 45 [kN] de carga máxima, lo que equivale a un 29% de mejora respecto del diseño original.

Figura 92. Superposición y alineación de los datos de ensayos de compresión.



Fuente: Software máquina MTS de Ensayos Universales.

3.9 ANÁLISIS DE FATIGA PROTOTIPO BIELA

Todos los elementos del motor experimentan carga y descarga de sus elementos en especial la biela y el cigüeñal, por eso se hace indispensable analizar la resistencia a la fatiga que la biela prototipo propuesta en la presente investigación pueda soportar; teniendo en cuenta la teoría clásica de diseño de elementos de máquinas, las posibilidades de simulación ofrecidas por el software CAD y la experiencia de los técnicos consultados en los diferentes talleres de la ciudad de Bucaramanga encargados de la reparación y del mantenimiento de guadañadoras, quienes afirman que la falla o rotura por flexión (ver figura 93) es la más común de las causas de refacción de estos motores (para ampliar el tema de fallas comunes en bielas ver anexos).

Figura 93. Falla común en bielas de motores de guadañadora.



Una de las fallas más comunes en bielas de motores de dos tiempos de pequeña cilindrada es la flexión producto de la fatiga a la que termina sometida la pieza luego de la repetición de ciclos de carga de trabajo dentro del motor, razón por la cual el ciclo de tensiones, en el caso de motores de dos tiempos conocido como pulsante (tensiones máximas y mínimas de signos iguales pero distinta magnitud), que, en la biela del motor Shindaiwa de la presente investigación dichas fuerzas oscilan entre los ± 7680 newton y ± 0 newton.

Según P. Orlov: “Las piezas que se someten a una carga variable y repetida duradera se rompen a tensiones considerablemente menores que el límite de rotura del material a carga estática. Esta circunstancia tiene gran significación para las máquinas modernas de altas revoluciones, cuyas piezas trabajan en condiciones de carga cíclicas con un número total de ciclos que alcanza muchos millones, en todo el período de servicio de la máquina. Cómo demuestra la estadística, no menos del 80% de roturas y averías que tienen lugar durante la explotación de las máquinas modernas está vinculado con los fenómenos de fatiga. Por eso, el problema de la resistencia a la fatiga es el problema clave para elevar la fiabilidad y longevidad de las máquinas. Las cargas cíclicas están expresadas con más evidencia en las máquinas y mecanismos con movimiento alternativo de las piezas (máquinas de émbolo, mecanismos de leva). No obstante, también en las máquinas con marcha suave (máquinas rotativas del tipo turbinas) son inevitables las cargas cíclicas, por ejemplo debido al desequilibrio de los rotores, a los abatimientos radiales y laterales de los rotores, etc. El número de ciclos de las cargas que el material soporte sin romperse depende de la magnitud de la tensión máxima y de la magnitud del intervalo entre los valores extremos de las tensiones del ciclo. A medida que disminuye la magnitud de las tensiones el número de ciclos, que provocan la rotura, aumenta y a cierta suficientemente pequeña tensión el material adquiere la capacidad de soportar un número ilimitadamente grande de ciclos sin rotura. Esta tensión llamada límite de fatiga

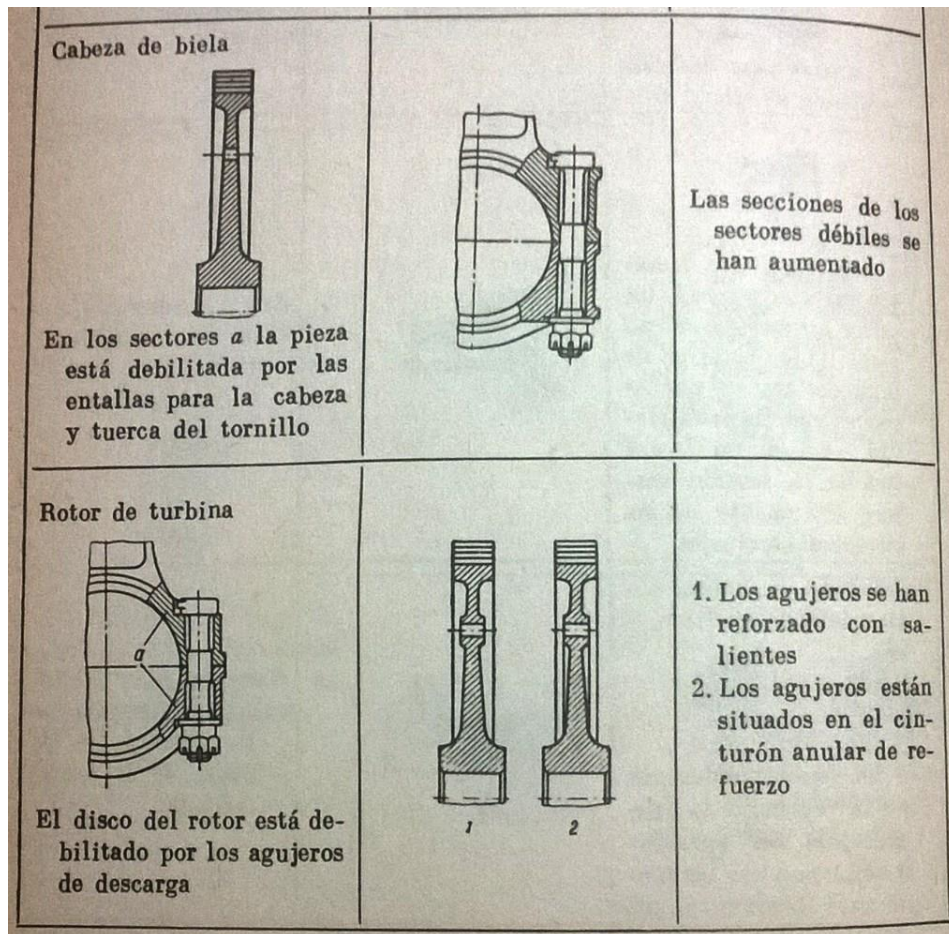
sirve de base del cálculo de resistencia de las piezas sometidas a cargas cíclicas.”²⁹

Otro tema de importancia que afecta la resistencia y la vida útil de una pieza son los concentradores de esfuerzos que dicha pieza pueda tener en su diseño o en su proceso de manufactura, detalle importante del diseño del prototipo de biela propuesto debido al proceso de manufactura aplicado y a la solución ingenieril escogida (cuerpo prototipo biela, tipo cercha) para hacer coincidir el centro de gravedad y el peso de éste prototipo con la biela original, de nuevo P. Orlov ofrece una referencia para este tema: “La resistencia a la fatiga de las piezas cae intensamente en presencia de debilitamientos, transiciones bruscas, ángulos entrantes, etc. Que provocan la concentración local de tensiones. En los sectores de debilitamiento surgen cambios bruscos de tensiones, cuya máxima magnitud puede ser 2 a 3 y más veces que el nivel medio de las tensiones que actúan en esta sección de la pieza. Ya que la intensidad de los deterioros primarios por fatiga se determina por la velocidad de difusión de las lagunas, y esta última es proporcional a la magnitud de las tensiones efectivas, en los sectores de concentración de tensiones surge aceleradamente la porosidad del metal, precedente a la formación de grietas de fatiga. A consecuencia de esto los deterioros por fatiga en las zonas de concentración de tensiones adelantan los deterioros en los demás sectores de la pieza. El grado de elevación de la tensión depende, en primer lugar, del tipo y forma de debilitamiento. Cuanto mayor sea el salto de las secciones en el sector de transición y más brusco el paso, tanto más será la tensión local máxima. El fenómeno de concentración de tensiones provocado por el factor de la forma, en la práctica se acrecienta por la circunstancia de que los sectores de disposición de los concentradores de tensiones casi siempre suelen estar debilitados por causas tecnológicas. En las piezas que se someten al tratamiento mecánico, en los sectores de las

²⁹ ORLOV, P. Ingeniería de diseño, tomo uno. 2da Edición, Editorial MIR, Moscú. 1985. P. 352.

transiciones, el debilitamiento comienza como resultado de cortar las fibras durante el anterior tratamiento de la pieza bruta por presión en caliente. En las piezas forjadas y estampadas, los sectores de las transiciones tienen baja resistencia mecánica, debido al estirado del metal en estos sectores.”³⁰ La figura 94 muestra los sectores propicios a fatiga en las bielas y la solución ingenieril aplicada.

Figura 94. Eliminación de concentradores de tensión.



Fuente: ORLOV, P. Ingeniería de diseño, tomo uno. 2da Edición, Editorial MIR, Moscú. 1985. P. 404.

³⁰ ORLOV, P. Ingeniería de diseño, tomo uno. 2da Edición, Editorial MIR, Moscú. 1985. P. 373.

Un punto significativo a tener en cuenta en el análisis de fatiga del prototipo de biela diseñado en el presente trabajo es la forma de viga con agujeros (tipo cercha) que tiene su cuerpo, tradicionalmente la forma del cuerpo de las bielas tienen su sección transversal a manera de H, Γ ó $\Gamma +$ (la sección transversal de la biela original del motor Shindaiwa tiene forma de Γ); según V. M. Faires:

“La importancia de la concentración de esfuerzo resultante de la existencia de un agujero en una viga depende de la localización del agujero. Si éste está en el eje neutro y no es demasiado grande no se puede producir reducción alguna de la resistencia a la fatiga de la viga. Por otra parte, si el agujero está cercano a las fibras exteriores, en que el esfuerzo es naturalmente grande, en el borde del agujero se puede producir un esfuerzo mucho mayor que él: $M * c/I$ correspondiente a la fibra externa.”³¹

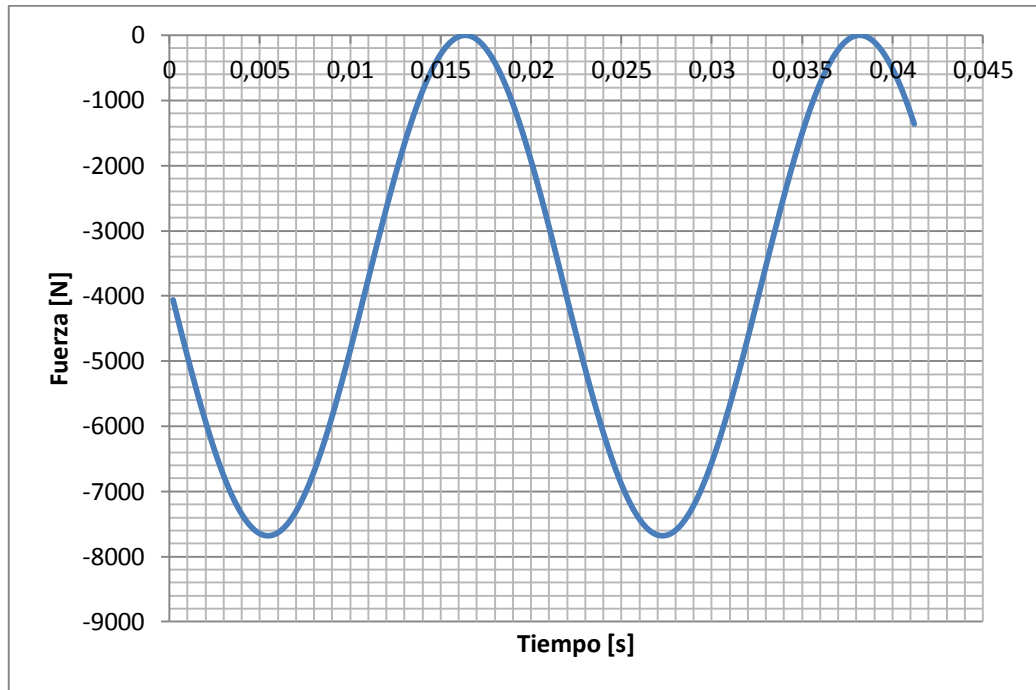
Realizando los cálculos correspondientes a la fatiga, inicialmente de la termodinámica de la combustión se obtiene:

- Fuerza máxima de compresión en el ciclo: $F_{max} = -7680 [N]$
- Fuerza mínima ciclo: $F_{min} = 0 [N]$

Y se determina así lo que es una carga repetida típica para motores de dos tiempos como lo muestra la figura 95.

³¹ FAIRES, Virgil Moring. Diseño de elementos de máquinas. Montaner y Simón Editores, Barcelona. 1970. P. 167.

Figura 95. Carga cíclica que experimenta la biela en su trabajo en el motor.



Del análisis de cargas efectuado al modelo CAD del prototipo de biela mediante el software SolidWorks® se obtienen los siguientes datos:

- Esfuerzo máximo a compresión de la pieza: $\sigma_{max} = 391,30 [MPa]$
- Esfuerzo mínimo de la pieza: $\sigma_{min} = 0 [MPa]$

Este primer cálculo a la fatiga se efectuó utilizando la metodología expuesta en el libro de Diseño de Máquinas de Shigley³² siendo el esfuerzo último a la fatiga: $S_{ut} = 1400 [MPa]$ de la materia prima empleada en la construcción del prototipo

³² BUDYNAS, R y NISBETT, J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGraw-Hill. Mexico D.F. 2008. 1051 p.

(acero HARDOX-450), el factor límite a la fatiga sin corregir se toma directamente de una investigación³³ aplicada al material, el cual tiene un valor de:

$$S'_e = 440 \text{ [MPa]} \quad (59)$$

Se procede luego a calcular el factor límite a la fatiga real (corregido), así:

$$S_e = k_f k_s k_r k_t k_m * S'_e \quad (60)$$

Teniendo en cuenta los factores de corrección que se presentan en la tabla 14 con su respectivo nombre se encontró el valor del factor límite a la fatiga real.

Tabla 14. Factores de corrección y variables del cálculo de fatiga prototipo biela.

Nombre	Variable	Valor	Unidades
Fuerza Máxima	Fmax	7680	N
Fuerza Mínima	Fmin	0	N
Esfuerzo Máximo	Smax	393	MPa
Esfuerzo Mínimo	Smin	0	MPa
Esfuerzo Medio	Smed	196,50	MPa
Rango de Esfuerzo	Sr	393	MPa
Relación de Esfuerzo	Sa	196,50	
Relación de Amplitud	Aa	0	
Factor Acabado superficial	Kf	0,80	
Factor de Tamaño	ks	1	
Factor de Confiabilidad	kr	0,90	
Factor de Temperatura	kt	0,90	
Factor Diverso	km	1	
Esfuerzo Ultimo	Sut	1400	MPa
Esfuerzo Bajo Ciclaje	Sl'	1050	MPa

³³ ULEWICZ, Robert et al. Fatigue properties of wear resistant martensitic steel. Czestochowa University of Technology, Faculty of Management, Institute of Engineering Production. Czestochowa. 2014. 6 p.

Tabla 14. (Continuación)

Esfuerzo fatiga sin Corregir	Se'	440	MPa
Esfuerzo a la fatiga Corregido	Se	285,12	MPa
Esfuerzo a la Fluencia	Sy	1200	MPa
Factor seguridad Soderberg	nfs	1,17	
Factor seguridad Goodman Modificado	nfgm	1,21	
Factor seguridad Gerber	nfg	1,39	
Factor seguridad ASME elíptico	nfa	1,42	
Factor de Seguridad Vida Infinita	nf	1,45	
Factor de resistencia a la fatiga	fy	0,775	
Constante A vida fatiga	a	4130,61	
Constante B vida fatiga	b	-0,19353	
Número de ciclos	N	6,83 X 10 ⁶	

Fuente: Tomado y adaptado de: BUDYNAS, R y NISBETT, J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGraw-Hill. México D.F. 2008. P. 273-340.

Reemplazando los anteriores factores en la ecuación (60), se obtuvo:

$$S_e = (0,8)(1)(0,9)(0,9)(1) * 440 [MPa]$$

$$S_e = 285,12 [MPa]$$

El factor límite a la fatiga para bajo número de ciclos es:

$$S'_l = 0,75 * S_u \quad (61)$$

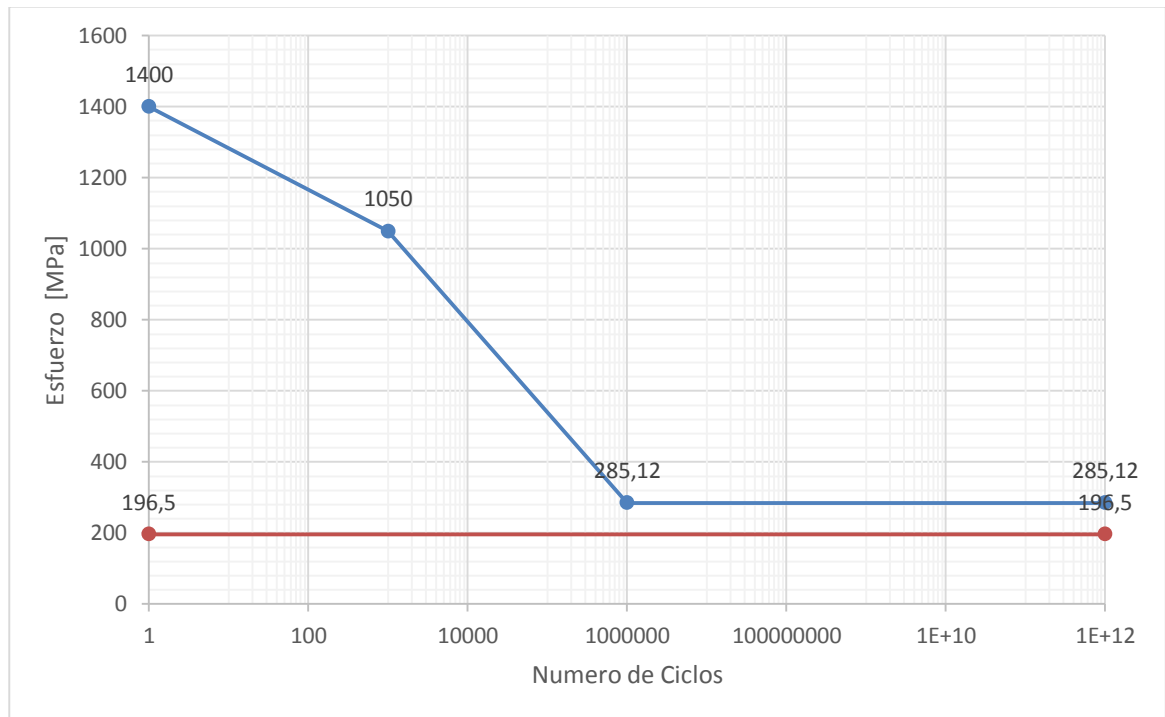
$$S'_l = 0,75 * 1400 [MPa]$$

$$S'_l = 1050 [MPa]$$

Con estos valores es posible elaborar un diagrama de Esfuerzo contra Número de Ciclos como el que se presenta en la figura 96, donde la leyenda **series1** hace

referencia a la curva de fatiga de la biela prototipo y la leyenda **series2** referencia al límite del esfuerzo alternante Von Mises encontrado en el estado de carga máximo soportado por el prototipo (véase figura 89).

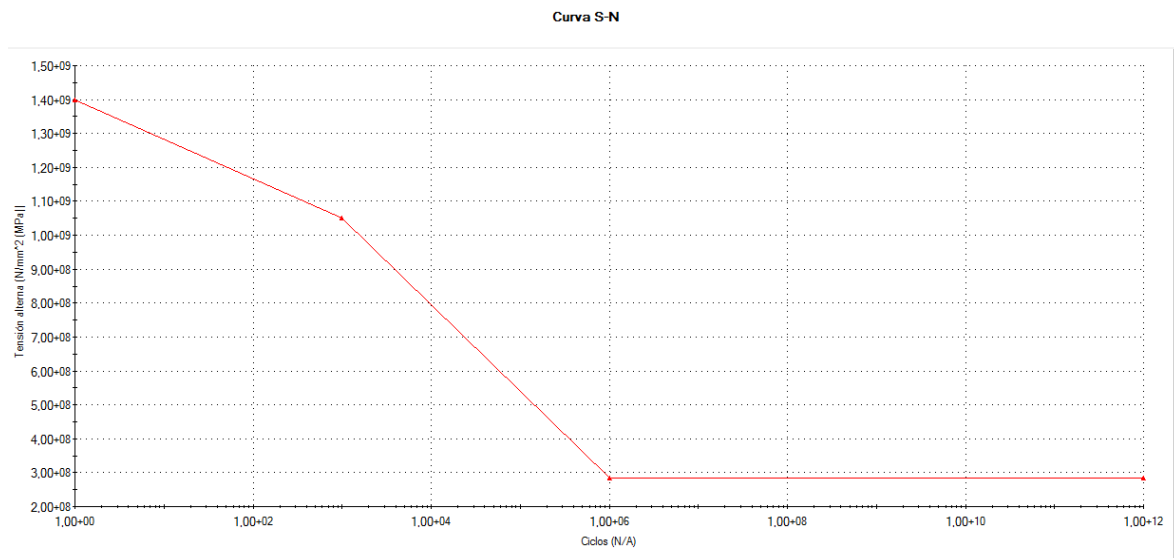
Figura 96. Diagrama S-N para la biela prototipo.



Con este diagrama se hace posible observar y comprobar a través de esta metodología que el diseño propuesto en la presente investigación puede soportar la falla por fatiga por un tiempo indefinido o para vida infinita y que cuenta con un factor de seguridad mínimo a la fatiga de 1,2 según el criterio de Soderberg (que es el más conservador de todos los criterios) como se muestra en la tabla 14.

A continuación se muestran los resultados de la simulación de fatiga efectuada utilizando la metodología del software CAD. La figura 97 muestra la curva S-N (esfuerzo en [MPa] contra Número de Ciclos) la cual se trazó usando el software de acuerdo a la teoría de fatiga de Soderberg para un número de ciclos de vida infinito. La figura 98 presenta el factor de seguridad para vida infinita por fatiga mínimo de 1,309. Por último, la figura 99, presenta el número máximo de ciclos de carga que puede soportar el prototipo el cual es de $1,00 \times 10^{11}$ [ciclos] lo que quiere decir que la pieza está diseñada para ciclos de vida infinita. El resultado que se obtuvo de la simulación CAD/CAE y de la teoría de falla por fatiga (véase tabla 14) puede compararse con los $6,325 \times 10^9$ [ciclos] obtenidos en un estudio y análisis semejante para una biela convencional.³⁴

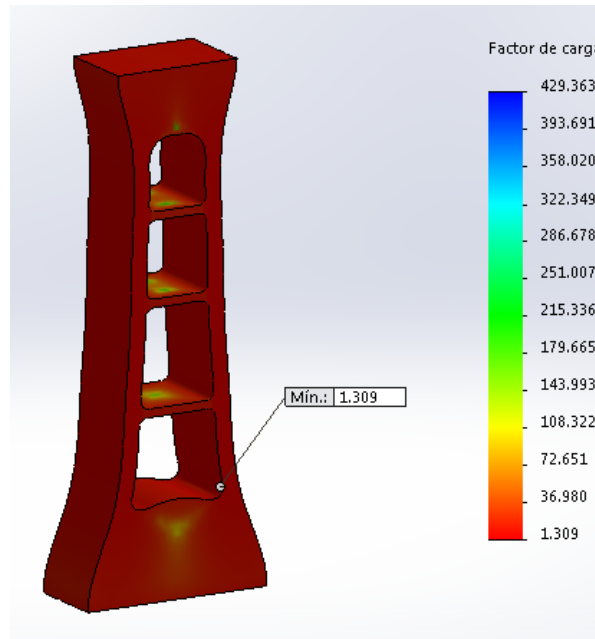
Figura 97. Curva de fatiga construida para ciclos de vida infinitos.



Fuente: Software SolidWorks®.

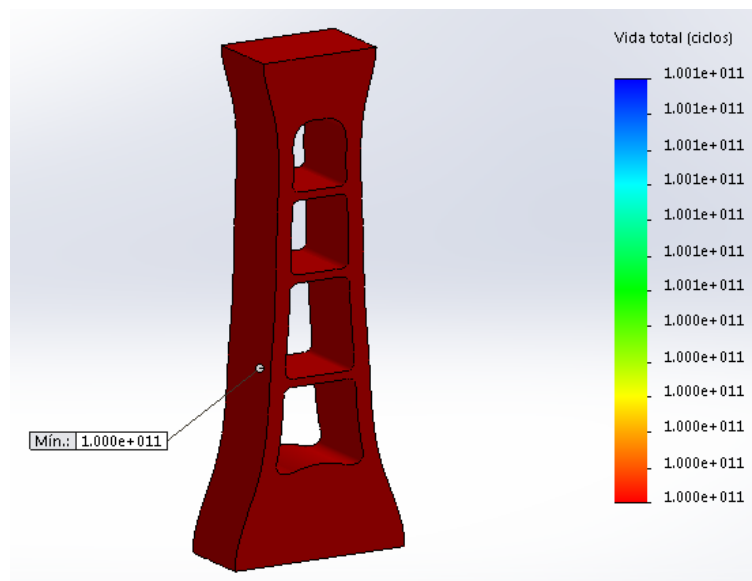
³⁴ Cheng Gang, Li Jianfeng, Sun Jie and Liu Yi, 2013. Finite Element Analysis of the Fatigue Life for the Connecting Rod Remanufacturing. *Journal of Applied Sciences*, 13: 1436-1442.

Figura 98. Factor de seguridad por fatiga del modelo CAD.



Fuente: Software SolidWorks®.

Figura 99. Total ciclos de vida soportados a fatiga por el modelo CAD.



Fuente: Software SolidWorks®.

4. PROCESO DE MANUFACTURA PROTOTIPO BIELA

Los métodos de manufactura han cambiado vertiginosamente desde que las maquinas empezaron a reemplazar el trabajo artesanal del hombre, hoy tenemos maquinas-herramientas que son capaces de hacer una pieza de complicada geometría en contados minutos (lo que antes tardaba varias jornadas de trabajo) a través de la electrónica, la telemática, el control numérico computarizado sin dejar de lado el moderno y robusto software de computación capaz no solo de apoyar el dibujo y diseño de piezas mecánicas sino de simular operaciones de corte, de desbaste, de forja o fundición e incluso gestionar todo el proceso de fabricación de un componente mecánico desde la materia prima, las maquinas, las herramientas de corte, los tiempos, su ciclo de vida y su disposición final. Procesos que se realizan en tiempo real, llevando a término todas y cada una de las operaciones necesarias rápida y eficazmente alcanzando acabados de precisión micrométrica.

En los inicios de la industria metalmeccánica la destreza de los operarios era clave para elevar los niveles de producción de cualquier fabrica, allí se tenía en cuenta las habilidades del controlador de la máquina-herramienta, la puesta a punto de la operación y el consecuente incremento de la productividad; hoy en día el enfoque ya no está en la precisión y rapidez de la operación sino en su eficiencia, en la reducción de costos, personal, material y operaciones, en hacer más con menos, pues las maquinas modernas de control numérico computarizado hacen todo el trabajo que el diseñador les asigne sin cansancio y sin parar. Se ha avanzado tanto en la industria de la fabricación que la tendencia ahora es la construcción de componentes, piezas e incluso edificaciones por medio del uso de la tecnología de impresión 3D. Pero, examinando el entorno y a las posibilidades de manufactura con que cuenta la industria regional, para la fabricación del componente mecánico

(biela) objeto de la presente investigación, se realizó primero que todo una consulta bibliográfica de las técnicas y procedimientos utilizados en la industria mundial, históricamente y recientemente, en el tema de fabricación de autopartes y más específicamente de bielas, se encontró (tomando a la República Popular China como punto de referencia de la industria mundial) que un 90% de estas piezas mecánicas; hablando solo de motores de combustión interna, se fabrican por forja en caliente y el 10% restante se hace o por sinterización, fundición u otros métodos especiales de manufactura.³⁵

Las bielas que son fabricadas por el método de forja en caliente poseen altas propiedades mecánicas y son capaces de soportar grandes cargas y velocidades; diferentes tipos de aleaciones de aceros son empleadas como la AISI 4340 o aleaciones Cromo-Níquel. Las bielas fabricadas por sinterización de polvos se caracterizan por tener una relación peso/tolerancia superior, bajos costos de maquinado subsecuentes, mínimo desperdicio de material, consistencia dimensional y precisión; sin embargo esta alternativa es un 30% más cara que las bielas forjadas. Las bielas hechas por fundición poseen excelente maquinabilidad y son económicamente competitivas, sin embargo las propiedades mecánicas son muy pobres por lo cual las bielas hechas por este método de fabricación se usan solo para maquinas o motores de baja potencia.³⁶

Dentro de la investigación de campo que se realizó en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, en un primer acercamiento a las posibilidades de fabricación teniendo en cuenta el análisis de la información sobre manufactura de bielas consultado físicamente en la Biblioteca de la Universidad y virtualmente en su base de datos, además de contar con la asesoría del Profesor Dr. Ing. Jens

³⁵ PLANCAK, Miroslav et al. A review of the possibilities to fabricate connecting rods. Annals of Faculty Engineering Hunedoara. University Politehnica Timisoara. Faculty of Engineering Hunedoara, Tome XI. 2013. 4 p.

³⁶ Ibid.

Jensen de la Hochschule Bremen University of Germany; comenzó una búsqueda en el corazón de la industria metalmecánica de Bucaramanga, exactamente desde la carrera 15 hacia el occidente y desde la Avenida Quebradaseca hacia el norte de la Ciudad, se visitaron importantes talleres de reparación y rectificación de motores, entre ellos: La Reconstructora de Motores de Bucaramanga (Carrera 14 N. 22-37), Rectificadora del Oriente (Calle 23 N. 12-62), Central de Motores (Calle 17 N. 14-35), buscando las posibilidades que ofrecían dichas industrias en cuanto a fabricación de componentes mecánicos para motores como bielas, pistones, camisas, bujes, cigüeñales, entre otros. Pero con la esperanza de que en algún taller o empresa de Bucaramanga o de su área metropolitana se encontrará una máquina, un proceso y un experto que pudiera fabricar bajo los estándares de la industria una biela según las especificaciones y los objetivos del presente proyecto.

El taller dedicado a la metalmecánica METALCA S.A. ubicado en la Carrera 14 N. 22-52 en el barrio Girardot aceptó el reto de evaluar el costo de fabricar la biela a través de un mecanizado hecho casi que artesanalmente mediante el uso del torno, el taladro y la fresadora con un costo estimado de trescientos mil pesos (unos ciento cincuenta dólares estadounidenses según la TRM del día Martes 2 de Septiembre de 2014 entregada por el Banco de la Republica) por pieza sin contar el material (que se creía, sin tener un análisis metalográfico de la pieza de referencia, podía emplearse un acero AISI 4340) por otro lado solo una empresa, la METALIZADORA DEL ORIENTE LTDA estuvo dispuesta a realizar el balanceo y la metrología de las bielas que fueron adquiridas para la presente investigación, sin ningún costo (en apoyo a esta investigación) y siguiendo los estándares de la industria.

De esa manera se pudo comprobar de primera mano lo que se sabía indirectamente a través de estudios económicos e históricos de la industria santandereana, es decir, que no existe una producción fuerte ni competitiva de autopartes que pueda dar la talla en el mercado mundial. Precisamente mientras se escribe este libro, la empresa más adelantada y organizada de nuestra región en cuanto a fabricación de autopartes se refiere: T. H. C. S. A. ubicada en la zona industrial de la ciudad de Girón retiró toda su planta de producción de ejes homocinéticos, cardanes, tulipas, etc. Fabricados con los más altos estándares de calidad a través de procesos de forjado, con aplicación de tratamientos térmicos y control de calidad para el país vecino de Ecuador y para su planta de producción en el departamento de Cundinamarca, dejando solo el servicio de comercialización, metrología, calidad y laboratorio de prueba de autopartes en su planta de Girón. El proceso de manufactura de los dos prototipos se realizó utilizando únicamente los medios técnicos y recursos de esta región del País.

4.1 SELECCIÓN DE LOS METODOS DE MANUFACTURA DE LA BIELA.

Como ya se ha comentado en páginas anteriores en esta investigación, en un primer acercamiento a los procesos de manufactura ofrecidos en nuestra ciudad y nuestra región, el primero y más escueto que se pudo encontrar fue el mecanizado de una pieza cilíndrica o prismática de acero usando máquinas herramientas convencionales como: torno, fresadora, taladro, cepillo, etc. En uno de los muchos talleres que se encuentran entre los barrios Girardot y Gaitán de la ciudad de Bucaramanga; exactamente el taller que cuenta con la razón social METALCA ofreció sus servicios de mecanizado para la realización de la propuesta de diseño de la biela por un costo de ciento cincuenta dólares (trescientos mil pesos en moneda local) cada una.

Con esta sola referencia, se procedió a buscar una empresa de rectificación de motores donde se lograra realizar la metrología certificada a cada una de las bielas que fueron adquiridas para la presente investigación completando parte del primer objetivo específico de este proyecto que tiene que ver principalmente con la ingeniería inversa; esta empresa responde al nombre de METALIZADORA DEL ORIENTE y fue allí donde además de realizar la medición técnica de las bielas se encontró una puerta abierta a toda la, quizá incipiente, industria metalmecánica (tal vez un poco oculta) que existe en Santander, a la Asociación de Metalmecánicos de Santander ASOMECSA y al grupo empresarial METALGREEN. Lo cual permitió conocer y visitar empresas de forja como FORJADOS S.A. y de fundición como FRAGAING S.A. Pero además se pudo tener acceso a empresas con tecnología de punta como HYDROBAS S.A. que posee una máquina de corte por chorro de agua marca FLOW WATERJET, la cual maneja tolerancias de corte micrométricas y tiene la ventaja de que el proceso de corte se hace en frío, lo que no produce deformación o cambios en la estructura interna del material al cortar, como si ocurre en el corte con plasma u oxiacetilénico; pero es un método de fabricación medianamente costoso si se hace en grandes cantidades (ver tabla 17) ya que el uso de la máquina para cualquier corte (hasta de 6 pulgadas de espesor en el caso del acero) es cobrado por el tiempo consumido más no por volumen. Pero esta máquina y este proceso de fabricación tiene la ventaja de que puede cambiar el diseño, tamaño o geometría de la pieza rápidamente sin incurrir en gastos adicionales como las costosas matrices en el caso de la fundición o del forjado.³⁷

El corte por chorro de agua garantiza la uniformidad de las propiedades del material además que permite espesores muy delgados los cuales son deseados en la zona de ubicación de los rodamientos de agujas que debe llevar la biela. La fundición es más económica que el corte por chorro de agua si se realiza en

³⁷ Fuente: FORJADOS S.A. y FRAGAING S. A. S.

grandes volúmenes de producción, pero tiene la gran desventaja en el caso de piezas pequeñas, que no es recomendable cuando se trata de espesores muy delgados, además de la poca uniformidad con la que queda el material, ya que la industria local no cuenta en estos momentos con procesos específicos de fabricación por fundición centrífuga (excepto la industria textil) sino por las técnicas de molde por cera perdida y por molde en arena. La forja es más económica aún que la fundición pero solo si la producción es masiva, por encima de las cinco mil piezas, distribuyendo los costos de fabricación de las costosas matrices que requiere el proceso³⁸.

Curiosamente, aunque el mecanizado hecho con maquinas-herramientas convencionales es la opción más costosa de todas, en términos de producción en serie, cuenta con la ventaja de que las piezas cumplen con los requerimientos dimensionales y las formas geométricas finales son muy cercanas a la forma de la biela original, y es una técnica de fabricación que tiene uno de los costos más asequibles si se requieren fabricar bielas en pequeñas cantidades.

Luego de hacer un recuento por todos y cada uno de los medios y posibilidades de fabricación que existen en esta región del País, para la fabricación de los dos prototipos de biela, el diseño final producto de todo el estudio e investigación desarrollada en el presente proyecto y en cumplimiento del tercer objetivo específico que se planteó, se optó por realizar ambos prototipos utilizando la tecnología de corte por chorro de agua con que cuenta la empresa HYDROBAS S.A.S. (Ver la máquina utilizada en la figura 100) la cual es una máquina versátil que permite el corte de cualquier lámina de material hasta de 6 pulgadas (152,40 mm) de espesor sin causar deformación ni cambio en sus propiedades internas, con acabados precisos que ahorran costo de mecanizados posteriores.

³⁸ Fuente: FORJADOS S. A.

Figura 100. Maquina FLOW MACH 3 de corte en frio por chorro de agua.



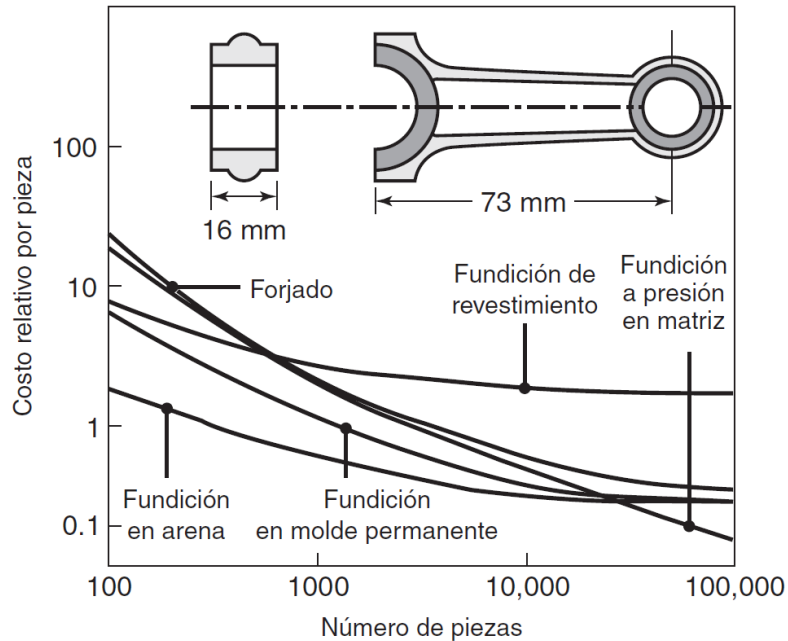
Fuente: <http://www.mechany.com/images/2506a.jpg>

En base a dicha decisión, se estructuró el diseño que tendría la biela prototipo (ver capítulo 3, sección 3.5) basado en el proceso de fabricación que se iba a emplear para construirla, es decir, que el diseño se elaboró teniendo en cuenta las materias primas disponibles en esta región del País (Bucaramanga, Piedecuesta, Girón, Floridablanca), al igual que los medios de fabricación existentes. A continuación se presentan las cotizaciones, pesquisas y costos reales de manufactura de las diferentes empresas de fabricación de la región y que ya fueron mencionadas anteriormente en la presente investigación.

En la figura 101 se muestra una interesante relación entre el número de piezas fabricadas (o por fabricar) contra el costo relativo por pieza; comparando los métodos de fabricación de fundición y de forjado, para una biela de un tamaño que en términos prácticos, se puede considerar como equivalente a la del motor Shindaiwa que se ha escogido como referencia para la presente investigación; en esta figura, si se traza una línea vertical a la mitad de la gráfica (en el punto de las cinco mil piezas) se puede ver claramente que la fundición en arena es el método de fabricación más económico de todos, el más costoso es la fundición de

revestimiento y la forja se ubica en la mitad. Pero si se mira hacia el final de la gráfica, hacia las cien mil piezas, los costos de fabricación por forja disminuyen considerablemente a menos de 0,5.

Figura 101. Costo relativo entre la forja y la fundición.

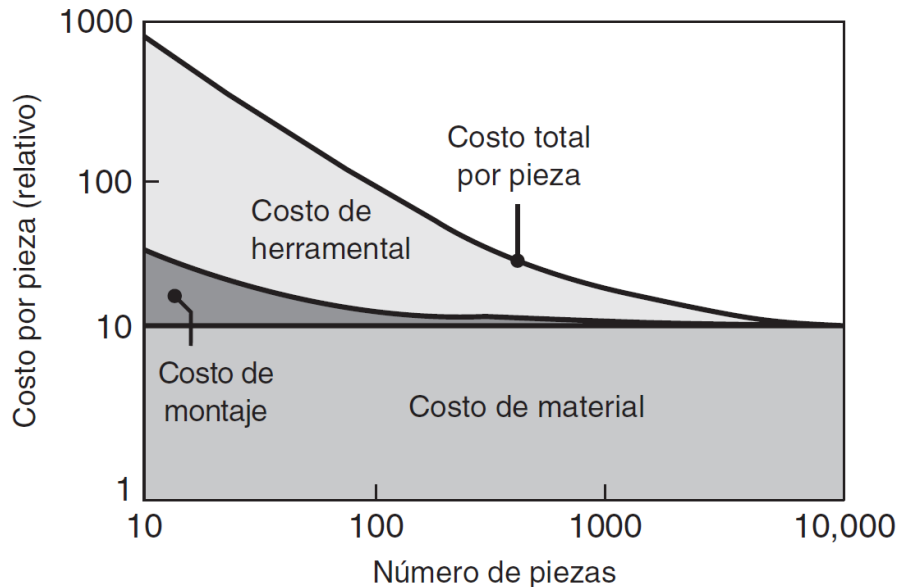


Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 394.

Por otro lado la gráfica mostrada en la figura 102 muestra el costo por pieza (relativo) contra el número de piezas en el caso específico de fabricación de piezas por forja, donde a partir de las cinco mil piezas, según esta relación, el costo llega a minimizarse y estabilizarse a tal punto que las piezas salen al costo de la materia prima, lo que prueba que la fabricación de piezas en serie por este método de manufactura es económico, permite generar geometrías complejas, desarrollar excelentes propiedades mecánicas y rapidez en la entrega de pedidos; conclusión que puede ser corroborada al consultar investigaciones como la

realizada por la facultad de ingeniería Hunedoara la cual confirma que un noventa por ciento de las bielas que se fabrican actualmente en el mundo se realiza mediante este proceso de manufactura.³⁹

Figura 102. Costo relativo forjado por número de piezas.



Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 393.

En el caso del ámbito local, la investigación que se realizó para el presente proyecto dio como resultado el descubrir que actualmente existe solo una empresa con la capacidad tecnológica y técnica para la fabricación en serie de piezas forjadas, esta empresa es FORJADOS S.A.S. ubicada en la Carrera 5 N. 57-47 en la ciudad de San Juan de Girón, Santander, Colombia. Empresa fundada por inmigrantes alemanes que llegaron a estas tierras a mediados del siglo XX para respaldar la puesta en marcha de la empresa Forjas de Colombia⁴⁰ conocida actualmente como FORCOL (ver anexos). En dicha organización se logró hablar

³⁹ PLANCAK, Miroslav et al. A review of the possibilities to fabricate connecting rods. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara*. University Politehnica Timisoara. Faculty of Engineering Hunedoara, Tome XI. 2013. 4 p.

⁴⁰ SANDOVAL, Diego, et al. *Análisis del desarrollo industrial de forjas de Colombia 1961-1981*. Programa BID/CEPALCIID/PNUD. Buenos Aires, 1982. 112 p.

con la alta gerencia y plantearles la idea de fabricar dos prototipos de biela como investigación de mercado y de negocio, aunque hubo buena voluntad por parte de ellos, la respuesta fue la siguiente cotización mostrada en la tabla número 15.

Tabla 15. Cotización fabricación bielas por forja.

Costo unitario	1.200 \$/Unidad (incluye forjado + Normalizado)
Pedido mínimo	5.000 Unidades/orden
Costo kilo-forja	12.500 \$
Costo matrices	18.000.000\$ (Acero para trabajo en caliente DIN 1.2714)

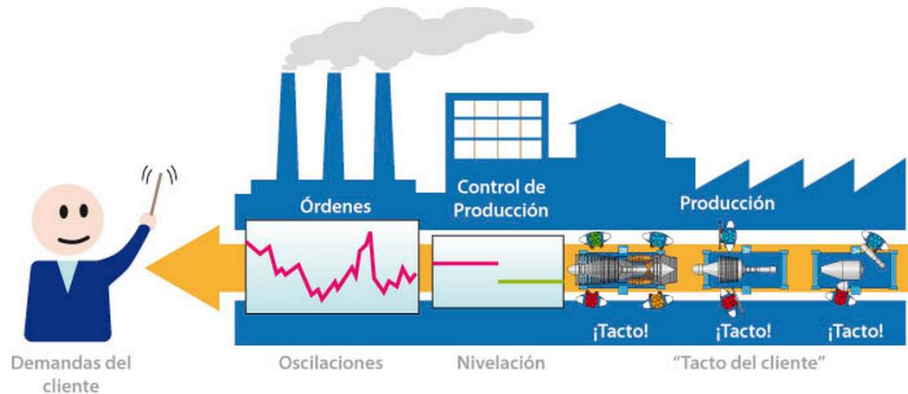
Fuente: FORJADOS S.A.S.

Evidentemente se hace imposible la fabricación de un pedido mínimo de cinco mil bielas para un par de estudiantes universitarios; principalmente por los costes de fabricación de las matrices, pero resultó interesante el ejercicio de indagación que ayudo a cambiar en algo la mentalidad de empleado con que se educa en las universidades y colegios, esto permite mirar los costos, los tiempos y las ganancias de este proceso de manufactura con ojos de empresario.

El tiempo de entrega para dicho pedido fue proyectado para una semana, exactamente en siete (7) turnos de ocho (8) horas cada uno. Es decir, haciendo un cálculo básico, se tiene una biela de la línea de producción cada cuarenta (40) segundos o en otros términos tenemos: 40 segundos/biela ó 1,50 bielas/minuto. Tiempo conocido como “takt time” o ritmo de producción en manufactura moderna, el cual es el tiempo de respuesta de la capacidad instalada de una fábrica para responder a las demandas de los clientes (ver figura 103). Sí este tiempo es inferior a las demandas del cliente o sí el tiempo de producción real es menor al

proyectado se necesitaran de horas extras y turnos adicionales para cumplir con el plazo de entrega lo que aumentaría los gastos por concepto de mano de obra.

Figura 103. Esquema tiempo de respuesta (takt time) línea de producción.



Fuente: <http://mtmingenieros.com/knowledge/que-es-takt-time/>

En cuanto a la segunda opción de manufactura para bielas encontrada en el mercado regional y que coincide con la tradición histórica y mundial comprobada de procesos de manufactura, esta la fundición. Dentro de la indagación realizada, se constató que hay variedad de empresas medianas y pequeñas que ofrecen sus servicios de fundición en Bucaramanga y su área metropolitana, empresas como: FUNDEDAR S.A., FUNDICIONES PUENTES S.A., METALGREEN S.A.S., FRAGAING S.A.S. y otras más, la mayoría de las cuales realizan su proceso de fundición a través de un alto horno lo que solo les permite alcanzar temperaturas para fundir hierro gris, pero empresas como METALGREEN S.A.S. y FRAGAING S.A. relativamente nuevas en el mercado, realizan su proceso de fundición mediante hornos de inducción eléctrica lo que les permite fundir (al alcanzar cualquier temperatura de fusión) cualesquier tipo de acero, bronce, aluminio, etc. Fue precisamente a estas dos empresas donde se acudió a indagar sobre la posibilidad de fabricar ambos prototipos de biela para ser probados e instalados, de acuerdo a la recomendación dadas por los libros de Jovaj⁴¹ y de Payri⁴².

⁴¹ JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Editorial MIR, 1982. p. 515.

El proceso de fundir el metal para la fabricación de piezas mecánicas llega a ser un arte basado en la experiencia, la prueba y el error, se debe establecer con precisión las dimensiones de los moldes que contendrán el metal líquido sabiendo que al calentarse el metal se expande y al enfriarse ocurre lo contrario, razón por la cual es necesario conocer el porcentaje de dilatación y de contracción del material que se está fundiendo.

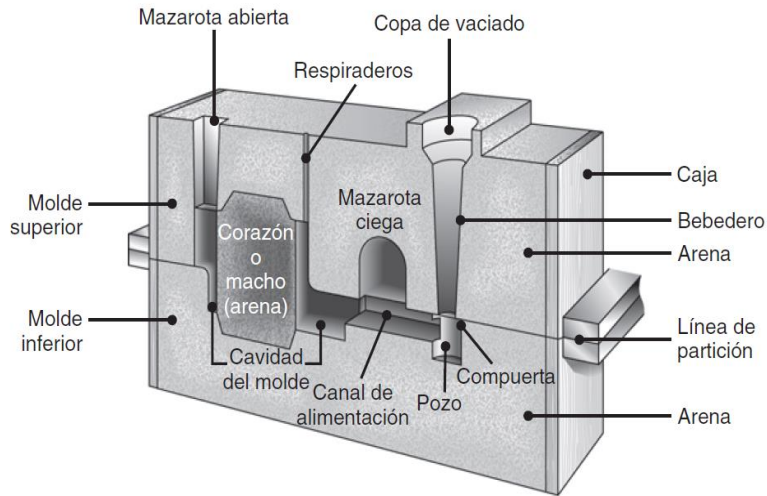
El corazón, la parte central de la fundición, no es ni el horno ni el proceso ni siquiera el material o la técnica utilizada sino el molde que debe construirse para que una vez el material mediante el proceso y la técnica adecuada alcance la temperatura exacta en el horno para que fluya y pueda verterse en el molde ocupe todas las cavidades del mismo y una vez se enfríe tome la forma del recipiente que lo contiene, el molde depende del proceso de fundición a utilizar, que puede ser por fundición centrífuga, por revestimiento, por presión, etc.⁴³

En la industria local, la técnica más empleada es la fundición por molde (aunque la industria textil usa fundición centrífuga en menor escala para la fabricación de herrajes), pero no el de molde permanente, aunque este método se puede implementar dependiendo del número de piezas que se necesite fabricar; los moldes (ver figura 104) son hechos en un tipo de arena especial de sílice (SiO_2) usando un modelo de la pieza como positivo hecho en madera, poliestireno expandido (conocido comercialmente como Icopor) o de polímero (dependiendo de la complejidad de la pieza) luego, estos moldes son usados como negativos al verter en ellos el metal que una vez solidificado sale con la forma final y con las dimensiones aproximadas que en términos prácticos, en base a la experiencia, los expertos en fundición aconsejan realizar este molde un 2% a 5% más grande que las dimensiones finales que debe tener la pieza, esto debido al fenómeno de dilatación que experimentan los metales al calentarse.

⁴² PAYRI, Prof. F.; DESANTES, Prof. J. M. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Editorial Reverté, S. A. 2012. P. 892.

⁴³ *Ibid.* P. 892.

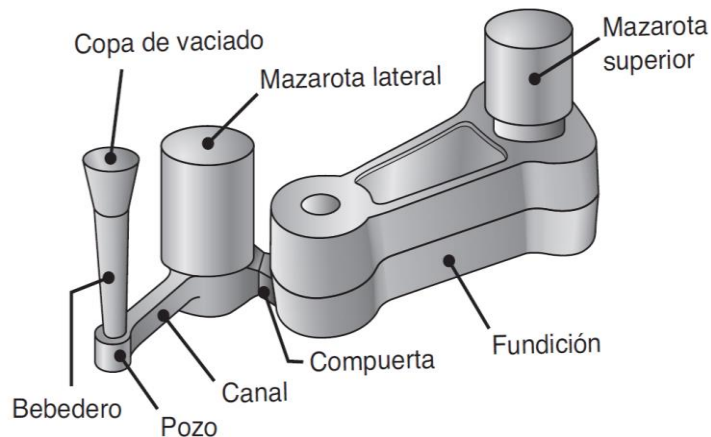
Figura 104. Partes principales de un molde en arena.



Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 290.

En el caso de la fundición de una sola biela, el montaje puede hacerse como el que se muestra en la figura 105, pero si se quiere realizar la fabricación de por los menos unas cinco mil bielas, es decir, si se va a realizar una producción en serie el molde a usar debe ser permanente, fabricado en aluminio por ejemplo.

Figura 105. Montaje utilizado en fundición de bielas.



Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 268.

Según los costos teóricos y relativos de fabricación de piezas mecánicas hechas por fundición son consecuentes con los encontrados en la realidad (en las empresas de fundición de Bucaramanga y su área metropolitana), puede verse en la figura 106, que el método de fundición por molde en arena es el más económico y que el método más productivo es la fundición por revestimiento que puede alcanzar las 1000 piezas/hora. Es oportuno comentar que la única empresa santandereana del área de fundición que se atrevió a analizar el problema y los costos de fabricar ambos prototipos de biela, opto por escoger la técnica de molde permanente, la cual es medianamente costosa y poco productiva, como propuesta de fabricación en serie para cumplir con un pedido hipotético de cinco mil bielas.

Figura 106. Costos relativos fundición.

Características generales de los costos de los procesos de fundición				
Proceso de fundición	Costo*			Capacidad de producción (piezas/hora)
	Matriz	Equipo	Mano de obra	
En arena	B	B	B-M	<20
Molde en cáscara	B-M	M-A	B-M	<50
Yeso	B-M	M	M-A	<10
Por revestimiento	M-A	B-M	A	<1000
En molde permanente	M	M	B-M	<60
A presión en matriz	A	A	B-M	<200
Centrífuga	M	A	B-M	<50

*B = bajo; M = medio; A = alto.

Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 337.

El trabajo de requisición hecho para conocer al día de hoy, en Bucaramanga y su área metropolitana el costo real que tendría la fabricación de una pieza de un peso próximo a los cuarenta gramos (40 [g]) que es el peso aproximado del acero de la biela del motor Shindaiwa S450EC1 para un pedido hipotético de cinco mil de estas bielas (se escogió este número para comparar dicho valor con el que se tiene de la forja); se encontró la siguiente información mostrada en la figura 107.

Figura 107. Lista de precios empresa METALGREEN S.A.S.



NIT: 900.471.169-0
 Lote Los Mangos
 Vereda Guatiguará
 Tel: 317-4040641
 Piedecuesta - Santander

LISTA DE PRECIOS FUNDICION

ACEROS AL CARBONO	VIP / SOCIOS		GENERAL	
	> 500 KG	< 500 KG	> 500 KG	< 500 KG
≈ SAE 1020 / 1030 / 1045 / 1060	\$ 7.500	\$ 7.600	\$ 7.800	\$ 8.000
ACEROS DE BAJA ALEACION				
≈ SAE 4140 / 4340 / 8620 / 3415	\$ 9.200	\$ 10.000	\$ 10.500	\$ 12.000
ACEROS AL MANGANESO				
11M (11% Mn)	\$ 7.500	\$ 8.000	\$ 8.500	\$ 12.000
12M (12% Mn)	\$ 8.000	\$ 9.000	\$ 9.500	\$ 13.000
ACEROS INOXIDABLES				
SAE 304	\$ 22.000	\$ 25.000	\$ 28.000	\$ 30.000
SAE 316	\$ 28.000	\$ 35.000	\$ 30.000	\$ 38.000
SAE 410 / 420	\$ 18.000	\$ 20.000	\$ 20.000	\$ 22.000
FUNDICIONES				
FUNDICION GRIS	\$ 3.800	\$ 4.000	\$ 4.500	\$ 5.000
FUNDICION NODULAR	\$ 5.800	\$ 6.000	\$ 6.000	\$ 7.000
ANALISIS DE LABORATORIO				
ESPECTROMETRIA	\$	50.000	\$	60.000
TOMA DE DUREZA	\$	20.000	\$	30.000
METALOGRAFIA	\$	200.000	\$	250.000

OBSERVACIONES:

- ◆ Precios exfabrica, no incluye modelo.
- ◆ Piezas con peso menor a 2 Kg, se negocia diferente dependiendo de su complejidad, independientemente de la cantidad.
- ◆ Precios para piezas con peso neto hasta de 350 Kg en los aceros inoxidables y de 400 Kg en los demás.
- ◆ Piezas con pesos mayores tendran un incremento del 15%
- ◆ Para los aceros inox 316 y 410/420 su fabricación está condicionada a la consecución de la chatarra
- ◆ Solo incluye alivio térmico, cualquier tratamiento térmico adicional es negociable.

Fuente: Metalgreen S.A.S.

En entrevista con el Gerente general de la empresa METALGREEN S.A.S. al plantearle el proyecto de fundir cinco mil bielas de 40 [g] de peso (aprox.) para guadañadora este afirmó que cada una de ellas costaría 1.500 \$ pero que serían entregadas sin las dimensiones finales exactas y ningún tratamiento térmico y que se realizarían mediante molde en poliestireno expandido (mejor conocido como Icopor) en un periodo de 30 días. Lo que comprueba que la mejor opción para fabricar un gran volumen de estas piezas es la forja.

No estando conformes con dicho análisis, se indagó en la empresa FRAGAING S.A.S. que fue más rigurosa con el pedido que se le hizo de cotizar la fabricación de una orden hipotética de cinco mil bielas, ya que realizó un estudio de factibilidad y emitió una cotización. Ésta fue la primera empresa que se visitó con el propósito de encargarle la fabricación de los dos prototipos de biela como parte de los objetivos específicos del proyecto. El costo de dichos prototipos se muestra en la tabla 16 en base a los precios que maneja dicha empresa por peso y mano de obra para la fundición de grafito esferoidal.

Tabla 16. Cotización fabricación bielas por fundición.

Costo unitario	20.000 \$/Unidad (No incluye T.T. ni mecanizado)
Pedido mínimo	2 Unidades/orden
Costo kilo fundición	7.000 \$
Costo molde + mano de obra	450.000\$ (Moldes en polímero o madera)

Fuente: FRAGAING S.A.S.

Por tanto, la fabricación de solamente dos bielas, que son los dos prototipos planteados para construcción dentro de los objetivos específicos de la presente investigación costaría casi medio millón de pesos (490.000 \$COP) muchísimo más económico en comparación con los costos de forja aunque con propiedades

mecánicas inferiores, pero sigue siendo muy costoso si comparamos este valor con el costo que conlleva realizar ambas piezas mediante el mecanizado manual por torno, fresa y taladro que aunque es más alto su valor de fabricación (300.000 \$/biela) las propiedades mecánicas y acabados son mejores, lo que ahorra tiempo y dinero; pero la mejor alternativa de todas en cuanto a la fabricación del par de prototipos es sin lugar a dudas la tecnología de corte por chorro de agua al comparar los acabados y las propiedades mecánicas alcanzadas mediante esta técnica.

El cuadro sinóptico de la tabla 17 muestra la comparación de todos los procesos de fabricación encontrados en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana. El proceso de manufactura que mejor rentabilidad obtiene por volumen de producción (y en cuanto a propiedades mecánicas) es la forja si se le compara con todas las demás posibilidades de fabricación.

El cuadro también presenta la mejor alternativa de fabricación para el par de prototipos, la mejor alternativa por costos y practicidad es la que ofrece la nueva tecnología de corte en frío por chorro de agua, tecnología que ofrece la empresa HYDROBAS S.A.; el costo por obtener una biela es de 25.000 \$COP (solo el valor del tiempo de corte + I.V.A.) más el costo del material que es de 35.000 \$COP (lámina de 3/8" de espesor de 200 [mm] X 200 [mm] de acero anti-desgaste comprada en la Compañía General de Aceros) lo cual da un total de 60.000 \$COP; por esta razón el diseño y la fabricación se planteó en base a este método de fabricación que ofrece excelentes acabados, lo que disminuye mecanizado, y preserva las propiedades mecánicas del material y su forma geométrica (no crea tensiones internas en el material ni lo deforma).

Tabla 17. Cuadro comparativo procesos de manufactura.

Proceso Manufactura	Empresa	Costo Unitario [\$/Und]	Pedido Mínimo [Und]	Costo Total [10 ⁶ \$]	Costo Material [\$/kg]	Otros costos
Forjado	Forjados S.A.	1.200	5.000	42	12.500	Matrices
Fundición	Fragaing S.A.	20.000	5.000	104	7.000	Molde
Corte x agua	Hydrobas S.A.	24.360	1	0,02436	10.500	-
Mecanizado	Metalca S.A.	300.000	1	0,30	5.500	-

Fuente: Los precios están en pesos colombianos (COP) entregados por las empresas consultadas.

Pero el costo de corte por chorro de agua no es el definitivo, debido a que este no es el costo último de fabricación, hace falta agregar los costos de rectificación de los alojamientos, de los tratamientos térmicos, y del recubrimiento con cobre por electrodeposición. Costos que han sido dispuestos en la tabla 18.

Tabla 18. Costo manufactura prototipos biela.

Proceso	Máquina	Tiempo [min]	Costo [\$]
Corte con agua	Flow Mach 3	16	24.360
Tratamientos térmicos	Horno baño de sales	660	20.000
Recubrimiento	Tanque + electrodos + solución de baño cobre acido	129	45.000
Rectificado	Taladro + Torno	120	50.000

Fuente: Los precios están en pesos colombianos (COP) para cada operación.

Es claro que la construcción de ambos prototipos tiene un costo total de 278.720 \$COP (doscientos setenta y ocho mil setecientos veinte pesos colombianos), con la debida aclaración de que solamente a uno de los prototipos se le aplicó todas las operaciones de manufactura, el otro fue utilizado exclusivamente para la prueba de compresión y fue destruido. El proceso demanda de un total de cinco (5) máquinas y de un montaje especial para el recubrimiento (tanque con

electrodos inmerso en solución química) toma un total de 925 minutos o 15,42 horas (cerca de dos jornadas de trabajo). Los costos de los tratamientos térmicos, recubrimiento y rectificado se analizan en la siguiente sección del presente capítulo.

Para la construcción en serie de este tipo de piezas el costo es altísimo si se hace por este medio de fabricación, ya que el trabajo de la máquina de corte por chorro de agua se mide por tiempo, en segundos de desbaste, así que no importa si son dos piezas o mil piezas, el costo no cambia por volumen de producción porque el desgaste de la máquina está en función del tiempo de uso y el mantenimiento de este tipo de equipos es costoso por ser una tecnología nueva en la que no existe mercado de repuestos, donde el daño de una de sus partes equivale a por lo menos dos semanas de inactividad en la espera de la importación y nacionalización de los repuestos. En conclusión el método de fabricación más rápido, práctico y económico para producir grandes volúmenes de piezas (según los datos de la investigación técnica, económica y de producción realizada en la región santandereana consignados en la tabla 17) es sin lugar a dudas el de la forja, que resulta ser el más económico pieza a pieza de todas las posibilidades a un costo de: 1.200 \$/Pieza.

4.2 FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS.

La fabricación de los prototipos (dos, de acuerdo a los objetivos específicos) de la propuesta de diseño de biela, basada en el análisis físico, químico, mecánico y de manufactura de la biela original (lo que se conoce técnicamente y de manera abreviada como ingeniería inversa) fue realizada como se planteó al principio de este trabajo de exploración, utilizando los materiales y procesos de fabricación existentes en nuestra región, ya que uno de los objetivos ulteriores de este trabajo

(y de los otros que se encauzan en las restantes partes del motor de dos tiempos de pequeña cilindrada) es poner a prueba la capacidad técnica-económica actual de la industria regional santandereana para descubrir hasta qué punto es capaz de competir codo a codo con la industria de clase mundial. Por otra parte también se quería comprobar que tipo de materia prima se puede conseguir en Bucaramanga y su Área Metropolitana, el costo y el acceso, los tipos de aceros y otros materiales, calidad, cantidad y disponibilidad de los mismos teniendo en cuenta como se vio en la tabla 15, que aunque para grandes volúmenes de piezas y en base a las propiedades mecánicas consiguientes, la mejor opción de fabricación es el forjado (empleando acero AISI 4140 como materia prima). En cuanto a la manufactura de los dos prototipos, el método más eficiente, económico, viable y versátil es el del corte por chorro de agua como ya se advirtió en la tabla 14.

4.2.1 Selección de la materia prima. Al seleccionar el método de corte por chorro de agua, el diseño basado en la ingeniería inversa de la biela original del motor Shindaiwa, necesariamente debía estar supeditado a las posibilidades y/o restricciones en la fabricación que posee esta técnica de corte, y una de esas restricciones es que los cortes que se pueden realizar son bidimensionales (ver figura 110), la punta de desbaste de la maquina se mueve sobre el plano x-y mientras que el chorro de agua horada el material en la dirección z hasta 6 pulgadas o 15,24 [cm], por tal razón el diseño tuvo que ser adaptado y proyectado para que se cortara de una lamina de acero de 10 [mm] de espesor.

En cuanto a la resistencia del material, éste (además de ser un acero similar al acero al cromo AISI 5120, ver figura 39) según la prueba de compresión realizada a la biela original, los cálculos y las simulaciones por CAD mediante elementos finitos debía contar con un límite elástico alrededor de los 800 MPa; el acero más

cercano a dichas propiedades es distribuido en Bucaramanga por la COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS a un costo por lámina (de 200 [mm] X 200 [mm] X 10 [mm]) de 35.000 \$COP es decir a 10.500 \$/kg (ver figura 108) el cual es un acero anti-desgaste conocido comercialmente como HARDOX-450; se seleccionó dicho material debido a que es el acero al cromo más próximo a la materia prima del que están fabricadas originalmente las bielas de los motores Shindaiwa, el cual no es un acero muy comercial en esta región del País y habría que traerlo de afuera, lo cual se sale de los objetivos de la presente investigación.

Figura 108. Ficha técnica acero anti-desgaste (ver anexos).

SSAB Oxelösund es el único productor de chapa antidesgaste HARDOX.

Información general

Propiedades mecánicas:	HARDOX 450	HARDOX 400
Dureza:	425 – 475 HB	370 – 430 HB
Límite de elasticidad*:	1200 MPa	1000 MPa
Resistencia a la tracción*:	1400 MPa	1250 MPa
Alargamiento A ₅ *:	10%	10%
Tenacidad a los impactos a -40 °C*:	40 J	45 J

* Valor típico para chapa de 20 mm de espesor.

Dimensiones:	HARDOX 450	HARDOX 400
Gama de espesores:	3,2 – 80 mm	4,0 mm – 130 mm
Anchura máx.:	3,3 m	3,3 m

Fuente: Compañía General de Aceros S.A.

La otra alternativa en cuanto al uso del material es el acero AISI 4140, comparando su composición química y propiedades mecánicas es el más aproximado al que se requiere para la fabricación de las bielas (ver figura 109), que es muy comercial y se consigue fácilmente, de un día para otro, en empresas distribuidoras de acero en la ciudad como la BÖHLER o la C.G.A. pero cuyo

principal inconveniente para usarlo en la manufactura de los prototipos es su presentación, ese material no se vende en lamina aquí en Bucaramanga, en Bogotá hay algunos espesores en platina pero es muy limitado; comercialmente se consigue en barra redonda y el precio por kilogramo varía en función del diámetro. Por ejemplo: hasta 3 pulgadas el kilo cuesta 5.500 \$COP +IVA pero habría que realizarle un trabajo de maquinado extra (además de trasladarlo desde otra ciudad), lo que lo hace más costoso y sale de los objetivos de esta investigación, aunque el uso del acero AISI 4140 no se descarta del todo ya que es más que apropiado como materia prima en el proceso de forjado.

Figura 109. Ficha técnica acero AISI 4140.

COMPOSICIÓN QUÍMICA							
	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si %	Cr %	Mo %
Análisis típico en %	0.38	0.75	0.035	0.04	0.2	0.80	0.15
	0.43	1.0			0.35	1.10	0.25

PROPIEDADES MECÁNICAS A TEMPERATURA AMBIENTE					
Estado de Suministro	Resistencia a la Tracción MPa	Límite elástico MPa	Alargamiento %	Reducción de Área %	Dureza Brinell aprox.
Laminado en Caliente	588 - 690	392	22	50	210 - 240
Calibrado	690 - 785	589	14	40	240 - 260
Bonificado	850 - 981	735	14	47	260 - 320

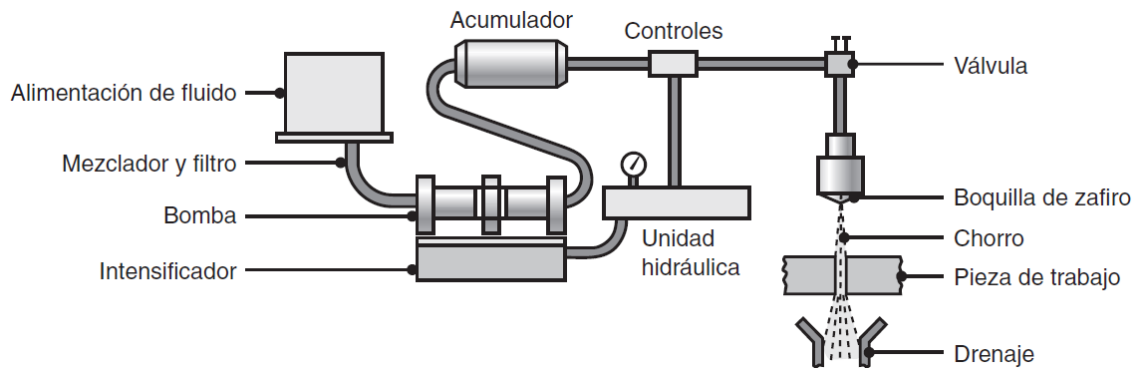
Nota: Estas propiedades mecánicas son tomadas sobre redondos de 25mm. Para mayores o menores dimensiones hay que considerar el efecto de masa.

Fuente: Compañía General de Aceros S.A.

4.2.2 Proceso básico de manufactura. Como ya se comentó, la máquina de corte en frío por chorro de agua es la mejor alternativa de método de fabricación para la manufactura de los prototipos del diseño de biela planteado, este corte se conoce como maquinado hidrodinámico, el chorro del agua actúa como una sierra

y corta una estrecha ranura en el material mediante un caudal (de agua pura o con aditivo abrasivo como carburo de silicio u óxido de aluminio) a una presión de hasta 94000 [psi] (648 [MPa]), los diámetros de las boquillas para el chorro varían de 0.05 [mm] a 1 [mm] (0.002 a 0.040 pulgada), con una precisión de +/- 0,0015 pulgadas (0,0381 [mm]) y una velocidad de hasta 500 pulgadas/minuto (212 [mm/s]). El tamaño mínimo de orificio que se puede producir satisfactoriamente hasta la fecha es de unos 3 [mm] (0.12 pulgadas); con máquinas de ejes múltiples, controladas por robots, se pueden maquinar piezas tridimensionales hasta las dimensiones de acabado. En los sistemas modernos el nivel óptimo de abrasivos en el chorro se controla de manera automática. La vida útil de la boquilla se ha mejorado produciéndola con rubíes, zafiros y materiales compósitos con base de carburo.⁴⁴

Figura 110. Esquema del proceso de maquinado por chorro de agua.



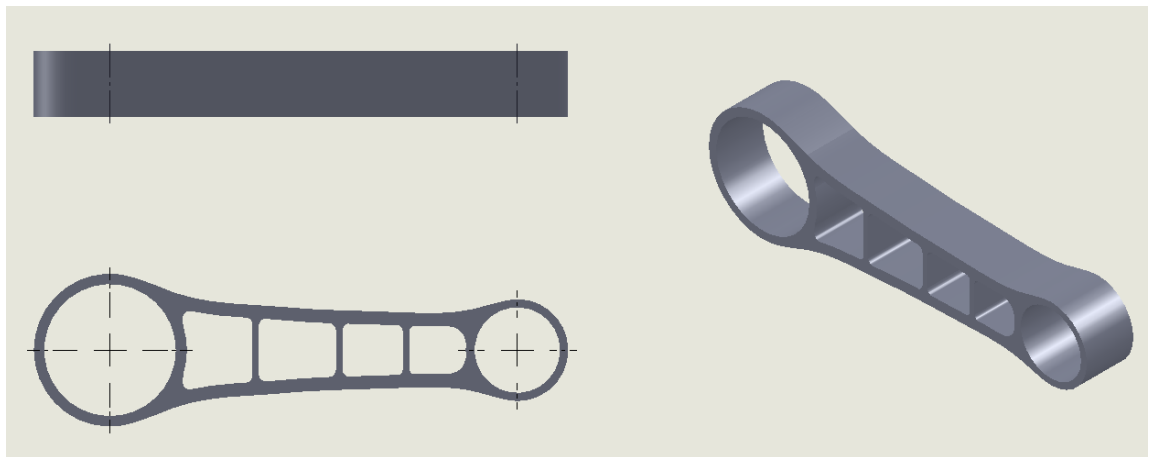
Fuente: Kalpajian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 857.

El corte en frío no modifica térmicamente las propiedades del material, además de ser muy versátil, lo cual permite darle cualquier forma a la pieza que se quiere

⁴⁴ Kalpajian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 857.

cortar, con la característica limitación de que solo es utilizado para piezas en dos dimensiones que poseen espesor como engranajes, bielas, brazos articulados, platinas, láminas, alojamientos, bujes, etc. Teniendo presente esta excelente alternativa se realizó el diseño de la biela, se comprobó por los métodos teóricos y de simulación por elementos finitos, proceso que fue explicado en el capítulo 3, sección 3.5 de la presente investigación, y la forma geométrica final del prototipo se muestra en la figura 111.

Figura 111. Esquema prototipo biela.



Fuente: Software SolidWorks®.

El resultado es un diseño bidimensional tipo cercha o de armazón, con un espesor de 10 mm constante, el cual cuenta con un gran momento de inercia que impide el pandeo, diseño que puesto a prueba en la realidad, como en la teoría y en las simulaciones, produjo excelentes resultados (ver detalles en la sección 4.3). La máquina para efectuar el corte (ver figura 100) solo necesita de suministrarle el material a cortar (en lámina) y de un archivo CAD del tipo .dwg (o en su defecto .dxf) que es un archivo de tipo bidimensional de la pieza a escala natural.

El resultado del corte en frío por chorro de agua de ambos prototipos se muestra en la figura 112; como primer paso se dispuso enteramente de uno de los prototipos (figura 112-a) para el ensayo de compresión para analizar su comportamiento. El otro prototipo (figura 112-b) se cortó tiempo después con la seguridad de que el perfil diseñado había soportado la prueba.

Figura 112. Resultado final corte chorro de agua prototipos biela.



(a)



(b)

4.2.3 Proceso para el mejoramiento de las propiedades. La cementación, procedimiento que consiste en enriquecer la superficie de aceros al carbono de baja aleación (< 0,2%) en una atmosfera carburante para luego realizar un temple localizado para que la superficie alcance ± 60 [HRC], se realizó en la empresa IMATT S.A.S., ubicada en el kilometro seis vía a Girón-Palenque. Ésta operación de tratamiento térmico es un proceso aplicado para el mejoramiento de las propiedades superficiales del material.

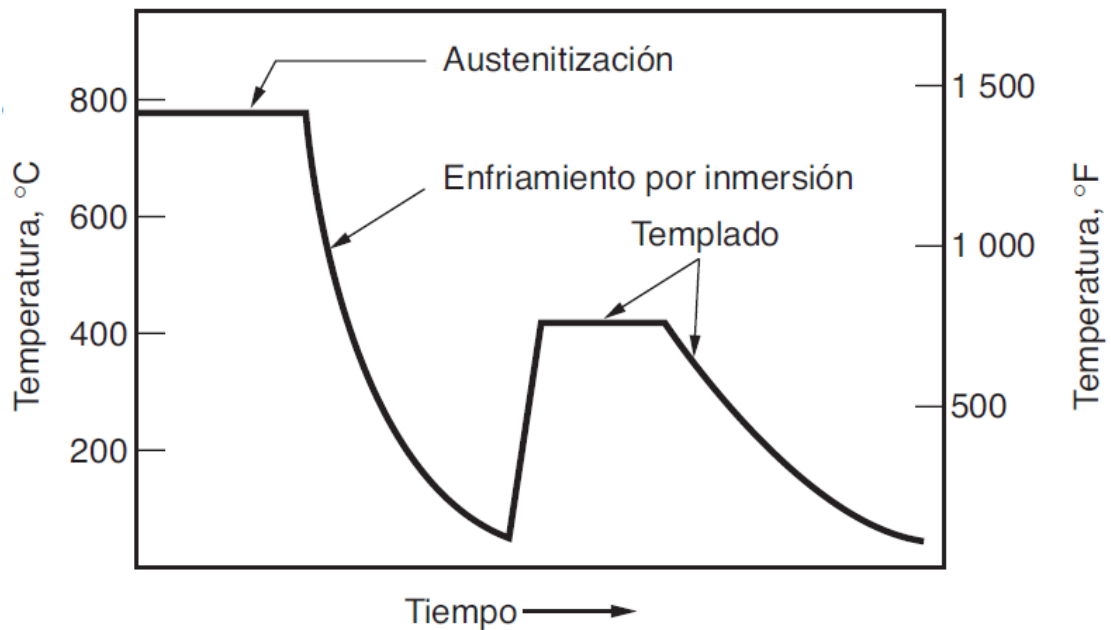
El proceso realizado por la empresa especializada consistió en introducir la pieza en un horno de baño de sales a 500 [°C] en un atmosfera de alto contenido de carbono, luego llevarla hasta los 900 [°C] sosteniéndola durante cuatro horas, para después enfriarla rápidamente en aceite y por último una hora de revenido a 180 [°C]. Según M. P. Groover el anterior tratamiento térmico superficial equivale a la carburización, que consiste en un tratamiento termoquímico en el cual la superficie en cuestión de la pieza se altera por la adición de carbono, este proceso se aplica a piezas de acero de bajo carbono para lograr una corteza exterior dura resistente al desgaste al mismo tiempo que se retiene un núcleo tenaz.⁴⁵

La explicación técnica del proceso es la siguiente: “Implica el calentamiento de una pieza de acero al bajo carbono en presencia de un medio rico en carbono, de manera que el **C** se difunda en la superficie. En efecto, la superficie se convierte en un acero al alto carbono, con una dureza más alta que la del núcleo de bajo carbono. El entorno rico en carbono puede crearse de varias formas. Otro método, llamado carburización gaseosa (método usado por el IMATT, el resultado final se muestra en la figura 115), usa hidrocarburos combustibles, como el propano (C_3H_8) dentro de un horno sellado para difundir el carbono dentro de las piezas. El grosor de la corteza en este tratamiento es delgado, de $0,13$ a $0,75$ mm ($0,005$ a $0,030$ [in]). Las temperaturas típicas de carburización están entre 875 [°C] y 925

⁴⁵ *Ibíd.* p. 654.

[°C] (1 600 [°F] y 1700 [°F]), dentro del rango de la austenita. La carburización seguida de un enfriamiento por inmersión produce un endurecimiento de la superficie alrededor de HRC = 60 (ver figuras 113 y 114). Sin embargo, debido a que las regiones internas de la pieza consisten en acero al bajo carbono, y a que su templabilidad es baja, no le afecta la inmersión y permanece relativamente tenaz y dúctil para soportar los impactos y los esfuerzos por fatiga.”⁴⁶

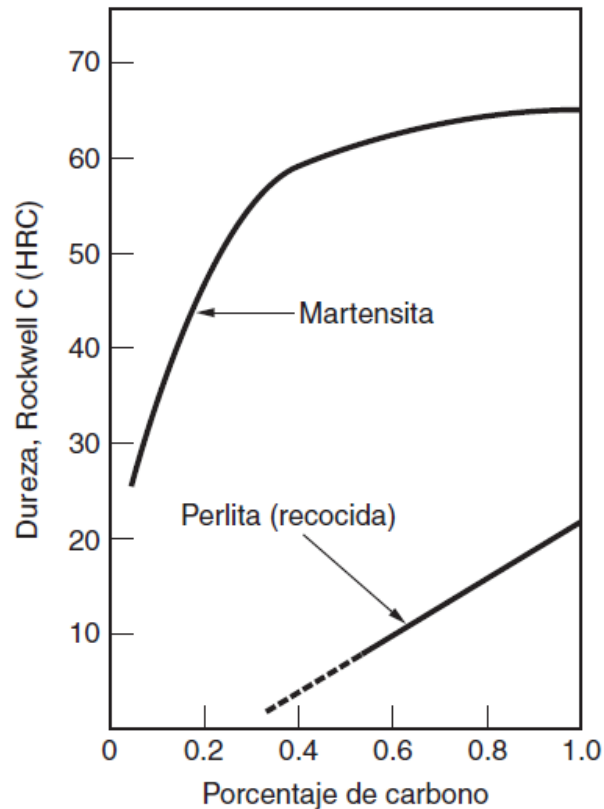
Figura 113. Tratamiento térmico típico de temple.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 651.

⁴⁶ *Ibid.* p. 654.

Figura 114. Dureza del acero al carbono en función del contenido de carbono.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 650.

Existe una novedosa técnica alternativa y segura, en cuanto a practicidad y costo se refiere para endurecimiento superficial de cualquier pieza (alcanzando la dureza y la profundidad requeridas según la aplicación lo requiera) conocida como *Nitruración por Plasma*, con este proceso la deformación es mínima, casi imperceptible (alrededor de 5 centésimas de [mm]) pero si se quiere disminuir el riesgo de deformación lo ideal es hacer la pieza con mecanizado de aproximación y hacer alivio de tensiones, proceso que dura de un día para otro, posteriormente las piezas pasan a mecanizado y estarían a punto para el proceso de nitruración iónica. En cuanto a un proceso de cementación o de nitruración por plasma, duran alrededor de 3 a 4 días para un lote de 5000 bielas más el tiempo de transporte.

Las máquinas que se utilizan para ello son hornos de retorta giratoria, debido a que son piezas pequeñas. El precio por kilo para cementación es de 8.000 \$COP y se hace nitruración por plasma cuya deformación es menos que la cementación, el valor por kilo es de 18.900 \$COP.⁴⁷

Figura 115. Resultado final cementación y temple localizados.



4.2.4 Operaciones de acabado. Para esta etapa del proceso la empresa CROMACERO ubicada en la calle 16 con carrera 14 en el barrio Gaitán de la ciudad de Bucaramanga, facilitó sus instalaciones y experiencia para llevar a cabo el proceso de recubrimiento por electrodeposición. Según S. Kalpakjian: “En la electrodeposición, la pieza de trabajo (cátodo) se deposita con un metal diferente (ánodo), que se transfiere mediante una solución electrolítica base agua (véase figura 116). Aunque el proceso de deposición comprende muchas reacciones, el proceso consiste básicamente en la siguiente secuencia:

⁴⁷ Información suministrada por la empresa TRATAR S.A.

1. Los iones metálicos del ánodo se descargan utilizando la energía potencial de la fuente externa de electricidad.
2. Los iones metálicos se disuelven en la solución.
3. Se depositan en el cátodo.

El volumen del metal depositado se puede calcular con base en la expresión⁴⁸:

$$\text{Volumen del metal depositado} = c * I * t \quad (61)$$

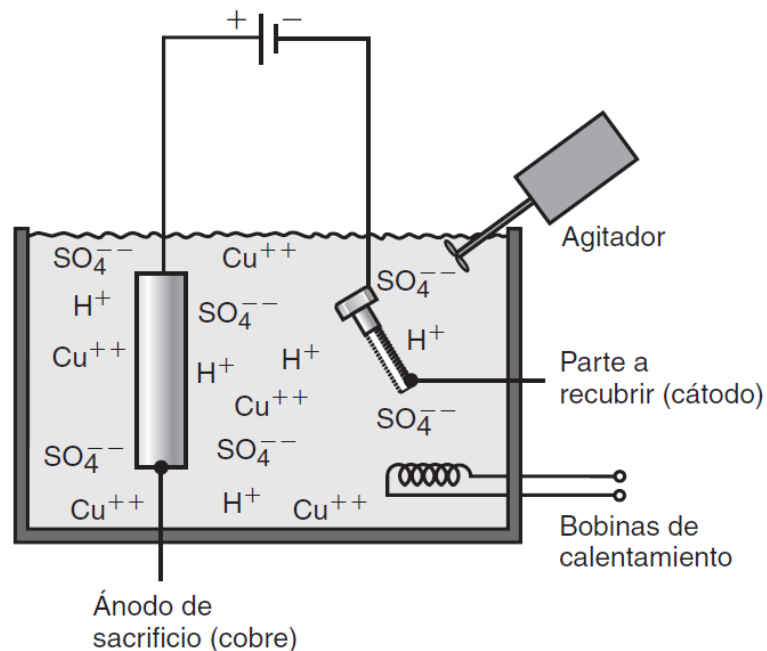
Donde I es la corriente en amperios, t el tiempo y c una constante que depende del metal de la placa, el electrolito y la eficiencia del sistema y, por lo regular, se encuentra en el intervalo de 0,03 a 0,1 [mm³/A-s]. Obsérvese que, para el mismo volumen de material depositado, cuanto más grande sea la superficie de la pieza de trabajo depositada, más delgada será la capa. Por lo común, el tiempo requerido para la electrodeposición es largo, porque la velocidad de deposición suele ser del orden de 75 [μm/hora] (en el caso de la biela prototipo, tomó un tiempo de 90 minutos a una corriente de 5 amperios para obtener una capa de +/- 1120 [μm]). En general, las capas delgadas depositadas son del orden de 1 [μm] y las capas gruesas pueden ser hasta de 500 [μm]. Las soluciones de deposición son ácidos fuertes o soluciones de cianuro. Al utilizar el metal de la solución para depositar, es necesario reponerlo periódicamente, lo que se logra mediante dos métodos principales: en ocasiones se agregan sales de metales adicionales a la solución, o se usa un ánodo de sacrificio del metal a recubrir dentro del tanque de electrodeposición, que se disuelve a la misma velocidad con que se deposita el metal.”⁴⁹

⁴⁸ Kalpakjian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. P. 1070.

⁴⁹ Ibíd. P. 1070.

Según S. Kalpakjian: “Los metales comunes de deposición son cromo, níquel (protección contra la corrosión), cadmio, cobre (resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica), estaño y zinc (protección contra la corrosión, en particular para láminas de acero).”

Figura 116. Esquema del proceso de electrodeposición.

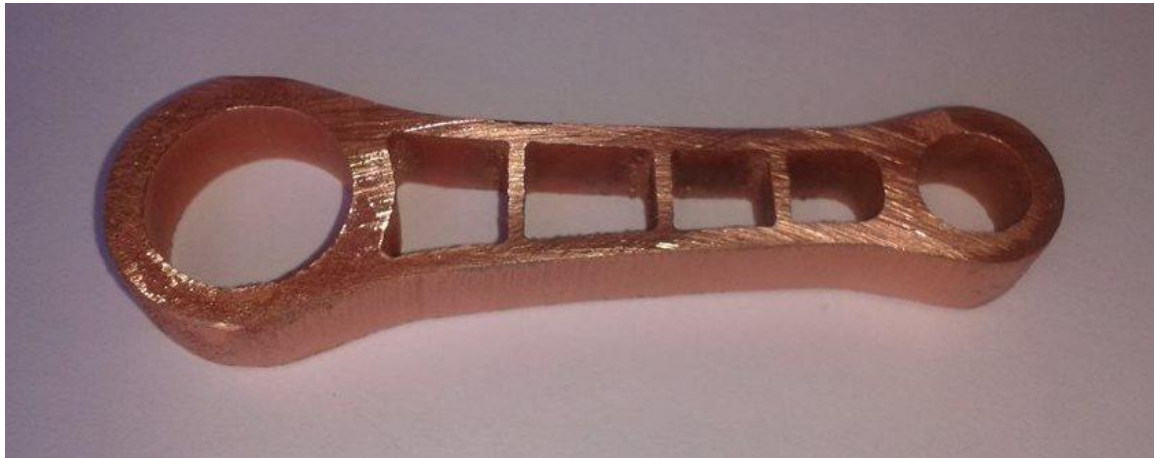


Fuente: Kalpakjian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 857.

En el proceso realizado a la biela se utilizó una solución de sulfato de cobre y una fuente de corriente continua durante un tiempo de 3 minutos para aplicarle una finísima capa de cobre a la pieza (un “flash”), pero no sin antes haber pasado por un minucioso proceso de limpieza para remover cualquier residuo de grasa, suciedad, óxido que pudiera tener la pieza. Primero se pasa por un esmeril con

grata de alambre, luego se lleva a ácido clorhídrico (+/- 25%) se enjuaga con agua y jabón; se lleva después a enjuague con desengrasante electrolítico anódico (para minimizar la fragilización por hidrógeno), se enjuaga nuevamente y se le aplica un “deep” ácido removedor (+/- 15% de alcalinidad) y por último ser enjuagada con agua pura. Luego de este proceso la pieza se lleva al baño de cobre ácido en una solución de sulfato de cobre, ácido sulfúrico y agua en un tanque plástico con dos electrodos de cobre al cual se le aplica una corriente continua de 5 amperios durante 90 minutos aproximadamente. El resultado se muestra en la figura 117.

Figura 117. Resultado final recubrimiento biela.



4.2.5 Proceso secundario de manufactura. Una vez realizado el mecanizado hidrodinámico de corte en frío por chorro de agua, se realizó los demás procesos de manufactura, a saber: tratamientos térmicos y el proceso de recubrimiento; el paso siguiente, el cual concluye el proceso de fabricación es la rectificación de los alojamientos o diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela. La empresa

METALIZADORA DEL ORIENTE LIMITADA, líder en la rectificación de componentes automotrices entregó una cotización del rectificado de los alojamientos de los prototipos los cuales son realizados por dicha empresa mediante la máquina SCLEDUM RB650 (connecting rod boring and grinding machine); el encargado de rectificación de dicha empresa estableció el precio de rectificación para una sola biela en \$30.000 COP con el correspondiente tiempo de dos (2) horas que tomaría dicho proceso. Al indagar en los talleres que poseen centros de mecanizado (CNC); la empresa INGENIERIA Y MECANIZADOS S.A.S. proporcionó otra cotización para el rectificado de los alojamientos de los prototipos de biela, a un costo de 5.500 \$COP para cada biela si se hace un pedido mínimo de cinco mil piezas; lo que da un total de veintisiete millones y medio de pesos (27.500.000 \$COP) para dicho trabajo. Al final se recurrió a mano de obra más económica pero bien calificada en maquinas convencionales (como taladro y torno), se buscó el taller MECANIZADOS & MANTENIMIENTO S.A.S. El resultado terminó siendo excelente en cuanto a las medidas finales de la pieza y el acabado superficial, a un costo de cincuenta mil pesos (50.000 \$COP) para ambos agujeros de la biela y un tiempo de entrega de dos (2) horas. El resultado final se muestra en la figura 118.

Figura 118. Resultado final rectificación alojamientos biela.



Según M. P. Groover: “Debido a sus características, el maquinado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura, como fundición o deformación volumétrica (por ejemplo, forjado y estirado de barras). Otros procesos crean la forma general de la pieza y el maquinado produce la forma final, las dimensiones y el acabado.”

En la operación o proceso secundario (dentro de la secuencia de manufactura planeada) de rectificado por parte de los técnicos del taller de mecanizado elegido para tal fin, consistió en el uso de dos tipos de maquinado para alcanzar la forma y las dimensiones proyectadas en la pieza: taladrado y torneado (ver en los anexos recomendaciones de maquinado para el acero anti-desgaste HARDOX 450). El primer paso en el proceso fue el montaje de la biela al taladro para aproximar ambas medidas (recordando que para efectos del tratamiento térmico superficial, en el proceso básico de manufactura por corte con chorro de agua se dejó un exceso de material de 0,3 [mm] al radio, es decir 0,6 [mm] a los diámetros del pie y de la cabeza de biela) a la medida final de cada alojamiento (ver plano biela para rectificado en los anexos) de acuerdo a las tolerancias y ajustes establecidos en la manufactura y el diseño (ver sección 5.6) operando a una velocidad de corte en el taladro de 65 r.p.m. debido a la gran dureza que posee esta zona de la pieza y usando como herramienta de corte una broca HSS Cobalto-Widia (Carburo o Tungsteno); para dicho rebaje no se uso fluido de corte (se mecanizó en seco) como tampoco se uso para el alesado final en el torno.

Después de la aproximación de ambas medidas, a saber: $\varnothing_{\text{cabeza biela}} = 20$ [mm] y $\varnothing_{\text{pie biela}} = 13$ [mm] se procedió a darles el ajuste necesario de acuerdo a la tolerancia que demandan los rodamientos de aguja (en la práctica, según los técnicos de mecanizado es de 0,02 [mm] o 20 [μm]) utilizando como máquina-herramienta un torno convencional al cual se le adecuo un buril punta de

tungsteno como herramienta de corte para realizar, mediante un alesado, la rectificación de ambos diámetros y darles el acabado superficial final; primero se realizó el agujero de la cabeza de la biela y por último el del pie, las medidas finales (ver figura 3 y figura 135) fueron de: $\varnothing_{\text{cabeza biela}} = 0,789$ pulgadas = 20,0406 [mm] y $\varnothing_{\text{pie biela}} = 0,514$ pulgadas = 13,0556 [mm]. La velocidad de corte la máquina-herramienta fue de 300 [r.p.m.] El resultado final se muestra en la figura 119.

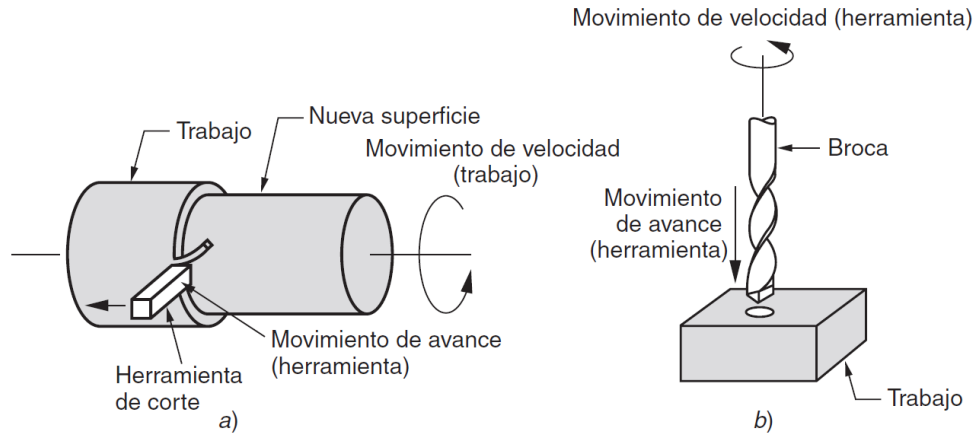
Figura 119. Resultado final rectificación cabeza y pie de biela prototipo.



Según la teoría de procesos y máquinas de remoción de material: “En el torneado se usa una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro, (ver figura 120). El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la pieza de trabajo giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo. El taladrado se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta giratoria que tiene dos filos cortantes. La

herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la pieza de trabajo para formar el agujero redondo...”⁵⁰

Figura 120. Proceso de torneado (a) y taladrado (b).



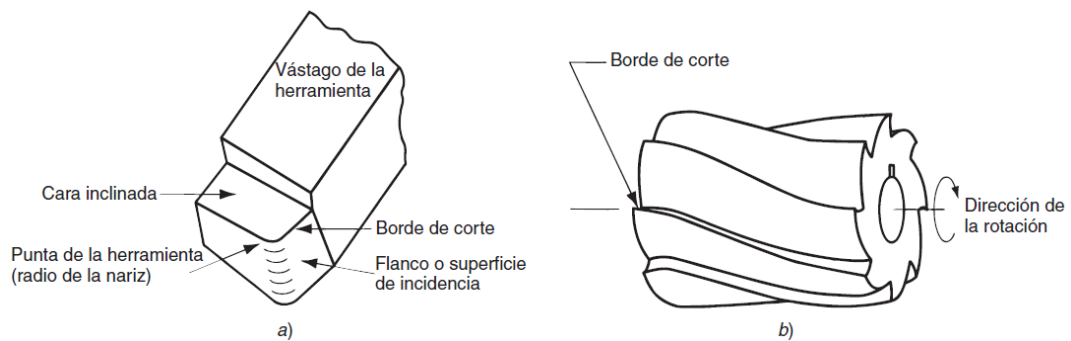
Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 484.

La herramienta de corte es un elemento trascendental en el mecanizado de piezas ya que es ella la que realiza el trabajo de remoción de material y proporciona la forma final. “Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes y está hecha de un material que es más duro que el material de trabajo. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo. El taladrado y el fresado usan herramientas rotatorias de múltiples filos cortantes (ver figura 121). Aunque la forma es bastante diferente de la herramienta de punta simple, muchos de los elementos de la forma son similares.”⁵¹

⁵⁰ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 483.

⁵¹ *Ibíd.* p. 485.

Figura 121. Herramienta de una sola punta (a) y de múltiples filos (b).



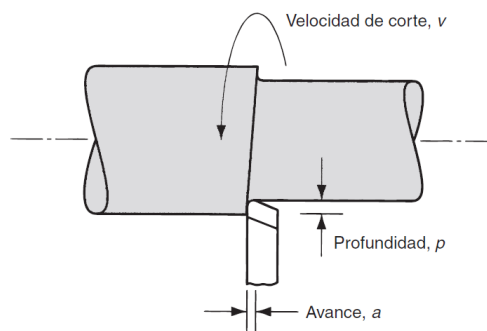
Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 485.

Otro aspecto importante que debe tenerse en cuenta en una operación de remoción de material es la velocidad de corte, que como se vio en la rectificación de los agujeros de la biela se usaron velocidades de corte mínimas, según M. P. Groover: “Para realizar una operación de maquinado se requiere el movimiento relativo de la herramienta y el trabajo. El movimiento primario se realiza a una cierta velocidad de corte v . Además, la herramienta debe moverse lateralmente a través del trabajo. Éste es un movimiento mucho más lento, llamado el avance f . La dimensión restante del corte es la penetración de la herramienta de corte dentro de la superficie original del trabajo, llamada profundidad de corte d . Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama condiciones de corte. Éstas son las tres dimensiones del proceso de maquinado y, en ciertas operaciones (por ejemplo, la mayoría de las operaciones con herramientas de una punta), se puede usar su producto matemático para obtener la velocidad de remoción de material del proceso:

$$R_{MR} = v * f * d \quad (62)$$

Dónde R_{MR} = velocidad de remoción de material [mm^3/s], v = velocidad de corte [m/s], la cual debe llevarse a mm/s , f = avance [mm] y d = profundidad de corte [mm]. Según Groover las operaciones de acabado se realizan a velocidades de avance de: $0,125$ [mm/Rev.] – $0,4$ [mm/Rev.] Y profundidades de: $0,75$ – $2,0$ [mm].”⁵² En la figura 122 se muestran los diferentes parámetros de mecanizado:

Figura 122. Velocidad de corte, avance y profundidad de corte en el torneado.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 485.

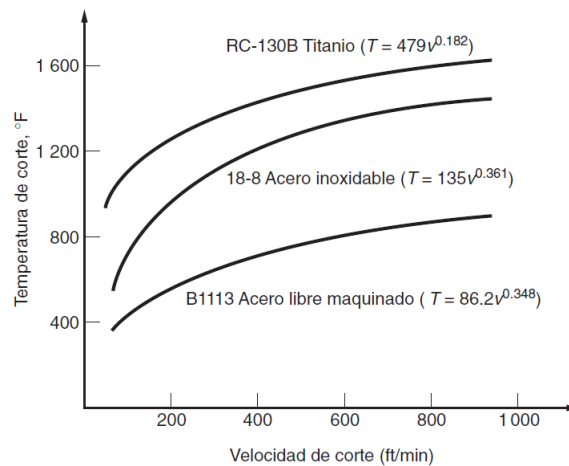
Un punto importante en el uso de las herramientas de corte es la temperatura de trabajo de la misma, que debe permanecer lo más baja posible para evitar el desgaste de la misma. “Para enfriar o lubricar la herramienta de corte se aplica frecuentemente un fluido de corte en la operación de maquinado. La determinación de usar o no un fluido de corte y, en caso afirmativo, la elección del fluido apropiado se incluyen generalmente dentro del panorama de las condiciones de corte. La selección de estas condiciones, junto con el material de trabajo y las herramientas, determina el éxito de una operación de maquinado.”⁵³ En el caso del

⁵² *Ibíd.* p. 486.

⁵³ *Ibíd.* p. 486.

rectificado de los alojamientos, agujeros o diámetros internos de la cabeza y del pie del prototipo de biela diseñado en la presente investigación, el mecanizado con el taladro y con el torno se realizó sin fluido de corte, es decir, en seco, según la figura 123 la temperatura media experimental alcanzada por la operación de corte (asumiendo que el acero usado en la fabricación de la biela es un tipo de acero inoxidable, ver composición química en los anexos) está entre los 400 [°F] – 800 [°F] (204 [°C] – 427 [°C]) teniendo en cuenta que la velocidad máxima de corte para el taladrado es de: 4,10 [m/min] (13,45 [pie/min]) y la velocidad máxima de corte para el alesado es de: 18,85 [m/min] (61,84 [pie/min]) según las velocidades de rotación usadas por los operarios que maquinaron los alojamientos de la biela.

Figura 123. Temperaturas de corte medidas experimentalmente.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 500.

Este cálculo de las velocidades de corte tanto del taladrado como del torneado (alesado) se realizó teniendo presente la velocidad rotacional de corte utilizada por los operarios en cada máquina, así: para el corte del taladro 65 [r.p.m.]; para el torneado 300 [r.p.m.] y la teoría de mecanizado expuesta más adelante.

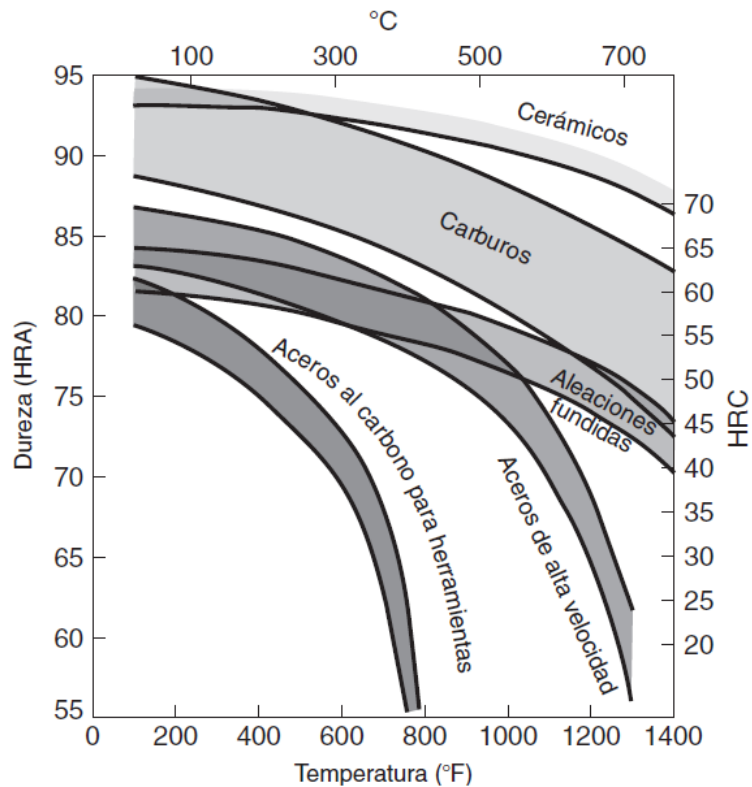
La velocidad de corte para el taladrado y para el torneado que se emplearon para encontrar las mayores temperaturas experimentales, fueron las más altas, y en base a la relación dureza-temperatura de diferentes materiales para herramientas de corte (ver figura 124) es posible afirmar que para el mecanizado de rectificación aplicado a los diámetros internos de la biela no necesita de fluido de corte, puede trabajarse en seco como efectivamente se hizo.

Por otro lado la temperatura de fusión del carburo de tungsteno (material de la herramienta de corte usado en la rectificación) es de 1300 [°C] (2370 [°F])⁵⁴, muy por encima de los 760 [°C] alcanzados por la operación; además como lo explica S. Kalpakjian: “Por razones económicas y ambientales, desde mediados de la década de 1990 hay una tendencia mundial a minimizar o eliminar el uso de los fluidos para el trabajo de los metales, tendencia que ha llevado a la práctica del maquinado casi seco (NDM, por sus siglas en inglés)... El maquinado en seco también es una alternativa viable. Con importantes avances en las herramientas de corte, se ha demostrado que es eficaz en diversas operaciones de maquinado (particularmente torneado, fresado y corte de engranes) en aceros, aceros aleados y hierros fundidos, aunque no para las aleaciones de aluminio.”⁵⁵

⁵⁴ Kalpakjian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. P. 649.

⁵⁵ *Ibíd.* P. 669.

Figura 124. Dureza de varios materiales para herramientas de corte.

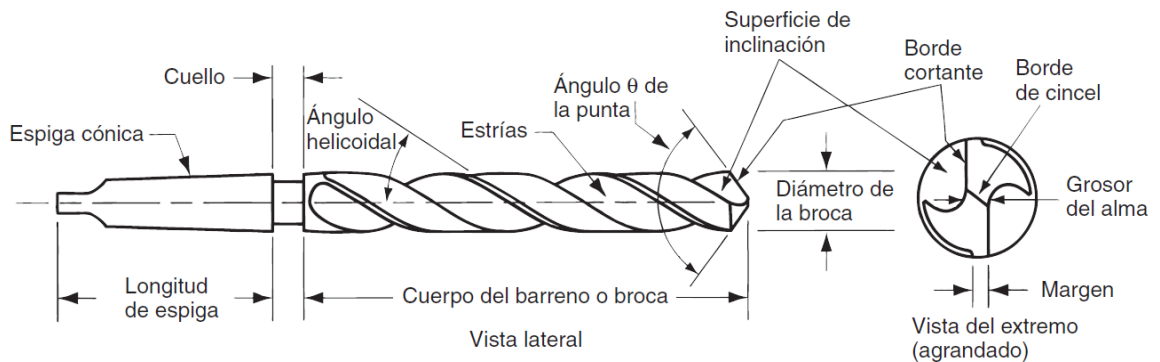


Fuente: Kalpakjian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 648.

Con referencia al taladrado Groover afirma que este procedimiento: “se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica rotatoria, llamada broca (ver figura 125), que tiene dos bordes cortantes en su extremo. La broca avanza dentro de la pieza de trabajo estacionaria para formar un agujero cuyo diámetro está determinado por el diámetro de la broca. El taladrado se realiza en una prensa taladradora, aunque otras máquinas herramienta puedan ejecutar esta operación.”⁵⁶

⁵⁶ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 518.

Figura 125. Geometría estándar broca helicoidal.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 563.

La velocidad de corte (ésta no sería tangencial sino periférica) en una operación de taladrado es la velocidad superficial en el diámetro exterior de la broca. Se especifica de esta forma por conveniencia, aunque casi todo el corte se realiza realmente a las velocidades más bajas cercanas al eje de rotación. Para fijar la velocidad deseada de corte en taladrado, es necesario determinar la velocidad de rotación de la broca por su diámetro. Si N representa las [rev/min] del husillo, entonces⁵⁷:

$$N = \frac{v}{\pi * D} \quad (63)$$

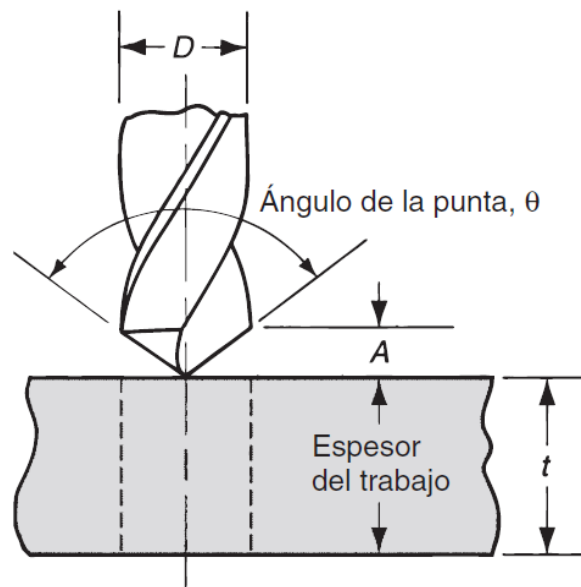
Donde v = velocidad de corte, [mm/min] ([in/min]); y D = diámetro de la broca, [mm] ([in]). Por lo cual la velocidad de corte es de 4,10 [m/min] = 13,45 [ft/min] para el agujero de la cabeza de la biela y de 2,65 [m/min] = 8,69 [ft/min] para el agujero del pie de la biela.

⁵⁷ Ibid. p. 518.

En algunas operaciones de taladrado, la superficie de la pieza gira sobre una herramienta en reposo, pero se aplica la misma fórmula. En el taladrado, el avance f se especifica en [mm/rev] ([in/rev]). Las velocidades recomendadas son aproximadamente proporcionales al diámetro de la broca; los avances más altos se logran con brocas de diámetro grande. Como generalmente existen dos bordes de corte en la punta de la broca, el espesor de la viruta no cortada (carga de viruta) que se toma en cada borde de corte es la mitad del avance.⁵⁸

En el caso de la operación de rectificado, el taladrado se hizo pasante como lo muestra la figura 126.

Figura 126. Agujero pasante.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 518.

⁵⁸ *Ibíd.* p. 518.

El tiempo de maquinado requerido para taladrar un agujero pasado se puede determinar con la fórmula⁵⁹ siguiente:

$$T_m = \frac{t+A}{f_r} \quad (64)$$

Donde T_m = tiempo de maquinado (taladrado), min; t = espesor del trabajo, [mm] ([in]); f_r = velocidad de avance, [mm/min] ([in/min]); A = tolerancia de aproximación que toma en cuenta el ángulo de la punta de la broca, y representa la distancia que la broca debe avanzar dentro del trabajo antes de alcanzar el diámetro completo. Dicha tolerancia está determinada⁶⁰ por:

$$A = 0,5 * D * \tan\left(90 - \frac{\theta}{2}\right) \quad (65)$$

Donde A = tolerancia de aproximación, [mm] ([in]); y θ = ángulo de la punta de la broca. Para el caso del mecanizado por taladrado del prototipo el tiempo que se invirtió fue de +/- veinte (20) minutos para cada agujero, lo que quiere decir que las variables tomaron los siguientes valores: $t = 10$ [mm]; $A = 0,4$ [mm] y $f_r = 0,52$ [mm/min] respectivamente.

En cuanto al proceso de torneado M. P. Groover expone esta teoría de mecanizado de la siguiente manera⁶¹: “La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la ecuación”:

⁵⁹ *Ibíd.* p. 518.

⁶⁰ *Ibíd.* p. 518.

⁶¹ *Ibíd.* p. 510.

$$N = \frac{v}{\pi * D_0} \quad (66)$$

Donde N = velocidad de rotación, [rev/min]; v = velocidad de corte, [m/min] ([ft/min]); y D_0 = diámetro original de la pieza, [m] ([ft]). Por lo cual, se tiene que las velocidades de corte para el diámetro de la cabeza y del pie de la biela son respectivamente de: 18,85 [m/min] = 61,84 [ft/min] & 12,25 [m/min] = 40,19 [ft/min].

La operación de torneado reduce el diámetro del trabajo D_0 al diámetro final D_f . El cambio de diámetro se determina por la profundidad de corte d :

$$D_f = D_0 - 2 * d \quad (67)$$

El avance en el torneado se expresa generalmente en [mm/rev] ([in/rev]). Este avance se puede convertir a velocidad de avance lineal en [mm/min] ([in/min]) mediante la fórmula:

$$f_r = N * f \quad (68)$$

Donde f_r = velocidad de avance, [mm/min] ([in/min]); y f = avance, [mm/rev] ([in/rev]). Y El tiempo para maquinar una pieza de trabajo cilíndrica de un extremo a otro está dado por:

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (69)$$

Donde T_m = tiempo de maquinado en minutos; y L = longitud de la pieza cilíndrica en [mm] ([in]). Un cálculo más directo del tiempo de maquinado lo proporciona la ecuación que sigue:

$$T_m = \frac{\pi * D_0 * L}{f * v} \quad (70)$$

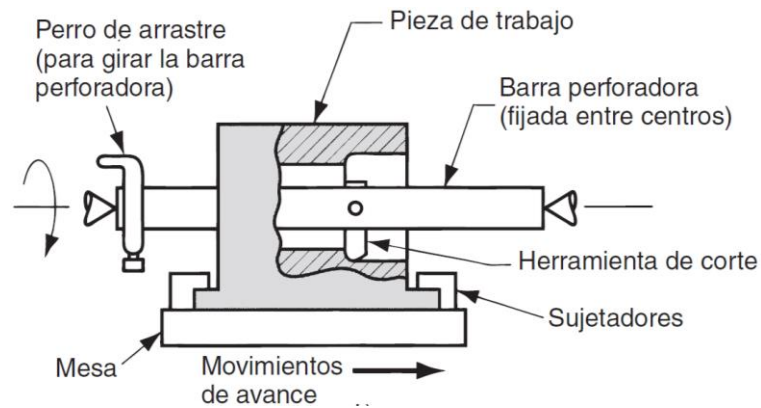
Donde D_0 = diámetro del trabajo, [mm] ([in]); L = longitud de la pieza de trabajo, [mm] ([in]); f = avance, [mm/rev] ([in/rev]); y v = velocidad de corte, [mm/min] ([in/min]).

En el caso concreto del mecanizado de acabado por torno (alesado) de los diámetros internos de la cabeza y del pie de biela, el tiempo que tomó realizar cada una de estas operaciones fue alrededor de los veinte (20) minutos, por tanto para el caso del tiempo de mecanizado de la cabeza de la biela los parámetros que se tienen son los siguientes: $D_0 = 20$ [mm]; $L = 10$ [mm]; $f = 0,001667$ [mm/rev] y $v = 18849,56$ [mm/min]. Para el caso del pie de la biela los parámetros son: $D_0 = 13$ [mm]; $L = 10$ [mm]; $f = 0,001667$ [mm/rev] y $v = 12252,21$ [mm/min].

Como práctica general, se añade una pequeña distancia a la longitud al principio y al final de la pieza de trabajo para dar margen a la aproximación y al sobre-recorrido de la herramienta. Hasta aquí la teoría de mecanizado expuesta por Groover. En cuanto a la operación específica realizada mediante el torno a los alojamientos de la pieza se conoce en la industria del mecanizado como alesado, M. P. Groover la define como perforado (Una herramienta de punta sencilla avanza en línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la pieza) ver figura 127. Las herramientas de una sola punta (ver figura 128) se usan en la mayoría de las operaciones ejecutadas en tornos. Las herramientas de corte para el torneado, careado, ahusado, contorneado,

chaflanado y perforado son herramientas de una sola punta.⁶² Precisamente la herramienta usada para el rectificado de los alojamientos fue un buril con punta de carburo de tungsteno.

Figura 127. Perforado, operación diferente al torneado realizada en el torno.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 516.

Figura 128. Barra perforadora hecha de carburo cementado (WC-Co).



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 517.

⁶² *Ibíd.* p. 510.

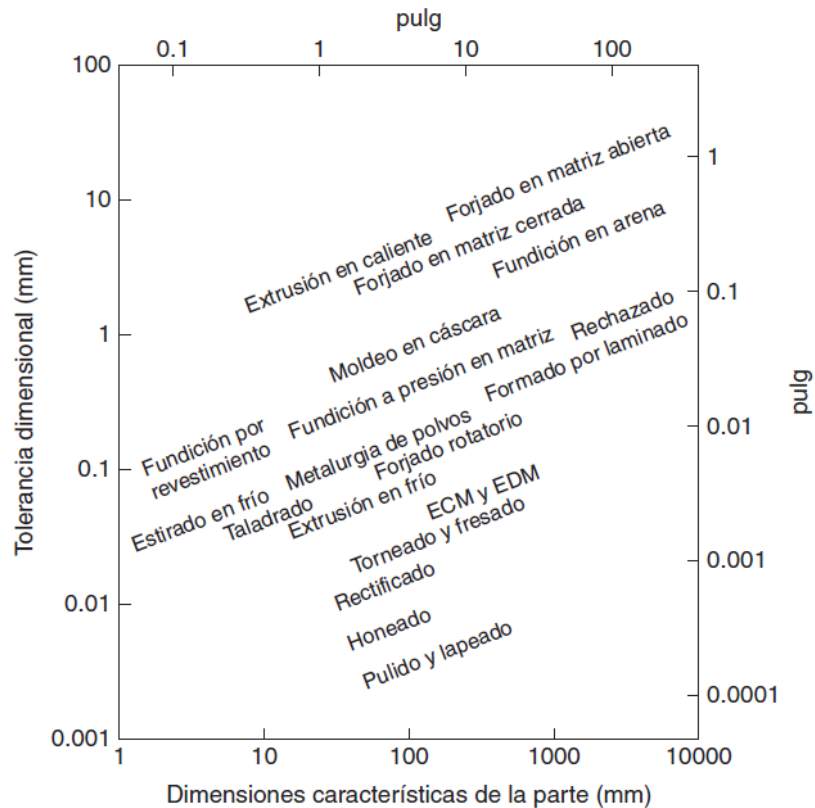
Al principio de esta investigación, se adquirieron dos bielas originales las cuales fueron caracterizadas en cuanto a sus dimensiones, material, resistencia mecánica y demás propiedades o estándares de calidad que una pieza de esta naturaleza debe poseer; una medida importante que se identificó fue la rugosidad de los alojamientos, en la sección 2.3 y en la figura 10, mediante un microscopio especializado se pudo obtener dicha medida de rugosidad (la cual es una distancia) y que por norma debe ser del tipo **N6**⁶³ para una aplicación de máquinas térmicas alternativas, como lo son los motores de combustión interna, debe tener una medida media de 0,8 [μm]. Medida que efectivamente una operación de torneado alcanza en promedio⁶⁴ (ver tabla de rugosidades de superficies obtenidas en diversos procesos de mecanizado en los anexos).

También se debe aclarar que las tolerancias y los ajustes que fueron suministrados en la operación de rectificado estuvieron basados en el tipo de aplicación para la que iba a ser usada el prototipo de biela, según la experiencia de los técnicos de la industria del mecanizado para rodamientos de agujas la tolerancia que se debe dejar para que éste cumpla su función y no se atasque en servicio es de $\pm 0,020$ [mm] o 20 [μm] (esta medida de tolerancia se dejó al radio y no al diámetro de los agujeros); lo cual también demuestra, al observar la figura 129 que una operación de torneado puede alcanzar este valor de tolerancia sin ningún tipo de inconveniente.

⁶³ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Normas que definen los términos de rugosidad superficial y establecen los parámetros, dirección de las irregularidades superficiales y reglas generales. ISO 4287/1-1987 & ISO 468-1982. Geneve, Switzerland: ISO.

⁶⁴ Kalpajian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 698.

Figura 129. Tolerancias dimensionales en diversos procesos de mecanizado.



Fuente: Kalpakjian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 1104.

4.3 COMPROBACIÓN DE DIMENSIONES Y PROPIEDADES FÍSICAS BIELA PROTOTIPO.

Una vez termina el proceso de manufactura, junto con todas las técnicas de fabricación necesarias para alcanzar las dimensiones y las propiedades mecánicas proyectadas en el diseño del prototipo de biela, el paso natural que sigue es la prueba de instalación y funcionamiento en el motor de guadañadora

correspondiente para la cual fue diseñada la pieza objeto de la presente investigación, pero antes se hace necesario comprobar, no al final del proceso sino a medida que la pieza recorre el itinerario de producción las dimensiones y las propiedades mecánicas que se proyectaron en el diseño en cada paso de la manufactura. La figura 130 muestra los procedimientos aplicados al prototipo.

Figura 130. Procedimientos aplicados para comprobación prototipo biela.



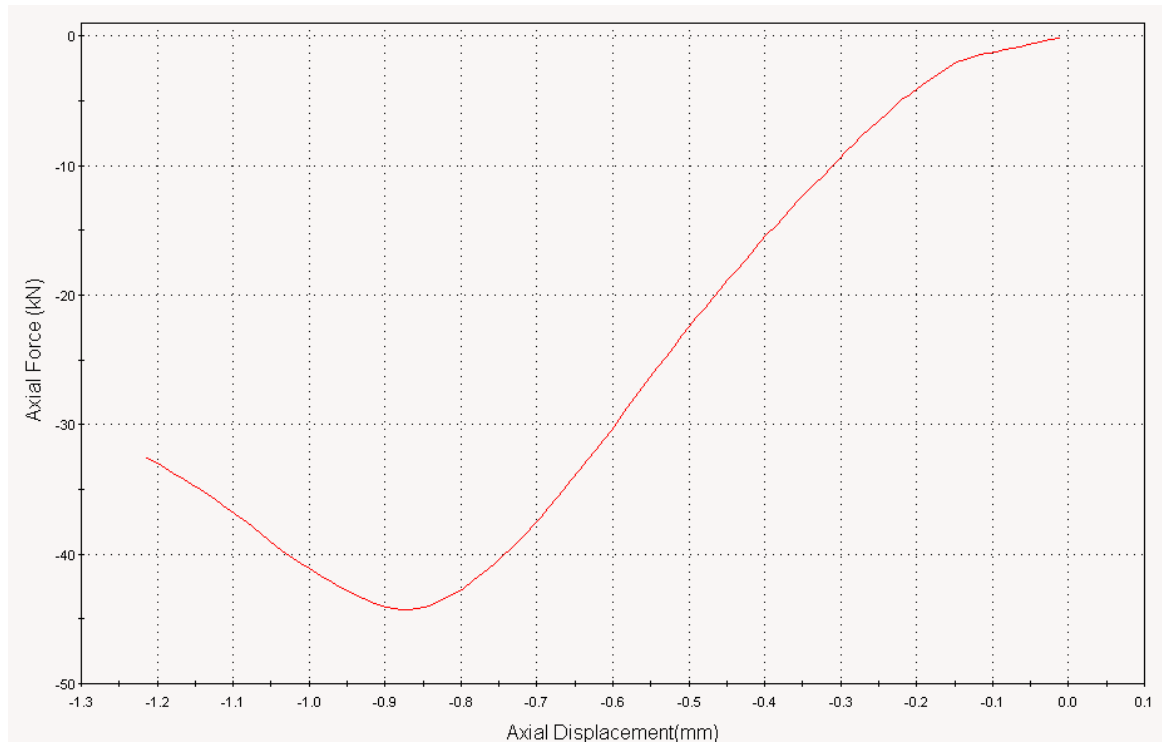
Eso fue lo ejecutado una vez se cortaron ambos prototipos de biela en la operación de mecanizado hidrodinámico por corte con chorro de agua, una de las piezas (ver figura 112-a) fue llevada directamente a la máquina de ensayos universales para comprobar de primera mano los valores de fuerza y desplazamiento proyectados en el diseño para la sección transversal, con la certeza (garantizada por el fabricante) de que la dureza del material usado (ver

figura 108) como materia prima se encontraba entre 425 [HB] y 475 [HB] (lo que equivale a un rango entre 45 [HRC] y 49 [HRC]) más de diez unidades de dureza por encima del material de la biela original, algo preocupante debido a que un material tan duro tiende a romperse antes que fluir cuando se le aplica grandes cargas. Preocupación superada una vez realizada la prueba de compresión, el material demostró tener una alta capacidad de deformación, lo que lo hace ideal para absorber grandes cargas. El resultado de la prueba se muestra en la figura 131 (compárese con la figura 91 que muestra el resultado de la simulación aplicada al modelo CAD del prototipo) y figura 132, además los valores del ensayo se han tabulado en la tabla 19.

Figura 131. Biela prototipo deformada luego del ensayo de compresión aplicado.



Figura 132. Resultado ensayo compresión fuerza-desplazamiento prototipo biela.



Fuente: Software máquina MTS de Ensayos Universales.

Tabla 19. Valores tabulados de fuerza, desplazamiento y tiempo.

Fuerza axial [kN]	Desplazamiento [mm]	Tiempo [s]
-0,33477086	-0,02656104	32,0976560
-0,64118707	-0,051349774	32,5976560
-0,97078264	-0,076687053	33,0976560
-1,27536050	-0,10076308	33,5976560
-1,63389050	-0,12700750	34,0976560
-2,19894150	-0,15174620	34,5976560
-3,09975700	-0,17721936	35,0976560
-4,18483400	-0,20118576	35,5976560
-5,35150860	-0,22736546	36,0976560
-6,65592530	-0,25203019	36,5976560
-8,04566960	-0,27735966	37,0976560
-9,46940040	-0,30221808	37,5976560
-10,96962000	-0,32637009	38,0976560
-12,60832200	-0,35253298	38,5976560
-14,09846700	-0,37708953	39,0976560

Tabla 19. (Continuación)

-15,66921900	-0,40083236	39,5976560
-17,41215900	-0,42601779	40,0976560
-19,04390900	-0,45192313	40,5976560
-20,86653900	-0,47701553	41,0976560
-22,64815100	-0,50251836	41,5976560
-24,59051900	-0,52754539	42,0976560
-26,58103400	-0,55343843	42,5976560
-28,38507700	-0,57706302	43,0976560
-30,45341500	-0,60281485	43,5976560
-32,36076700	-0,62692243	44,0976560
-34,12583900	-0,6520189	44,5976560
-35,99085200	-0,67690843	45,0976560
-37,66850300	-0,70172197	45,5976560
-39,18425000	-0,72707868	46,0976560
-40,53193300	-0,75165468	46,5976560
-41,78387100	-0,77648216	47,0976560
-42,84143400	-0,80185241	47,5976560
-43,64490900	-0,82649624	48,0976560
-44,17483500	-0,85130382	48,5976560
-44,28053700	-0,87754148	49,0976560
-43,97091300	-0,90394616	49,5976560
-43,37849800	-0,92946255	50,0976560
-42,69379800	-0,95342469	50,5976560
-41,89624800	-0,97855169	51,0976560
-41,02010300	-1,00322180	51,5976560
-40,04999500	-1,02656320	52,0976560
-38,89809000	-1,05263790	52,5976560
-37,72854200	-1,07763250	53,0976560
-36,64765500	-1,10189370	53,5976560
-35,59446300	-1,12715960	54,0976560
-34,72426600	-1,15027420	54,5976560
-33,83894300	-1,17611830	55,0976560
-32,88476600	-1,20295070	55,5976560
-31,97020700	-1,21797810	56,0976560

Fuente: Software máquina MTS de Ensayos Universales.

Comparando la falla real del prototipo contra el comportamiento entregado por la simulación hecha por elementos finitos, la deformación mostrada en la realidad es semejante a la entregada por la simulación de pandeo que se aplicó al modelo CAD modificado del prototipo de biela (véase figura 91), por lo cual este método de diseño comprueba su funcionalidad para el diseñador en que le permite predecir y entender la manera como se comportará su diseño bajo cargas de falla.

En cuanto a la curva de fuerza contra desplazamiento (véase figura 132), se pueden observar tres zonas importantes: 1) el comienzo de la curva, que va desde el 0 hasta los 5 [kN] de fuerza; 2) el comportamiento lineal del material de donde se extrae el valor de la pendiente con el cual se caracterizó el mismo, va desde los 5 [kN] hasta los 35 [kN]; y 3) la zona de falla por pandeo de la pieza, donde el material sobrepasa el límite de fluencia y ya no se recupera, va desde los 35 [kN] hasta terminar con 1,2 [mm] de desplazamiento producto del pandeo.

El ensayo de compresión aplicado a la biela prototipo entregó cerca de cincuenta valores de carga y desplazamiento (véase tabla 19 y figura 132) con los cuales se dedujeron los valores de esfuerzo y deformación que se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Datos Esfuerzo/Deformación ensayo compresión biela prototipo.

Deformación [mm/mm]	Esfuerzo [MPa]
-0,000428394	-10,98
-0,000828203	-21,02
-0,001236860	-31,83
-0,001625174	-41,82
-0,002048462	-53,57
-0,002447464	-72,10
-0,002858312	-101,63
-0,003244858	-137,21
-0,003667102	-175,46
-0,004064911	-218,23
-0,004473442	-263,79
-0,004874375	-310,47
-0,005263915	-359,66
-0,005685887	-413,39
-0,006081952	-462,24
-0,006464892	-513,74
-0,006871100	-570,89

Tabla 20. (Continuación)

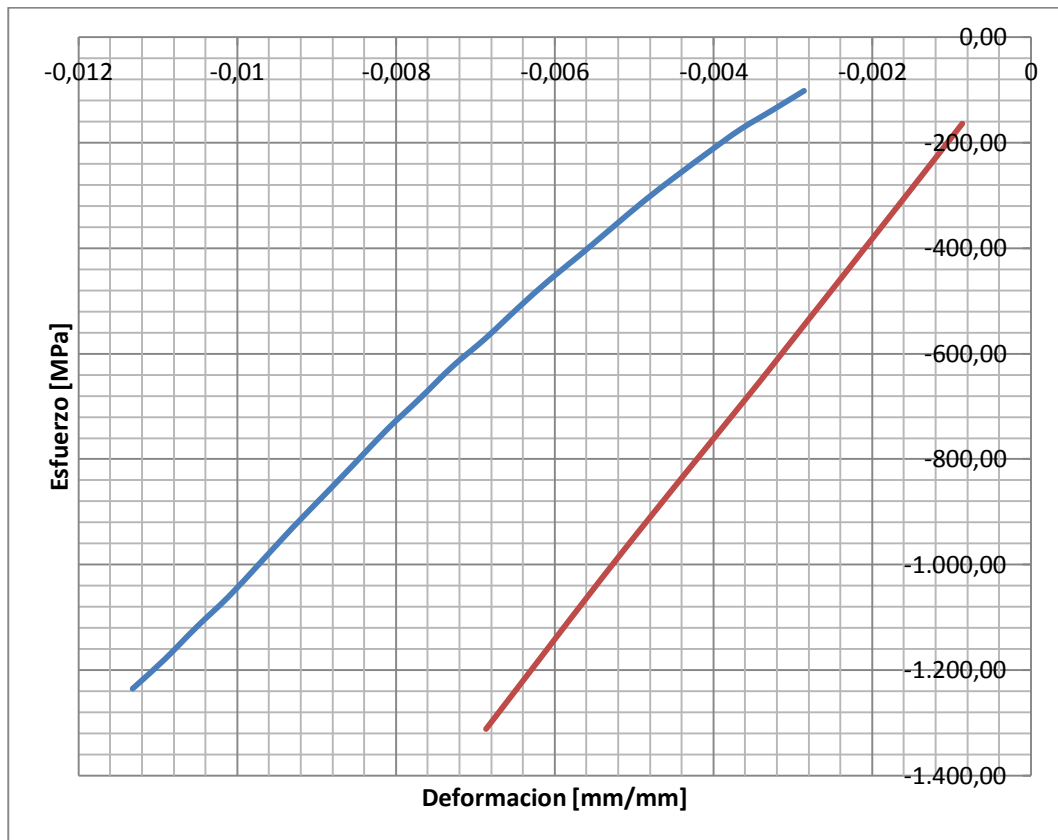
-0,007288918	-624,39
-0,007693625	-684,15
-0,008104952	-742,56
-0,008508604	-806,25
-0,008926225	-871,51
-0,009307258	-930,66
-0,009722601	-998,47
-0,010111424	-1.061,01
-0,010516196	-1.118,88
-0,010917631	-1.180,03
-0,011317841	-1.235,03
-0,011726811	-1.284,73
-0,012123189	-1.328,92
-0,012523623	-1.369,96
-0,012932811	-1.404,64
-0,013330284	-1.430,98
-0,013730397	-1.448,36
-0,014153575	-1.451,82
-0,014579448	-1.441,67
-0,014990993	-1.422,25
-0,015377470	-1.399,80
-0,015782735	-1.373,65
-0,016180631	-1.344,92
-0,016557097	-1.313,11
-0,016977647	-1.275,35
-0,017380777	-1.237,00
-0,017772078	-1.201,56
-0,018179583	-1.167,03
-0,018552391	-1.138,50
-0,018969222	-1.109,47
-0,019401993	-1.078,19
-0,019644364	-1.048,20

Fuente: Software máquina MTS y Microsoft Excel®.

Al evaluar los datos de las tablas 19 y 20, se buscó confrontar el comportamiento de la simulación y de la prueba de compresión real trazando los datos donde el

prototipo se comportó elásticamente, según lo evidencia la curva de fuerza contra desplazamiento (véase figura 132), en la figura 133 se muestran ambas curvas.




Figura 133. Curvas de simulación y ensayo de compresión biela prototipo.



En la figura 133, la línea azul representa los datos de la región elástica del ensayo de compresión real, la cual posee una pendiente con valor igual a: 137146 [MPa]. Mientras que la línea roja representa los datos de la simulación, esta curva posee una pendiente de: 190667 [MPa]. Tomando como un dato experimental el valor de la pendiente del ensayo de compresión se puede concluir que existe un error del 39% respecto de los datos de la simulación.

En cuanto a la comprobación de la dureza alcanzada por el segundo prototipo (ver figura 112-b), al que le fueron aplicados todos los procesos de manufactura y fue probado en el motor, en las zonas de influencia (la cabeza, el pie y el cuerpo) que fueron evaluadas en la biela original (ver medidas en la tabla 2), los resultados del ensayo de dureza entregaron valores que se encuentran en un rango de 55 [HRC] – 60 [HRC] para el caso del pie y de la cabeza del prototipo de biela (ver figura 134) y valores de dureza para el cuerpo (ver figura 108) que se encuentran entre 45 [HRC] – 49 [HRC]. Los cuales son resultados satisfactorios que cumplen con las propiedades mecánicas proyectadas en el diseño y aplicadas a la pieza por el método de cementación y temple aplicado, y garantizados por el proveedor de materia prima.

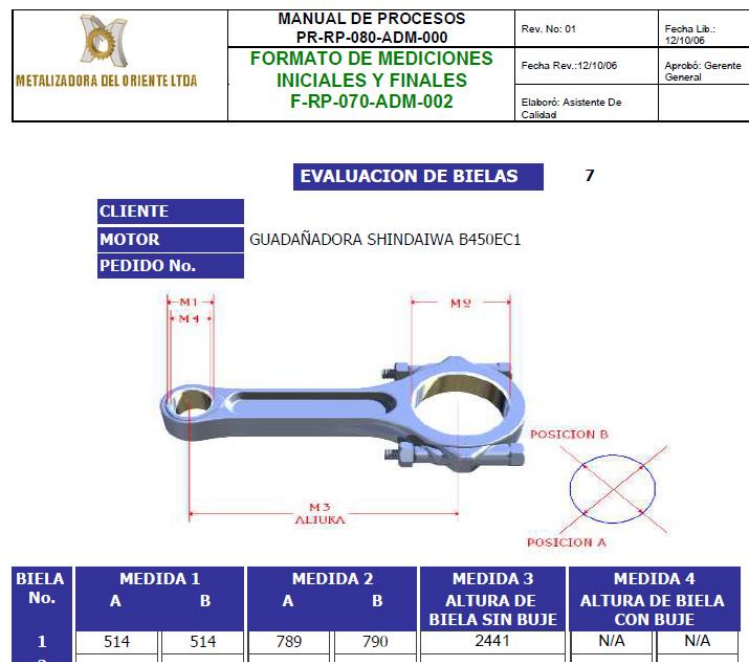
Figura 134. Resultados ensayo dureza prototipo biela.

		REPORTE DE CALIDAD NUMERO 0007130				
		COD. FRIT-04		REV. No. 02		
		FECHA: 02/08/05		PAG. 1 de 1		
CLIENTE: MECANIZADO					LOTE No. 0029464-353 FECHA: 19-12-14	
CANT	UNIDAD INSPEC.	TIPO DE PIEZA	MATERIAL	TRATAMIENTO TERMICO REALIZADO	DUREZA FINAL	
1	1	Pieza	00000	Trata.Térmico Localizado	55-60 HRC	
1	1	Pieza	00000	Trata.Térmico Localizado	55-60 HRC	
						

Fuente: IMATT S.A.S.

Por último, luego de realizar todos los procesos de manufactura y antes de probar la biela en el motor, el segundo prototipo se envió a metrología para comprobación de sus tres dimensiones principales⁶⁵ que son de suma importancia para el ensamble de la misma en el motor, más exactamente en el muñón del cigüeñal y en el bulón del pistón, elementos que su vez necesitan de rodamientos de agujas para que el movimiento relativo entre las piezas se realice con un mínimo de fricción, por ello la medida de los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela tienen que ser exactas, puntualmente, deben poseer una tolerancia adecuada (ver sección 5.6) para la aplicación en la que van a trabajar, en este caso los rodamientos de agujas. Los resultados de la metrología se muestran en la figura 135 (ver reporte completo en los anexos).

Figura 135. Resultados metrología prototipo biela.



Fuente: Metalizadora del Oriente Limitada.

⁶⁵ KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 1102.

Comparando estos resultados con los obtenidos en la metrología de la biela original (ver figura 3) es de notar que existe una diferencia de dos (2) milésimas de pulgada (equivalentes a 0,05 [mm]) entre las medidas de los diámetros internos del pie de ambas biela y una diferencia de (1) milésima de pulgada (0,025 [mm]) entre las medidas de los diámetros internos de cabeza de biela; en cuanto a la medida entre centros la diferencia alcanza las cuatro (4) milésimas de pulgada (0,1 [mm]). Diferencias que se encuentran entre las tolerancias del proceso de maquinado utilizado.

4.4 PRUEBA DE INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO.

Luego de realizar las pruebas y comprobaciones necesarias respecto a la conformidad (o calidad) de las dimensiones y propiedades mecánicas entregadas a la segunda biela por el proceso de manufactura y que fueron proyectadas en el diseño, se realizó la instalación del prototipo de biela en el motor de guadañadora.

El primer paso necesario para el montaje de la biela en el motor, es el montaje de la biela en el cigüeñal y su respectivo balanceo, esta importante operación debe hacerse apropiadamente pues un mal montaje puede desequilibrar el motor debido a que la biela y el cigüeñal son masas oscilantes, este ensamble se realizó en un taller de reparación de motocicletas. La operación consistió en la limpieza de las piezas, la inserción del muñón a una de las partes del cigüeñal, el posicionamiento del rodamiento de agujas, seguido de la instalación de la biela y por último de la inserción mediante prensa hidráulica de la contraparte del cigüeñal con ajuste por interferencia; después vino la alineación de los ejes y por último la

prueba de balanceo en el torno. A continuación se muestran las figuras 136 y 137 donde se hace evidente esta última parte del proceso.

Figura 136. Prototipo biela con sus respectivos rodamientos.



Figura 137. Montaje y balanceo prototipo biela en cigüeñal.



Una vez instalada y balanceada la biela en el cigüeñal, sencillamente resta la instalación de la misma en el motor, esta operación se realizó en uno de los talleres tradicionales de reparación de guadañadoras, moto-sierras y maquinaria

agrícola del centro de la ciudad de Bucaramanga; se alquiló el mismo modelo⁶⁶ del motor Shindaiwa utilizado por los compañeros que precedieron esta investigación y del cual se extrajo una de las bielas que se usó como guía del presente trabajo de grado; el motor se muestra en las figuras 138 y 139.

Figura 138. Motor en el que se instaló la biela.



⁶⁶ CASTELLAR BUELVAS, Jairo Daniel y ROMERO MARTINEZ, Leonardo José. Desarrollo de una herramienta software para el diseño de motores de combustión interna de dos tiempos (fase I). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2014. p. 141.

Figura 139. Motor en el que se instaló la biela, sin cubierta.



Una vez el motor se seleccionó, se le hizo el respectivo mantenimiento y limpieza, el recambio de los sellos y empaques, toda la operación duro alrededor de una (1) hora. Inicialmente se procedió a desarmar el motor removiendo la cubierta protectora de plástico, luego la bujía, seguido por los cables eléctricos, el bloque o culata y por último el desensamble del cárter. Antes de la instalación del cigüeñal junto con la biela prototipo, se aseguro la limpieza total de las partes internas del motor y de las que ya se habían removido utilizando gasolina; y por último se engrasaron todos los elementos rodantes internos del motor. A continuación se muestra la secuencia de imágenes en su orden desde la figura 140 hasta la 143:

Figura 140. Motor de prueba sin culata, junto a él la biela prototipo y el cigüeñal.



Figura 141. Instalación biela en el motor.

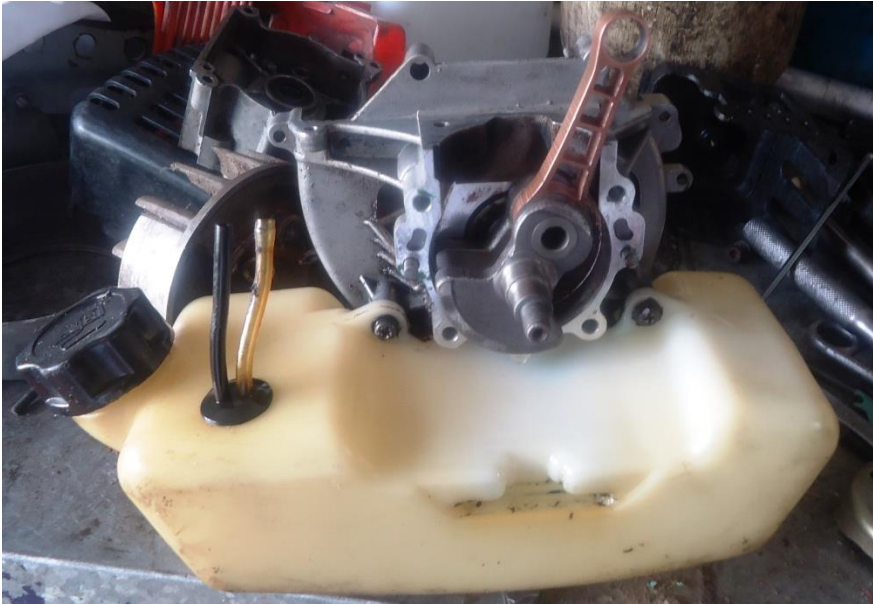


Figura 142. Instalación émbolo.

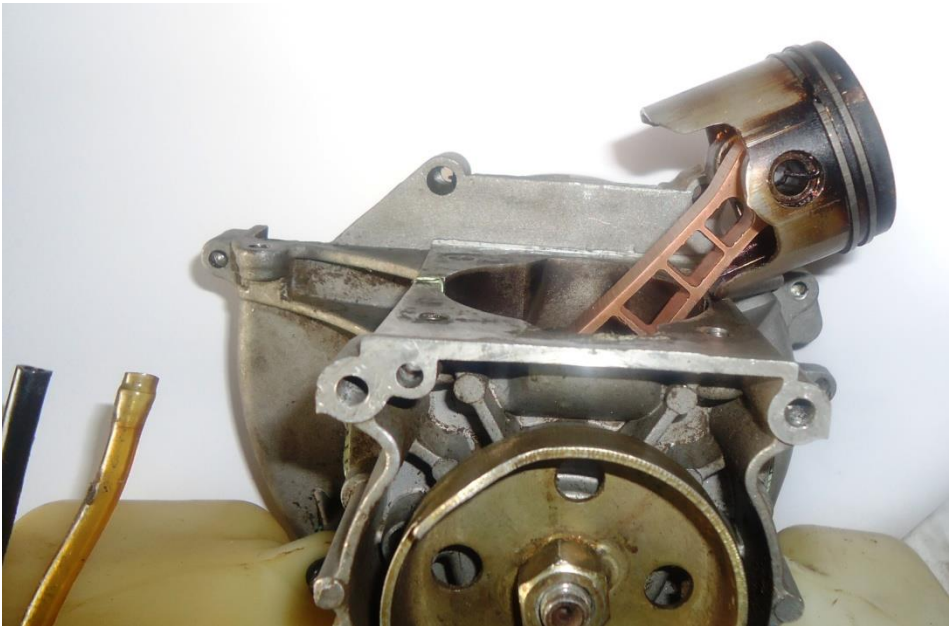


Figura 143. Motor ensamblado con el prototipo de biela.



Una vez se armó el motor y estuvo en condiciones de funcionamiento, se procedió al montaje de la bujía, el cableado eléctrico, el arranque, la cubierta de plástico, el filtro del combustible y por último a llenar el depósito de combustible con gasolina y aceite para motores de dos tiempos. El siguiente paso fue el encendido del motor y el montaje de la caña de corte (figura 145) para efectuar el desmalezado de una pequeña franja de maleza en el andén de una calle en pleno centro de la ciudad de Bucaramanga (véase figura 144). Posteriormente se le removió el prototipo de biela al motor y se le instaló la biela original (ver figura 146).

Figura 144. Maleza sobre el andén de una calle del centro de Bucaramanga.



Figura 145. Instalación caña de corte en el motor.



Figura 146. Remoción del prototipo de biela del motor.



Los videos del corte realizado con el motor y del mismo motor funcionando con el prototipo de biela instalada, pueden verse en los archivos anexos a este trabajo de investigación. La tabla 21 resume los resultados de la prueba discriminados en tres partes las cuales son: motor a mínimas revoluciones (ralentí), en régimen o servicio y a máximas revoluciones, respectivamente.

Tabla 21. Resultados prueba instalación y funcionamiento prototipo biela.

r.p.m. motor	Tiempo	Resultado	Observaciones
2750 (mín.)	15 minutos	0.k.	prueba de funcionamiento biela prototipo Realizada con el motor estático.
7500	20 minutos	0.k.	prueba de corte o desmalezado en una calle del centro de Bucaramanga.
11500 (máx.)	10 minutos	0.k.	prueba de funcionamiento biela prototipo Realizada con el motor estático.

5. DOCUMENTACION MANUFACTURA BIELA.

“La ingeniería de manufactura es una función que realiza el personal técnico, y está relacionada con la planeación de los procesos de manufactura para la producción económica de productos de alta calidad. Su papel principal consiste en preparar la transición del producto desde las especificaciones de diseño hasta la manufactura de un producto físico. Su propósito general es optimizar la manufactura dentro de una organización particular.”⁶⁷

Esta sección de la presente investigación comienza con la definición de ingeniería de manufactura que enuncia el libro Fundamentos de Manufactura Moderna de Mikell P. Groover, ya que como él lo enuncia, el diseño y construcción de los formatos necesarios y suficientes para que se lleve a cabo el proceso de fabricación de cualquier componente mecánico son tan indispensables como los planos de detalle de cualquier elemento mecánico. Continuando con la metodología de dicho libro, éste explica que la planeación de los procesos necesarios para la transformación de la materia prima en un componente útil que cumpla con todos los estándares de calidad mecánicamente hablando es la principal y primera actividad de la ingeniería de manufactura. La planeación de procesos incluye: decidir qué procesos y métodos deben usarse y en qué secuencia, determinar los requerimientos de habilitación de herramientas, seleccionar el equipo y los sistemas de producción y estimar los costos de producción para los procesos...⁶⁸

Otra importante actividad que la ingeniería de la manufactura debe tener en cuenta es el diseño para la manufactura, el cual es el proceso (como ya se explicó

⁶⁷ GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. 1062 p.

⁶⁸ Ibid.

en la sección anterior) que debe estar (y estuvo) antes de cualquier otro pues no importa qué tipo de proceso de manufactura se use, si la pieza a construir no se diseñó teniendo en cuenta como se iba a fabricar puede ser imposible traerla del papel a la realidad o en su defecto muy costoso por los procesos que deben realizarse, las máquinas, adaptaciones, tiempo, etc.

La planeación de procesos (según M. P. Groover) en la manufactura de cualquier producto tiene que ver con los métodos o técnicas de fabricación más convenientes y el orden en el cual deben realizarse para producir una pieza o producto determinado según la ingeniería de diseño. Los detalles y las decisiones más importantes a tener en cuenta, son los siguientes:

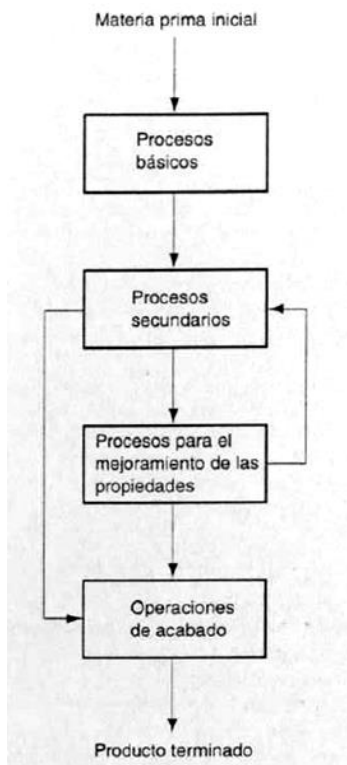
- Procesos y secuencias: el plan de proceso debe describir brevemente todos los pasos de procesamiento que se usan en la unidad de trabajo (por ejemplo, ensamble de piezas), así como el orden en el cual se realizan.
- Selección del equipo: en general, la ingeniería de manufactura pretende implantar planes de procesos que utilicen equipo existente.
- Herramientas: el planificador de proceso debe decidir que herramientas necesita cada proceso y en qué condiciones se realizará dicho proceso.
- Estimación de los costos de producción: es realizado por el planificador del proceso con ayuda de profesionales en finanzas.

Continuando con lo enunciado en el libro Fundamentos de Manufactura Moderna de M. P. Groover los procesos necesarios para manufacturar una pieza específica se determinan en gran parte por el material con que se fabrica la pieza, que es seleccionado con base en requerimientos funcionales (y en el caso de esta investigación, en base al material de la biela original y a la disponibilidad de

materiales existentes en esta región). Una vez seleccionado el material, la elección de los procesos posibles se delimita considerablemente. Una secuencia típica (afirma Groover y que se muestra en la figura 147) de procesamiento para fabricar una pieza separada consiste en:

- 1. Un proceso básico.**
- 2. Uno o más procesos secundarios.**
- 3. Operaciones para mejorar las propiedades físicas.**
- 4. Operaciones de terminado.**

Figura 147. Secuencia típica de procesos requeridos en la fabricación de piezas.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 969.

Los procesos básicos y secundarios que ilustran la figura 147 son de formado, los cuales alteran la forma de la pieza de trabajo; establecen la configuración geométrica inicial de la pieza, estos procesos son: fundición, forjado, laminado, etc. En la mayoría de los casos (una interesante excepción es el corte por chorro de agua), la geometría inicial debe refinarse mediante una serie de procesos secundarios los cuales convierten la forma básica en la forma geométrica final. Y existe cierta correlación en los procesos básicos y secundarios pues cuando la pieza de trabajo es fundida o forjada el proceso secundario es un maquinado; cuando el proceso básico es un laminado el correspondiente proceso secundario es de estampado, perforado y/o doblado.⁶⁹

Después de las operaciones de formado (continúa Groover), por lo general se realizan otras para mejorar las propiedades físicas y/o terminar el producto. Las operaciones para mejorar las propiedades incluyen el tratamiento térmico. Las operaciones de acabado son las últimas de la secuencia (figura 147) y por lo general proporcionan un recubrimiento en la superficie de la pieza, entre estos procesos esta el galvanizado y la pintura. En algunos casos (como es el caso de los prototipos de biela construidos para la presente investigación), después de los procesos de mejoramiento de propiedades se aplican operaciones secundarias adicionales antes de proceder al acabado, como lo sugiere el ciclo de retorno (ver figura 147). Un ejemplo es una pieza maquinada que se endurece mediante tratamiento térmico, antes de éste, la pieza se deja con un tamaño más grande de lo ideal para permitir la distorsión. Después del endurecimiento, se llevan al tamaño y tolerancia final mediante acabado por esmerilado. En la tabla 22 se presentan algunos ejemplos de procesos básicos de fabricación.

⁶⁹ Ibid.

Tabla 22. Secuencias de procesos de fabricación típicos.

Proceso básico	Proceso(s) secundario(s)	Proceso de mejoramiento de las propiedades	Operaciones de acabado
<i>Fundición en arena</i>	<i>Maquinado</i>	<i>ninguno</i>	<i>Barnizado</i>
<i>Fundido en troquel</i>	<i>Ninguno, forma neta</i>	<i>ninguno</i>	<i>Barnizado</i>
<i>Fundición en vidrio</i>	<i>Presión, moldeado soplado</i>	<i>ninguno</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Moldeado por inyección</i>	<i>Ninguno, forma neta</i>	<i>ninguno</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Laminado barra</i>	<i>Maquinado</i>	<i>Tratamiento térmico</i>	<i>Electrochapeado</i>
<i>Laminado hoja metálica</i>	<i>Suajado, doblado, grabado</i>	<i>ninguno</i>	<i>Electrochapeado</i>
<i>Forjado</i>	<i>Maquinado (casi la forma neta)</i>	<i>ninguno</i>	<i>Barnizado</i>
<i>Extrusión aluminio</i>	<i>Corte a longitud</i>	<i>ninguno</i>	<i>Anodizado</i>
Atomización de polvos metálicos	Presión de la pieza (PM)	Sinterizado	Barnizado

Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 969.

Según M. P. Groover: “Los procesos más apropiados y el orden en el cual deben realizarse, se determinan con base en la capacidad, experiencia y juicio del planificador de procesos.” Algunas directrices y consideraciones que usan los planificadores de procesos para tomar estas decisiones son⁷⁰:

- *Requerimientos de diseño: la secuencia de procesos debe satisfacer las dimensiones, tolerancias, acabados de superficie y otras especificaciones establecidas por el diseño de productos.*
- *Requerimientos de calidad: deben seleccionarse procesos que satisfagan los requerimientos de calidad en términos de tolerancias, integridad de las superficies, consistencia y capacidad de repetición, y otras medidas de calidad.*
- *Procesos disponibles: si el producto y sus componentes se van a hacer en forma interna, el planificador debe seleccionar, en lo posible, los procesos y equipo disponible en la fábrica.*

⁷⁰ *Ibid.*

- Utilización del material: *es conveniente que la secuencia de procesos use en forma eficiente los materiales y reduzca el desperdicio. Cuando sea posible, se deben seleccionar procesos de formas netas o casi netas.*
- Restricciones de precedencia: *son requerimientos de secuencia tecnológica que determinan o restringen el orden en el cual se realizan los pasos del procesamiento. Ejemplo: debe taladrarse un orificio antes de que pueda roscarse...*
- Superficies de referencia: *ciertas superficies de la pieza deben formarse (generalmente mediante maquinado) casi al principio de la secuencia a fin de que funcionen como superficies de ubicación para otras dimensiones que se formarán después.*
- Eliminar pasos innecesarios: *la secuencia de procesos debe planearse con la cantidad mínima de pasos de procesamiento. Deben evitarse las operaciones innecesarias y pedirse cambios en el diseño para eliminar características que no son absolutamente necesarias.*
- Costo mínimo: *La secuencia de procesos debe ser el método de producción que satisfaga todos los requerimientos anteriores y también obtenga el costo de producto más bajo posible.*

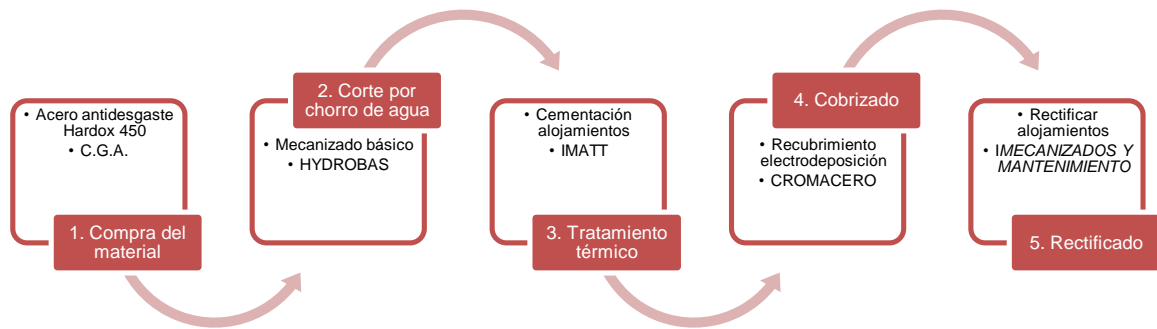
Teniendo en cuenta todas las recomendaciones anteriores, la investigación realizada en cuanto a procesos de fabricación y materiales existentes en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana y del diseño del prototipo de biela, el resultado al que se llegó fue el estructurar el siguiente plan de procesos para la fabricación de los prototipos:

1. **Materia prima:** *comprar una lámina de 20 [cm] X 20 [cm] X 1 [cm] de acero anti-desgaste HARDOX 450, un material muy comercial y vendido por la COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS.*

- 2. Proceso básico:** *realizar el mecanizado de dicha lámina mediante corte en frío, por chorro de agua a presión (hasta 94000 psi), por la empresa HYDROBAS S.A., el cual garantiza la forma neta o final de la pieza que se corta, ya que se manejan tolerancias de corte de hasta +/- 0,0381 mm (0,0015 pulgadas) a velocidades de hasta 0,0212 m/s (500 pulgadas/minuto) por lo cual el proceso de manufactura no requiere, en muchas aplicaciones, de procesos secundarios.*
- 3. Procesos para el mejoramiento de las propiedades:** *realizar un tratamiento térmico de cementación y temple localizado a los alojamientos del prototipo de biela para que alcancen una dureza de +/- 60 HRC mediante un horno de baño de sales por la empresa IMATT S.A.S.*
- 4. Operaciones de acabado:** *aplicar un recubrimiento de cobre por electrodeposición mediante un tanque plástico, dos electrodos, solución de sulfato de cobre y ácido sulfúrico; en la empresa CROMACERO S.A, aplicar una capa de 110 μ m (aprox.) a toda la pieza para protegerla del agresivo ambiente con combustible, aire, agua y calor que sufre dentro del motor y que por ser de acero y tener zonas tan diminutas, la protección contra la corrosión es un aspecto importante a considerar en la manufactura.*
- 5. Procesos secundarios:** *una vez la pieza ha sido cortada, aplicado los tratamientos térmicos y protegida contra la corrosión, rectificar cada uno de los alojamientos, el del pie y el de la cabeza de biela (por lo cual en el corte en frío se dejó 0,6 mm de sobre material al diámetro de cada alojamiento), para garantizar las dimensiones finales y para corregir cualquier tipo de deformación geométrica que le haya podido causar el tratamiento térmico o el recubrimiento, utilizando máquinas herramientas convencionales propiedad de la empresa MECANIZADOS Y MANTENIMIENTO S.A.S.*

En la figura 148 se muestra un esquema que expone el paso a paso del proceso de manufactura aplicado, según las recomendaciones y posibilidades de fabricación existentes en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana.

Figura 148. Secuencia de procesos para la fabricación de prototipo biela.



El anterior plan de proceso de manufactura no puede quedarse en el papel, según M. P. Groover, el plan de proceso se prepara en un formato denominado **hoja de ruta** (un ejemplo se muestra en la figura 149), se llama así porque especifica la secuencia de operaciones y el equipo que visitará la pieza durante su producción, “la hoja de ruta es al planificador de procesos lo que el dibujo de ingeniería es al diseñador del producto.”⁷¹

Es un documento oficial que especifica los detalles del plan de procesos. La hoja de ruta debe incluir todas las operaciones de manufactura que se van a realizar en la pieza de trabajo enlistadas en el orden conveniente en el que se van a realizar. Para cada operación, debe enlistarse lo siguiente⁷²:

⁷¹ *Ibíd.* p. 971.

⁷² *Ibíd.* p. 971.

1. Una breve descripción de la operación, indicando el trabajo que se va a realizar, las superficies que se van a procesar ya indicadas en dibujo de la pieza y las dimensiones (y las tolerancias, si no están especificadas en el dibujo de la pieza) que se van a obtener.
2. El equipo en el cual se va a realizar el trabajo.
3. Cualquier tipo de herramientas requeridas, como dados, moldes, herramientas de corte, plantillas o sujetadores y medidores.
4. Algunas compañías incluyen estándares de tiempo de ciclos, tiempos de preparación y otros datos en la hoja de ruta.

Figura 149. Modelo de una hoja de ruta.



No. de parte: 031393		Nombre de la parte Cuerpo de la válvula		Revoluciones 2	Página 1 de 2	
Material: 416 Inoxidable		Tamaño: 2.0 diám. × 5.0 long.		Planificador: MPG	Fecha: 3/13/XX	
No.	Operación	Depto.	Máquina	Herramientas calibradoras	Tiempo de preparación	Tiempo del ciclo
10	Cara; áspera y torneado de acabado para 1.473 ± 0.003 de diám. × 1.250 ± 0.003 de longitud; chafán a 0.313 ± 0.002 ; torneado de acabado para 1.875 ± 0.002 de diám.; formar tres surcos de 0.125 de anchura × 0.063 de profundidad.	L	325	G857	1.0 h	8.22 m
20	Invertido; cara a 4.750 ± 0.005 longitud; torneado de acabado para 1.875 ± 0.002 de diám.; taladrar orificio axial $1.000 + 0.006, -0.002$ de diám.	L	325		0.5 h	3.10 m
30	Taladrar y mandrilar tres orificios radiales en 0.375 ± 0.002 de diám.	D	114	F511	0.3 h	2.50 m
40	Fresar ranura de 0.500 ± 0.004 de ancho × 0.375 ± 0.003 de profundidad.	M	240	F332	0.3 h	1.75 m
50	Fresar plano de 0.750 ± 0.004 de ancho × 0.375 ± 0.003 de profundidad.	M	240	F333	0.3 h	1.60 m

Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 971.

Evidentemente una hoja de ruta no es suficiente para especificar todos y cada uno de los parámetros y detalles que tiene un elemento mecánico, se hace necesario también (según Groover), además de la elaboración de los planos de detalle, de una **hoja de operaciones**⁷³ para cada uno de los pasos listados en la hoja de ruta, un formato más detallado que desglosa los detalles específicos del trabajo de fabricación como: velocidades de corte, número de piezas por lote, herramientas, diagramas para preparación y demás instrucciones útiles para el operador que realiza el procedimiento de manufactura.

Siguiendo la anterior metodología (y las recomendaciones) expuesta por Groover en su libro, se realizó la planeación del proceso, los respectivos planos de detalle, la hoja de ruta del proceso (ver figura 150), las hojas de operaciones de cada paso de manufactura y de control de calidad; formatos los cuales están consignados en los anexos del presente libro y a continuación se muestran como pantallazos y explican proceso por proceso.

Figura 150. Imagen hoja de ruta para manufactura prototipo biela.

 		HOJA DE RUTA			
		NOMBRE DE PARTE:	<i>Biela motor Shindaiwa B450</i>	MATERIAL:	<i>Acero anti-desgaste HARDOX 450</i>
		NUMERO DE PARTE:	<i>0 0 1 - M S B450</i>	TAMAÑO:	<i>Lámina 200mm X 200mm X 10mm</i>
		APLICACIÓN:	<i>Shindaiwa / B450</i>	FECHA:	<i>29/11/2014</i>
		NIVEL DE ING. PRODUCTO:	<i>Liberado</i>	REV.:	<i>0 1</i>
		PLAN DE CONTROL N.:	<i>A 1</i>	HOJA:	<i>1 de 1</i>
		ELABORÓ:	<i>Andrés Lizcano</i>	APROBÓ:	<i>Dr. Ing. J. L. Chacón</i>
N.	OPERACIÓN	MAQUINA/HERRAMIENTA	TIEMPO DE PREPARACIÓN	TIEMPO DE CICLO	
10	<i>Corte, según archivo .dwg del cuerpo de la biela $\pm 0,0381$ mm; alojamiento pie biela $\varnothing 13,2921$ mm $\pm 0,0381$ mm; alojamiento cabeza biela $\varnothing 20,3025$ mm $\pm 0,0381$ mm</i>	<i>FLOW MACH 3 - 7320b</i>	<i>15 minutos</i>	<i>1 minuto</i>	
20	<i>Cementación localizada, tratamiento térmico de temple a los alojamientos de la biela con una profundidad de 800 μ (0,8 mm), a temperatura de 900 °C por 240 minutos</i>	<i>HORNO BAÑO EN SALES</i>	<i>180 minutos</i>	<i>480 minutos</i>	
30	<i>Recubrimiento por baño en Cobre ácido, a la totalidad del cuerpo de la biela, usando 1 kg de sulfato de Cobre, 123 c.c. de ácido sulfúrico, 5 litros de agua y una corriente de 5 amperios</i>	<i>TANQUE DE POLIMERO, ELECTRODOS, RECTIFICADOR, BAÑO DE COBRE SAL DE ROCHELA</i>	<i>10 minutos</i>	<i>119 minutos</i>	
40	<i>Rectificación alojamientos, alojamiento pie biela $\varnothing 13,0556$ mm $\pm 0,0127$ mm; alojamiento cabeza biela $\varnothing 20,0406$ mm $\pm 0,0127$ mm</i>	<i>TALADRO (BROCA HSS TUNGSTENO) + TORNO (BURIL PUNTA TUNGSTENO)</i>	<i>20 minutos</i>	<i>100 minutos</i>	

⁷³ Ibid. p. 971.

El anterior pantallazo muestra la hoja de ruta, la cual está dispuesta en dos partes, en la parte superior de la misma están los datos básicos que identifican el formato: el nombre, el logo de la entidad o empresa (en este caso la UIS y la Escuela de Ingeniería Mecánica); los datos de la pieza: nombre, parte número, materia prima, fecha, nivel de revisión, la persona encargada de elaborar el formato y la encargada de aprobar el mismo. En la segunda parte aparecen los datos de todos y cada uno de los procesos que se aplicaran a la pieza, en el caso del prototipo de biela son cuatro puntos, ver figura 148, según la secuencia de procesos: 10) la operación básica por corte con chorro de agua; 20) la operación para mejorar propiedades físicas por cementación y temple; 30) operación de acabado superficial por recubrimiento por electrodeposición y 40) proceso secundario de mecanizado para dar la medida final y rectificar los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela. Esta secuencia de operaciones se ha numerado así debido a que el proceso está sujeto a mejoras o actualizaciones por tanto de esta manera se pueden añadir otras operaciones sin cambiar el orden establecido de manufactura. Y cada una de las casillas donde están las operaciones listadas está dispuesta para que el operario pueda leer de allí: la secuencia que debe seguir, el trabajo que debe desarrollar, las máquinas/herramientas que debe utilizar y un tiempo de preparación y de ciclo establecido mínimo para desarrollar todo el proceso de manufactura diseñado para fabricar una biela.

5.1 COMPRA DE MATERIA PRIMA.

Dentro de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana no existe gran variedad de proveedores de aceros, esto se puede asegurar debido a la investigación que se hizo para el presente trabajo de grado (ver sección 4.2.1), en cambio en ciudades como Medellín, Bogotá o Cali la competencia es mayor y los

precios son más competitivos tanto así que en ocasiones, si el tamaño del material y el tipo es considerable como por ejemplo una barra redonda de acero AISI 4340 de 5 metros de largo por 40 mm de diámetro, es mucho más económico comprarla en Medellín pues aunque hay que pagar el transporte, aun así cuesta un 15% menos. Para la hechura de los prototipos se seleccionó una lámina de acero anti-desgaste comercialmente conocida como HARDOX 450 (ver sección 4.2.1), se realizó por tanto una orden de compra a nombre de la Compañía General de Aceros S.A. la cual se muestra en la figura 151.

Figura 151. Imagen orden de compra materia prima.

ORDEN DE COMPRA N. 001

Por concepto de compra de material para manufactura bielas.

Fecha: Viernes 11 de Julio de 2014.

Empresa: Compañía General de Aceros S.A.

Dirección: Carrera 14 N. 23-02

Teléfono: 6337708

Nit: 860.069.182-1

Número de pedido: 393705

ITEM	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	CANT	PESO	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Cortes lámina MAXDUR-450 Negro Rectangular	10mm X 200mm X 200mm	1	3,33 Kg	30.172	30.172
	SUBTOTAL	---	---	---	---	30.172
	VALOR FLETE	---	---	---	---	0
	I.V.A.	---	---	---	---	4.828
	VALOR NETO	---	---	---	---	35.000

Nota: código de producto N. 10222.

Atentamente,

Jose Hernando Villamizar

José Hernando Villamizar Villamizar

Est. Ing. Mecánica

C.C. _____ ;

Cel. _____

Dirección:

5.2 CORTE POR CHORRO DE AGUA.

La hoja de operación para el corte en frío por medio de chorro de agua a alta presión fue diseñada (al igual que los otros formatos) para mostrar en detalle los equipos, las máquinas, los insumos, los procedimientos, la secuencia y los tiempos que toma cada proceso de manufactura que debe aplicarse para obtener un producto de calidad que cumpla con los requerimientos y estándares de la industria.


En la figura 152 se muestra la hoja, en la parte superior de la misma están los datos básicos que identifican el tipo de formato, el número, el nombre, la entidad o empresa responsable (en el caso de una empresa debería ponerse el departamento responsable), la materia prima, la fecha, la revisión, la persona encargada de elaborar el formato y la encargada de aprobar el mismo. En la parte central aparecen los datos de la pieza que se está procesando: Nombre, número de parte, material, cantidad y una descripción general de la operación para que el operario que lea dicho formato tenga una idea integral de lo que se quiere obtener al final del proceso.

Seguidamente se muestra paso a paso las operaciones que él debe realizar, junto con las máquinas, los detalles y tiempos mínimos que debe cumplir para completar satisfactoriamente el proceso de manufactura en cuestión. Al final del formato se encuentra una guía consuetudinaria de calidad para que antes y después del proceso el operario rápidamente compruebe que la pieza se encuentra entre las tolerancias de calidad aceptadas. Por último cada formato tiene asociado un plano de detalle, el cual también se muestra como una imagen en la parte inferior derecha del formato para que el operario pueda revisar con más detalle la pieza.

En el caso concreto de esta rutina de corte en frío por chorro de agua se muestra que consta de seis (6) operaciones, utiliza una sola máquina y emplea un tiempo total de 20 minutos. Ver el formato completo en los anexos.

Figura 152. Imagen de la hoja de operación corte en frío.

HOJA DE OPERACIÓN: CORTE EN FRIO



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

PROCESO NUMERO: 0 1
 NOMBRE DEL PROCESO: Corte en frío
 ENTIDAD RESPONSABLE: HYDROBAS S.A.S.
 MATERIA PRIMA: Lamina Espesor 10 mm Acero antidesgaste Hardox 450

FECHA: 17/12/2014
 REVISIÓN: 0 1
 ELABORÓ: Andrés Lizcano
 APROBÓ Dr. Ing. J. L. Chacón

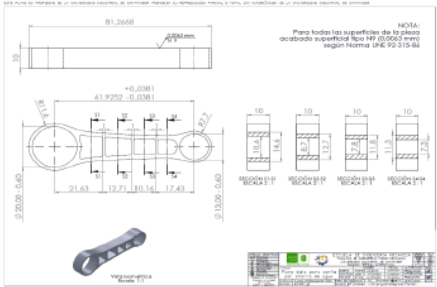
Parte N.	Nombre de la Pieza	Página	Descripción general	
0 0 1 - M 5 8450	Bielá motor Shindaiwa S450EC1	1 de 1	Corte en frío del cuerpo y alojamientos del diseño de biela desde una lamina de acero antidesgaste Hardox 450	
Material	Tamaño	Piezas por lote		
Acero H. 450	200 mm X 200 mm X 10 mm	Dos (2)		
N.	Operación	Detalle	Maquina	Tiempo de ciclo
1	Ingreso lamina Acero HARDOX 450	Ingreso lámina de acero rectangular precortada con plasma	FLOW MACH 3	20 minutos
2	Posicionamiento	Acomodación de la lámina para el corte		
3	Aproximación	Posicionamiento de la punta de corte de la máquina		
4	Carga datos	Alimentación software maquina con plano achivo .dwg biela		
5	Definición	Definición de las coordenadas de corte de la herramienta		
6	Corte	Proceso de corte en frío por chorro de agua		

CONTROL DE CALIDAD

Tamaño de la muestra: _____

- Ø interno Cabeza 19,4000 ± 0,0381 mm
- Ø interno Pie 12,4000 ± 0,0381 mm
- Distancia centros 61,9252 ± 0,0381 mm
- Ancho 10 ± 0,0381 mm
- Sin Material excedente
- Peso de la pieza 42,70 ± 0,30 g

% Piezas defectuosas: _____



NOTA:
Para todos los especificos de la pieza accionado superficial tipo H9 (0,0004 mm) según norma UNE 92-110-04


5.3 TRATAMIENTO TÉRMICO.

El formato de operación de cementación y temple localizado está enfocado para ser una guía de operación de mejoramiento de las propiedades mecánicas superficiales de la biela en el diámetro interno de los alojamientos del pie y de la cabeza, allí se muestra que la operación consta de siete (7) pasos, necesita de

tres tipos diferentes de máquinas y toma un tiempo de más de ocho (8) horas. Ver figura 153.

Figura 153. Imagen formato operación cementación y temple.

HOJA DE OPERACIÓN: CEMENTACION Y TEMPLE



PROCESO NUMERO: 0 2
 NOMBRE DEL PROCESO: Tratamiento Termico: Cementacion y Temple
 ENTIDAD RESPONSABLE: IMATT LTDA.
 MATERIA PRIMA: Biela cortada en frio

FECHA: 17/12/2014
 REVISIÓN: 0 1
 ELABORÓ: Andrés Lizcano
 APROBÓ Dr. Ing. J. L. Chacón

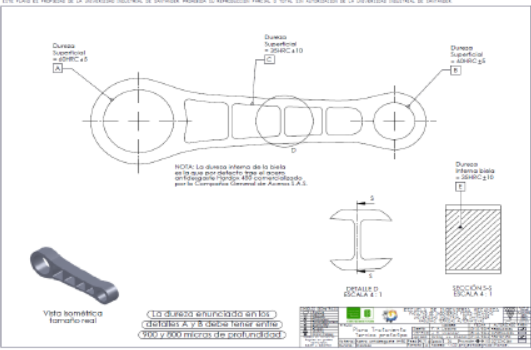
Parte N.	Nombre de la Pieza	Página	Descripción general	
0 0 1 - M 5 B450	Biela motor Shindaiwa S450EC1	1 de 1	Cementación en atmosfera carburante y temple localizado en la cabeza y el pie de la biela prototipo para alcanzar dureza de 60 HRC.	
Material	Tamaño	Piezas por lote		
Acero H. 450	Indicado en el plano	Una (1)		
N.	Operación	Detalle	Máquina	Tiempo operación
1	Alistamiento del Horno	Limpieza y ajuste del horno	Horno baño de sales	3 horas
2	Ingreso Biela	Calentamiento horno a 500 °C		
3	Calentamiento horno 900 °C	Pico de temperatura del proceso		
4	Sostenimiento horno a 900 °C	Cementación en atmosfera carburante	Horno baño de sales	4 horas
5	Enfriamiento en aceite	Temple	Recipiente con aceite	< 5 segundos
6	Revenido a 180 °C - 200 °C	Alivio de tensiones y liberación de gases de la pieza	Horno baño de sales	1 hora
7	Limpieza y aceitado	Remoción de escoria y capa protectora corrosión	Grateadora	5 minutos

CONTROL DE CALIDAD

Tamaño de la muestra: _____

- Ø interno Cabeza 19,400 ± 0,0381 mm
- Ø interno Pie 12,400 ± 0,0381 mm
- Distancia centros 61,9252 ± 0,0381 mm
- Dureza Ø internos 60 ± 5 HRC
- Sin Material excedente
- Peso de la pieza 42,70 ± 0,30 g

% Piezas defectuosas: _____



ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL SIN APROBACIÓN DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

NOTA: Las dimens. internas de la biela se toman por defecto tipo de aceros en el rango de 450-480 ppm de carbono, por la Compañía General de Aceros S.A.S.

Dureza Superficial = 58HRC ± 5
 Dureza Superficial = 58HRC ± 5
 Dureza Superficial = 60HRC ± 5
 Dureza Interna biela = 60HRC ± 5

Vista isométrica (prototipo real)

(C) de todos los derechos reservados
 CENITSA S.A.S. - Calle 100 No. 100-100
 4000 y 2000 metros de profundidad

5.4 RECUBRIMIENTO.

La operación de acabado necesaria para proteger la biela de la corrosión, el recubrimiento de cobre por electrodeposición, es la operación más meticulosa y ávida de insumos más que cualquier otra debido a la cantidad de variables que maneja el proceso; en total se necesita de seis (6) pasos, cinco (5) máquinas y

toma un tiempo de 90 minutos, pero demanda controlar la corriente que corre por la biela, la cual debe ser continua de 5 amperios y constante, además de cuidar la pieza de la fragilización por hidrógeno con el ingreso de la misma en horno a 190 [°C] por espacio de 10 minutos dos veces, luego de haberla limpiada y después de la operación de recubrimiento. El formato se muestra en la figura 154.

Figura 154. Imagen hoja de operación recubrimiento.

HOJA DE OPERACIÓN: RECUBRIMIENTO



PROCESO NUMERO: 03
 NOMBRE DEL PROCESO: Recubrimiento
 ENTIDAD RESPONSABLE: CROMACERO
 MATERIA PRIMA: Biela cortada con temple localizado

FECHA: 17/12/2014
 REVISIÓN: 0 1
 ELABORÓ: Andrés Lizcano
 APROBÓ Dr. Ing. J. L. Chacón

Parte N.	Nombre de la Pieza	Página	Descripción general		
001-M.S.8400	Biela motor Shindaiwa S450EC1	1 de 1	Cobrizado por medio de electrodeposición en solución de sulfato de cobre y ácido sulfurico utilizando corriente continua.		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Acero H. 450	Indicado en el plano	Una (1)			
N.	Operación	Detalle	Maquina	Tiempo de ciclo	Otros parametros
1	Limpieza pieza	Remover oxidos, suciedad, aceite	Grata + jabón + acidos	5 minutos	N.A.
2	Flash de cobre acido	Baño alcalino de la pieza en solución de Cobre	Tanque + electrodos	3 minutos	corriente continua
3	Desgasificación	Liberacion gases internos producto de la electrolisis	Horno	10 minutos	180 °C - 190 °C
4	Electrodeposicion	Baño de la pieza en solución de sulfato de Cobre (1 kg) + ácido sulfurico (123 c.c.) + agua (5 litros)	Tanque + electrodos + rectificador	90 minutos	5 amperios (c.c.)
5	Desgasificación	Liberacion gases internos producto de la electrolisis	Horno	10 minutos	180 °C - 190 °C
6	Limpieza superficial	Grateado de la pieza para quitar rebabas	Esmeril	1 minuto	N.A.

CONTROL DE CALIDAD

Tamaño de la muestra: _____

Profundidad recubrimiento 110 ±10 µm

Desgasificación

Sin Material excedente

Peso de la pieza 50,20 ± 0,5 g

% Piezas defectuosas: _____



Propiedades físicas de la Biela:

Densidad = 0,00785 gramos por milímetro cúbico

Masa = 42,705223 gramos

Volumen = 5440,1558 milímetros cúbicos

Área de superficie = 5699,6377 milímetros cuadrados


5.5 RECTIFICADO.

El rectificado de los alojamientos, diámetros o agujeros del pie y de la cabeza de la biela es la operación que finaliza el proceso de manufactura, que en total consta de cuatro pasos. El rectificado, es un proceso de mecanizado constituido por dos

partes: desbaste y acabado, la primera parte se realiza utilizando un taladro como máquina-herramienta que se trabaja con la mínima velocidad para aproximar los diámetros de la cabeza y del pie de la biela a la medida final. La segunda parte, el acabado, se realiza utilizando un torno con un buril punta de tungsteno como herramienta de corte y mediante la técnica de mecanizado conocida como alesado, a la mínima velocidad disponible en el torno, se le da la medida final (con tolerancia) a ambos diámetros. En esta operación se utilizan dos máquinas-herramientas y demanda de 120 minutos o 2 horas de tiempo; el formato se muestra en la figura 155.

Figura 155. Imagen hoja de operación rectificada.

HOJA DE OPERACIÓN: RECTIFICACIÓN ALOJAMIENTOS



PROCESO NUMERO: 04
NOMBRE DEL PROCESO: Rectificación
ENTIDAD RESPONSABLE: MECANIZADOS & MANTENIMIENTO S.A.S.
MATERIA PRIMA: Biela cortada, templada y cobrizada

FECHA: 17/12/2014
REVISIÓN: 01
ELABORÓ: Andrés Lizcano
APROBÓ: Dr. Ing. J. L. Chacón

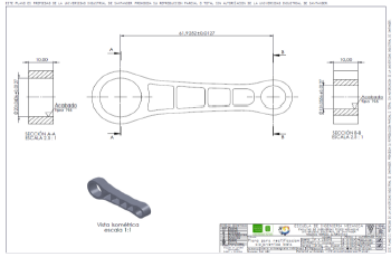
Parte N.	Nombre de la Pieza	Página	Descripción general		
001 - M 5 8450	Biela motor Shindaiwa S450EC1	1 de 1	Proceso de remoción de material por maquinado en Taladro y Torno para alcanzar la medida de los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela con su respectivo ajuste y acabado superficial.		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Acero H. 450	Indicado en el plano	Una (1)			
N.	Operación	Detalle	Máquina	Consumible	Tiempo de ciclo
1	Limpieza y preparación máquina-herram.	Instalación broca HSS de carburo de tungsteno	Taladro	N.A.	7 minutos
2	Taladrado Ø interno Cabeza	Aproximación diámetro cabeza de la biela	Taladro	N.A.	20 minutos
3	Limpieza y preparación máquina-herram.	Instalación broca HSS de carburo de tungsteno	Taladro	N.A.	7 minutos
4	Taladrado Ø interno Pie	Aproximación diámetro pie de la biela	Taladro	N.A.	20 minutos
5	Limpieza y preparación máquina-herram.	Instalación buril punta carburo de tungsteno	Torno	N.A.	7 minutos
6	Alesado Ø interno Cabeza	Rectificación medida y acabado final	Torno	N.A.	20 minutos
7	Limpieza y preparación máquina-herram.	Ajuste buril punta carburo de tungsteno	Torno	N.A.	7 minutos
8	Alesado Ø interno Pie	Rectificación medida y acabado final	Torno	N.A.	20 minutos
9	Limpieza exceso de material pieza	Remoción y lijado de rebabas del maquinado	Grata	N.A.	10 minutos

CONTROL DE CALIDAD

Tamaño de la muestra: _____

- Ø Interno Cabeza 20,0406 ± 0,0127 mm
- Ø Interno Pie 13,0556 ± 0,0127 mm
- Distancia centros 61,9252 ± 0,0127 mm
- Ancho 10 ± 0,0381 mm
- Rugosidad Acabado Tipo N6 (0,8 µm)
- Peso biela 34,7207 +/- 0,0500 g

% Piezas defectuosas: _____



5.6 CONTROL DE CALIDAD.

La calidad se define como “la totalidad de características de un producto o servicio que comprenden su capacidad para satisfacer necesidades determinadas.” según la ASQC (American Society for Quality Control). En un producto manufacturado como es el caso de la biela de un motor, la calidad tiene dos sentidos⁷⁴:

1. *Las características de productos*, son los aspectos del producto que provienen del diseño; son características funcionales y estéticas del artículo que pretenden atraer y aportar satisfacción al cliente (la suma de las características de un producto define su grado, de acuerdo con el nivel de mercado al que se dirige el producto); las características de un producto se deciden en el diseño y generalmente determinan el costo inherente del producto.
2. *Libre de deficiencias*, significa que el producto hace lo que se supone que debe hacer (dentro de las limitaciones de sus características de diseño) y que está exento de defectos y de condiciones fuera de lo tolerable, ver tabla 23, este aspecto de la calidad incluye los componentes individuales del producto, al igual que el producto mismo; cuando está libre de deficiencias significa que se apega a las especificaciones de diseño, lo cual se consigue en el proceso de manufactura. Aunque el costo de manufactura en un producto es una función de su diseño, minimizar el costo del producto al más bajo nivel posible dentro de los límites establecidos por su diseño, es en gran parte una cuestión de evitar defectos, desviaciones de las tolerancias y otros errores durante la producción. Las características de un producto son lo relativo a la calidad de la que se responsabiliza el o los

⁷⁴ JURAN, J. M., GRYNA, F. M., Quality Planning and Analysis, 3rd ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.

encargados del diseño. Las deficiencias en la calidad son responsabilidad del o los encargados de la manufactura.

Tabla 23. Aspectos de la calidad.

Aspecto de la calidad	Ejemplos
<i>Características del producto</i>	<i>Configuración del diseño, tamaño, peso</i> <i>Características distintivas del modelo</i> <i>Facilidad de uso</i> <i>Atractivo estético</i> <i>Funcionamiento y rendimiento</i> <i>Disponibilidad de opciones</i> <i>Confiablez</i> <i>Durabilidad y larga vida de servicio</i> <i>Posibilidad de recibir servicio</i> <i>Reputación del producto y el fabricante</i>
Libre de deficiencias	Libre de defectos Apego a las especificaciones Componentes dentro de las tolerancias No faltan partes No hay fallas al inicio


Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 1034.

De acuerdo a lo anterior, es lógico pensar que el control de calidad debe comenzar en la fuente: en las máquinas y en los procesos de fabricación. Es por esta razón que muchas empresas en la práctica utilizan un formato (ver figura 156) llamado carta de puesta a punto y/o lista de chequeo en la que cada operario encargado de cada máquina y proceso antes de realizar cualquier procedimiento u operación “calibre” o chequee su máquina para que ésta tenga las optimas condiciones y pueda realizar el trabajo de acuerdo a las especificaciones necesarias y suficientes de calidad, esta operación de verificación se realiza cada vez que hay un cambio de turno en la planta y cada vez que se vaya a comenzar una nueva operación de manufactura. En este formato (figura 156) puede verse que consta de cinco partes, las cuales son:

1. Encabezado, donde aparece el logo de la empresa, el tipo de formato y los datos específicos que identifican el producto que se está manufacturando, como el numero de parte, etc. **2. Herramental**, donde se especifican la o las herramientas y los parámetros de la misma. **3. Puesta a punto y lista de chequeo**, donde se especifican y verifican los parámetros tanto del proceso como las características que el producto debe tener al salir de dicho proceso. **4. Inspección**, que es un examen de calidad dentro del proceso mismo, donde se verifican características específicas del producto que el proceso o procesos deben imprimirle, esta es la esencia de la calidad en la fuente, pues si el producto no cumple con los mínimos requisitos no continua en la línea de producción sino que es devuelto inmediatamente al anterior paso de manufactura o incluso desechado si se sale de los límites de tolerancia mínimos. **5. Observaciones y datos adicionales**, en esta parte del formato se consignan o se leen datos importantes referentes al proceso, a las maquinas o al producto.

Dentro de los formatos de manufactura que se diseñaron para el presente trabajo de investigación, se especificó con el mayor grado de detalle las variables importantes y no negociables que deben controlarse en cada paso de la manufactura para que las piezas (sea una o miles) se fabriquen de la misma manera conforme al diseño original y con un mínimo de varianza de los parámetros del proceso; también se agregó a dichos formatos (ver anexos) un lista de chequeo de calidad para que el operario que termine de realizar su trabajo compruebe que las especificaciones de la pieza están dentro de los parámetros aceptables de fabricación y ésta pueda seguir a la siguiente operación; esta filosofía de calidad es algo cotidiano en empresas grandes y medianas que manejan grandes lotes de producción ya que la inspección se hace adyacente a la misma línea de producción lo que les ahorra grandes cantidades de tiempo y recursos.

Figura 156. Ejemplo carta puesta a punto/lista de chequeo.

<input type="checkbox"/> CARTA DE PUESTA A PUNTO					<input type="checkbox"/> LISTA DE CHEQUEO						
		NIP: _____		APLICACIÓN: _____		TRAZABILIDAD: _____					
		CELDA: _____		MAQUINA: _____		FECHA: _____					
		NIVEL DE ING. PLANO _____		PLAN DE CONTROL _____		TURNO _____					
						NIVEL DE REVISION _____					
HERRAMENTAL											
1. INSERTO SUPERIOR SUP / INF		MARTILLO 6300			1. EMPUJADOR PERFIL		2. CUCHILLA PERFIL				
DESBARBADO											
PUESTA A PUNTO Y LISTA DE CHEQUEO	HORNO	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO					CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO				
		NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIÓN DEL PARAMETRO	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO	NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO
		1	Coloración de la flama				5	Cascarilla			
		2	Temperatura Camara				6	Color de la pieza			
	3	Tiempo de Referencia									
	4	Lote de carga inicial									
	FORJADO	NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIÓN DEL PARAMETRO	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO	NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO
		2	Temperatura Matriz				5	Cascarilla			
		3	Lubricación Matriz				6	Grieta/ pliegue/ poros			
		4	Temperatura pieza				7	Rebasas			
						8	Foja incompleta				
	DESBARBADORA	NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIÓN DEL PARAMETRO	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO	NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO
3		Alineación Empujador Cuchilla Campana									
INSPECCIÓN EN EL PROCESO	INSPECCIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO					CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO				
		NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO	NUM	DESCRIPCIÓN CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	RESULTADO
		1	∅ Exterior Bocin				8	Grieta/ pliegue/ poros			
		2	Longitud Total				9	∅ Interior ensamble tubo			
		3	Espesor Brida								
		4	∅ Interior Bocin								
		5	Ancho de Brida								
	6	∅ Brida									
	7	Deformaciones									
	OBSERVACIONES: _____					PROGRAMA: _____		ABREVIATURAS NIP = NUMERO DE PARTE N. A. = NO APLICA P.A.P. = PUESTA APUNTO		F4-070-0209	
						DIMENSIONES EN mm				REVISION 1	

Fuente: FORCOL S. A.

Las técnicas de inspección y medición están muy relacionadas con el tema del control de calidad, ya que, el control de calidad de una pieza se relaciona con la detención de medidas fuera del rango de tolerancia preestablecido en el diseño y las acciones correctivas necesarias para eliminar dichas desalineaciones⁷⁵. Por tanto la filosofía de control de calidad aplicada a este proyecto está limitada a inspeccionar la biela en sus dimensiones y propiedades mecánicas comparándolas con las dimensiones y propiedades mecánicas asignadas en el diseño, durante y después de cada proceso. Según Groover, la moderna filosofía de control de calidad comprende un ámbito de actividades más amplio, que

⁷⁵ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 1033.

incluye el diseño robusto y el control estadístico de procesos. Sin embargo, para este trabajo de grado el enfoque de control de calidad que se ha aplicado, está enfocado al proceso de manufactura y al prototipo de biela, usando herramientas de medición convencionales de metrología como: micrómetro telescópico para agujeros, calibrador pie de rey, balanza de precisión, durómetro, termómetro, amperímetro, probeta y otros.

El uso de estos elementos de medición es indispensable para garantizar que las operaciones realizadas en el proceso de fabricación sobre la biela den la forma correspondiente a las dimensiones, las tolerancias, acabado superficial y propiedades mecánicas proyectadas en el diseño; por si solos estos elementos son necesarios para la comprobación de las dimensiones aunque no son suficientes pues se requiere de la implementación de una rutina o protocolo de medición de acuerdo a la geometría de la pieza y a las posibilidades de medición que ofrecen los instrumento en sí, para que las medidas que se hagan sobre la pieza capturen las dimensiones que se quieren evaluar y no otras o éstas queden erróneas. En el caso de la comprobación de las dimensiones de la biela, la medida más dificultosa de verificar es la altura, longitud o distancia entre centros (**Dc**) de los ejes de los diámetros de la cabeza y del pie de la biela, no por su complejidad o imposibilidad, sino porque no existe en el mercado un instrumento de medición que pueda medir fielmente esta distancia, para lo cual habría que diseñar, construir, probar y certificar un aparato de medición especial para las dimensiones de la biela, lo cual se sale de los objetivos del presente trabajo de grado; se opto por usar un elemento de medición convencional como el calibrador pie de rey y diseñar un sencillo protocolo (rutina) de medición para establecer esta medida, el cual consiste en la medición de ambos diámetros de la biela (el de la cabeza y el del pie) además de la medición de la distancia **L1** y **L2** (ver esquema en la figura 157), la distancia entre centros sería por tanto la sustracción o la adición de la

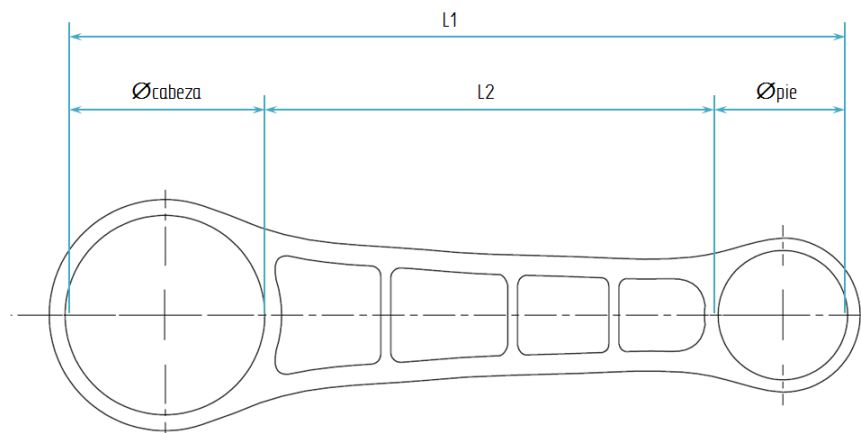
suma de los radios de ambos diámetros al valor medido de la distancia **L1** o **L2** respectivamente, es decir:

$$Dc = L1 - \left(\frac{\varnothing_{cabeza}}{2} + \frac{\varnothing_{pie}}{2} \right) = L2 + \left(\frac{\varnothing_{cabeza}}{2} + \frac{\varnothing_{pie}}{2} \right) \quad (71)$$

La tolerancia o diferencia admisible entre ambos resultados es de +/- 0,0381 [mm] sobre la medida original que es de 62,9252 [mm] (ver sección 2.3), tolerancia dada por la precisión de la máquina de corte en frío por chorro de agua y que en la práctica dicha desviación no influye en el rendimiento del motor (ver capítulo 3 y sección 4.3 de la presente investigación).

Los demás parámetros geométricos y propiedades físicas de la biela asignadas en el diseño no demandan de elaborados procedimientos o rutinas de medición, si no que permiten tomar las medidas directamente sobre la pieza y verificar su valor (ver figura 2 y sección 2.3 de la presente investigación).

Figura 157. Procedimiento o rutina de medición de longitud o altura biela.



En cuanto a la *medición*, según M. P. Groover, es: “un procedimiento en el cual se compara una cantidad desconocida con un estándar conocido, usando un sistema de unidades aceptado y consistente.” Esta medición proporciona un valor numérico de la cantidad que interesa, dentro de ciertos límites de precisión y exactitud. En cambio la *inspección*, “es un procedimiento en el cual se examina alguna característica de una parte o producto, tal como una dimensión, para determinar si se apega o no a la especificación de diseño.”

Muchos procedimientos de inspección se basan en técnicas de medición, mientras que otros usan métodos de calibración. La *calibración* determina sencillamente si la característica de la parte cumple o no con la especificación del diseño. Por lo general es más rápida que la medición, pero proporciona información insuficiente del valor real de la característica que nos interesa.⁷⁶

Cada vez que se realiza una medición implícitamente se están aplicando conceptos y principios, que según M. P. Groover, son la exactitud y precisión. “La *exactitud* es el grado en el que un valor medido coincide con el valor verdadero de la cantidad que nos interesa. Un procedimiento de medición es exacto cuando no tiene errores sistemáticos. Los errores sistemáticos son desviaciones positivas o negativas del valor verdadero que son consistentes de una medición a la siguiente.

La *precisión* es el grado en el que se puede repetir el proceso de medición. Una buena precisión significa que se reducen al mínimo los errores aleatorios en el procedimiento de medición. Por lo general los errores aleatorios se asocian con la participación humana en el proceso de medición. Entre los ejemplos están las

⁷⁶ *Ibid.* P. 1007.

variaciones en la preparación, la lectura imprecisa de la escala, las aproximaciones redondeadas, etc. Entre los elementos no humanos que contribuyen al error aleatorio están los cambios de temperatura, el desgaste gradual y el desajuste en los elementos funcionales de un artículo y otras variables. Se supone que los errores aleatorios obedecen a una distribución estadística normal cuya media es cero... La distribución normal posee ciertas propiedades bien definidas, incluyendo el hecho de que 99,73% de la población se encuentra dentro del $\pm 3\sigma$ de la medida de la población. Con frecuencia esto se considera como indicio de la precisión de un instrumento de medición.”⁷⁷

En el caso del control de calidad implementado en el presente trabajo de grado, adyacente a la manufactura, la inspección de los parámetros geométricos y físicos establecidos en el diseño de la biela, el principio de medición que más hay que tener en cuenta es el de la exactitud, ya que, la medición se realiza solamente a los prototipos de la presente investigación y no a un lote de piezas, por tal razón se debe tener especial cuidado de que las herramientas de medición estén correctamente calibradas para que el valor a medir sea el correcto y tenga la menor desviación tanto positiva como negativa posible; en este caso la seguridad de que las medidas se hicieron correctamente está en que cada empresa escogida para llevar a cabo cada uno de los procesos de manufactura de los prototipos del diseño de la biela, cuenta con personal y herramientas calificadas además de la experiencia de muchos años, lo que respalda aún más el trabajo efectuado por ellos.

Continuando con la filosofía de medición e inspección en la industria de la manufactura desarrollada por M. P. Groover, plantea que: “Otro aspecto de un instrumento de medición es su capacidad para captar diferencias muy pequeñas

⁷⁷ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 1008.

en la cantidad que interesa. La indicación de esta característica es la variación más pequeña de la cantidad que puede detectar el instrumento. En general se aplican los términos de *resolución* y *sensibilidad* para este atributo en un dispositivo de medición. Algunas medidas, en especial en un ambiente de manufactura, deben hacerse con rapidez. La capacidad de un instrumento de medición para indicar la cantidad en el mínimo periodo se denomina *velocidad de respuesta*. En condiciones ideales, el periodo debe ser cero; sin embargo, éste es un ideal imposible. Las anteriores características se usan como criterios para seleccionar un dispositivo de medición. Debe mencionarse que pocos instrumentos de medición obtienen marcas perfectas en todos los criterios. En general, es necesario comprometer algunos aspectos para ganar otros cuando se elige un dispositivo para determinada aplicación, y debe ponerse énfasis en aquellos criterios que son más importantes.”⁷⁸

Otro aspecto importante en cualquier procedimiento de medición e inspección, afirma M. P. Groover, es la comparación del valor desconocido con un estándar conocido; y continua: “Son muy importantes dos aspectos de un estándar: 1) debe ser consistente y no cambiar con el tiempo y 2) debe basarse en un sistema de unidades que sea consistente y acepten los usuarios. En la época moderna, los estándares para longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura y luz se definen en términos de fenómenos físicos, porque existe la confianza de que no se alterarán. En el mundo han evolucionado principalmente dos sistemas de unidades: 1) el sistema usual de Estados Unidos (U.S.C.S), y 2) el Sistema Internacional de Unidades (SI o sistema métrico).” En la presente investigación se ha decidido usar el sistema métrico como estándar.

⁷⁸ Ibid. P. 1009.

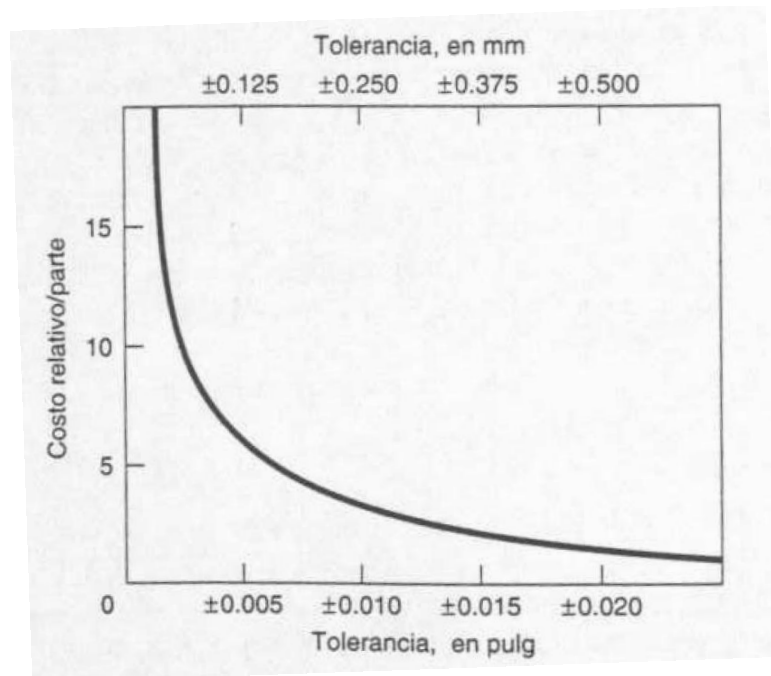
Retomando lo expuesto por M. P. Groover respecto al control de calidad, explica los principios de la inspección en la misma: “La *inspección* implica el uso de técnicas de medición y calibración para determinar si un producto, sus componentes, subensambles o materiales iniciales se apegan a las especificaciones del diseño. El diseñador del producto establece las especificaciones, y para los productos mecánicos éstas se refieren a las dimensiones, acabados de superficie y características similares. La inspección se realiza antes, durante y después de la manufactura. Las inspecciones se dividen en dos tipos: 1) *inspección por variables*, en la cual las dimensiones del producto o parte se miden mediante instrumentos de medición apropiados; y 2) *inspección por atributos*, en la cual las partes se calibran para determinar si están dentro de los límites de tolerancia o no. La ventaja de medir las dimensiones de una parte es que se obtienen datos acerca de sus valores reales. Cuando una dimensión de parte se calibra simplemente, todo lo que se sabe es si está dentro de la tolerancia, es demasiado grande o demasiado pequeña. Por otra parte, la calibración puede hacerse con rapidez y a un costo bajo.”⁷⁹

En conclusión, según M. P. Groover: “lo que *la inspección* busca es determinar la calidad del producto en relación con las especificaciones de diseño”; en ese sentido se ha dispuesto de dicha filosofía de calidad para asegurar que las especificaciones de la biela en la manufactura cumplen con los requerimientos asignados en el diseño, esta inspección se ha planeado para que sea manual, no automatizada y por contacto, utilizando herramienta de medición convencional como ya se mencionó; en ese orden de ideas debido a que se trata de un par de piezas y no de miles, no se hace necesario el uso del muestreo estadístico, es posible afirmar entonces que el aseguramiento de la calidad se realiza con un muestreo contra inspección al 100%.

⁷⁹ *Ibíd.* P. 1010.

Un tema de vital importancia para la calidad, Según M. P. Groover, es el tema de las tolerancias. “Los ingenieros de diseño tienden a designar tolerancias en las dimensiones de los componentes y ensambles; con base en sus conocimientos y experiencia, pueden predecir cómo afectarán las variaciones de tamaño del funcionamiento y el rendimiento. La experiencia indica que las tolerancias más estrechas provocan un mejor rendimiento. Se da poca importancia al costo provocado por las tolerancias que son indebidamente estrechas en relación con la capacidad del proceso (ver relación tolerancia/costo en la figura 158). Conforme se reduce la tolerancia, el costo para alcanzar la tolerancia aumenta a una velocidad de aceleración. Entre las razones están: 1) pueden requerirse pasos de procesamiento adicionales para obtener tolerancias más estrechas y 2) pueden requerirse máquinas de producción que sean más precisas y costosas.

Figura 158. Relación general entre las tolerancias y el costo de manufactura.



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall, Primera edición, 1997. p. 1036.

El ingeniero de diseño debe considerar esta relación. Aunque al asignar tolerancias debe considerarse principalmente el funcionamiento, el costo también es un factor y cualquier alivio que pueda proporcionarse a los departamentos de manufactura en forma de tolerancias más amplias, sin sacrificar el funcionamiento del producto, vale la pena.”⁸⁰

En el presente trabajo de grado se ha optado por usar tolerancias de diseño según la aplicación a la que va a ser sometida la pieza a fabricar, en este caso la industria automotriz, no es posible el uso de tolerancia estadística debido a que la manufactura está limitada a dos piezas, las tolerancias se han especificado con base en la variabilidad disponible que conseguirá el funcionamiento y el rendimiento requerido; M. P. Groover, lo especifica de la siguiente manera: “Las tolerancias de diseño deben ser compatibles con la capacidad de proceso. No tiene caso especificar una tolerancia de $\pm 0,001$ pulgadas en una dimensión si la capacidad de proceso es significativamente más amplia que $\pm 0,001$ pulgadas. Debe ampliarse la tolerancia (si lo permite la funcionalidad del diseño) o debe seleccionarse una operación de manufactura distinta. Lo ideal es que la tolerancia especificada debe ser más grande que la capacidad del proceso. Si el funcionamiento y los procesos disponibles lo impiden, debe incluirse la clasificación en la secuencia de manufactura para inspeccionar cada unidad y separar las que cumplen especificaciones de las que no lo hacen.

Por lo general, los ingenieros de diseño de productos no establecen las tolerancias en sus límites naturales; éstas se especifican con base en la variabilidad disponible que obtendrá el funcionamiento y el rendimiento requerido. Es útil conocer la razón de la tolerancia especificada en relación con la capacidad del proceso: se indica mediante el índice de capacidad de proceso, definido como:

⁸⁰ Ibid. p. 1036.

$$PCI = T/6*\sigma \quad (72)$$

En donde PCI = índice de capacidad de proceso; T = rango de tolerancia, la diferencia entre los límites superior e inferior de la tolerancia especificada; y 6σ = límites naturales de tolerancia. La suposición implícita en esta definición es que la media del proceso se establece igual a la especificación nominal de diseño, por lo que el numerador y el denominador en la ecuación (72) se centra alrededor del mismo valor.”⁸¹

Ahora bien, la decisión de establecer un valor apropiado para las tolerancias a utilizar en la fabricación de los prototipos del presente proyecto se basó: en el nuevo diseño de la biela, en la metrología de la biela original del motor, en las dimensiones de la canastilla y del pasador de la cabeza y del pie de la biela original respectivamente, del catálogo de rodamientos para bielas de la empresa NBS⁸² y de las recomendaciones dadas en el libro Manufactura, ingeniería y tecnología por el autor del libro S. Kalpakjian, las cuales se exponen a continuación:

“Eventualmente, las partes y los componentes manufacturados de manera individual se ensamblan como productos. Damos por hecho que cuando se fabrican y ensamblan mil podadoras, cada parte coincide en forma apropiada con otro componente. Por ejemplo, las ruedas de la podadora se deslizan con facilidad en sus ejes, o los pistones ajustan de manera adecuada dentro de los cilindros, no quedando ni apretados ni flojos. La tolerancia dimensional se define como la

⁸¹ Ibid. P. 1037.

⁸² EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on line]. <<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

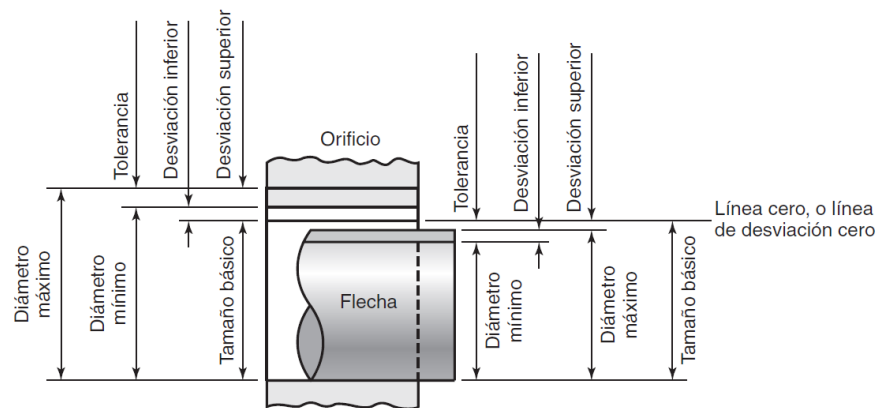
variación permisible o aceptable de las dimensiones (altura, anchura, profundidad, diámetro y ángulos) de una parte. La raíz de la palabra “tolerancia” es el latín *tolerare*, que significa “soportar” o “tolerar”. Las tolerancias son inevitables, dado que es virtualmente imposible (e innecesario) manufacturar dos partes que tengan las mismas dimensiones. Además, debido a que las tolerancias cerradas pueden incrementar el costo del producto de manera significativa, un intervalo de tolerancia estrecha es indeseable económicamente. Sin embargo, en el caso de algunas partes, las tolerancias cerradas son necesarias para el funcionamiento apropiado y se justifica el gasto adicional asociado con los intervalos estrechos de tolerancia. Ejemplos son los instrumentos de medición y calibradores de precisión, los pistones hidráulicos y los rodamientos para motores de aeronaves. Las tolerancias dimensionales sólo se vuelven importantes cuando una parte se va a ensamblar o se va a hacer coincidir con otra. Las superficies independientes y que no son funcionales no requieren un control cerrado de la tolerancia. Así, por ejemplo, *la exactitud de los orificios y la distancia entre ellos en una biela son mucho más críticas que la anchura y el espesor de la misma en diversos puntos a lo largo de su longitud.*⁸³

De acuerdo a lo anterior las dimensiones críticas de la biela diseñada para la presente investigación que demandan un maquinado con tolerancia y acabado superficial específico son los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela y la distancia entre ellos (definida como longitud o altura de biela). Las tolerancias, los ajustes y los acabados superficiales son un tema muy importante en la manufactura, es así como se ha estandarizado una nomenclatura para designarlos, por ejemplo S. Kalpakjian explica que: “Se ha establecido cierta terminología para definir con claridad estas cantidades geométricas, como el sistema de la International Organization for Standardization (ISO) –ver figura 159.

⁸³ KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 1102.

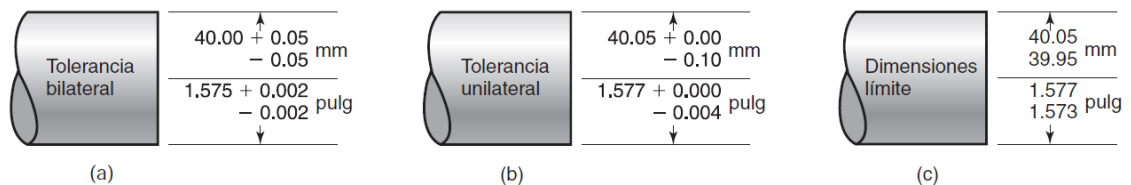
Obsérvese que tanto la flecha como el orificio tienen diámetros mínimos y máximos, respectivamente, siendo la diferencia entre ellos la tolerancia para cada miembro. En un plano apropiado de ingeniería se especificarían estos parámetros con valores numéricos (ver figura 160).”⁸⁴

Figura 159. Tamaño básico, desviación y tolerancia de acuerdo al sistema ISO.



Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 1103.

Figura 160. Métodos para asignar tolerancias a una flecha.



Fuente: KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación. Quinta edición, México, 2008. p. 1103.

⁸⁴ Ibid. P. 1103.

En base a las recomendaciones de las normas ISO para tolerancias en rodamientos contenidas en el catálogo de la empresa NBS⁸⁵, los rodamientos para uso general se fabrican con clase de tolerancia tipo P0. Las tolerancias ISO para orificios (en este caso los orificios serían ambos alojamientos de la biela) están basado en la norma: DIN ISO 286-2. En el caso de la presente investigación fueron usadas las tolerancias tipo E7 (ver figura 161) para orificios que se encuentran entre 10 [mm]/18 [mm] (que es el caso del diámetro del pie de la biela) y para orificios entre 18 [mm]/30 [mm] (que es el caso del diámetro de la cabeza de la biela).

Figura 161. Tabla de tolerancias ISO para orificios.



Tolerancias ISO para orificios (DIN ISO 286-2) - Lubrication holes ISO clearance

Sigla Designación	Diferencia teórica Theoric Deviation	Campo dimensional teórico en mm / Dimensional range mm																												
		más de 3 over 3	6	10	18	30	40	50	65	80	100	120	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	
		más de 6 over 6	10	18	30	40	50	65	80	100	120	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000	
Diferencias en µm / Deviation µm																														
E 6	sup.	+28	+34	+43	+53	+66	+79	+94	+110	+129	+142	+161	+175	+189	+210	+226														
	inf.	+20	+25	+32	+40	+50	+60	+72	+85	+100	+110	+125	+135	+145	+160	+170														
E 7	sup.	+32	+40	+50	+61	+75	+90	+107	+125	+146	+162	+182	+198	+215	+240	+260														
	inf.	+20	+25	+32	+40	+50	+60	+72	+85	+100	+110	+125	+135	+145	+160	+170														
E 11	sup.	+95	+115	+142	+170	+210	+250	+292	+335	+390	+430	+485	+535	+585	+660	+730														
	inf.	+20	+25	+32	+40	+50	+60	+72	+85	+100	+110	+125	+135	+145	+160	+170														
E 12	sup.	+140	+175	+212	+250	+300	+360	+422	+485	+560	+630	+695	+765	+845	+960	+1070														
	inf.	+20	+25	+32	+40	+50	+60	+72	+85	+100	+110	+125	+135	+145	+160	+170														
E 13	sup.	+200	+245	+302	+370	+440	+520	+612	+715	+820	+920	+1015	+1105	+1245	+1410	+1570														
	inf.	+20	+25	+32	+40	+50	+60	+72	+85	+100	+110	+125	+135	+145	+160	+170														
F 6	sup.	+18	+22	+27	+33	+41	+49	+58	+68	+79	+88	+98	+108	+120	+130	+142														
	inf.	+10	+13	+16	+20	+25	+30	+36	+43	+50	+56	+62	+68	+76	+80	+86														

Fuente: EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on-line].

<<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

⁸⁵ EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on line]. <<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

En cuanto al juego radial que se debe dejar para los rodamientos de agujas el catálogo⁸⁶ especifica lo siguiente: “Uno de los principales factores que influyen en la durabilidad de los rodamientos de agujas es el juego radial, determinado como el valor medio de varias medidas del desplazamiento total sobre el plano perpendicular al eje del rodamiento. Dicho desplazamiento es típico de uno de los aros del rodamiento (el otro es estacionario) durante la rodadura en varias direcciones angulares, tanto respecto al aro rotativo como también respecto al estacionario y a diversas posiciones angulares de la serie de bolas o rodillos respecto a los aros mismos. Considerados los diversos coeficientes de juego requeridos en la entrega, los rodamientos rígidos se realizan según varios grupos de juego inicial. En general, los rodamientos de agujas se realizan según el grupo de juego radial normal **CN**, que, en empleos comunes en la mayor parte de los casos, suministran parámetros satisfactorios de funcionamiento. El juego radial se evidencia añadiendo la Designación de la clase de precisión (**C2, C3, C4, C5**) a la sigla del rodamiento mientras que a los rodamientos fabricados con un juego radial correspondiente al grupo normal no se les añaden otras designaciones convencionales.”

En base a lo anterior, la tolerancia radial entre el agujero de la biela y los rodamientos se usó el juego radial **CN** (ver figura 162) para ambos agujeros teniendo en cuenta que para el rodamiento que va en la cabeza de la biela, que la acopla al cigüeñal se utilizó el respectivo rodamiento **KZK 15X20X10** (ver figura 163) y para el rodamiento que va en el pie de la biela, que la conecta al pistón se utilizó el rodamiento con referencia **KBK 10X13X16** (ver figura 164); con base a los diámetros nominales del muñón del cigüeñal y del bulón del pistón de 15 [mm] y 10 [mm] respectivamente (ver medidas tolerancias en el maquinado en la sección 4.2.5).

⁸⁶ EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on line]. <<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

Figura 162. Tolerancia radial rodamientos de agujas de rodillos cilíndricos.

Diámetro orificios (mm) Bore diameter (mm)		Juego radial (μm) - Radial clearance (μm)							
		C2		CN		C3		C4	
		mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.
-	24	0	25	20	45	35	60	50	75
24	30	0	25	20	45	35	60	50	75
30	40	5	30	25	50	45	70	60	85
40	50	5	35	30	60	50	80	70	100
50	65	10	40	40	70	60	90	80	110
65	80	10	45	40	75	65	100	90	125
80	100	15	50	50	85	75	110	105	140
100	120	15	55	50	90	85	125	125	165
120	140	15	60	60	105	100	145	145	190
140	160	20	70	70	120	115	165	165	215
160	180	25	75	75	125	120	170	170	220
180	200	35	90	90	145	140	195	195	250
200	225	45	105	105	165	160	220	220	280
225	250	45	110	110	175	170	235	235	300
250	280	55	125	125	195	190	260	260	330
280	315	55	130	130	205	200	275	275	350
315	355	65	145	145	225	225	305	305	385
355	400	100	190	190	280	280	370	370	460
400	450	110	210	210	310	310	410	410	510
450	500	100	220	220	330	330	440	440	550

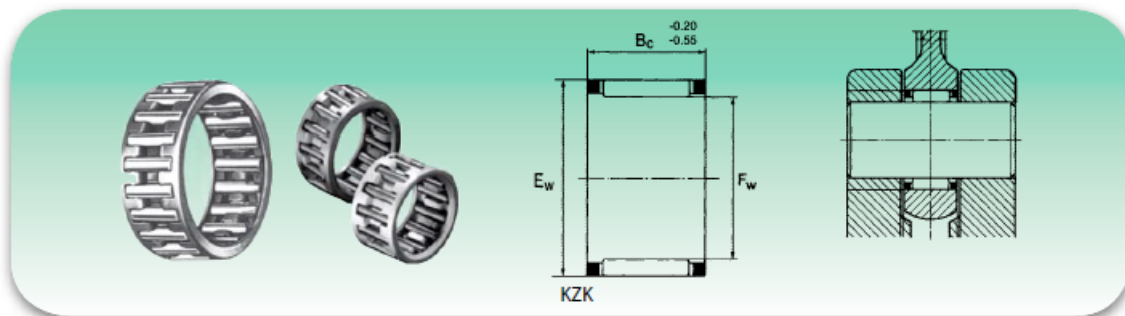
Fuente: EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on-line].

<<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

Figura 163. Rodamiento agujas serie KZK.



Jaulas de agujas para articulaciones de bielas, soporte botón de manivela (serie KZK)
Needle roller and cage assemblies for crank pin of connecting rod (KZK series)



Diámetro eje (mm) Shaft diameter (mm)	Sigla Designation	Peso (g) Weight (g)	Dimensiones (mm) Dimensions (mm)			Coeficientes de carga (N) Basic load ratings (N)	
			F_w	E_w	B_c	Dinámico C Dynamic C	Estático C_s Static C_s
8	KZK 8x12x8	1.9	8	12	8	4 700	4 580
10	KZK 10x14x10	3.3	10	14	10	5 000	5 160
12	KZK 12x15x13	3.6	12	15	13	5 300	7 400
	KZK 12x16x10	3.5	12	16	10	6 100	6 900
	KZK 12x16x11	3.7	12	16	11	6 200	7 100
	KZK 12x17x10	5	12	17	10	7 020	7 020
14	KZK 12x18x10	7.8	12	18	10	7 400	7 200
	KZK 14x18x10	4	14	18	10	7 100	8 500
	KZK 14x19x10	5.5	14	19	10	7 300	7 600
	KZK 14x19x12	7.5	14	19	12	7 460	7 950
15	KZK 14.4x20.4x10	6.5	14.4	20.4	10	8 100	7 800
	KZK 15x19x9	5	15	19	9	6 800	7 100
	KZK 15x19x10	6	15	19	10	7 200	8 400
	KZK 15x20x10	7.5	15	20	10	7 800	9 100
	KZK 15x21x10	8.5	15	21	10	8 400	10 500
	KZK 15x21x11	9.5	15	21	11	8 500	10 700
	KZK 15.2x22.2x12	11.5	15.2	22.2	12	8 600	11 100

Fuente: EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on-line].

<<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

Figura 164. Rodamiento agujas serie KBK.



Diámetro eje (mm) Shaft diameter (mm)	Sigla Designation	Peso (g) Weight (g)	Dimensiones (mm) Dimensions (mm)			Coeficientes de carga (N) Basic load ratings (N)	
			F _w	E _w	B _c	Dinámico C Dynamic C	Estático C _s Static C _s
8	KBK 8x11x10	1.85	8	11	10	3 500	4 000
	KBK 8x12x10	2	8	12	10	3 700	4 100
9	KBK 9x12x11.5	2.4	9	12	11.5	4 200	4 800
	KBK 9x12x13	2.75	9	12	13	4 600	5 800
	KBK 9x12x14	3.5	9	12	14	4 700	5 900
	KBK 9x13x12	4.1	9	13	12	5 300	5 700
	KBK 9x13x12.5	4.9	9	13	12.5	5 300	5 700
	KBK 9x13x13	5.1	9	13	13	5 350	5 600
10	KBK 10x13x8	2	10	13	8	4 000	5 000
	KBK 10x13x10	2.4	10	13	10	4 200	5 200
	KBK 10x13x14.5	5.1	10	13	14.5	5 400	6 600
	KBK 10x13x16	5.7	10	13	16	6 800	7 700
	KBK 10x14x10	3.4	10	14	10	4 400	4 600
	KBK 10x14x11	4	10	14	11	5 200	5 700
	KBK 10x14x12	4.5	10	14	12	5 400	6 000
	KBK 10x14x12.5	4.85	10	14	12.5	5 600	6 200
	KBK 10x14x13	5.4	10	14	13	5 600	6 200

Fuente: EURO BEARING SPAIN. Catálogo rodamientos jaula de agujas [on-line].

<<http://www.eurobearings.es/ecatalogos/eCatalogo-jaulas-de-agujas-nbs/ecatalogo-jaulas-de-agujas-nbs.pdf>> [citado en 14 de enero de 2015]

Figura 165. Fin.



Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. 4 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2009. p. 726.

6. CONCLUSIONES

- Se identificó completamente la composición química del material de la biela original mediante el análisis de espectrometría por chispa, el cual resultó ser un acero al cromo entre 0,8% y 0,9% con una dureza de 335 Brinell con lo cual también se identificó un tratamiento térmico de temple en agua resultando ser un acero similar al AISI/SAE tipo 5120.
- Se encontró que el número de diferencias finitas idóneo para el análisis de la pieza es de cuatrocientos mil elementos donde convergieron los datos de esfuerzo con un porcentaje de error de 4,8% con respecto a los valores entregados por mallas que no se ajustaban a la curvatura, por lo cual se utilizó éste tipo de mallas que aumentaron la convergencia y la precisión sin sacrificar tiempo y recurso computacional.
- Se Diseñó la biela usando las herramientas computacionales COMSOL Multiphysics® y SolidWorks® a su vez se verificó los datos resultantes utilizando la metodología del libro de Shigley junto con la manufactura de la pieza y los respectivos ensayos de dureza, compresión y metrología aplicados. Con la excepción de la prueba física a la fatiga, debido a que se necesita de un banco de pruebas especializado para efectuar dicho estudio.
- La caracterización de la biela permitió identificar un límite elástico de 843,60 MPa para el material con el que fue diseñada y construida esta pieza, además del proceso de fabricación por forja a la que fue sometida y el tratamiento térmico de temple que se le aplicó, resultando una efectiva ingeniería inversa utilizando únicamente los laboratorios y recursos disponibles en la Universidad Industrial de Santander.

- Los métodos, medios y materiales de fabricación que existen en Bucaramanga y su Área Metropolitana se encuentran en una etapa de desarrollo tal que permiten la fabricación con estándares de calidad loables y en cantidades mayor a las cinco mil unidades en el caso del forjado para las piezas del mecanismo Cigüeñal-Biela-émbolo de un motor de combustión interna de dos tiempos de pequeña cilindrada.
- Se fabricaron dos bielas prototipo tal como se indica en los objetivos específicos del presente trabajo de investigación utilizando los materiales y recursos de manufacturas existentes en esta región del País; se fabricó primero un prototipo para comprobar las propiedades mecánicas dispuestas en el diseño; una vez fueron comprobadas dichas características se procedió a la fabricación del segundo prototipo.
- Aunque se cumplieron todos los objetivos de la presente investigación, la prueba final de instalación y funcionamiento de la biela en un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada equivalente al original, no se pudo comparar rigurosamente el efecto puntual en el rendimiento y en los parámetros medibles del motor debido a la falta de un banco de pruebas de M. T. A.

7. RECOMENDACIONES

- El orden de los pasos de manufactura de la biela puede modificarse pero no reducirse; el proceso de recubrimiento por electrodeposición aplicado puede realizarse al final de todas las operaciones diseñando un gancho que sea soporte y a la vez electrodo ubicándolo en los diámetros internos del pie y de la cabeza de la biela, así es recubrimiento se distribuye mas uniformemente por toda la biela.
- En la operación de corte en frio por chorro de agua la medida de los diámetros internos de la cabeza y del pie de la biela puede dejarse sin sobre-material ya que el tratamiento de cementación y temple no modifica las dimensiones y cualquier irregularidad puede ser corregida en el maquinado para rectificación, optimizando de esta manera la manufactura.
- Se recomienda profundizar en el análisis del recubrimiento de la biela original ya que no se le realizó un análisis químico por chispa directamente, además en el proceso de ensayos no destructivos éste resultó modificado con la limpieza y la aplicación de los productos.
- Para conocer realmente el número de ciclos de esfuerzos que el prototipo de biela diseñado puede soportar, se hace necesario una prueba de fatiga entre el intervalo de fuerzas en que opera el motor.
- A los demás compañeros que están fabricando las demás piezas del motor, más exactamente a los compañeros del cigüeñal se les recomienda tener en cuenta la geometría especial del prototipo de biela diseñado en la presente investigación para que ésta no llegue a interferir con su diseño.

BIBLIOGRAFÍA

ARMAS VERGEL, Octavio, *et al.* Motores de Combustión Interna Alternativos. Barcelona: Editorial Reverté, 2012. 1002 p.

BUDYNAS, R. y NISBETT, J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F.: McGraw-Hill, 2008. 1059 p.

CASTELLAR BUELVAS, Jairo Daniel y ROMERO MARTINEZ, Leonardo José. Desarrollo de una herramienta software para el diseño de motores de combustión interna de dos tiempos (fase I). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2014. 189 p.

CLIMENT, Héctor. Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña cilindrada. Barcelona: Editorial Reverté, 2004. 243 p.

GREUTER, Ernst and ZIMA, Stefan. Engine Failure Analysis: Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. Warrendale: SAE International, 2012. 568 p.

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. México: McGraw-Hill, 2007. 1022 p.

JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Editorial MIR, 1982. 650 p.

KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. México D.F.: Pearson Educación, 2008. 1295 p.

MOTT, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. México D.F.: Pearson Educación, 2006. 930 p.

ANEXOS

Table 6.2
Contribution of Engine and Engine Peripherals
to Vehicle Breakdowns (Source: [6-4])

Ignition	29.7%
Fuel system	13.9%
Fuel injection	13.1%
Cooling	17.7%
Engine	25.7%

These, too, can be statistically documented [see also 6-1, 6-2]. Pistons and cylinder sleeves, connecting rods, crankshaft, and bearings are the components most frequently affected by engine failures (Fig. 6.2).

6.2 Crank train failures

6.2.1 Pistons

The piston is the central component of the so-called *piston machine*, which encompasses not only engines, but also pumps and compressors. In an engine, pistons perform the following functions; see also Fig. 6.3:

- Provide a variable working space (cylinder) boundary
- Seal the working space

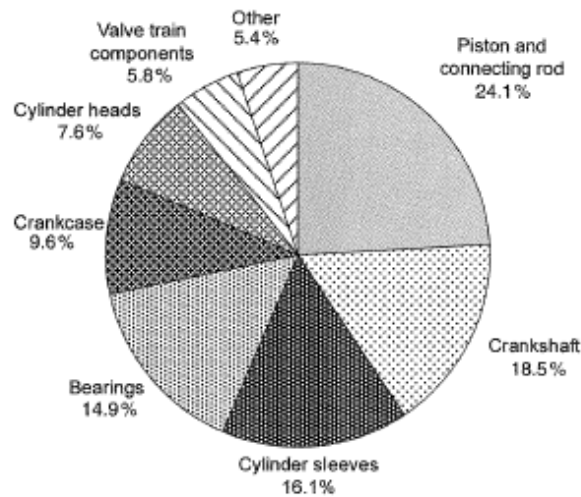


Fig. 6.2 Combustion engine failures by location. Source: Allianz

BIBI INTECA S.L.

⁸⁷ GREUTER, Ernst and ZIMA, Stefan. Engine Failure Analysis: Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. SAE International. Warrendale, 1st Ed. 2012. P 190-203.

3187101818

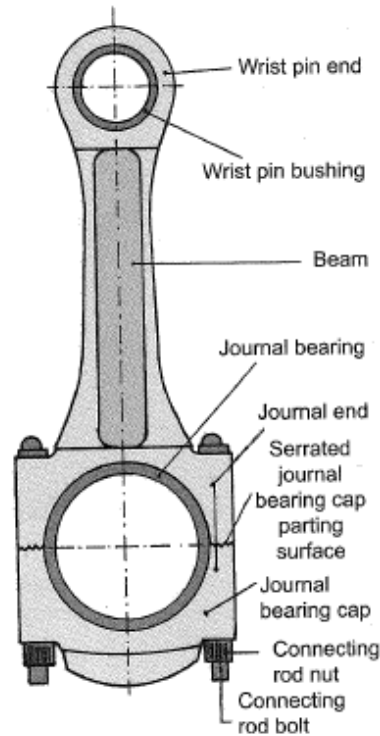


Fig. 6.128 Connecting rod terminology.

combination, type, geometry, and pretension of piston rings, cylinder wall surface treatment (honing), deformation behavior of piston, and cylinder sleeve. The latter is in turn affected by crankcase stiffness. Oil consumption is determined not only by the piston group, but also by valve stems, with oil able to pass through the valve guides, as well as crankcase ventilation.

6.2.3 Connecting rods

As part of the crank train, the connecting rod is tasked with transferring displacement and forces from the piston to the crankshaft—and vice versa. It also represents the kinematic link between piston and crankshaft. The connecting rod consists of a wrist pin end (the “small end”), a beam, and a journal end (the “big end”). The journal end is made up of a connecting rod head and bearing cap. The wrist pin end

is connected to the piston by means of the wrist pin; the journal end is connected to the crankshaft by means of a crankpin journal (Fig. 6.128).

The wrist pin end executes an oscillating (pure reciprocating) motion, while the journal end does a rotating motion, and the beam a swinging motion (Fig. 6.129). Because of increased engine power and the resulting larger crankpin diameters, the journal end will no longer pass through the cylinder bore; accordingly, for high-speed diesel engines, the bearing cap joins the beam at an angle. The added transverse forces on the parting line are often taken up by a keyed interface between bearing cap and beam, in the form of interlocking serrations (Fig. 6.130).

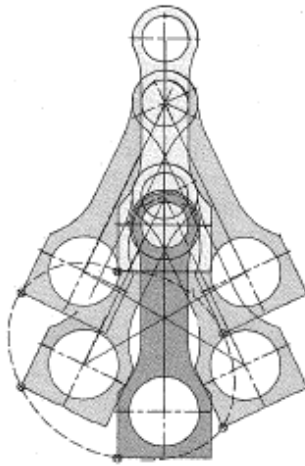


Fig. 6.129 Connecting rod positions during one crankshaft revolution.

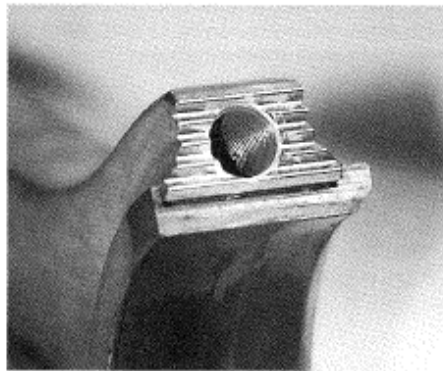


Fig. 6.130 Serrated parting surface of an angled journal bearing cap.

In older designs, the interlocking interface consisted of a key and keyway. Even in straight-parted connecting rods found in motor vehicle engines, modern practice is to take advantage of mechanical interlocking at the bearing cap interface, without the manufacturing complexity of machining serrations; the journal end is "cracked" to yield a "cracked connecting rod" (Fig. 6.131). The fracture surface provides perfect seating of the bearing cap against the beam. Originally only possible with cast connecting rods, cracking is now also applied to forged connecting rods.

Connecting rods of large diesel engines have straight parting surfaces, and are of a "marine" design, in which the connecting rod is bolted to the journal end. This enables the pistons to be pulled without disassembling the journal end bearing. In newer designs, this parting surface is located directly below the wrist pin end, so that it is no longer necessary to remove the heavy connecting rod when pulling a piston. This also reduces the headroom needed to perform this operation.

Because of considerable increase in gas pressures (in motor vehicle diesels, up to 150 bar; medium and large engines have ignition pressures up to 200 bar), modern vehicle engines employ trapezoidal connecting rods, in which the lower part of the wrist pin end, which must take up these high gas pressures, is wider than the upper part, which takes up inertia forces.

As the element responsible for transferring force and motion between piston and crankshaft, the connecting rod is subjected to alternating, high forces. As a moving engine component, it should be as light as possible; with regard to its interaction with the wrist pin and crank pin, it should be rigid. These conflicting requirements force very restricted connecting rod dimensioning, making the connecting rod susceptible to many different types of secondary failures (Fig. 6.132).

LIBRARY

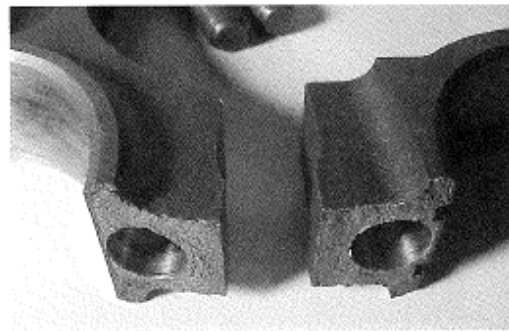


Fig. 6.131 Parting surface of a "cracked" connecting rod.

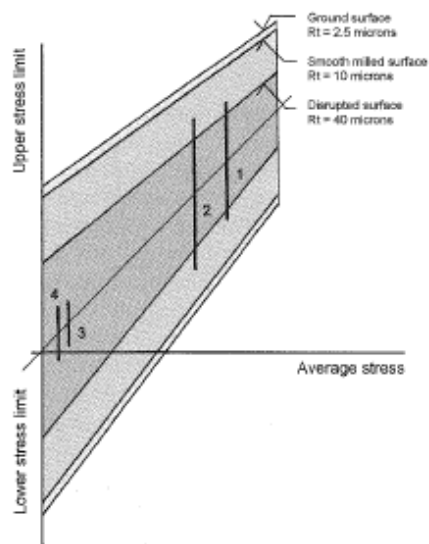


Fig. 6.132 Effect of surface finish on connecting rod load limits: 1, Load in bearing cap fillet during assembly; 2, Load in bearing cap fillet from inertia forces; 3, 4, Load on bearing cap back in transition to fillet from inertia forces.

Connecting rods are usually forged. Passenger car engines also use cast connecting rods. Rods are also made using sintering processes. The connecting rod is loaded in compression (predominantly by gas forces) and tension (predominantly by inertia forces). Moreover, the additional swinging motion of the connecting rod imposes bending loads (Fig. 6.133).

Forces transmitted from the wrist pin, through the connecting rod, to the crankshaft, and the reverse, are borne by lubricating films in the bearings. Forces imposed on the journal and wrist pin ends are therefore dependent on the pressure distribution in the lubricant. This, in turn, is affected by connecting rod stiffness. Under load, the journal and wrist pin ends deform (Fig. 6.134).

- The upward-acting inertia force is counteracted by the lubricating film between the crank pin and the lower (cap side) bearing shell. Forces between the connecting rod and bearing cap are taken up by the connecting rod bolts. The journal bore deforms into a vertical oval, and the rod bolts are bent outward. With insufficient bolt tension, the inside edge of the cap/beam interface would open.
- By contrast, under maximum gas pressure, the beam exerts force through the lubricating film, against the crank pin. The journal bore

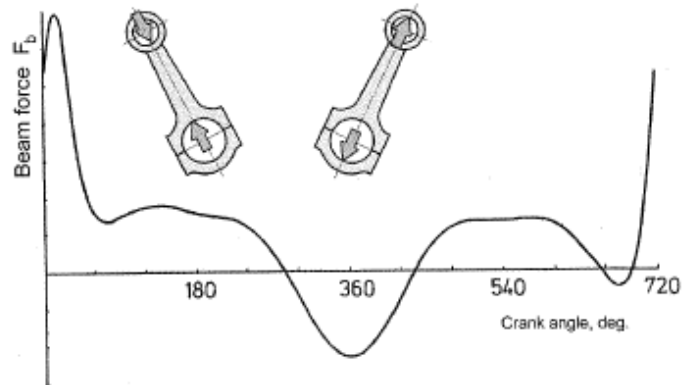


Fig. 6.133 Connecting rod beam force over one complete engine cycle.

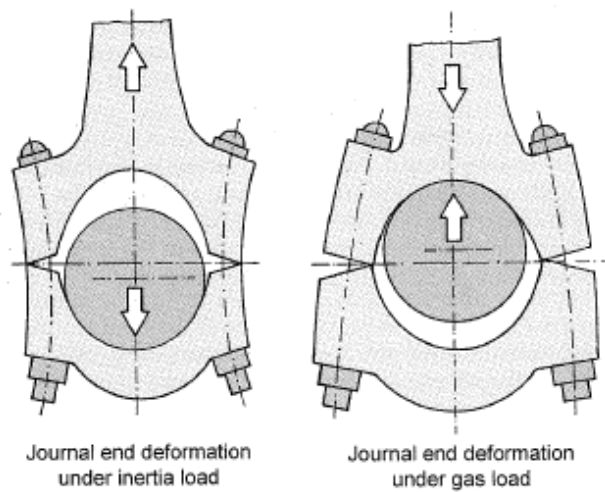


Fig. 6.134 Connecting rod deformation (schematic).

deforms into a horizontal oval, the bolts bend inward, and the outer edges of the cap/beam interface tend to open.

These deformations impose considerable bending loads on the journal and wrist pin ends. Assembly forces are even larger than operating forces, because after all, these must be able to withstand operating forces. Therefore, bolting the bearing cap to the beam takes on special

significance: the interface must not be allowed to spread open, and sufficient bearing interference (tight fit of bearing in the journal bore) must be assured.

Because bolt tension determines the stress condition of the journal end, and therefore the shape of the bore, care must be taken that the connecting rod bolts are tightened in the same manner at every subsequent reassembly as in their initial factory assembly. If the bolts are tightened excessively, the journal bore will deform into a horizontal oval; if not tightened sufficiently, into a vertical oval (Fig. 6.135). The achievable bolt tightening accuracy is dependent on the tightening method. If tightening to a specific torque, the portion of torque converted to bolt tension depends on friction conditions in the threads and at the beam/bearing cap interface. As roughness is smoothed with every tightening, thread friction decreases, so that a higher portion of torque is converted to bolt pretension. As a result, the journal bore deforms into a horizontal oval. This explains why journal end bearing

RIRI IOTECA UIS

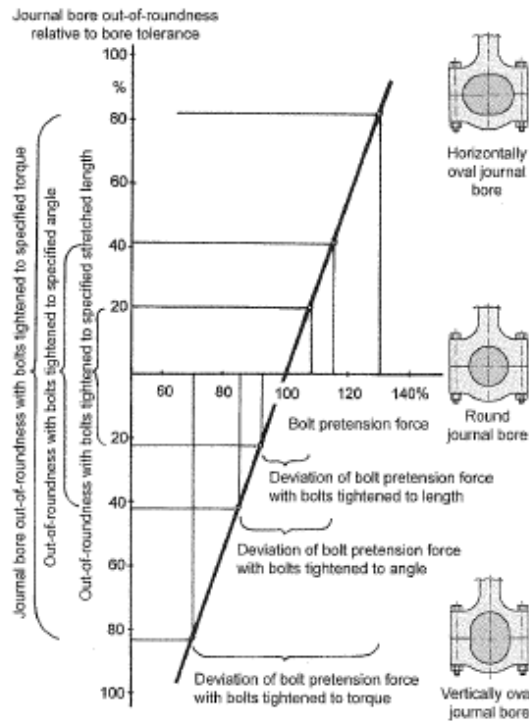


Fig. 6.135 Journal bore out-of-roundness as a function of bolt tension.

seizing seems to occur preferentially after engine overhaul. Better results are obtained by tightening by angle, but the smallest scatter in bolt pretension is obtained by tightening to length, because bolt length is directly proportional to bolt pretension.

The most heavily loaded areas of straight-split connecting rods are the fillets where the beam transitions to the journal and wrist pin ends (Fig. 6.136). In angle-parted connecting rods, the upper part of the blind-threaded holes are often the source of fatigue failures.

Because of its function as a linking element between piston and crankshaft, connecting rod failures usually engender serious consequences. The connecting rod is, in effect, trapped between hammer and anvil, and is deformed and shattered accordingly.

Failures in which the connecting rod is severely deformed, even bent, underscore the astonishing ductility of high-quality heat-treated steels (Fig. 6.137).

ENGINEERING

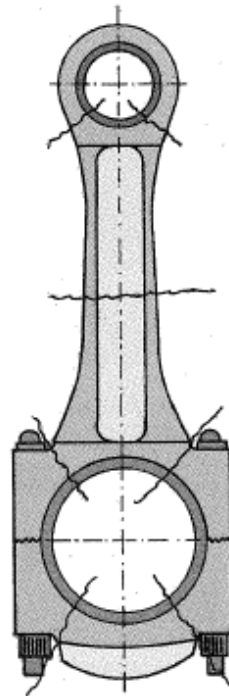


Fig. 6.136 Connecting rod fracture zones.



Fig. 6.137 Extremely deformed connecting rod of a large diesel engine.

6.2.3.1 Manufacturing defects

The greater the load on a piston, the more sensitive it becomes to machining marks, notches, or nicks (see Fig. 6.132).

Example a: After an operating time of 725 hours following engine overhaul, the bearing cap of a diesel engine connecting rod broke. The total operating time of the engine (and rod) was 8700 hours. The fatigue failure (Fig. 6.138) was initiated by a ground-in groove in the already highly stressed fillet. The fillet was probably nicked and damaged while grinding the flat for the bearing cap nut (Figs. 6.139 and 6.140). In view of the otherwise long service life of the rod, this damage probably occurred during the most recent engine overhaul.

Example b: After a component operating time of 36,500 hours in a diesel engine, a connecting rod broke below the wrist pin end, resulting in a thrown rod that penetrated the crankcase (Fig. 6.141). The cause of the fatigue failure in the highly stressed transition from beam to wrist pin end was impact damage by some foreign object, incurred during engine operation (Fig. 6.142). The fracture surface showed a fatigue fracture followed by force fracture of the remaining cross section, starting in the area of the flange edge, and extending across roughly half of the shaft cross section (Figs. 6.143 and 6.144). Impact damage was visible on the upper surface of the flange, as well as the extended axis of the wrist pin bearing. The assumption that the failure involves depressions around impact damage that occurred prior to the fracture was borne out by the uneven, disturbed fracture progression at the point of origin, as well as smoothing of the slightly raised fracture edges.



Fig. 6.138 Connecting rod fatigue failure.

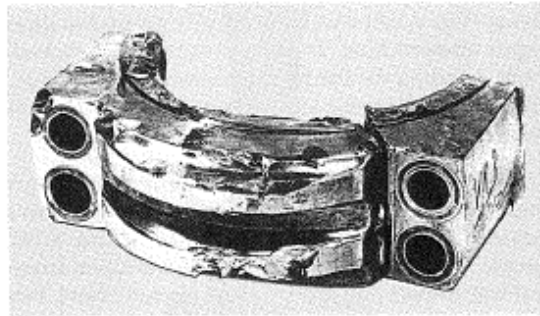


Fig. 6.139 Connecting rod bearing cap with crack through fillet at nut surface.

6.2.3.2 Fretting corrosion

Example a: After 20,000 hours of operation, a locomotive engine was removed and disassembled for overhaul. During overhaul, a crack was detected in a connecting rod (Fig. 6.145). The crack initiated at the journal end, stretched across the entire width of the connecting rod, to within about 6 cm of the fillet to the bolt head mating surface. Furthermore, traces of severe fretting corrosion were visible near

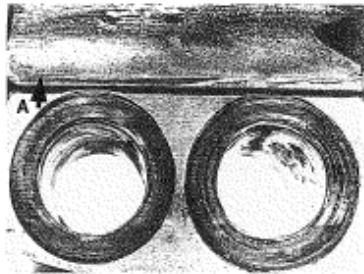


Fig. 6.140 Site of fracture initiation (A) at a nick in the fillet, caused by grinding.

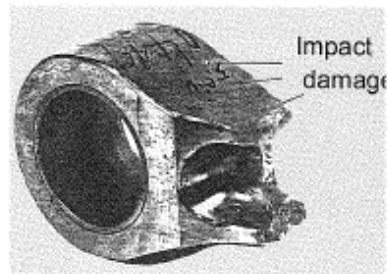


Fig. 6.141 Fragment of broken connecting rod.

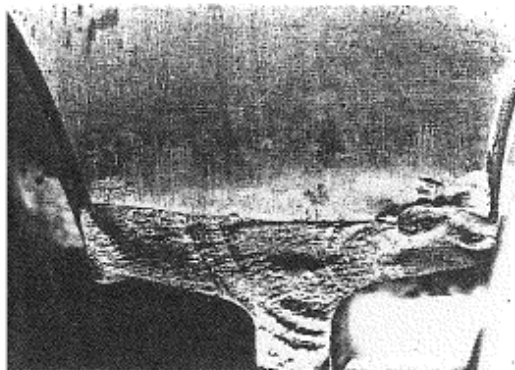


Fig. 6.142 Magnified view of connecting rod fragment, showing impact damage on upper side of flange near fracture initiation site.

the connecting rod parting line. The fracture surface showed a well-advanced, slowly propagating fatigue crack. The crack initiated at a small projection, N (see Fig. 6.146), at the connecting rod journal end, typical of fretting fatigue cracks. The ultimate cause of this fatigue fretting failure was insufficient bearing insert pretension; for subsequent engines, this pretension had been increased.

Example b: A connecting rod bolt broke after 750,000 km of operation in a locomotive engine (Fig. 6.147). The fracture began with a fatigue fracture surface F1, about 2 mm wide, oriented about 45° to the bolt axis. This continued into a fatigue fracture surface F2, perpendicular to the bolt axis, ending with a small residual fracture surface F3 (Fig. 6.148). The fact that the initial crack began at 45°, typical of fretting fatigue fracture, suggests that the crack began as a result of severe fretting corrosion at one of the pilot diameters. After engine disassembly at the indicated mileage, the bolt was re-installed in a

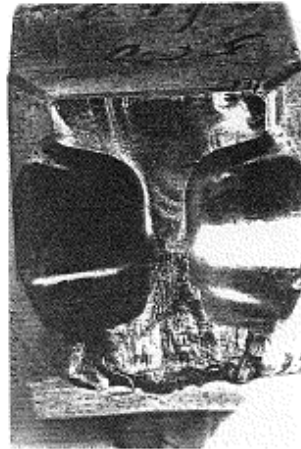


Fig. 6.143 Fracture initiation area with fatigue failure fracture surface and adjacent force-failure fracture surface.

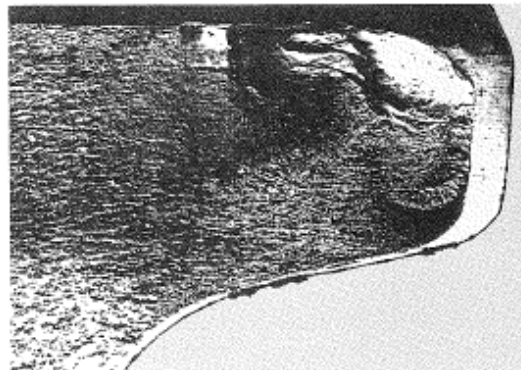


Fig. 6.144 Magnified view of fracture initiation area of the previous illustration.

different orientation, which changed its loading. This led to a fatigue fracture surface running in a different direction (F2) and ultimately to complete failure.

6.2.3.3 Assembly defects

The most common mistake in engine assembly is incorrect tightening of fasteners. The consequences are:

- Spreading of the mating surfaces, followed by bolt fracture (Fig. 6.149); the connecting rod, no longer guided by the crankshaft, is severely damaged and in turn damages the crankshaft, crankcase, and piston

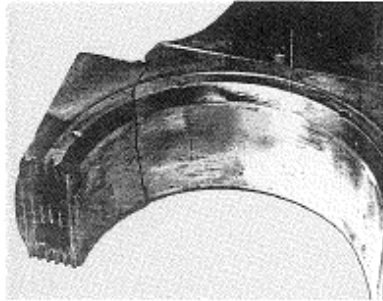


Fig. 6.145 Crack propagation at the journal end of a connecting rod; traces of fretting corrosion at the bore surface.

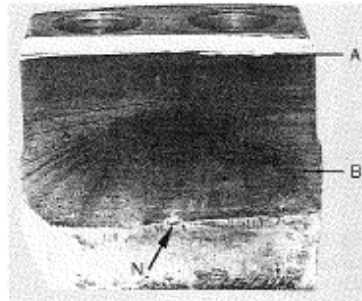


Fig. 6.146 Exposed fatigue and laboratory-induced residual force fracture, with crack initiation site marked at N (A: laboratory force fracture; B: fatigue crack).

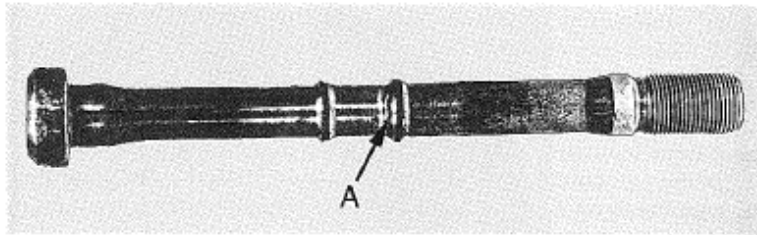


Fig. 6.147 Fractured connecting rod bolt; crack initiation site at A.

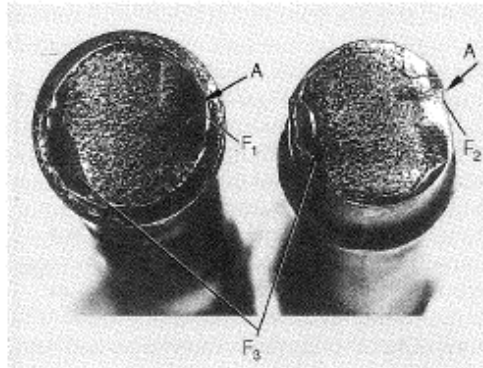


Fig. 6.148 Fracture surfaces of a bolt shaft, with crack initiation site at A, primary fretting fatigue fracture surface F_1 , secondary fatigue fracture surface F_2 , and residual fracture surface F_3 .



Fig. 6.149 Connecting rod failure as a result of connecting rod bolt fracture.



Fig. 6.150 Connecting rod failure as a result of hydraulic lock.

- Oval deformation of the bearing bore, with associated bearing seizing
- Insufficient journal bearing insert pretension, resulting in fretting corrosion—a source of fatigue failures; see Figs. 6.145 and 6.146

6.2.3.4 Failures caused by engine operation

Often, connecting rod failures develop as a result of operational irregularities and from damage to other engine components. Severe piston seizing is always associated with connecting rod damage. But even far less spectacular damage may result in connecting rod damage, e.g., leaking charge air intercoolers, cylinder seals, corrosion holes in cylinder sleeves, etc., all of which result in the cylinder filling with coolant. Similarly, fuel or lubricating oil collecting in a cylinder can lead to the feared phenomenon of hydraulic lock (Fig. 6.150).

Example: The charge air intercooler of a diesel engine developed a leak. With the engine shut down, water trickled through the intake manifold

and into the nearest cylinder with open intake valves. The piston happened to come to rest below top dead center, on its downstroke. When the starter next turned the engine over, it did not immediately try to move the piston against the water in the cylinder. During the continued downward stroke, and then the upward stroke, several of the engine's fifteen other cylinders fired, so that great force was exerted by this one piston against the incompressible slug of water in the cylinder. The results were severe crank train and crankcase damage.

Hydraulic lock has also become the subject of a court decision. In accordance with German motor vehicle insurance law (specifically, AKB § 12 Section 1 IIe), on May 31, 1989, the Hamm appellate court delivered the following verdict [6-10]:

- "1. Engine damage as a result of a so-called hydraulic lock (entry into the combustion chamber of water which had been splashed up by driving through a puddle, or by another vehicle moving in the opposite direction) is considered to be an accident.
- "2. The case in question is considered to be an uninsured operational failure . . ."

The case was described as follows: ". . . at this point, a vehicle approached from the opposite direction, throwing a wave of water onto his own car. From this moment onward, the car juddered throughout the remainder of the journey, furthermore, it trailed a cloud of blue exhaust . . . partial engine disassembly revealed a bent connecting rod, which necessitated engine replacement at a cost of 8062.69 Deutschmarks . . ."

As this case shows, connecting rod failures result in severe related damage, and often lead to total destruction of the engine.

6.2.4 Crankshafts

The crankshaft is a system of serially arranged, phase-shifted eccentricities, in which the individual element—the crank throw—consists of the crankpin, the two crank cheeks, and half of each adjoining main bearing journal (Fig. 6.151). Depending on configuration, the crank cheeks may include one or two cast-in, forged-on, or bolted-on counterweights.

Crankshafts transform the forces introduced by the connecting rods into torque, "collect" the torque of individual cylinders, and "deliver" it to the flange at the output end of the crankshaft. Furthermore, crank train forces are passed to the crankcase through the crankshaft, and the crankshaft ensures a supply of oil to the crankpins. Depending on

ANEXO B. TEORÍA DEL TEMPLE POR INDUCCIÓN.⁸⁸

El temple por inducción consiste en enfriar de manera controlada piezas de acero previamente calentadas a temperaturas superiores a 800°C. Este tipo de temple utiliza bobinas de cobre fabricadas a la medida de la zona a calentar donde la entrega de potencia (kW) y frecuencia de corriente (Hz) puede ser ajustada. Al hacer circular un campo magnético alterno por estas bobinas (inductores) la pieza en estudio se comporta como un electroimán que se opone al flujo magnético natural (Corriente de Foucault), fenómeno que se traduce en generación de calor por efecto Joule de manera controlada.⁸⁹

El campo magnético variable a que se aludió anteriormente es producido por una corriente eléctrica alterna de intensidad y frecuencia adecuadas para el trabajo a efectuar, que recorre una bobina de forma especialmente adaptada a la zona de la pieza a calentar. Ese campo magnético depende, además de la intensidad de la corriente eléctrica que recorre la bobina y de su frecuencia, del número de vueltas que la integra. Las corrientes inducidas en la pieza de trabajo generan su propio campo magnético de sentido contrario al generado por el inductor, siendo éste el motivo por el cual las corrientes inducidas se debilitan hacia el interior provocando el llamado "skin effect" o efecto película. La disminución de la intensidad de la corriente inducida desde la periferia hacia el interior está expresada por una ley exponencial⁹⁰:

$$i_x = i_s * e^{-\frac{x}{d}} \quad (A1)$$

Donde i_x indica la densidad de corriente a la distancia x de la superficie calentada; i_s indica la densidad de corriente en la superficie calentada y d es la "Profundidad

⁸⁸ TRATERIBER. Temple por inducción. [online]. [citado 5 junio 2014]. En: <<http://www.trateriber.es/pdf/GrupoTrateriber-Induccion.pdf>>..

⁸⁹ *Ibíd.*

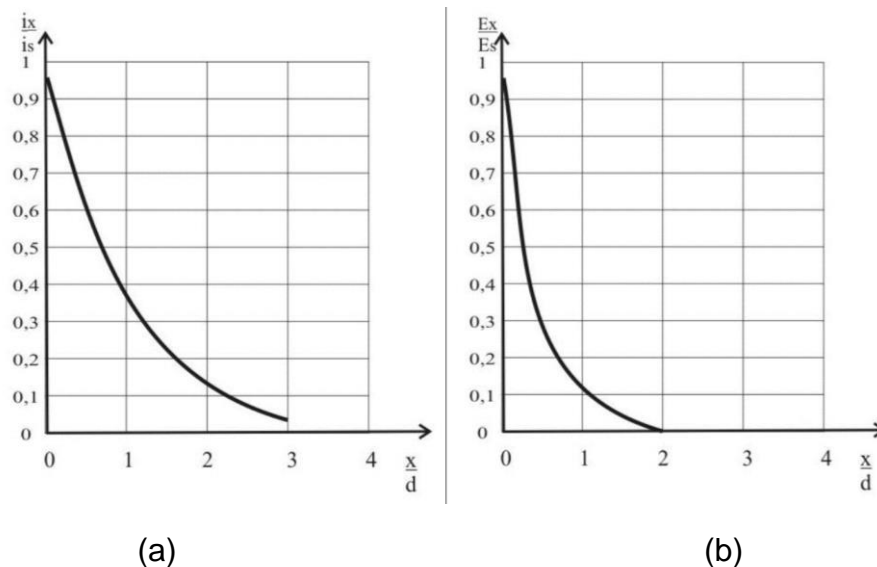
⁹⁰ *Ibíd.*

de penetración" que determina la efectiva profundidad de las corrientes parásitas en su generación de calor. El valor de d está dado por la siguiente expresión⁹¹:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * \mu_0 * \mu_T * f}} \quad (A2)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío; μ_T es la permeabilidad magnética relativa de la pieza que se calienta (disminuye cuando aumenta la temperatura); ρ es la resistividad de la pieza de trabajo (aumenta con la temperatura); f es la frecuencia del campo magnético actuante producido por la corriente que recorre la bobina inductora. En la figura A1 (a) y (b) se muestra, respectivamente, la variación de i_x/i_s y de la energía específica generadora de calor (elevando al cuadrado el parámetro i_x), en función de la relación x/d .

Figura A1. Variación de la corriente (a) y energía específica (b) en la capa templada por inducción.



Fuente: FRR-UTN. XI - Temple superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En: <http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

⁹¹ Ibid.

De lo que se podrá deducir que, para idénticas condiciones de resistividad y permeabilidad relativa, la "Profundidad de penetración" d , depende fundamentalmente de la frecuencia alimentadora de la bobina inductora. Además cuando la profundidad x iguala a d , es decir la relación x/d es igual a **1**, la relación de densidades de corriente es aproximadamente **0,37** (figura A1-a) y la relación de energías específicas es aproximadamente **0,13** (figura A1-b) siendo esta última la causante de las temperaturas generadas en la pieza de trabajo y por consiguiente, este valor de **0,13** es totalmente inadecuado para los fines del temple.⁹²

Además de la influencia de la frecuencia en la definición de d , cumple un rol importante la permeabilidad magnética relativa μ_r la cual depende de la temperatura a que se encuentra el material; en el acero desde valores elevados a temperatura ambiente, llega prácticamente de 1 a 768°C, incrementándose fuertemente la Penetración " d ". Esto puede producirse por valores demasiado elevados de la densidad de energía puesta en juego, que podría volver al acero magnéticamente saturado.⁹³

Para que el temple por inducción sea efectivo, es decir que el calentamiento de la zona a tratar llegue en profundidad hasta el espesor deseado, es necesario que el diámetro del redondo o el espesor de la placa a tratar tenga una relación de D/d o $A/d > 3$ siendo D el diámetro de la pieza y A el espesor de la placa (según los casos); si esas relaciones son menores se pierde eficiencia ya que empiezan a tener influencia las corrientes generadas, que son de signo opuesto, contrabalanceando las originadas en una cara (si se trata de una placa) o de un extremo del diámetro (si se trata de un redondo).⁹⁴

⁹² Ibid.

⁹³ Ibid.

⁹⁴ Ibid.

Para el caso puntual de los diámetros internos de la biela de la presente investigación: $\varnothing_{\text{cabeza}} = 20 \text{ mm} \div 0,88 \text{ mm} = 22,73$ y $\varnothing_{\text{pie}} = 13 \text{ mm} \div 0,88 \text{ mm} = 14,77$.

Las variables que afectan a la velocidad de calentamiento son las siguientes: Intensidad o fuerza del campo magnético generado por la corriente que recorre la bobina de trabajo con sus características fundamentales: intensidad y tensión. De los amperios-vueltas de la bobina de trabajo surge la fuerza magnética en forma de líneas de fuerza (flujo magnético). La Frecuencia de la corriente que recorre la bobina de trabajo; ya se vio su influencia en el valor de d ; a mayores frecuencias existe mayor acercamiento de las líneas de fuerza. La Separación entre la pieza de trabajo y la bobina inductora y las Características magnéticas y eléctricas del material a tratar: resistividad y permeabilidad magnética.⁹⁵

Existen diferencias entre el temple por inducción del acero y el que se realiza en hornos debido a los parámetros: tiempo, temperatura, las propiedades eléctricas y magnéticas de los aceros, la frecuencia de inducción eléctrica y potencia eléctrica, y la influencia de la estructura metalográfica previa al temple.⁹⁶

En cuanto al tiempo que tarda un acero en alcanzar su temperatura de austenización, que es el proceso que dependiendo del acero ocurre a un determinado valor de temperatura el cual forma austenita, que es la microestructura que al ser enfriada rápidamente genera martensita, el cristal que da al acero su dureza; depende de la microestructura previa (que en el caso de nuestra pieza de investigación es una estructura templada y revenida: ferrita y perlita). En la tabla A1 se muestra ver la temperatura de austenización para diferentes aceros.

⁹⁵ Ibid.

⁹⁶ Ibid.

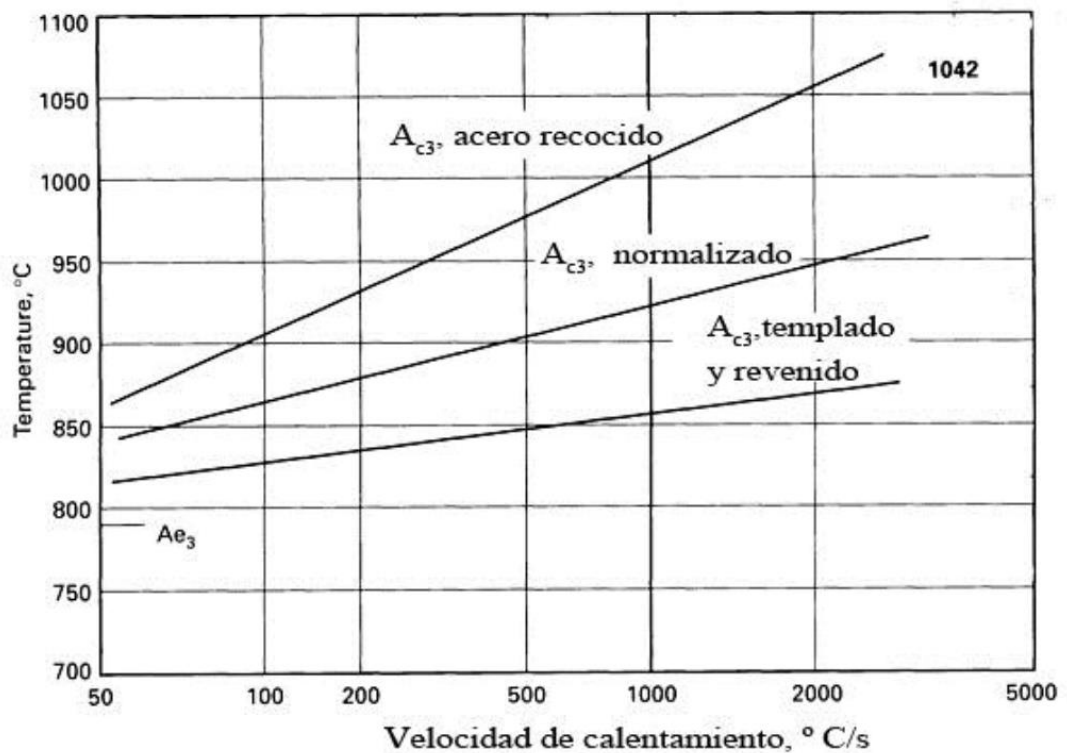
Tabla A1. Temperatura de austenización de diversos aceros.

% de carbono	T. de calentamiento en horno °C	T. de calentamiento por inducción °C
0,30	845 – 870	900 – 925
0,35	830 – 855	900
0,40	830 – 855	870 – 900
0,45	800 – 845	870 – 900
0,50	800 – 845	870
0,60	800 – 845	845 – 870
Mayor de 0,60	790 – 820	815 – 845

Fuente: FRR-UTN. XI - Temple superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En: <http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

Los valores de los parámetros principales que determinan el temple por inducción que se le aplicó a la pieza de la presente investigación se descubrieron al realizar la prueba de microdureza; teniendo en cuenta el espesor de la pieza la profundidad que alcanzó el temple fue de +/- 0,88 mm. Lo que evidencia aún más que el tipo de acero a utilizar debe ser un AISI 5120 para que a partir de estos insumos se realice el proceso de reingeniería con el objetivo de replicar dicho tratamiento a la pieza que se quieren construir utilizando los recursos de esta región del País; por ejemplo en la figura A2 puede verse el efecto de la temperatura, velocidad de calentamiento y estructura previa para el temple de un acero AISI SAE 1042.

Figura A2. Temperatura de austenización acero SAE 1042.



Fuente: FRR-UTN. XI - Temples superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En: <http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

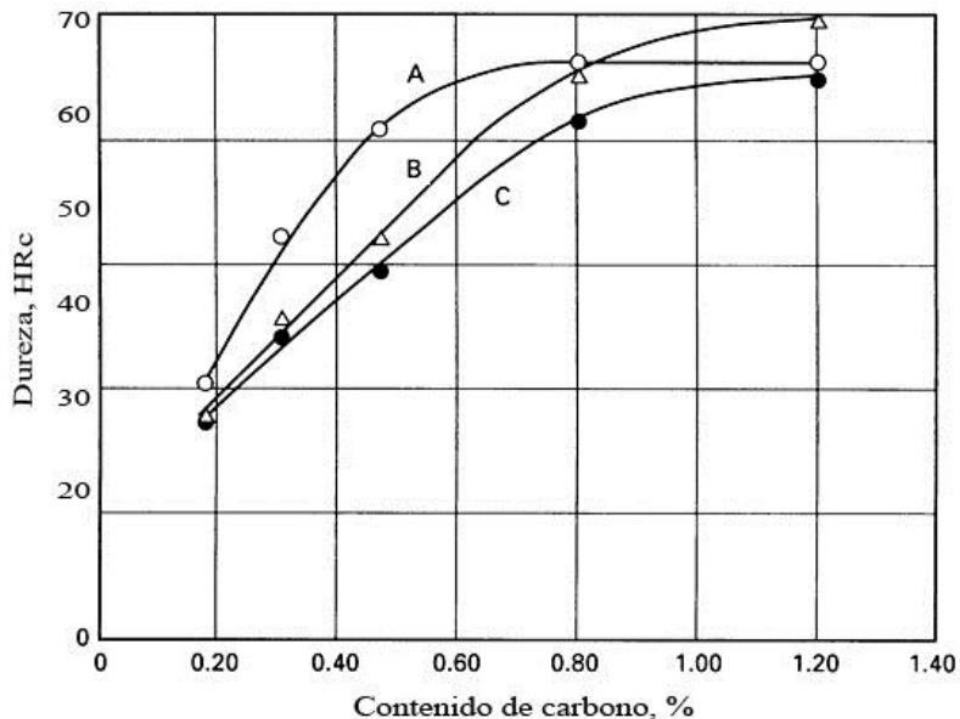
Del anterior ejemplo, además de ver que para estructuras blandas es necesario un mayor tiempo de calentamiento; es necesario también conocer con precisión la composición química del acero de la pieza a la cual se le quiere aplicar un temple por inducción o que ya le fue aplicado (para ver la composición química exacta del acero empleado en la fabricación de la biela ver sección 2.5.4) ya que elementos residuales del acero nos indican la eficacia del incremento en la temperatura de calentamiento.⁹⁷

“La dureza de la capa templada por inducción es mayor que la correspondiente a los tratamientos de temple en horno. Esto se debe a que la capa templada por

⁹⁷ Ibid.

inducción (que es martensítica) tiene un volumen específico mayor que las capas interiores (que serán perlíticas o bainíticas) originando tensiones que se traducen en mayores durezas. Así mismo, la martensita se forma desde un grano más fino que en el calentamiento en horno dando, en consecuencia, mayor dureza. Otro factor a tener en cuenta para aceros hipoeutectoides, es que hay diferencias en el porcentaje de carbono de la austenita, lo que influye en la dureza, aumentándola.”⁹⁸ En la figura A3 se puede ver el efecto del contenido de carbono y las diferencias entre el temple por inducción y el realizado en horno; donde la curva A es un endurecido por inducción. La curva B es un calentado en horno y templado en agua. La curva C es un calentado en horno, templado en agua y revenido. Los aceros templado-revenidos fueron tratados en N líquido antes del revenido a 100° C durante 2 h.

Figura A3. Efecto del contenido de carbono sobre la dureza de aceros al carbono.



Fuente: FRR-UTN. XI - Temple superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En:

<http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

⁹⁸ Ibid.

En el caso de la manufactura (ver capítulo 4) de la biela prototipo, no se encontró en Bucaramanga y su Área Metropolitana una empresa que se comprometiera a implementar un proceso de temple por inducción para los diámetros internos de la biela desarrollada; se puede apreciar en el proceso alternativo de temple que se le aplicó que hubo que cementar primero estas zonas del prototipo hasta un 0,8% de C para alcanzar los 60 HRC, que en el caso de la curva A sería un 0,4% de C.

En cuanto a la resistividad, ella varía con la temperatura de tal modo que para temperaturas cercanas al ambiente es de aproximadamente entre $10 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ (hierro electrolítico) y $20 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ (acero de 1 % de C), hasta aproximadamente $110 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ a 750-800° C. Para temperaturas mayores de 800°C, cercanas al punto de Curie, el crecimiento de la resistividad es de $5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ por cada 100° C de aumento de temperatura.⁹⁹

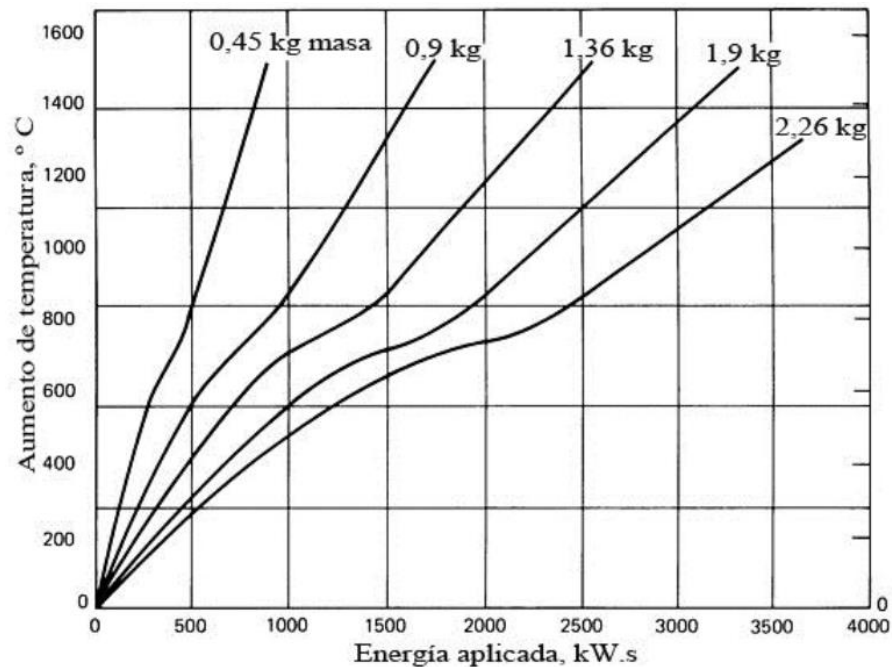
De la misma manera que crece la resistividad decrece la permeabilidad magnética relativa hasta alcanzar la temperatura del punto de Curie. Debajo de ella, depende de la intensidad del campo magnético. De esto se desprende que, a medida que la permeabilidad desciende, disminuyen las propiedades ferro-magnéticas del acero... a mayores temperaturas de calentamiento por inducción, se incrementa la necesidad de energía aplicada y para cuando se supera el punto de Curie, los incrementos de energía son mayores. En este caso, en que se necesita alta temperatura para llegar a la austenización, el equipo debe tener circuitos especiales que permitan la variación de la impedancia y así compensar el cambio en las propiedades magnéticas del acero.¹⁰⁰

Esto se puede apreciar en la figura A4. Notar la disminución en la velocidad de calentamiento cuando se acerca o supera la temperatura de Curie (770° C).

⁹⁹ Ibid.

¹⁰⁰ Ibid.

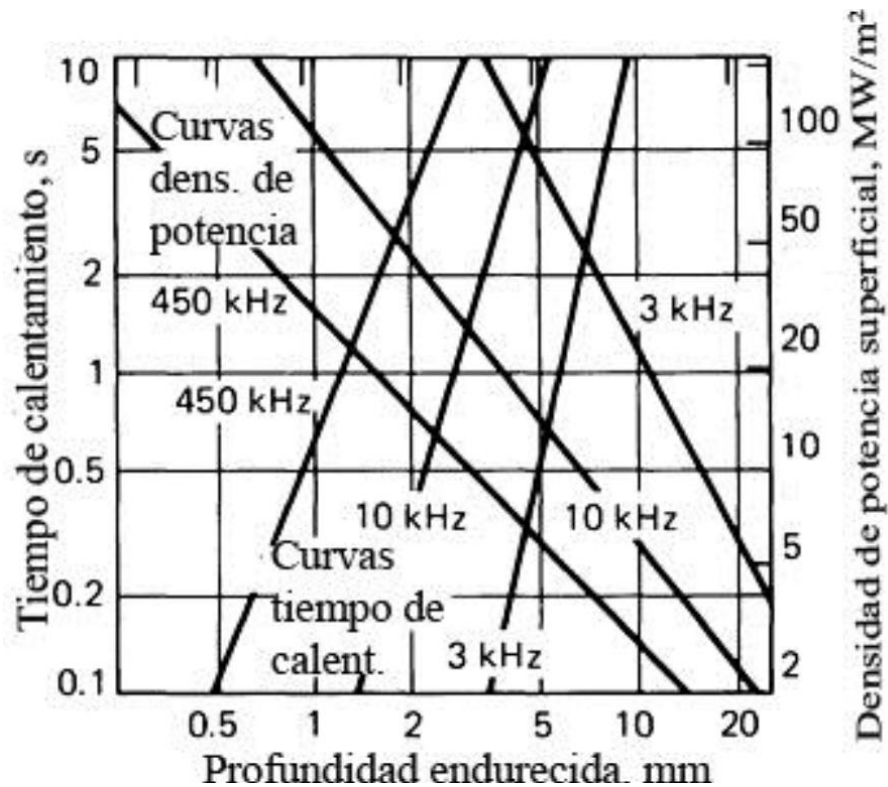
Figura A4. Aumento de temperatura en función de la energía aplicada para calentar por inducción un acero al carbono.



Fuente: FRR-UTN. XI - Temples superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En: <http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

Por otro lado la selección de la frecuencia (otro de los factores importantes en un proceso de temple por inducción) está ligado a la profundidad de la capa que se desea temprar que en el caso de la pieza de estudio de la presente investigación tiene una extensión entre los 880 μm y 1000 μm ; cuanto mayor sea la profundidad del temple menor será el valor de la frecuencia usada, en la figura A5 se muestra dicha relación además del tiempo de calentamiento y la densidad de potencia en MW/m^2 se aprecia igual manera que a profundidades de capa templada menores se necesitan mayores frecuencias para un determinado tiempo de calentamiento y para un determinado espesor de capa tratada se necesitan menores densidades de potencia superficial.

Figura A5. Interrelación entre el tiempo de calentamiento, densidad de potencia superficial y profundidad de capa endurecida, para generadores de distinta frecuencia.



Fuente: FRR-UTN. XI - Temple superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En: <http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

De la figura A5 se deduce acerca del valor del espesor ($d = 0,88 \text{ mm}$) para la penetración del temple en los diámetros de la cabeza y del pie de la biela original que la frecuencia que fue usada por el generador para crear el temple aplicado a dicha pieza fue de 450 kHz, el tiempo de calentamiento estimado es de unos 35 segundos y utilizando una densidad de corriente de +/- 150 MW/m².

En la tabla A2 puede apreciarse la densidad de potencial superficial para distintos espesores de capas calentadas por inducción.

Tabla A2. Análisis comparativo de las 3 técnicas.

Frecuencia [kHz]	Profundidad de capa [mm]	Densidad de potencia del equipo		
		Baja	Optima	Alta
500	0.381 – 1.143	1.08	1.55	1.86
	1.143 – 2.286	0.46	0.78	1.24
10	1.524 – 2.286	1.24	1.55	2.48
	2.286 – 3.048	0.78	1.55	2.33
	3.048 – 4.064	0.78	1.55	2.17
3	2.286 – 3.048	1.55	2.33	2.64
	3.048 – 4.064	0.78	2.17	2.48
	4.064 – 5.080	0.78	1.55	2.17
1	5.080 – 7.112	0.78	1.55	1.86
	7.112 – 8.890	0.78	1.55	1.86

Fuente: FRR-UTN. XI - Temple superficiales. [online]. [citado 5 junio 2014]. En:
 <http://www.frr.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/11-Temple_por_induccion_v2.pdf>.

ANEXO C. EJEMPLO REAL DE INGENIERÍA DE MANUFACTURA: FORCOL.

La historia¹⁰¹ de FORCOL conocida en un principio como Forjas de Colombia comienza en el año de 1961, era una empresa dedicada a la forja y maquinado de rodajes para tractores, piezas para la industria automotriz, bridas, válvulas y otras piezas. Estaba considerada como industria básica en el sector metalmecánico. A lo largo de su historia paso por las manos de más de tres administraciones diferentes y casi de tres años de cierre (1971 - 1973). La idea original de instalar una empresa de Forja provino de un importador de partes y piezas para tractores, quien hacia el año de 1959 interesó al dirigente empresarial bumangués, don Pedro María Buitrago argumentando que, debido a los altos precios de los productos forjados importados en el mercado nacional, sería conveniente para la industria, llenar el vacío de forja de estampa en el país. Don Pedro María Buitrago, quien había sido promotor de varias empresas, se dio entonces a la tarea de promover la instalación de una planta de forjado, para lo cual entró en conversaciones con la empresa alemana RHEINSTAHL, quienes además de tener instalaciones para forjado, manufacturaban y vendían equipos para este propósito. Con el fin de conseguir financiación se iniciaron además conversaciones con CATERPILLAR (y su único distribuidor GENERAL ELECTRIC), empresa importadora de orugas con una cobertura del 80% del mercado nacional o sea el principal competidor de Forjas de Colombia. Sin embargo no tuvo éxito esta propuesta. En marzo de 1962, en vista de que los estudios eran favorables para el establecimiento de la forja en Colombia, se entró en contacto con otras dos firmas alemanas, aparte RHEINSTAHL: KRUPP y FRITZ WERNER. A mediados de 1962 se firmó un contrato “ad referendum” entre RHEINSTAHL y Forjas, en espera de que el IFI (Instituto de Fomento Industrial) garantizara los posibles empréstitos. Sin embargo, solamente hasta principios del año 1963 se logró interesar a algunas identidades como la Corporación Financiera Internacional del Banco Mundial, la

¹⁰¹ SANDOVAL, Diego, et al. Análisis del desarrollo industrial de forjas de Colombia 1961-1981. Programa BID/CEPALCIID/PNUD. Buenos Aires, 1982. 112 p.

Corporación Financiera Colombiana (entre otras). Los aportes de capital inicialmente fueron de 61,31% capital privado nacional y 38,69% capital privado extranjero.

El montaje de la planta se realizó en el periodo julio de 1964 – julio 1966, con la participación de 40 alemanes entre ingenieros, técnicos y obreros. La capacidad de forja se estableció en 9000 toneladas/año incluyendo 3000 toneladas de cuerpos moledores y mecanizado de 250 cadenas/mes y 800 rodillos/mes. En cuanto al proceso de producción se montaron tres secciones: la de matricería, la de forjado y la de mecanizado.

Luego de la puesta en marcha de la empresa y ante la difícil situación producto de diversos factores¹⁰², Forjas entró en concordato y según los acreedores, se decidió al cierre en junio de 1971 paralizándose la producción. La firma italiana FIAT presentó una propuesta de reactivación que consistió en celebrar un contrato de administración para la nueva empresa, encargándose la FIAT de la gestión y de suministrar asistencia técnica. Con este plan se perseguía explotar la demanda potencial de autopartes y conjuntos forjados para tractores de oruga y evitar lo sucedido en otras épocas. Además se pretendía producir partes que se encontraban agotadas y sin cuyo complemento no se podrían vender las existencias de productos terminados que había en ese momento (1971) y cuyo valor llegaba a \$25 millones (415 toneladas de productos forjados). De esta forma, en diciembre de 1973 se firmó un contrato de administración y explotación por 12 años con esta firma. Las pérdidas que se tuvieron con la administración FIAT se estiman en 350 millones de pesos. Es así como, en 1980 el IFI decidió rescindir el contrato con FIAT y tomar directamente su administración.

En julio de 1980 una nueva administración se hizo cargo de la empresa cuyos objetivos fueron los de vincular la planta de Forjas a una empresa más grande que

¹⁰² Ibíd. P 12.

utilice productos forjados y de esta manera asegurar el mercado y resolver los problemas financieros.

Hasta aquí va la historia¹⁰³ de Forjas de Colombia (hoy conocida como FORCOL) hasta los años 80's. en la actualidad (al momento de realizar y escribir la presente investigación) la empresa que estaba en manos del consorcio empresarial dueño de la también empresa santandereana T. H. C. S. A. se encontraba desmontando la planta que por años acogió esta importante organización vendiendo sus equipos y maquinaria de apoyo, ya que la alta gerencia decidió cerrar la planta pues no representaba ganancias, aunque la empresa tampoco sostenía pérdidas, ya que económica y técnicamente se había estabilizado y alcanzado su auto-sostenimiento, lo cual le permitía abastecer con piezas de primera calidad el mercado automotriz colombiano y andino como tulipas, juntas homocinéticas, yugos y demás piezas para diferenciales y transmisiones.

A continuación se muestran los formatos de manufactura utilizados por esta empresa, tomados directamente de la línea de producción, los cuales fueron estudiados y analizados como información de apoyo para elaborar la documentación necesaria y suficiente para el proceso de manufactura del diseño de biela planteado en la presente investigación; teniendo en cuenta: las maquinas a utilizar, los procedimientos, los tiempos de operación, planos, hojas de ruta y el control de calidad.

Formato de control de producción.

Antes de fabricar un componente mecánico el ingeniero de diseño debe conocer las máquinas que necesita utilizar para llevar a cabo la pieza proyectada y junto con el ingeniero de producción planear los tiempos, los recursos, la mano de obra y establecer metas claras de producción antes de dar comienzo al proceso. Por otro lado después de que el proceso se echó a andar se hace necesario

¹⁰³ Ibíd. 112 p.

controlarlo para verificar que se está cumpliendo con las metas planeadas en un principio sea para mantener la producción, mejorarla o ajustarla de acuerdo a la realidad del trabajo efectuado por las máquinas y los operarios en la planta o nuevos pedidos. Es allí donde se hace necesario la implementación de una herramienta conocida como el formato: BITÁCORA de PRODUCCIÓN, el cual busca controlar los tiempos, las piezas producidas, rechazadas, las causas de paradas de producción, etc.

Figura A6. Bitácora de producción.

BITÁCORA PRODUCCION

FECHA: D / M / A MÁQUINA: _____ No DE OPERARIOS DEL TURNO: _____
 N/P: _____ OPERACIÓN: _____

TURNO 3

HORA	Piezas Producidas	META TURNO	CAUSA RAZ DE PERDIDA DE PRODUCCION		OBSERVACIONES
			COD PARADA	TOTAL MIN.	
10:00 pm					
11:00 pm					
11:00 pm					
12:00 am					
12:00 am					
1:00 am					
2:00 am					
2:00 am					
3:00 am					
3:00 am					
4:00 am					
4:00 am					
5:00 am					
5:00 am					
6:00 am					
TOTAL			# Piezas Rechazadas		
OEE =	$\frac{\text{Piezas Producidas} \times \text{Piezas Rechazadas}}{\text{Meta Turno} \times 100}$				DILIGENCIA

TURNO 2

HORA	Piezas Producidas	META TURNO	CAUSA RAZ DE PERDIDA DE PRODUCCION		OBSERVACIONES
			COD PARADA	TOTAL MIN.	
2:00 pm					
3:00 pm					
3:00 pm					
4:00 pm					
4:00 pm					
5:00 pm					
5:00 pm					
6:00 pm					
6:00 pm					
7:00 pm					
7:00 pm					
8:00 pm					
8:00 pm					
9:00 pm					
9:00 pm					
10:00 pm					
10:00 pm					
TOTAL			# Piezas Rechazadas		
OEE =	$\frac{\text{Piezas Producidas} \times \text{Piezas Rechazadas}}{\text{Meta Turno} \times 100}$				DILIGENCIA

TURNO 1

HORA	Piezas Producidas	META TURNO	CAUSA RAZ DE PERDIDA DE PRODUCCION		OBSERVACIONES
			COD PARADA	TOTAL MIN.	
6:00 am					
7:00 am					
7:00 am					
8:00 am					
8:00 am					
9:00 am					
9:00 am					
10:00 am					
10:00 am					
11:00 am					
11:00 am					
12:00 pm					
12:00 pm					
1:00 pm					
1:00 pm					
2:00 pm					
TOTAL			# Piezas Rechazadas		
OEE =	$\frac{\text{Piezas Producidas} \times \text{Piezas Rechazadas}}{\text{Meta Turno} \times 100}$				DILIGENCIA

CÓD PARADAS NO PLANIFICADAS DE MAQ

A	Calentamiento de Insertos / Hidraulico
B	Falta de dispositivos / herramientas / gages
C	Mantenimiento de hta de forja o hta de corte
D	Mantenimiento imprevisto de máquina
E	Montaje en puesta a punto
F	Ajuste de medidas en puesta a punto
G	Falta de material / Transporte de material
H	Falta imprevista de energía, aire ,gas
I	Ausencia imprevista de personal
J	Retrabajos / Selección
K	Daño imprevisto de herramientas
L	Horno Frio

CÓD PARADAS PLANIFICADAS DE GESTIÓN

M	Aseo y Limpieza
N	Mantenimiento Planeado
O	Pruebas / Estudios de Irg de Productos / Procesos
P	Muestras Iniciales
Q	Reunión / Capacitación planeada
R	Falta planeada de personal


F3-004-0907
Rev. 02

Fuente: FORCOL.

Formato de operaciones.

Después de que los ingenieros de diseño y producción se han puesto de acuerdo para desplegar la producción de un componente mecánico en determinada cantidad, con una determinada calidad y en un determinado tiempo la tarea pasa a manos de los profesionales y técnicos en manufactura y mecanizado encargados de que el proceso de fabricación cumpla con los diseños, los estándares y los tiempos de fabricación no de una ni dos piezas sino de quizá miles de piezas las cuales deben ubicarse entre una estrecha banda de tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas. Para facilitar dicho control las grandes empresas han implementado una herramienta conocida como CARTA PUESTA A PUNTO o también llamada y utilizada como LISTA DE CHEQUEO donde se especifica detalladamente las variables, la descripción y el control del proceso en cuestión para que cada pieza en producción posea, al final de la línea las mismas características y propiedades proyectadas en el diseño.


Figura A7. Carta puesta a punto: Temple.

TEMPLE										
<input type="checkbox"/> CARTA DE PUESTA A PUNTO					<input type="checkbox"/> LISTA DE CHEQUEO					
		N/P: _____	APLICACIÓN: _____		FECHA: _____		TURNO _____			
		NIVEL DE ING.: _____	MAQUINA: _____		CELDA: _____					
		PLAN DE CONTROL REF.: _____	NIVEL DE REVISION: _____		TRAZABILIDAD: _____					
DESCRIPCION Y CONTROL DEL PROCESO										
DESCRIPCION CARACTERISTICA	ESPECIFICADO	INSTRUMENTO DE MEDICION	RESULTADO			DESCRIPCION CARACTERISTICA	ESPECIFICADO	RESULTADO		
	TEMPLE	DISPLAY	TEMPLE				TEMPLE	TEMPLE		
1 Temperatura		CRONOMETRO				6 Agitacion Medio Temple				
2 Tiempo de Ciclo		CRONOMETRO				7 Temperatura Medio de Temple				
3 Tiempo de Permanencia										
4 Piezas por Bandeja										
5 Concentracion Medio Temple										
DESCRIPCION Y CONTROL DEL PRODUCTO										
DESCRIPCION CARACTERISTICA	ESPECIFICACION	INSTRUMENTO DE MEDICION	PIEZA 1		PIEZA 2		PIEZA 3		OBSERVACIONES:	
			MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO		
8 Dureza		DUROMETRO								
APROBÓ:					ABREVIATURAS					
					N/P = NUMERO DE PARTE					
					N.A = NO APLICA					
					ING. = INGENIERIA					
F4-080-0909		REVISION 1	DIMENSIONES EN MILIMETROS			Hoja 1 de 1				

Fuente: FORCOL.

Existe además de la hoja de operación otros formatos estandarizados para los cuales tampoco existe una guía o receta sino que son diseñados por cada empresa dependiendo de las necesidades que tiene de controlar y normalizar sus procesos, este es el caso de la preparación de una solución química o aditivo que necesariamente debe prepararse bajo parámetros específicos.

Figura A8. Carta puesta a punto: centrado y refrentado.

 CARTA DE PUESTA PUNTO		NUMERO DE PARTE: 0-50-0017 APLICACION: MAZDA / 3-130		DESCRIPCION OP: CENTRADO Y REFRENTADO		HOJA: 1 DE 1	
		NIVEL DEL PRODUCTO: LIB FECHA: 10/07/2007		NOMBRE MAQUINA: CENTRADORA ENCOMARTIC LINEA/UNTA ESTRICIA		OP. No:	
		PLAN DE CONTROL N°: PEPC-020-001 REG. LOTE:		REGISTRO DE MUESTRO: FORMULADO: 13-02-2015 REV: 1 FECHA: 1-04-2015 ESTADO: <input checked="" type="checkbox"/>		020	
		ELABORO: AUDITOR DE CALIDAD		APROBO: LEONARDO QUEZADA		CARGO: COORDINADOR PROCESOS Y AJUST. CALIDAD	
NUM.	DESCRIPCION CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO	P.A.P.		P.A.P.		LISTA DE CHEQUEO Y EVENTOS	
		FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:
1.	LONGITUD TOTAL						
2.	PROFUNDIDAD DEL CENTRO BASE ESPIGA -A						
3.	PROFUNDIDAD DEL CENTRO BASE ESPIGA -B						
4.	RUN-OUT ENTRE A Y E						
NUM.	DESCRIPCION CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO	P.A.P.		P.A.P.		LISTA DE CHEQUEO Y EVENTOS	
		FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:
1.	LONGITUD TOTAL						
2.	PROFUNDIDAD DEL CENTRO BASE ESPIGA -A						
3.	PROFUNDIDAD DEL CENTRO BASE ESPIGA -B						
4.	RUN-OUT ENTRE A Y E						
NUM.	DESCRIPCION CARACTERISTICAS DEL PROCESO	P.A.P.		P.A.P.		LISTA DE CHEQUEO Y EVENTOS	
		FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:
1.	LONGITUD TOTAL						
2.	PROFUNDIDAD DEL CENTRO BASE ESPIGA -A						
3.	PROFUNDIDAD DEL CENTRO BASE ESPIGA -B						
4.	RUN-OUT ENTRE A Y E						
NUM.	DESCRIPCION CARACTERISTICAS DEL PROCESO	P.A.P.		P.A.P.		EVENTOS	
		FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:
1.	PRESION DE LA MAQUINA						
5.	PRESION DE ANCLAJE						
7.	AVANCE						
8.	R. P. M.						
9.	CONCENTRACION DEL REFRIGERANTE						
NUM.	DESCRIPCION CARACTERISTICAS DEL PROCESO	P.A.P.		P.A.P.		EVENTOS	
		FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:
1.	PRESION DE LA MAQUINA						
5.	PRESION DE ANCLAJE						
7.	AVANCE						
8.	R. P. M.						
9.	CONCENTRACION DEL REFRIGERANTE						
NUM. CANT.	DESCRIPCION DISPOSITIVOS Y HERRAMIENTAS	P.A.P.		P.A.P.		P.A.P.	
		FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:	FECHA: HORA: RESPONSABLE:
1.	4 MARGALES						
2.	2 SOPORTE DE LA PIEZA						
3.	1 PRESA						
4.	1 PORTA BROCA						
5.	2 MANGUETON DE REFRIGERANTE						
6.	1 BROCA DE CENTRO DERECHA						
7.	1 BROCA DE CENTRO IZQUIERDA						
OBSERVACIONES							

Fuente: FORCOL.

Formato para piezas fuera de especificación.

El control de calidad en una empresa busca estandarizar los procesos y procedimientos de fabricación antes que estandarizar los mismos productos generados por ella, esto quiere decir que es más importante asegurarse de la calidad en la fuente, es en este punto que se hace necesario la implementación de una herramienta que permita saber en tiempo real y específicamente que parte del proceso está fallando, para ello las empresas han implementado códigos internos de falla que les permiten identificar la causa del problema.

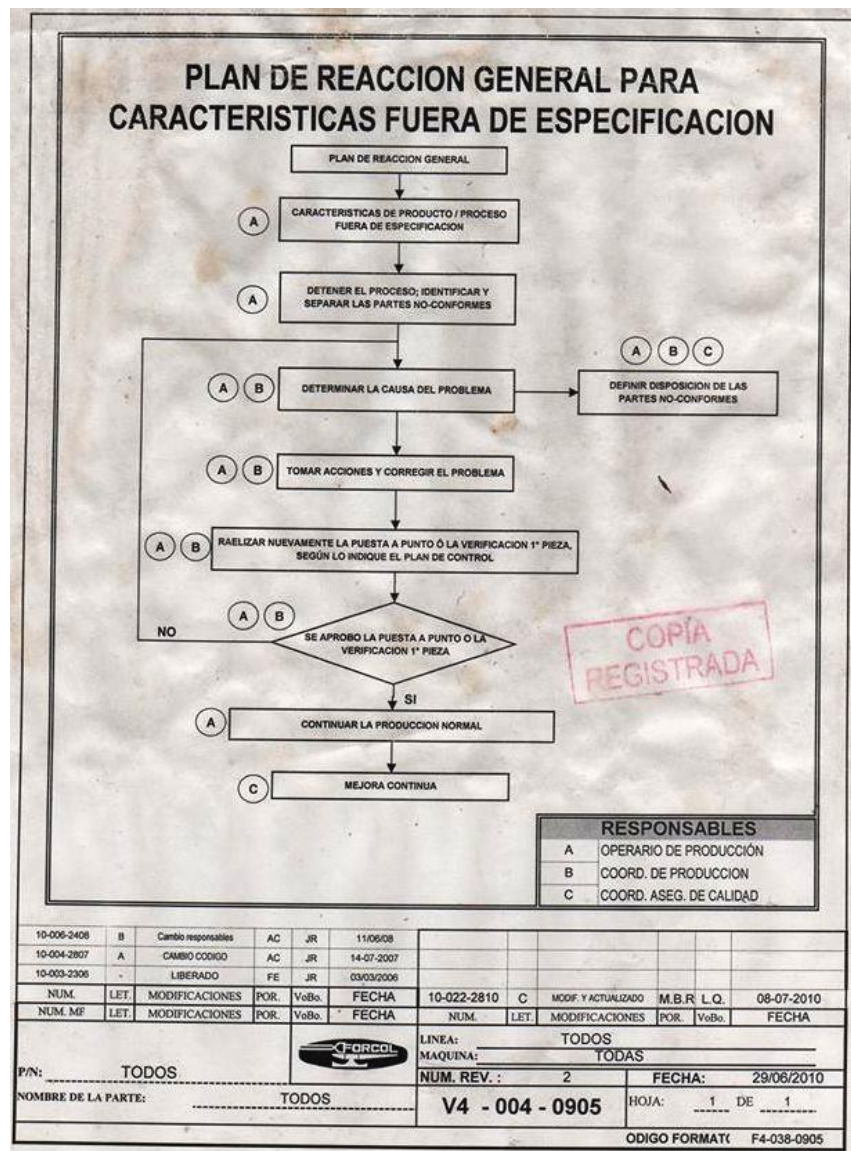
Figura A9. Códigos de rechazo línea de producción.

CODIGOS DE RECHAZOS LINEA DE CUBO RUEDA		
COD	CARACTERISTICA	MAQUINA
MDI	MUESTRAS INICIALES	TODAS
CA	PROGRAMACION	SUSTRAND
CAA	DIAMETRO BRIDA MENOR	
CAB	ROTURA HERRAMIENTA	
CAC	VARIACION MAQUINA	
CAD	OTROS	
CB	PROGRAMACION	FISHER 3
CBA	ALTURAS MAYORES / MENORES	
CBAB	DIAMETRO PRE ESTRIADO / ESTRIADO MAYOR / MENOR	
CBAC	DIAMETRO EMSAMBLE TUERCA MAYOR / MENOR	
CBAD	DIAMETRO EMSAMBLE CAJA TUERCA MAYOR / MENOR	
CBAE	DIAMETRO GUARDAPOLVO MAYOR / MENOR	
CBAF	DIAMETRO ESPESOR BRIDA	
CBAH	CONO INTERNO	
CBAI	ROTURA HERRAMIENTA	
CBAJ	VARIACION MAQUINA	
CBAK	OVALIDAD	
CC	PROGRAMACION	
CCA	DIAMETRO RODAMIENTO MAYOR / MENOR	
CCAB	DIAMETROS EXTERNOS MAYO / MENOR	
CCAC	ALTURAS MAYOR / MENOR	
CCAD	RUN OUT ALTO	
CCAE	ROTURA HERRAMIENTA	
CCAF	CAMBIO HERRAMIENTA	
CCAG	MALA CORRECCION	
CCAH	VARIACION MAQUINA	
CCAI	OVALIDAD	
CCAJ	OTROS	
CD	PROGRAMACION	VARINELLI
CDA	RUN OUT ALTO	
CDAB	ESTRIADO DESTRUIDO	
CDAC	OTROS	
CE	PROGRAMACION	SUPEMEC
CEA	DIAMETRO ESPARRAGO MAYOR	
CEAB	CONCENTRICIDAD MALA	
CEAC	ROTURA HERRAMIENTA	
CEAD	CAMBIO HERRAMIENTA	
CEAE	GOLPES	
CEAF	OTROS	
CFA	MACHO PARTIDO	ARBOGA
CFB	GOLPES	
CFC	ROSCA MAYOR	

Fuente: FORCOL.

Las grandes empresas han determinado en sus protocolos de calidad procedimientos normalizados de reacción para las características fuera de especificación para que todos y cada uno de los empleados sepan que acciones tomar al encontrar una de estas características fuera de norma.

Figura A10. Formato plan reacción general características fuera especificación.



Fuente: FORCOL.

Otra herramienta utilizada por las empresas para indexar las no conformidades, son las fichas de rechazo que además de asignarle un código a la pieza rechazada les determinan datos específicos de la no conformidad.

Figura A11. Ficha para material de rechazo.

Forma de rechazo de material reparable de FORCOL. El formulario contiene los siguientes campos:

- Logo de FORCOL.
- Título: MATERIAL RECHAZADO REPARABLE.
- Número de identificación: Nº 8430.
- Campos de texto: N / P, FECHA, HOJA INSP., APLICACIÓN, CANTIDAD, TRAZABILIDAD/COLADA.
- Campos de selección: NO CONFORMIDAD, RECLASIFICACIÓN (con casilla de verificación), RETRABAJO (con casilla de verificación).
- Campo de texto: Observaciones.
- Campo de texto: NOMBRE INSP.
- Código de referencia: F3-006-0805.


Fuente: FORCOL.

Fichas de despacho.

Por último, están las fichas de despacho que son las que finalizan la liberación del producto que termina en la línea de producción conforme a las medidas y propiedades mecánicas proyectadas en el diseño, esta parte también es importante para el control de calidad en una empresa pues dispone las piezas que se fabrican en el respectivo orden de salida que corresponde a las necesidades del cliente, esto quiere decir que los productos terminados se embalan para el cliente que los requiere y no para otro.

Figura A12. Formato ficha de despacho.

R8-007-0408



FICHAS DE DESPACHO

PRODUCTO: YOKE TRES PUNTAS CANTIDAD MAX. YOKES/ESTIBA: VER CUADRO

FORMA DE DESPACHO: SUNCHADOS MEDIO DE EMPAQUE: ESTIBA

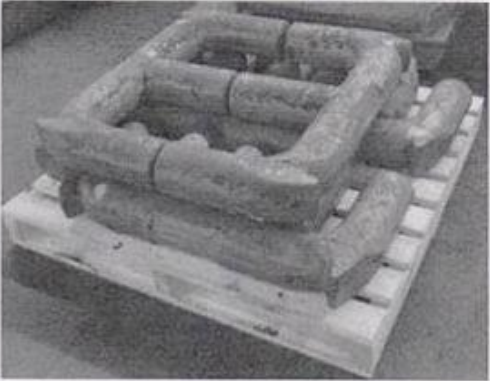
INSTRUCCIONES Y CARACTERISTICAS DEL COMPONENTE DE EMPAQUE

ITEM	NUMERO DE PARTE	APLICACIÓN	PESO PIEZA	CANT. MAX. YOKES/CAJA	CLIENTE
1	2322-2602016M	YOKE TRES PUNTAS	230	6	TR

FLUJO DE PROCESO DE EMPAQUE


```

graph TD
    INICIO([INICIO]) --> A[Ubicar las piezas en almacén *]
    A --> B[Identificar el material con el número de la colada +]
    B --> C[Ubicar las piezas en estibas +]
    C --> D[Generar remisión y factura de producto +]
    D --> FIN([FIN])
                    
```



OBSERVACIONES: * Operación realizada por operarios de Forja; # operación realizada por auditor de calidad
+ Operación realizada por operario de almacén

ELABORO: <u>Coord. De SGC</u>	APROBO: <u>Luis Alberto Santos</u>
FECHA: <u>30 de abril de 2008</u>	CARGO: <u>Gerenta de Planta</u>



F8-001-0408
Rev. 02

Fuente: FORCOL.

ANEXO D. FICHA TÉCNICA ACERO ANTI-DESGASTE: HARDOX 450.



Ficha Técnica: Version 2010-02-01

Hardox 450

Página.1 (2)

CHAPA ANTIDESGASTE

Hardox 450 es una chapa antidesgaste con una dureza aproximada de 450 HBW. Concebida para aplicaciones que exigen resistencia al desgaste junto a buenas propiedades para el conformado en frío. Hardox 450 presenta muy buena soldabilidad.

Aplicaciones	Cajas de volquetes, containers, Trituradoras, cribas, tolva, alimentadores dosificadores, elevadores, volcadores para minas, cucharas, cuchillos para cucharas, transportadores, cuchillas de corte, piñones y poleas para cadenas, máquinas cargadoras, camiones, máquinas de movimiento de tierras, excavadoras, tuberías sometidas a desgaste, transportadores de tornillo sin fin, prensas, etc.												
	Composición química (análisis de colada)	Espesor de chapa mm	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	B %	CEV valores típicos	CET valores típicos
	3* - (B)	0,21	0,70	1,60	0,025	0,010	0,25	0,25	0,25	0,004	0,41	0,30	
	B - 20	0,21	0,70	1,60	0,025	0,010	0,50	0,25	0,25	0,004	0,47	0,34	
	(20) - 40	0,23	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004	0,57	0,37	
	(40) - 50	0,23	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	0,25	0,60	0,004	0,59	0,36	
	(50) - 80	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,00	0,60	0,004	0,72	0,41	

*Chapa de espesor inferior a 4 mm solo tras acuerdo especial.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

El acero es de grado fino.

Dureza	HBW 425-475		
Propiedades mecánicas	Límite elástico R_e MPa 1200	Carga de rotura R_m MPa 1400	Alargamiento A_5 % 10
Resiliencia	Ensayo de temperatura °C -40 (-40°F)	Energía de impacto Charpy-V, probeta longitudinal J 40	
Ensayos	Ensayo de dureza Brinell, según EN ISO 6506-1, en superficie mecanizada 0,5-3 mm bajo la superficie de la chapa por colada y 40 Tn. Los ensayos se realizan para cada variación de 15 mm en el espesor de chapas de la misma colada.		
Condiciones de suministro	Q.		

www.hardox.com



Dimensiones	<p>Hardox 450 se suministra en espesores desde 3^o-80 mm. Para más detalles sobre dimensiones con - sultar nuestro catálogo 41 - Información general de productos Weldox, Hardox, Armax y Toolox - ES.</p> <p>*Chapa de espesor inferior a 4 mm solo tras acuerdo especial</p>
Tolerancias	<p>Tolerancias de espesor de acuerdo con la garantía de precisión de espesor AccuRollTech™ de SSAB Oxelösund.</p> <p>- AccuRollTech™ cumple los requerimientos de EN 10 029 Clase A, pero ofrece tolerancias más reducidas.</p> <p>Información más detallada puede obtenerse en nuestro catálogo 41 - Información general de productos Weldox, Hardox, Armax y Toolox - ES.</p> <p>Según EN 10 029.</p> <p>- Tolerancias de forma, largo y ancho.</p> <p>- Tolerancias de planicidad según Clase N (Tolerancias normales).</p>
Propiedades de superficie	<p>Según EN 10 163-2</p> <p>- Requerimientos según Clase A.</p> <p>- Condiciones de reparación según Subclase 1. (Permite reparación por soldadura)</p>
Requerimiento general técnico de suministro	<p>Según 41 - Información general de productos Weldox, Hardox, Armax y Toolox - ES.</p>
Tratamiento térmico y fabricación	<p>Hardox 450 ha obtenido sus propiedades mecánicas gracias al templeado y si fuere necesario por revenido. Hardox 450 no debe ser calentado a más de 250^o(480^oF) si se quiere mantener las propiedades de la chapa.</p> <p>Hardox 450 no admite tratamientos térmicos posteriores.</p> <p>Para más información sobre soldadura y fabricación, vea nuestros catálogos en www.hardox.com o consulte nuestro departamento técnico.</p> <p>Se tomaran las debidas precauciones a la hora de soldar, cortar, granallar o otros trabajos sobre el producto. El granallado, especialmente en chapas imprimadas, puede producir polvo con gran concentración de partículas. Nuestro departamento de servicio técnico al cliente proveerá de más información a petición.</p>

HARDOX® TechSupport

Information from
SSAB Oxelösund.

#55

Cambio de HARDOX 400 a HARDOX 450

Un cambio de HARDOX 400 a HARDOX 450 ofrece la posibilidad de incrementar la vida útil o crear estructuras de menor peso y, en algunos casos, ambas cosas. Gracias a las favorables características de trabajo de HARDOX en el taller, en la mayoría de los casos el cambio es un proceso armónico, que no comporta mayores dificultades.

SSAB Oxelösund es el único productor de chapa antidesgaste HARDOX.

Información general

Propiedades mecánicas:	HARDOX 450	HARDOX 400
Dureza:	425 – 475 HB	370 – 430 HB
Límite de elasticidad*:	1200 MPa	1000 MPa
Resistencia a la tracción*:	1400 MPa	1250 MPa
Alargamiento A ₅ *:	10%	10%
Tenacidad a los impactos a -40 °C*:	40 J	45 J

* Valor típico para chapa de 20 mm de espesor.

Dimensiones:	HARDOX 450	HARDOX 400
Gama de espesores:	3,2 – 80 mm	4,0 mm – 130 mm
Anchura máx.:	3,3 m	3,3 m



Ventajas del salto de calidad

Mayor vida útil

Los 50 Brinell de dureza que se ganan con el cambio al HARDOX 450 incrementan la duración del material. Los estudios de casos reales muestran que es posible alcanzar un aumento en la vida útil de hasta el 50%, y en algunas aplicaciones incluso valores más altos.

Ejemplos de incrementos en la vida útil obtenidos cambiando HARDOX 400 por HARDOX 450 para distintos materiales, desgaste por deslizamiento, según WearCalc™:

Basalto	35 – 45%
Granito	75 – 85%
Chatarra de acero de taller	35 – 45%

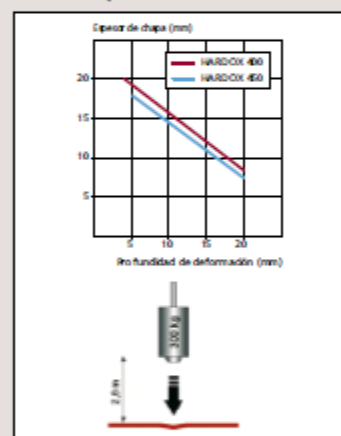
Estructuras menos pesadas

Adoptando HARDOX 450 en lugar de HARDOX 400 puede usarse chapa más delgada en las aplicaciones. Una chapa más delgada hace que los productos pesen menos, pudiéndose aumentar la carga útil máxima y la rentabilidad. La experiencia acumulada por nuestros clientes muestra que pueden conseguirse reducciones de peso de hasta el 15%. No obstante, al realizar el diseño debe tenerse en cuenta la conformación, flexión y resistencia a la fatiga.

Mayor resistencia a las abolladuras

Sustituyendo HARDOX 400 por HARDOX 450 se incrementa la resistencia a las abolladuras, tal como se muestra en la figura. En este ensayo se deja caer un peso de 300 kg desde una altura de 2,8 m sobre una chapa de 600 x 600 mm.

Resultados de ensayos de impacto por caída de HARDOX 400 y HARDOX 450:



HARDOX 450 en el taller

Soldadura

HARDOX 450 puede ser soldado con todos los métodos convencionales de soldadura por arco previstos para soldar chapa de acero ordinario y de alta resistencia. Deberían usarse consumibles básicos y de rutilo que confieran un contenido máximo de hidrógeno de 5 ml/100 g. Además, estos deberán poseer un límite de elasticidad de unos 500 MPa. Con ellos se reduce el nivel de tensiones residuales en la junta y, por tanto, su susceptibilidad al agrietamiento en frío. Usando consumibles de acero inoxidable austenítico AWS 307 o AWS 309 puede evitarse el precalentamiento.

Temperatura de precalentamiento recomendada usando una aportación de calor de 1,7 kJ/mm y un contenido de hidrógeno de máximo 5 ml/100 g en el material depositado, °C:

Espesor combinado de chapa (mm)	HARDOX 450	HARDOX 400
< 40	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
40 – 65	100	75
65 – 100	125	100
> 100	175	175

Corte

Pueden utilizarse todos los métodos de corte: oxi-fuel, plasma, láser, corte por chorro de agua abrasivo (AWJ).

Recomendaciones al cortar HARDOX 450 con el método oxi-fuel (oxicorte). Requisitos de precalentamiento, °C:

Espesor de chapa (mm)	HARDOX 450	HARDOX 400
< 40	sin precalentamiento	sin precalentamiento
40 - 44,9	100	sin precalentamiento
45 - 49,9	100	100
50 - 59,9	150	100
60 - 69,9	150	150
70 - 80	175	150

Velocidades reducidas de corte (mm/min) posibles de usar sin precalentamiento:

Espesor de chapa (mm)	< 40	40	45	50	60	70	80
HARDOX 450	sin restricciones	230	200	180	170	160	150
HARDOX 400	sin restricciones	sin restricciones	230	210	200	190	180

Plegado

Radio de herramienta (R) y abertura de matriz (W) mínimos recomendados cuando la línea de plegado es perpendicular o paralela a la dirección de laminado.

Espesor (t) (mm)	Perpendicular R / t		Paralela R / t		Perpendicular W / t		Paralela W / t	
	HARDOX 450	HARDOX 400	HARDOX 450	HARDOX 400	HARDOX 450	HARDOX 400	HARDOX 450	HARDOX 400
t < 8	3,5	2,5	4,0	3,0	10,0	8,5	10,0	10,0
8 ≤ t < 20	4,0	3,0	5,0	4,0	10,0	10,0	12,0	10,0
t ≥ 20	5,0	4,5	6,0	5,0	12,0	12,0	14,0	12,0

La fuerza de plegado necesaria puede calcularse usando la fórmula de abajo:

$$P = \frac{1,6 \times b \times t^2 \times R_m}{10000 \times W}$$

W = abertura de matriz (mm)

b = longitud de plegado (mm)

t = espesor de chapa (mm)

R_m = resistencia a la tracción (MPa)

La fuerza resultante se presentará en toneladas (1 tonelada equivale a 10kN) con una precisión de ±20%.

HARDOX 450 tiene una resistencia a la tracción más alta, por tanto la fuerza de plegado necesaria se verá incrementada aproximadamente un 12% en comparación con la fuerza necesaria para plegar chapa HARDOX 400 del mismo espesor. Al aumentar la calidad de la chapa, el espesor puede reducirse como mínimo en un 6% usando la misma fuerza de plegado que para HARDOX 400. Es decir, la fuerza necesaria para plegar HARDOX 450 de 19 mm es igual a la que hace falta para plegar HARDOX 400 de 20 mm, y plegando HARDOX 450 de 5,5 mm es igual que HARDOX 400 de 6 mm.

Taladrado

Drill	HSS-8% Co		Carburo cementado macizo		Carburo cementado soldado		Plisquitas intercambiables	
	HARDOX 430	HARDOX 400	HARDOX 430	HARDOX 400	HARDOX 430	HARDOX 400	HARDOX 430	HARDOX 400
Vc (m/min)	7	9	30 - 40	35 - 45	30 - 40	35 - 45	50 - 70	60 - 80
f (mm/rev)	0,05 - 0,30	0,05 - 0,35	0,10 - 0,15	0,10 - 0,15	0,10 - 0,15	0,10 - 0,15	0,06 - 0,14	0,06 - 0,14

Asesoramiento técnico

Si desea información más detallada no dude en ponerse en contacto con nuestro representante de ventas local.

HARDOX®

WEAR PLATE

Chapa antidesgaste HARDOX, sólo de SSAB Oxelövand.
HARDOX es una marca registrada de SSAB Oxelövand.

SSAB
OXELÖVAND

SSAB Oxelövand AB
SE-613 80 Oxelövand
Suecia

Teléfono +46 155-25 40 00
Fax +46 155-25 40 73
www.ssaab.com
www.hardox.com

En caso de discrepancias prevalecerá la versión inglesa de este documento.
En www.ssaab.com/publications puede descargarse la versión más reciente.

Este folleto contiene sugerencias de carácter general. No obstante, SSAB Oxelövand AB no asumirá explícitamente responsabilidad alguna acerca de su idoneidad en aplicaciones individuales. Rotar bajo la responsabilidad del usuario de este folleto adaptar las recomendaciones aquí dadas a los requisitos de cada aplicación individual.

TS-SSA-Uppdragsgivare från HARDOX 400 to HARDOX 430, 44-02-2007

ANEXO E. TABLA RUGOSIDADES SUPERFICIALES MECANIZADO. ¹⁰⁴

698 Capítulo 23 Procesos de maquinado utilizados para producir formas redondas: torneado y producción de orificios

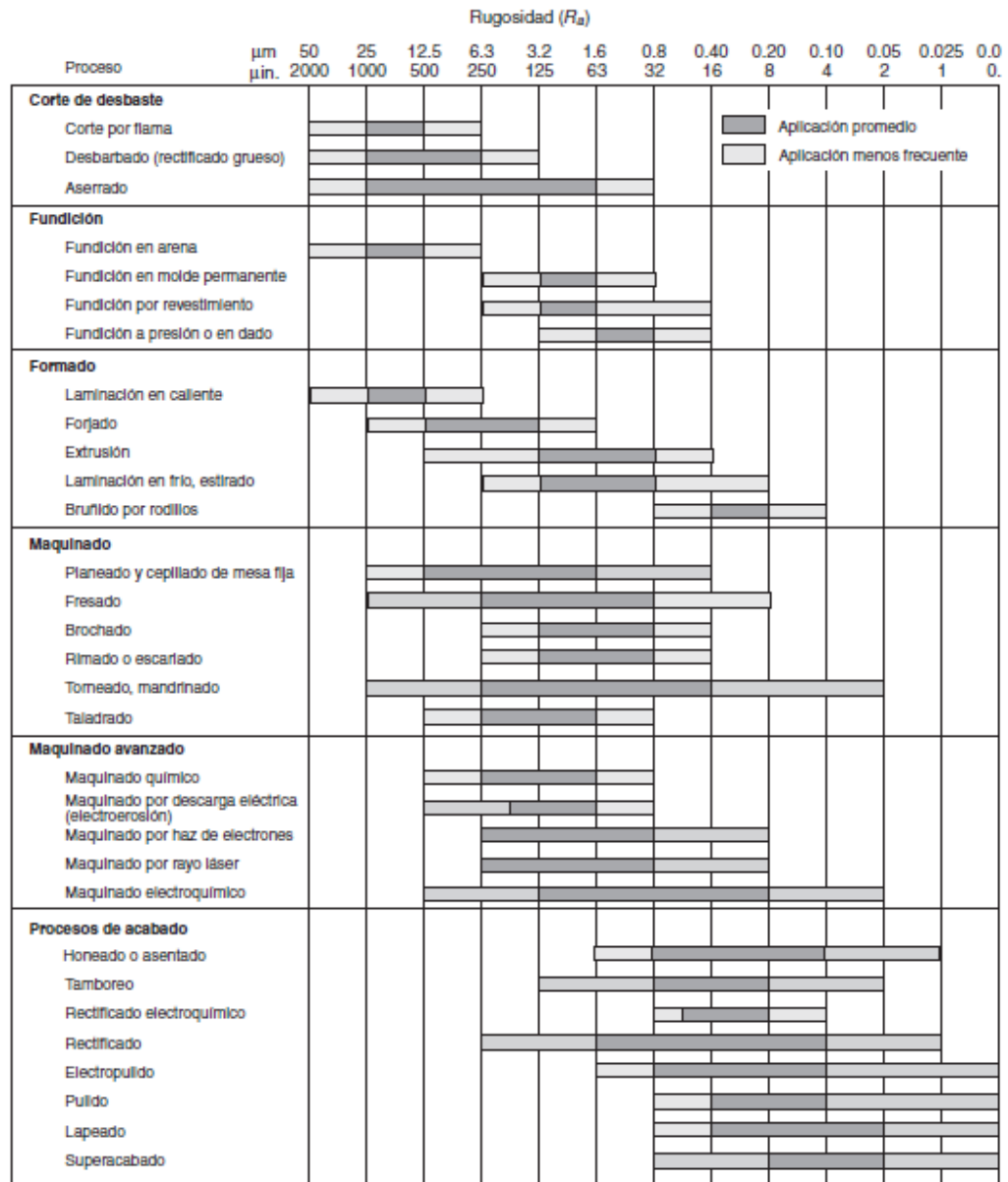



FIGURA 23.13 Rugosidades de superficies obtenidas en diversos procesos. Obsérvese la amplia variedad dentro de cada grupo, sobre todo en torneado y mandrinado.

¹⁰⁴ Kalpakjian, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. Pearson Educación. México. 2008. página 698.

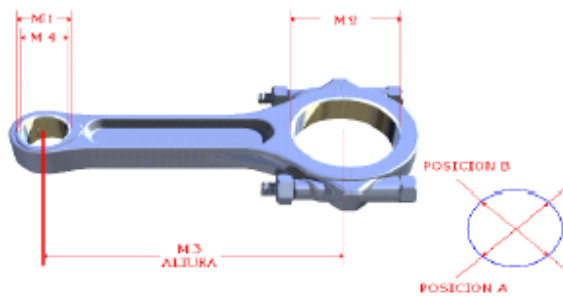
ANEXO F. REPORTE COMPLETO METROLOGÍA BIELA ORIGINAL.

 METALIZADORA DEL ORIENTE LTDA	MANUAL DE PROCESOS PR-RP-080-ADM-000	Rev. No: 01	Fecha Lib.: 12/10/06
	FORMATO DE MEDICIONES INICIALES Y FINALES F-RP-070-ADM-002	Fecha Rev.: 12/10/06	Aprobó: Gerente General
		Elaboró: Asistente De Calidad	

EVALUACION DE BIELAS

7

CLIENTE JOSE HERNANDO VILLAMIZAR
MOTOR
PEDIDO No.



BIELA No.	MEDIDA 1		MEDIDA 2		MEDIDA 3 ALTURA DE BIELA SIN BUJE	MEDIDA 4 ALTURA DE BIELA CON BUJE	
	A	B	A	B			
1	511	512	787	788	2.438		
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

ESPECIFICACIONES

--	--	--

OBSERVACIONES Medidas en pulgadas




DANI ROMERO VILLALBA
INGENIERO DE PRODUCCION



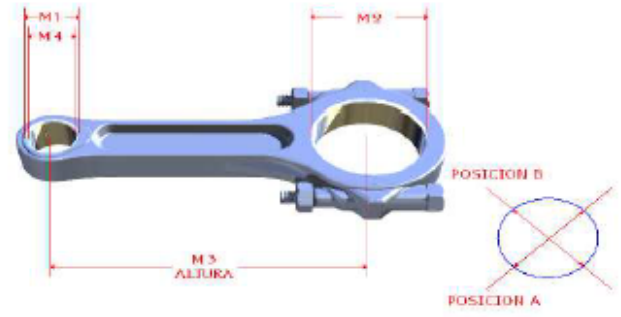
JOSE MARTINEZ
RESPONSABLE DE BIELAS

ANEXO G. REPORTE COMPLETO METROLOGÍA BIELA PROTOTIPO.

 METALIZADORA DEL ORIENTE LTDA	MANUAL DE PROCESOS PR-RP-080-ADM-000	Rev. No: 01	Fecha Lib.: 12/10/08
	FORMATO DE MEDICIONES INICIALES Y FINALES F-RP-070-ADM-002	Fecha Rev.: 12/10/08	Aprobó: Gerente General
		Elaboró: Asistente De Calidad	

EVALUACION DE BIELAS 7

CLIENTE
MOTOR GUADAÑADORA SHINDAIWA B450EC1
PEDIDO No.



BIELA No.	MEDIDA 1		MEDIDA 2		MEDIDA 3 ALTURA DE BIELA SIN BUJE	MEDIDA 4 ALTURA DE BIELA CON BUJE	
	A	B	A	B			
1	514	514	789	790	2441	N/A	N/A
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

ESPECIFICACIONES		

OBSERVACIONES MEDIDAS EN MILESIMAS DE PULGADAS.




DANI ROMERO VILLALBA
INGENIERO DE PRODUCCION

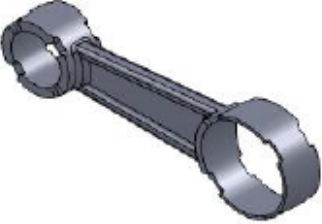


JOSE MARTINEZ
RESPONSABLE DE BIELAS

Impreso: jueves, 08 de enero de 2015

ANEXO H. RECIBOS Y COTIZACIONES EMPRESAS DE MANUFACTURA.

		PLAN DE TRABAJO No. 0-1-25-1 FABRICACIÓN DE BIELA SEGUN PLANO GRAFITO ESFEROIDAL		MATERIAL:
FECHA	Septiembre 24 de 2014	CONTACTO		
LUGAR	Giron- Santander	DIRIGIDO A	ING. ANDRES LIZCANO	
CLIENTE	ING. ANDRES LIZCANO	ELABORADO POR	Ing. Ricardo Andrés García Ing. Luis Carlos Franco	

OBJETIVOS		
FABRICACION DE BIELA SEGUN PLANO		
		
Diseño	Diseño para moldeo y colada.	Validación del dibujo para fundición.

FUNDAMENTO TEÓRICO	

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES		
ACTIVIDAD	Mes	
	Semana 1	Semana 2
DISEÑO EN SOFTWARE CAD		
FABRICACIÓN DE MODELOS DE FUNDICIÓN		
FUSIÓN Y COLADA DE MOLDES		
ENTREGA FINAL DEL PRODUCTO		

PROPUESTA TECNICO - ECONOMICA				
ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	V/R UNITARIO	VALOR TOTAL
BIELA SEGÚN PLANO	UN.	5000	\$ 20,000	\$ 100,000,000
PLACA MODELO EN ALUMINIO	UN.	1	\$ 4,000,000	\$ 4,000,000
SUB-TOTAL				\$ 104,000,000

	TOTAL \$ 104,000,000
--	-----------------------------

CONDICIONES COMERCIALES	
Vigencia de la Oferta:	30 días
Tiempo de Entrega:	Según cronograma(60 DIAS HABILES) (A PARTIR DE LA ORDEN DE COMPRA Y PAGO DE ANTICIPO)
FABRICACION:	SEGÚN PLANO PROPORCIONADO
Lugar de Entrega:	Nuestras Instalaciones (KM 1 VIA AL ALTO- VEREDA LAGUNETAS- GIRÓN)
ANTICIPO:	30 % PARA INICIAR EL TRABAJO \$31,200,000.0
Valores sin IVA	
NOTA:	NO INCLUYE MECANIZADO

ING. RICARDO ANDRES GARCIA

CORTE LASER

**TORNO - CENTRO MECANIZADO - SOLDADURA - ESPECIALISTAS EN MANTENIMIENTO
REPARACION Y FABRICACION DE PIEZAS PARA LA INDUSTRIA**

Bucaramanga, Noviembre 06 de 2014

Señores:
DOLMAR
Andres Lizcano Villamizar
Ingeniero Mecanico



De acuerdo a su amable solicitud. Presentamos a su consideración la siguiente cotización:

Cant.	Descripción del Servicio	Valor Unit.	Valor Total
5000	Mecanizados Biela Motor 2T Dolmar	5.500	27.500.000
		Sub Total	27.500.000
		IVA 16%	4.400.000
		TOTAL	31.900.000

OBSERVACION

Premecanizado según plano, espesor de los 2 diámetros
en los agujeros mostrados en el plano.

CONDICIONES COMERCIALES

Tiempo de Entrega : 60 días hábiles después de confirmada la orden de compra


Forma de pago : 50% Inicial

50% En la entrega del producto.

Cualquier inquietud gustosamente lo atenderemos

Atentamente:

Erving Ricardo Moreno Pacheco

Cia. General de Aceros S.A. FACTURA DE VENTA No. **90409971** 

Nit: 860.069.182-1 OFICINA BUCARAMANGA Julio 11 de 2014 Pagina 17 - 1

Ciudad: 22108 JOSE HERNANDO VILLAMIZAR VILLAMIZAR Condición de pago: Pago anticipado Moneda: COP
 No: 1006640325 Telefonos: 3178737137 Fax: Vencimiento: 11.07.2014
 Dirección radicación factura: FLORIDABLANCA Orden de Compra: JOSE
 Dirección entrega material: Número de Pedido: 393705
 Nros. de Entrega: 80449691

POR FAVOR REALIZAR EL PAGO A NOMBRE DE CIA GENERAL DE ACEROS SA EN LA CUENTA CORRIENTE DE BANCO DE OCCIDENTE 290-02597-2, BANCO DE BOGOTA 020-00999-9, BANCOLOMBIA 046-0845987 Y ENVIAR SOPORTE DE PAGO AL CORREO blana.onofre@oga.com.co o aceros@oga.com.co

FACTURA POR COMPUTADOR AUTORIZADA DESDE 903993009 HASTA 90700000 SEGUN RESOLUCION 310020077687 DE 20140502 COD. ICA INDUSTRIAL 2410 TAR 0 65% COD. ICA COMERCIALIZACION 4662 TAR 1 104%

CODIGO	DESCRIPCION	DIMENSIONES	CANTIDAD		VALOR			
			Unidad	Kilos	Unitario	Desc	Total	
10222	CORTES LAMINA MAXOUR-450 NEGRO RECTANGULAR	10 00 mm x 200 00 mm x 200 00 mm	1	3.331	30.172	0 %	30.172	
SUBTOTAL								30.172
VALOR FLETE								0
I.V.A.								4.808
VALOR NETO								35.000

ESTA FACTURA DE VENTA SE ASIMILA EN TODOS SUS EFECTOS LEGALES A LA LETRA DE CAMBIO CONFORME A LOS ARTICULOS 727 Y 728 DEL CODIGO DE COMERCIO SE FACTURAN INTERESES DEL MANTENIMIENTO VIENTE AL MOMENTO DE LA EMISION CUANDO POR MORA, SERVIDO RETENEDOR Y EL TOTAL DEL CAPITAL POR EL SOLO RECLAMAMIENTO O MORA EN EL PAGO O CONDICIONES DE CREDITO ASESIGNADAS. PARA LA ENTREGA DE MANTENIMIENTO SE REQUIERE RESPONDERABLE EL SELLO DE LA COMPAÑIA, FIRMA Y CEDULA DEL FUNCIONARIO QUE RETIRA.

SON: TREINTA Y CINCO MIL PESOS MCTE

No DE CHEQUE	FECHA	VALOR	BANCO
No DE CHEQUE 1	FECHA	VALOR	BANCO
No DE CHEQUE 2	FECHA	VALOR	ENTIDAD AVALADORA
No DE CHEQUE 3	FECHA	VALOR	NO AUTORIZACION

CONDICION PAGO: _____

ACEPTO LA PRESENTE Y DECLARO HABER RECIBIDO REAL Y MATERIALMENTE LOS ARTICULOS ANTES DESCRITOS

Firma T SSGO Comprador/ Fecha Recibido


Elaboro la factura: TABAZONA GONZALEZ FABIO ANDRES CHAVEZ OLIVERAS HERNANDEZ

OBSERVACIONES:
 EN CASO DE RECLAMO DEBIDAMENTE COMPROBADO SOBRE LA CALIDAD DEL MATERIAL Y/O SERVICIO SUMINISTRADO, COMPAÑIA GENERAL DE ACEROS S.A. ÚNICAMENTE RESPONDERA CON EL REEMBOLSO DEL MATERIAL Y/O SERVICIO DEFECTUOSO O HASTA EL VALOR DEL MATERIAL RECIBIDO EN CASO DE ACUERDO A LA LEY 1251 DE JULIO 17 DE 2008, UNA VEZ CUMPLIDO EL TERMINO DE PLAZA (10) DIAS CALENDARIOS SIGUIENTES A LA RECEPCION DE LA PRESENTE FACTURA, NO RECLAMARE EN CONTRA DE SU CONTADORA, SE ENTIENDE QUE ESTA HA SIDO ACEPTADA DE FORMA TACITA E IRREVOCABLE

Principal Bogotá Av. 58 No. 37B-51 Sur PBX: (1) 770 0560 FAX: (1) 770 0550 770 0530 Bogotá Centro de Producción Inocencio Díaz 54 No. 47-01 Tel: 420 6900 Fax: 420 7153 Cartagena Diag. 30 No. 54-206 Local 19 Centro Comercial Memorial Plaza Tel: 667 3940 Fax: 677 0527 Cali Cra. 31A No. 15 - 59 Acopi - Yumbo PBX: 691 8585 Fax: 665 8593 Medellín Calle 52 No. 41 - 139 Itagüé PBX: 372 4100 Fax: 277 6088 Bucaramanga Cra. 14 No. 23 - 02 PBX: 633 7708 Fax: 633 2779 Barranquilla Vía 40 No. 51 - 444 PBX: 371 7600 Fax: 344 3328

Regimen: Cámara de Comercio 113216, Regimen Contable Ración 05-3107-1, Código Actividad Económica Pyme 2410 - Otros grandes contribuyentes, Resolución 2006 Decretos 2036 - Otros administradores, Resolución 844 DIAN Arit 2598

www.oga.com.co www.oga.com.co

 **IMATT S.A.S.** 890 212 604-8 * ORIGINAL

Ingeniería de Materiales, Mantenimiento y Tratamientos Térmicos Limitada

ORDEN DE PEDIDO No.: 0029464

Fecha: 17/12/2014

Certificado C005/990 Autopista a Girón Km.6 Cra. 12 Tel. 6532301 - 6469752 Bucaramanga, Colombia

Ciudad: 001471 MECANIZADO Nit: 00001
 Dirección: GIRÓN Tel:
 Orden de Compra: Fecha de Entrega: 20/12/2014

DETALLE DEL INFORME

Producto	Piezas	Descripcion	Cantidad	Und.
TRATAMIENTO TERMICO	1	PIEZA HARDOX 450 60 HRC	1.00	UND.

Observaciones:

NOTA: La garantía de los Servicios de Tratamiento Térmico, Metalizado y Laboratorio Metalográfico, está limitada a la información suministrada por el cliente en su orden de servicio.

ENTREGADO	RECIBIDO	APROBADO
El Cliente	Recepción	
Fecha y Hora Recepción:	17/12/2014 16:22:14	

IMATT S.A.S. INGENIERIA DE MATERIALES MANTENIMIENTO Y TRATAMIENTOS TERMICOS TEL: 890 212 604-8

*** Visite nuestra página <http://imatttda.com> e-mail: imatttda@yahoo.com



HYDRO BAS S.A.S.
CORTE UNIVERSAL EN FRIO

NIT. 900.648.449-1 RÉGIMEN COMÚN

Calle 22 # 11 - 23
Tel. 671 3662
Bucaramanga - Colombia
hydrobas@outlook.com

FECHA	DIA	MES	AÑO
	23	09	2014

VENCE	DIA	MES	AÑO
	23	09	2014

FACTURA DE VENTA

Nº FV 0222

CLIENTE:	JOSE VILLAMIZAR VILLAMIZAR	NIT:	
DIRECCIÓN:		CIUDAD:	Floridablanca
E-MAIL:		TEL:	
		CELULAR:	3178737137

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VR. UNIT.	VR. TOTAL
1	1	SERVICIO CORTE BIELA ABIERTA LAMINA	21.000	21.000



SON:	VEINTI CUATRO MIL TRESCIENTOS SESENTA PESOS MCTE.	SUBTOTAL \$	21.000
		I.V.A. \$	3.360
		TOTAL \$	24.360

RESOLUCIÓN DIAN N° 40000186384 DE FECHA 2014/01/21 AUTORIZA NUMERACIÓN DEL FV 0001 AL FV 1000

RECIBIR EL SERVICIO Y/O PRODUCTOS DESCRITOS EN LA PRESENTE FACTURA DE VENTA, QUE POR SI SOLA SURTE LOS EFECTOS DE TÍTULO VALOR, EN RAZÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LO ESTABLECIDO EN LA LEY 1201 DEL 2008, SEGÚN EL ARTÍCULO TRIBUTARIO, CÓDIGO DE COMERCIO Y DEMÁS NORMAS. SE HACE CONSTAR QUE LA FIRMA DE UNA PERSONA DISTINTA DEL COMPRADOR IMPLICA QUE DICHA PERSONA SE ENTENDE AUTORIZADA EXPRESAMENTE POR EL COMPRADOR PARA FIRMAR, CONFESAR LA DEUDA Y OBLIGAR AL COMPRADOR. TODA MORA EN EL PAGO CAUSARÁ INTERESES MENSUALES DE ACUERDO A LA TASA MÁXIMA AUTORIZADA POR LA LEY.

FIRMA HYDRO BAS

FIRMA CONFORME

NIT. ó C.C.

ORIGINAL CLIENTE

ANEXO I. FORMATOS Y PLANOS PARA MANUFACTURA.

Los formatos y planos para manufactura de la biela prototipo, al igual que los videos de prueba con la biela instalada y funcionando dentro del motor Shindaiwa B450EC1, se encuentran en la carpeta ANEXOS contenida dentro del CD que acompaña este trabajo de investigación.