

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

*ANÁLISIS DEL DISEÑO MECÁNICO Y LA
FABRICACIÓN DE UNA BIELA DE AUTOMÓVIL*

Alumno: Redondo Cremilde, Rubén

Directora: Ortega Rodríguez, Naiara

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 25 de junio de 2019

Resumen

En este documento se presenta el análisis mecánico y del proceso de fabricación de la biela de un motor de combustión interna de cuatro tiempos. En primera instancia, se decide qué material es más conveniente emplear para fabricar el componente y de entre todos los posibles procesos principales de fabricación cuál se utiliza. A continuación, empleando el software AutoCad, se realiza un modelo 3D de la pieza. Con el modelo realizado y el material seleccionado se analiza mecánicamente utilizando un software de elementos finitos: ANSYS Workbench. Esto permite validar el diseño analizando tensiones, deformaciones y el comportamiento a fatiga. Finalmente, se procede a estudiar el mecanizado de la biela con objeto de realizar una hoja de procesos. Para ello se decide qué operaciones se van a realizar y qué herramientas se utilizarán.

Palabras clave: biela, análisis mecánico, diseño, fabricación, AutoCad, ANSYS Workbench, mecanizado, hoja de procesos.

Abstract

The aim of this document is to describe the mechanical analysis and manufacturing process of a four-stroke internal combustion engine connecting rod. First of all, it is necessary to select the material of the connecting rod and its main manufacturing process. Next, using AutoCad, a 3D model of the connecting rod will be done. With this model and the selected material, the component will be analysed using a finite element software: ANSYS Workbench. Analysing stress, deformation and fatigue behaviour the validity of the design can be verified. Eventually, the machining process is studied to obtain an operation process sheet. To achieve it, it will be decided which operations will be made and which tools will be used.

Key words: connecting rod/conrod, mechanical analysis, design, manufacturing, AutoCad, ANSYS Workbench, machining, operation process sheet.

Laburperna

Dokumentu honen helburua lau aldiko barne-errekuntzako motor baten bielen analisi mekanikoa eta fabrikazio prosezua aurkeztea da. Lehenik eta behin, zer material erabiliko den eta zein izango den fabrikazio prozezu nagusia erabakiko da alternativa analisi baten bidez. Ondoren, bielaren 3D modeloa egingo da AutoCad software-ra erabiliz. Behin modelua eginda eta zein material erabiliko den jakinda, analisi mekaniko egingo da elementu finituko software baten bidez: ANSYS Workbench. Software hau tentsioak, deformazioak eta fatiga portaera aztertzeke herremintak emango ditu. Proiektuaren azken etapan bielaren mekanizazio prozezu analizatuko da prozezu orri bat egiteko helburuarekin. Horretarako zer operazio egin behar diren eta zehin herreminta erabiliko diren aukeratuko da.

Gako hitzak: biela, analisi mekanikoa, diseinua, fabrikazioa, AutoCad, ANSYS Workbench, mekanizazioa, prozezu orria.

Índice de contenidos

1.	Introducción	1
2.	Contexto	2
2.1.	Situación económica del mercado de la automoción	2
2.2.	Tendencias de mercado	4
2.3.	El motor del automóvil	6
3.	Objetivos y alcance del trabajo	9
4.	Beneficios que aporta el trabajo	10
5.	Análisis de alternativas	11
5.1.	Alternativas de material	11
5.1.1.	Descripción de los materiales.....	11
5.1.2.	Tabla de decisión del material.....	14
5.2.	Alternativas en el proceso de fabricación	15
5.2.1.	Descripción de los procesos de fabricación	15
5.2.2.	Tabla de decisión del proceso de fabricación	17
6.	Procedimiento de desarrollo de las tareas.....	19
6.1.	Etapas de investigación y revisión de la información	19
6.2.	Etapas de análisis resistente del componente	19
6.2.1.	Modelado en CAD.....	19
6.2.2.	Obtención de las sollicitaciones sobre la biela.....	21
6.2.3.	Realización del análisis resistente mediante software MEF	23
6.3.	Etapas de fabricación	24
6.3.1.	Decisión de las operaciones a realizar y su orden.....	24
6.3.2.	Decisión de las herramientas a emplear	24
6.3.3.	Realización de la hoja de procesos.....	24
7.	Descripción de los resultados.....	25
7.1.	Resultados del análisis resistente	25
7.1.1.	Uniones entre elementos	26
7.1.2.	Mallado.....	27
7.1.3.	Análisis cinemático	29
7.1.4.	Análisis dinámico	30
7.2.	Resultados del proceso de fabricación	38
7.2.1.	Operaciones de mecanizado	38
7.2.2.	Herramientas de mecanizado.....	39
7.2.3.	Hoja de procesos	49

7.2.4.	Resumen del proceso de fabricación	60
8.	Planificación del proyecto	61
8.1.	Fases.....	61
8.1.1.	Fase 1: selección del componente	61
8.1.2.	Fase 2: investigación sobre el componente	61
8.1.3.	Fase 3: diseño del componente.....	62
8.1.4.	Fase 4: análisis mecánico del componente	62
8.1.5.	Fase 5: mecanizado del componente	62
8.1.6.	Fase global: gestión	63
8.2.	Hitos	63
8.3.	Duración total del proyecto y diagrama Gantt.....	64
9.	Descargo de gastos	66
9.1.	Costes directos.....	66
9.2.	Costes indirectos.....	66
9.3.	Resumen descargo de gastos.....	67
10.	Conclusiones.....	68
11.	Bibliografía.....	69
	ANEXO I. Normativa aplicable	70
	ANEXO II. Obtención gráfica $\log_{10}(\sigma)$ - $\log_{10}(N)$	71
	ANEXO III. Análisis resistente a 5200rpm	72
	ANEXO IV. Planos de diseño	77
	ANEXO V. Lista de herramientas de mecanizado	79

Índice de figuras

Figura 1: Producción mundial de vehículos.....	2
Figura 2: Producción de vehículos por comunidad autónoma	3
Figura 3: Uso de vehículos según la fuente de energía.....	4
Figura 4: Fases de un motor de cuatro tiempos.....	7
Figura 5: Partes de la biela	8
Figura 6: WBS del proyecto	9
Figura 7: Modelo CAD de la biela	20
Figura 8: Modelo CAD del conjunto	21
Figura 9: Ciclo de Otto teórico y real.....	22
Figura 10: Gráfica presión-giro del cigüeñal a 3700 rpm	22
Figura 11: Uniones entre elementos	26
Figura 12: Sistema de referencia de la junta de revolución.....	27
Figura 13: Mallado inicial y mallado mejorado	28
Figura 14: Aceleración lineal a 3700rpm	29
Figura 15: Tensiones máximas en la biela	30
Figura 16: Tensiones medias en la biela.....	31
Figura 17: Distribución de tensiones en el momento de máxima tensión	31
Figura 18: Detalle de la zona de máxima tensión.....	31
Figura 19: Deformaciones unitarias máximas y medias en la biela	32
Figura 20: Detalle de la zona de máxima deformación unitaria	32
Figura 21: Gráfica $\log_{10}(\sigma)$ - $\log_{10}(N)$	33
Figura 22: Máxima tensión principal máxima	34
Figura 23: Mínima tensión principal mínima.....	34
Figura 24: Valor máximo de la tensión principal máxima en el Punto 1.....	35
Figura 25: Tensión en el Punto 1 a lo largo del ciclo	35
Figura 27: Coeficiente de seguridad a fatiga de la biela	36
Figura 28: Biela original	38
Figura 29: Coromill 300 Capto	40
Figura 30: Tabla de características Coromill 300 Capto	41
Figura 31: Dimensión de la plaquita	41

Figura 32: Tabla de selección de plaquita	42
Figura 33: Tabla con los parámetros de corte en función del material	42
Figura 34: Tabla con parámetros de corte en función de la plaquita	42
Figura 35: CoroBore BR20 Coromant Capto.....	44
Figura 36: Tabla de características CoroBore BR20 Coromant Capto.....	45
Figura 37: Códigos de plaquitas compatibles.....	45
Figura 38: Tabla de selección de plaquita	45
Figura 39: Tabla con los parámetros de corte en función del material	46
Figura 40: Tabla con parámetros de corte en función de la plaquita	46
Figura 41: Broca CoroDrill 860.....	47
Figura 42: Tabla de características Corodrill 860	47
Figura 43: Parámetros de corte broca CoroDrill 860	47
Figura 44: Macho de laminación CoroTap 400.....	48
Figura 45: Tabla de características CoroTap 400.....	48
Figura 46: Parámetros de corte del roscado	48
Figura 47: Relación entre el diámetro inicial y diámetro final de la rosca.....	49
Figura 48: Etapas de la fabricación.....	60
Figura 49: Gráfica presión-giro del cigüeñal a 5200rpm	72
Figura 50: Aceleración lineal a 5200rpm	73
Figura 51: Aceleración angular a 5200rpm	73
Figura 52: Tensiones equivalentes máximas y medias.....	73
Figura 53: Distribución de tensiones en el momento de tensión máxima	74
Figura 54: Detalle del punto de tensión máxima	74
Figura 55: Deformación unitaria máxima.....	75
Figura 56: Coeficiente de seguridad a fatiga a 5200rpm	76

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades de los materiales.....	13
Tabla 2: Tabla de decisión de la alternativa de material.....	14
Tabla 3: Tabla de decisión del proceso de fabricación.....	18
Tabla 4: Características el motor	25
Tabla 6: Resumen estado tensional Punto 1 y Punto 2.....	36
Tabla 8: Hitos del proyecto.....	63
Tabla 9: Periodos de inactividad.....	64
Tabla 10: Descargo de gastos	67
Tabla 11: Estado tensional punto crítico	75
Tabla 12: Herramientas de mecanizado.....	79

1. Introducción

En este trabajo se analizará mediante un software de elementos finitos (EF) el comportamiento mecánico de la biela de un motor de cuatro tiempos de combustión interna alternativo y se decidirán las operaciones a seguir y las herramientas a emplear en su proceso de mecanizado.

En primer lugar, se comenzará contextualizando la situación actual en cuanto a ventas y tendencias futuras de la industria de la automoción desde una perspectiva global hasta la situación de la comunidad autónoma del País Vasco. También se incluirá una breve introducción sobre el motor del automóvil y el papel que la biela juega en el mismo. Posteriormente, se definirán los objetivos, el alcance y los beneficios del proyecto.

A continuación, se decidirá qué material se decide emplear para la fabricación del componente y cuál será el proceso de fabricación a seguir previo al mecanizado. Todo esto se llevará a cabo mediante un análisis de alternativas y sus correspondientes tablas de decisión.

El primer paso para comenzar el desarrollo de la parte técnica del documento será modelizar la biela mediante un software CAD (Computer-Aided Design). Una vez modelizada y con el material previamente elegido en el análisis de alternativas, tenemos todos los datos necesarios para realizar el análisis mecánico del componente empleando el software de EF.

El último apartado técnico a desarrollar en el trabajo será el relacionado con el proceso de mecanizado de la biela. En este apartado se incluirá toda la información relativa a la selección de herramientas y a las operaciones a realizar. Ambos resultados quedarán recogidos en una hoja de procesos de modo que sirva de guía al operario para poder llevar a cabo el proceso de mecanizado.

Finalmente, se desarrollará la planificación del proyecto, se realizará el descargo de gastos pertinente y extraerán una serie de conclusiones del trabajo.

2. Contexto

2.1. Situación económica del mercado de la automoción

El sector del automóvil es un exponente claro del proceso de transformación y de la evolución de la economía global. Además, todo lo que ocurre en este sector es especialmente relevante, pues acaba modificando las pautas dominantes del sistema industrial.

El sector ha mantenido ocho años consecutivos de evolución positiva en la producción de vehículos tras la debacle de 2009, y se espera que continúe esta evolución en los próximos años. Aun así, se prevén cambios sustanciales, ya que el 58% de participación que acumulaban Europa, Estados Unidos y Japón en 2007, actualmente no llega al 44%, acaparando solo China el 30% del total de producción mundial. Se estima que la producción de automóviles a escala global superará el umbral de los 100 millones de vehículos en 2019.

PRODUCCION DE VEHICULOS EN LOS PRINCIPALES PAISES DEL MUNDO								
PAISES	2007	2009	2011	2013	2015	2016	2017	Media %- 2017/07
1.China	8.882.456	13.790.994	18.418.876	22.116.825	23.731.600	28.118.794	29.015.434	21,2%
2.EEUU	10.780.729	5.731.397	8.661.535	11.066.432	12.100.095	12.180.301	11.189.985	2,1%
3.Japón	11.596.327	7.934.057	8.398.630	9.630.181	9.278.238	9.204.813	9.693.746	-3,8%
4.Alemania	6.213.460	5.209.857	6.146.953	5.718.222	6.033.164	5.746.808	5.645.581	-1,3%
5.India	2.253.729	2.641.550	3.927.411	3.898.425	4.125.744	4.519.341	4.782.896	11,1%
6.Corea del Sur	4.086.308	3.512.926	4.657.094	4.521.429	4.555.957	4.228.509	4.114.913	0,6%
7.México	2.095.245	1.561.052	2.681.050	3.054.849	3.565.469	3.600.365	4.068.415	9,4%
8.España	2.889.703	2.170.078	2.373.329	2.163.338	2.733.201	2.885.922	2.848.335	0,0%
9.Brasil	2.977.150	3.182.923	3.407.861	3.712.380	2.429.463	2.156.356	2.699.672	-5,2%
10.Francia	3.015.854	2.047.658	2.242.928	1.740.000	1.970.000	2.090.279	2.227.000	-5,9%
11.Canadá	2.578.790	1.490.482	2.135.121	2.379.834	2.283.474	2.370.656	2.199.789	-1,4%
12.Tailandia	1.287.346	999.378	1.457.798	2.457.057	1.915.420	1.944.417	1.988.823	7,1%
13.R. Unido	1.750.253	1.090.139	1.463.999	1.597.872	1.682.156	1.816.622	1.749.385	0,6%
14.Turquia				1.125.534	1.358.796	1.485.927	1.695.731	
15.Rusia	1.660.120	752.012	1.990.155	2.184.266	1.384.399	1.303.544	1.551.293	-5,1%
16.Irán	997.240	1.395.075	1.648.505	743.647	962.337	1.282.172	1.515.396	4,3%
17.R. Checa	937.648	983.243	1.199.845	1.132.931	1.303.603	1.349.896	1.419.993	6,3%
18.Indonesia	411.638	464.816	838.388	1.206.368	1.098.780	1.177.797	1.216.615	19,2%
19.Italia	1.248.312	843.239	790.348	658.206	1.014.223	1.103.305	1.142.210	-2,0%
20.Eslovaquia	571.071	461.340	639.763	975.000	1.000.001	1.040.000	1.001.520	10,5%
TOTAL	73.266.061	61.703.997	79.880.028	87.507.027	90.780.583	95.057.929	97.302.534	4,4%

Figura 1: Producción mundial de vehículos

Al igual que sucede a escala mundial, la fabricación de vehículos sigue siendo una industria estratégica en la Unión Europea, con una producción de 19,2 millones de automóviles, furgonetas, camiones y autobuses por año. Las exportaciones ascienden a casi 6 millones de vehículos, lo cual genera un superávit comercial de más de 90.000 millones de euros, configurándose la Unión Europea como el mayor exportador de coches del mundo, seguida muy de lejos por Japón y Estados Unidos, segundo y tercer clasificados respectivamente.

En España, hace 30 años se fabricaban apenas un millón de unidades frente a los tres millones de vehículos que se fabrican en la actualidad, y se vendían 700.000 unidades frente a los 1,5 millones actuales. Por tanto, se puede decir, que a día de hoy, el sector de la automoción se consolida como una industria con empleo estable y uno de los sectores más importantes de la economía del país. También es el tercer sector industrial en inversión en I+D+i, aglutinando el 10% del total.

2.2. Tendencias de mercado

La crisis de los motores diésel del Grupo Volkswagen, suscitada desde el año 2015 en Estados Unidos, ha acelerado el proceso de electrificación del sector de la automoción, incluyendo la adopción de medidas reguladoras en grandes ciudades sobre emisión de gases contaminantes. De este modo, se espera que en un futuro a corto/medio plazo coexistan diferentes modelos de propulsión siendo cada vez más habitual ver coches eléctricos. Sin embargo, de los 3.000 modelos diferentes que se producen en más de 700 fábricas, solo el 2% son vehículos totalmente eléctricos.

Es evidente que las reducciones de futuras de las emisiones de CO₂ de los automóviles de pasajeros dependerán, en gran medida, del aumento en ventas de vehículos con motor alternativo. A pesar de que los fabricantes europeos de vehículos están expandiendo sus carteras de automóviles alternativos (eléctricos principalmente), desafortunadamente vemos que su penetración en el mercado todavía es baja y muy fragmentada en toda la Unión Europea, constituyendo las principales barreras para el desarrollo de los mismos su asequibilidad, la disponibilidad de infraestructuras y la falta de inversión.

Vehicles in use by fuel type in the EU

% share | 2015

EUROPEAN UNION ▾

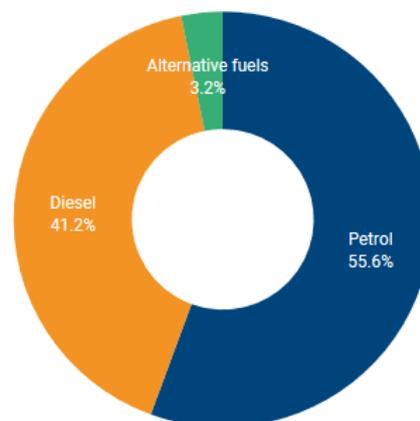


Figura 3: Uso de vehículos según la fuente de energía

Sin embargo, a nivel europeo, se trata de apoyar e impulsar estas nuevas y necesarias tendencias en la propulsión de vehículos. La industria del automóvil es el inversor privado más grande en I+D+i de Europa, con más de 53.800 millones de euros invertidos anualmente, por delante de la industria farmacéutica y la tecnológica. El 'Indicador de Inversión Industrial de I+D+i' de la UE refleja que, en las compañías internacionales, creció este gasto un 5,8% en 2017, siendo el sexto año consecutivo de crecimiento significativo.

En España, se fabrican 42 modelos de coches diferentes y, en el último año, se adjudicaron ocho nuevos vehículos a las fábricas del país. En los próximos meses se esperan 15 más, de los que la mitad vienen con versión alternativa (híbrido, eléctrico o gas).

Respecto a la producción de vehículos por tecnología de propulsión, en el año 2017 la tasa de crecimiento interanual de los eléctricos estuvo en el 15%, aunque solo representan el 0,3% de la producción total de vehículos en España, el de los híbridos en el 76%, representando el 0,1% del total producido y un 74% los de gas natural, un 0,2% del total. En cuanto a las matriculaciones, las tasas de crecimiento interanual de los vehículos eléctricos e híbridos estuvieron, en ambos casos, en el entorno del 80%, representando el 3,4% de total de las matriculaciones.

En cuanto a promover el uso de alternativas a los combustibles fósiles, también es destacable la labor del País Vasco. Ibil, el primer gestor de recarga de coches eléctricos, constituido en 2009 en alianza al 50% entre la multinacional Repsol y el Ente Vasco de la Energía (EVE), es actualmente el mayor agente del sistema, con más de 104 puntos de recarga repartidos por toda España. Además, el Gobierno Vasco, para 2018-2020, apoyará técnica y económicamente la instalación de 315 puntos de recarga rápida de uso público.

Finalmente, es necesario mencionar que el sector del automóvil ha apostado firmemente por la revolución digital de la industria, también conocida como industria 4.0. Se considera que la mitad de las compañías en el mundo invertirán más de 250 millones de dólares en la renovación de sus plantas industriales para reconvertirlas en centros inteligentes en los próximos cinco años, por lo que, si se mantuviera la tendencia, el 24% de las plantas serían inteligentes en 2022.

España ocupa el puesto 24 de un total de 25 países que están mejor preparados para transformar sus sistemas productivos y beneficiarse así de la denominada cuarta revolución industrial, según un estudio publicado por el Foro Económico Mundial. Con una estadística como la descrita, si no se corrige la situación, podría tener problemas al adaptarla al sector de automoción. Primero, porque se es muy dependiente de decisiones externas, y segundo, porque no hay capacidad tecnológica para adaptar los productos a las exigencias futuras.

En el País Vasco se encuentra también ACICAE, importante cluster de automoción y uno de los primeros constituidos en Europa. Esta asociación empresarial, está dedicada a la mejora de la competitividad del sector de la automoción. De este modo, el País Vasco mantiene un peso específico importante en el apoyo de I+D+i, orientado a mejorar procesos y productos, con una especial atención a las tecnologías relacionadas con la Inteligencia Artificial y la Industria 4.0 [1].

2.3. El motor del automóvil

Actualmente, uno de los retos de sector de la automoción, es conseguir una optimización cada vez mayor de los componentes que integran el vehículo. Esta optimización vendrá dada por reducir el peso los componentes de tal modo que las propiedades mecánicas de estos no se vean afectadas. Esta optimización trae consigo un aumento de la eficiencia del vehículo, aspecto positivo en cualquier tipo de máquina, y una reducción de las emisiones de CO₂ a la atmosfera, reduciéndose la contaminación producida por los automóviles cuyo mecanismo de propulsión son los combustibles fósiles.

La segunda de las ventajas mencionadas es de especial interés actualmente dada la aparición del coche eléctrico y su inminente irrupción en el mercado. La mayor sostenibilidad de este tipo de vehículos frente a los diésel o gasolina, hace que sea de gran importancia reducir las emisiones de gases contaminantes tanto como sea posible, y reducir el peso de los componentes del vehículo contribuye a este fin de manera positiva.

Si el coche eléctrico entra en el mercado con la fuerza que se prevé dentro de unos años, los mayores damnificados serán los proveedores de componentes. Según un estudio dirigido por Paul Eichenberg [2], ex vicepresidente de estrategia de Magna Powertrain y Magna Electronics, el 75% de los mayores fabricantes de componentes podrían convertirse en irrelevantes para el año 2030. Este hecho viene motivado, principalmente, por el hecho de que el motor de un coche eléctrico es relativamente más simple de construir que uno de combustión, pues únicamente cuenta con 20 piezas móviles frente a las 2.000 que tiene un vehículo con motor de combustión interna, aproximadamente.

Como ya se ha mencionado, la complejidad del motor de combustión comparado con el motor eléctrico en cuanto a número de piezas es mucho mayor. En el presente trabajo nos centraremos en analizar componente de vital importancia en el primer tipo de motores como es la biela.

Hoy en día, podemos distinguir, principalmente, tres tipos de motores empleados en automoción: motores de combustión interna, motores eléctricos y motores híbridos. Sin entrar en detalle en cada uno de estos tres tipos, puesto que no es la finalidad del trabajo, vamos a explicar cuál es su principio de funcionamiento:

- **Motores de combustión:** es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión.
- **Motores eléctricos:** es un tipo de máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos que generan las bobinas que están dentro del motor.

- **Motores híbridos:** son motores de combustión convencionales, a los que se les suma un segundo motor, de tipo eléctrico, que está alimentado por unas baterías de alto voltaje. Generalmente, puede operar con cualquiera de los dos motores, o con ambos a la vez en el caso de precisar de más potencia.

En los próximos párrafos nos centraremos en los motores de combustión interna alternativos. Podemos distinguir entre motores de combustión interna alternativos de dos tiempos y de cuatro tiempos. En el sector del automóvil se utilizan principalmente los de cuatro tiempos, por tanto, serán los que expliquemos. Existen pequeñas diferencias en el funcionamiento dependiendo si se trata de un motor de gasolina o un motor diésel, pero resumidamente, los cuatro tiempos o fases del ciclo termodinámico de combustión son las siguientes:

1. **Admisión:** en esta fase el descenso del pistón aspira la mezcla de aire más combustible en los motores de encendido provocado (motores de gasolina) o el aire en motores de encendido por compresión (motores diésel).
2. **Compresión:** al llegar al punto muerto inferior, la válvula de admisión se cierra, comprimiéndose el gas contenido en la cámara por el ascenso del pistón.
3. **Explosión/Expansión:** al llegar al punto muerto superior el gas ha alcanzado la presión máxima. En los motores de gasolina salta la chispa en la bujía, provocando la inflamación de la mezcla, mientras que en los motores diésel, se inyecta a través del inyector el combustible muy pulverizado, que se autoinflama por la presión y temperatura existentes en el interior del cilindro. En ambos casos, una vez iniciada la combustión, esta progresa rápidamente incrementando la temperatura y la presión en el interior del cilindro y expandiendo los gases que empujan el pistón. Esta es la única fase en la que se obtiene trabajo.
4. **Escape:** en esta fase el pistón empuja, en su movimiento ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto muerto superior, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo.

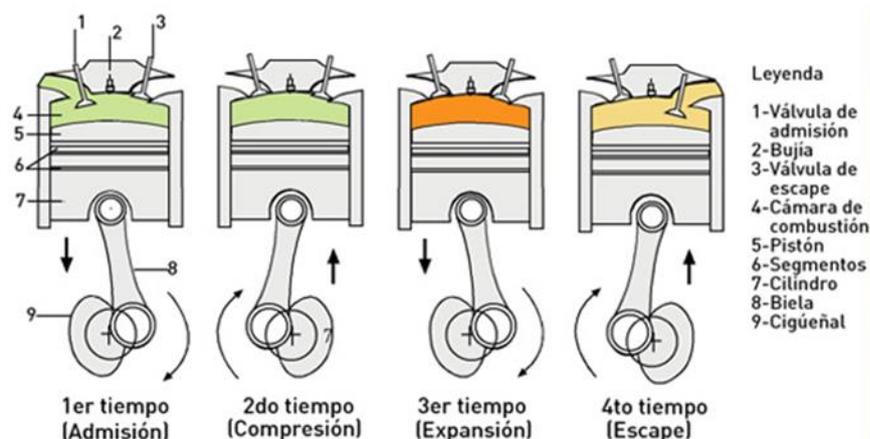


Figura 4: Fases de un motor de cuatro tiempos

Si nos centramos en la parte principal del mecanismo que hace posible este ciclo de cuatro tiempos, sin tener en cuenta elementos auxiliares, este estaría compuesto por el grupo pistón-biela-cigüeñal. Este mecanismo puede estudiarse tanto cinemática como dinámicamente como un mecanismo biela-manivela puesto que son equivalentes. Dado que se trata de un mecanismo relativamente sencillo, estudiar, por ejemplo, la posición del pistón en función del ángulo de giro del cigüeñal no sería una tarea complicada y a partir de ahí se podría obtener su velocidad y aceleración.

Tal y como se ha mencionado en el primer párrafo de este subapartado, el trabajo se centrará en el estudio de la biela del motor. La biela es el elemento encargado de transmitir al cigüeñal los esfuerzos generados por la combustión sobre el pistón, para que el cigüeñal termine convirtiendo el movimiento alternativo del pistón en rotativo.

Se pueden distinguir las siguientes partes en una biela:

- **Cabeza:** extremo de mayor diámetro empleado para unir la biela al cigüeñal. En ocasiones, la cabeza de la biela está dividida en dos. En estos casos, a la parte separada se le conoce con el nombre de sombrerete.
- **Cuerpo:** parte central que sirve para conectar el pie y la cabeza de la biela.
- **Pie:** extremo de menor diámetro de la biela por donde se une al pistón a través de un bulón

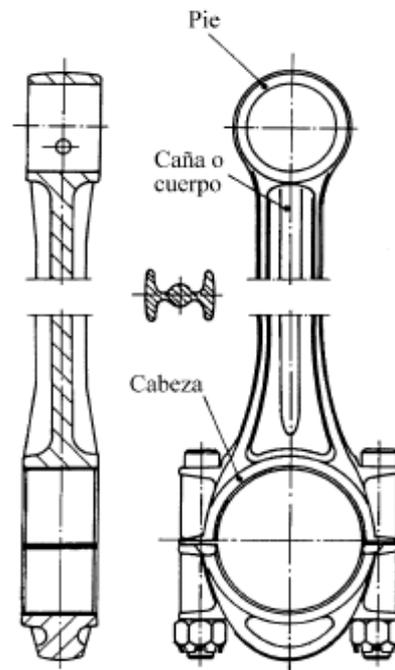


Figura 5: Partes de la biela

Los avances computacionales de las últimas décadas nos permiten simular el comportamiento en servicio de los componentes del motor empleando softwares basados en el método de elementos finitos (MEF). Esto supone una gran ventaja de cara a la optimización previamente mencionada, pues nos permitirá saber si los nuevos diseños, soportarán las condiciones previstas durante su vida útil. Además, también se dispone de softwares de fabricación, empleados para comprobar, entre otras cosas, que el diseño propuesto es compatible con el método de fabricación a emplear.

Debido a los grandes esfuerzos que tiene que soportar y su difícil lubricación, el correcto diseño y fabricación de este componente es de gran importancia. En el presente trabajo nos dispondremos a verificar, empleando software MEF, un determinado diseño de una biela y analizar su proceso de fabricación.

3. Objetivos y alcance del trabajo

Mediante este trabajo se pretenden alcanzar los siguientes objetivos técnicos:

- 1. Analizar mecánicamente, mediante simulación por elementos finitos, el diseño de una biela de un motor de combustión interna.** Como resultado de este análisis se obtendrán los datos de las tensiones, deformaciones y del comportamiento a fatiga del componente bajo distintos regímenes de giro y estados de carga. Estos servirán para justificar de un modo global, estableciendo una serie de hipótesis simplificadoras, la validez del componente desde el punto de vista mecánico.
- 2. Analizar las diferentes etapas del proceso de fabricación.** Este objetivo incluye, por un lado, decidir cuál es el proceso principal de fabricación más adecuado, y por otro lado, especificar qué operaciones se deberían llevar a cabo sobre la pieza en bruto para obtener el producto final, ordenar estas operaciones de modo que se optimicen los tiempos de producción y seleccionar las herramientas que son necesarias para llevar a cabo el mecanizado. Los resultados referentes al mecanizado deberán ser plasmados en una hoja de procesos.

Por otro lado, también existen una serie de objetivos académicos que se pretenden lograr. Estos objetivos son: aprender a utilizar softwares de modelado 3D, profundizar en el manejo de software de análisis por EF y aprender a utilizar los catálogos de herramientas.

De cara a determinar el alcance del proyecto, se incluye a continuación World Breakdown Structure (WBS) del mismo:

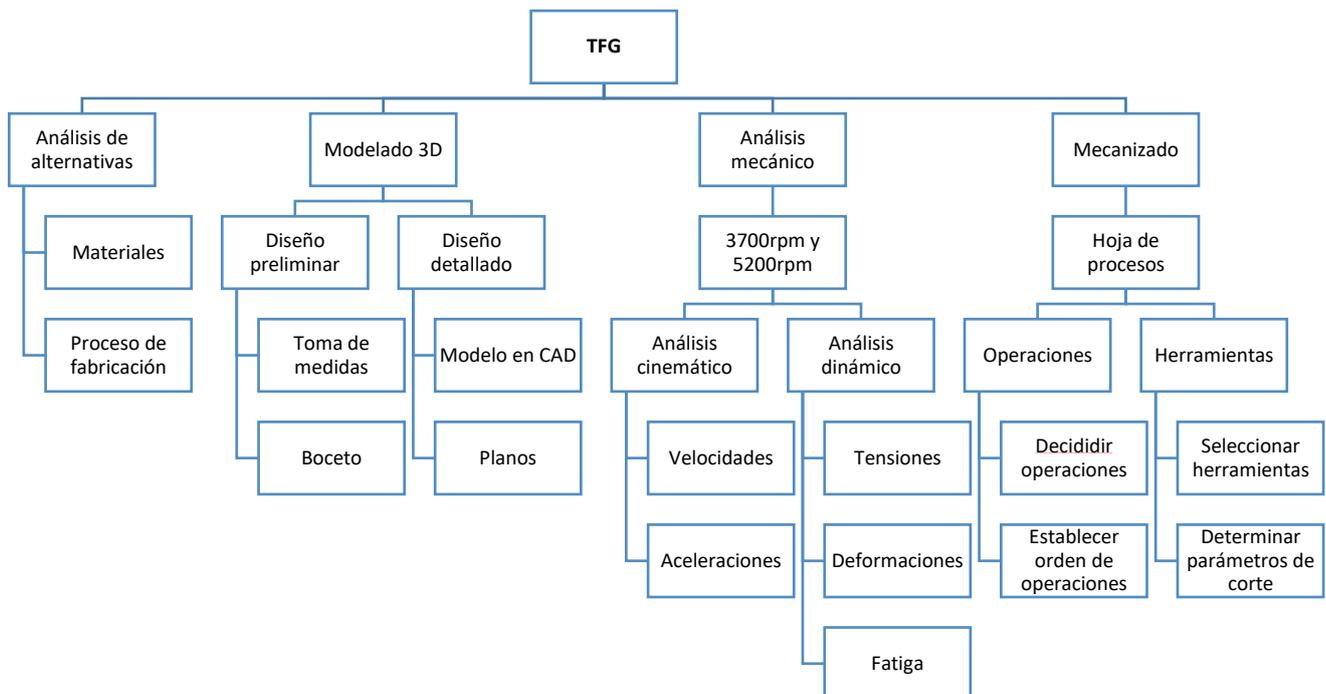


Figura 6: WBS del proyecto

4. Beneficios que aporta el trabajo

En cuanto a los beneficios que aporta el trabajo, podemos diferenciar entre beneficios técnicos y beneficios económicos.

A. BENEFICIOS TÉCNICOS

- En el trabajo se establece un procedimiento para analizar el diseño de la biela de un motor, especificando los pasos a seguir para poder llevarlo a cabo utilizando el software ANSY Workbench 2019 R1. Este procedimiento es adaptable a diferentes componentes mecánicos realizando pequeñas modificaciones (uniones entre elementos por ejemplo), en función de las características del componente en estudio.
- Se analizan los diferentes aspectos a tener en cuenta para verificar (tensiones, deformaciones y comportamiento a fatiga) que un diseño es válido para desempeñar su función correctamente. El modo en que estos aspectos se han analizado puede resultar útil de cara a un análisis general de nuevos diseños de piezas u optimizaciones de piezas ya existentes.
- En el apartado referente al proceso de mecanizado se establecen los pasos a seguir para elegir diferentes tipos de herramientas, explicando las particularidades de cada una.

B. BENEFICIOS ECONÓMICOS

- El orden establecido para llevar a cabo el mecanizado completo del componente se ha realizado buscando minimizar los tiempos productivos en las operaciones que no son de mecanizado: paradas de la máquina para que el operario realice alguna operación o cambios entre herramientas. El objetivo de realizar esto es aumentar la productividad del proceso.
- A la hora de elegir herramientas se ha hecho la selección teniendo en cuenta el conjunto de las operaciones y buscando compatibilidades entre ellas. De este modo, se ha logrado realizar doce operaciones de mecanizado con seis herramientas distintas únicamente.

5. Análisis de alternativas

El primer paso antes de realizar el análisis resistente de la biela o describir cómo será su proceso de mecanizado, será necesario seleccionar, mediante un análisis de alternativas, qué material es el más adecuado emplear para fabricar este componente y el proceso de fabricación principal, previo al mecanizado, más conveniente.

5.1. Alternativas de material

5.1.1. Descripción de los materiales

Para una correcta elección del material, es necesario conocer, en primera instancia, cuáles van a ser las sollicitaciones mecánicas de la biela y de este modo saber cuáles van a ser las propiedades mecánicas mínimas que se le deben exigir al material que elijamos. Durante el proceso de combustión, la biela va a estar sometida a elevadas tensiones tanto de tracción como de compresión, aplicadas de forma alterna. Por tanto, un factor crucial a tener a cuenta será la resistencia a fatiga del material. Las elevadas tensiones mencionadas, unidas a las temperaturas de entre 90°C y 120°C que puede alcanzar la biela, provocarán unas deformaciones que será necesario analizar para saber si el componente es válido o no. No obstante, éstas no serán las únicas consideraciones a tener en cuenta, ya que también habrá que considerar, por ejemplo, la capacidad del material de ser tratado mediante diferentes procesos de fabricación.

Teniendo esto en cuenta, las diferentes opciones que se proponen son:

A. ACEROS DE BAJA ALEACIÓN

Los aceros de baja aleación son de gran uso en diversas aplicaciones en componentes de automoción, entre las que se incluyen las bielas. Se trata de un grupo de aceros con un contenido, generalmente medio en carbono (0.25%-0.60% en peso de carbono), y como su nombre indica un contenido bajo de aleantes (inferior al 6% en peso). Un tipo acero de esta familia, de uso muy común, es el acero AISI 4340.

Gracias a la modificación en la composición química de este acero, se obtiene una mejora en sus propiedades mecánicas, entre las que podemos destacar una gran resistencia a la fatiga y a las elevadas tensiones y un nivel mayor de dureza manteniendo una buena ductilidad y tenacidad. Esta mejora de las propiedades mecánicas, frente a aceros sin alear, permite además una reducción de material, con la correspondiente reducción de peso, factor importante a considerar.

No obstante, la mejora no viene solo en cuanto a propiedades mecánicas. Este grupo de aceros es susceptible de ser utilizado sin problemas en los rangos de temperaturas requeridos y en el tipo de atmósfera del entorno. Además, ofrecen la posibilidad de ser sometidos a tratamientos térmicos de forma satisfactoria, de modo que si es necesario, podamos mejorar las características del producto final.

Finalmente, cabe destacar que este grupo de materiales, y en particular el AISI 4340, poseen buenas propiedades de conformabilidad y maquinabilidad. La conformabilidad podemos medirla mediante la elongación en rotura del material, que se sitúa en torno al 22%. La maquinabilidad, por su lado, mediante el módulo elástico o la dureza del material, presentando en ambos casos valores correctos de cara a analizar la maquinabilidad.

B. ALEACIONES DE TITANIO

Actualmente, la aleación de titanio más empleada para la fabricación de las bielas es la aleación $\alpha+\beta$, y entre todas estas aleaciones la aleación TI-6Al-4V. Este tipo de aleaciones destacan por su resistencia mecánica específica, resistencia a la corrosión, dureza, capacidad de trabajar a temperaturas elevadas y baja densidad.

Desde el punto de vista resistente, el titanio sería un firme sustituto del acero en la producción de bielas ya que posee una gran resistencia con un peso considerablemente menor que el del acero. Sin embargo hay varios factores que hacen que este material aún no reemplace al acero en automóviles convencionales.

El primero de estos factores es el precio. Resulta difícil introducir este tipo de materiales en vehículos convencionales dado su elevado coste, habiendo otro material, como es el acero, que cumple con las solicitaciones exigidas por el motor perfectamente, con un precio menor. Por otro lado, la resistencia a la fatiga, factor clave a la hora de elegir material, es menor que en el acero.

Estos factores, hacen que las aleaciones de titanio, ampliamente utilizadas en otras aplicaciones, como por ejemplo aeronaves (por su gran relación resistencia/peso), no se utilicen para la fabricar bielas de automóviles convencionales. Sin embargo, sí es utilizada en automóviles de competición o de alta gama donde el factor peso sí juega un papel mucho más importante que el precio.

Los dos últimos aspectos a considerar serían la conformabilidad y la maquinabilidad. A diferencia del acero, presenta valores de elongación en rotura bajos, lo que afecta a la conformabilidad y un bajo módulo elástico combinado con elevadas durezas incluso a altas temperaturas, lo que perjudica a la maquinabilidad de este material.

C. ALEACIONES DE ALUMINIO

El uso de este material en bielas de automóviles limita casi exclusivamente al sector de la competición, donde lo más importante va a ser encontrar un material lo más ligero posible capaz de soportar las solicitaciones exigidas. Entre todas las aleaciones de aluminio, suele emplearse para este fin la serie 2000, que se trata de una aleación de aluminio-cobre, y dentro de esta serie la aleación 2011T8 sería una opción.

Las propiedades de esta serie serían una correcta resistencia mecánica, una buena resistencia a la corrosión, y el menor peso de las tres alternativas presentadas. Sin embargo, para la aplicación concreta de bielas de automóviles, presenta tres problemas importantes: baja resistencia a la fatiga, bajo módulo elástico y un alto coeficiente de expansión térmica. Además, dada su menor resistencia mecánica, el reducido peso de la biela no implicaría una disminución del tamaño, ya que se necesitaría mayores secciones para soportar los mismos esfuerzos.

Otro problema que presentarían las bielas de este tipo sería su mayor sensibilidad a la propagación de grietas en lugares donde exista algún defecto. Ello conllevaría que no podría realizarse la típica unión de la cabeza de la biela al cigüeñal, utilizando una biela de cabeza partida unidas ambas partes empleando tornillos. La razón es que para separar la cabeza de la biela el primer paso es realizar una pequeña entalla y el aluminio presentaría problemas para una correcta propagación de esta en el momento de la ruptura.

Si analizamos la conformabilidad el aluminio, al igual que el titanio, presenta mayores dificultades que el acero para ser tratado mediante procesos de conformación plástica como la forja. Sin embargo, su elevada ductilidad y baja dureza hace que sea un material fácilmente mecanizable pese a su bajo módulo elástico.

Por todo esto, y principalmente porque en automóviles convencionales no podría concebirse cambiar de forma continua las bielas del motor por riesgo a que fallen, su uso se limita al de un sector donde no se escatima en gastos como sería el de la competición.

Realizado una breve descripción cualitativa de los tres posibles materiales a emplear, puede resultar interesante cuantificar las propiedades importantes mencionadas, con el fin de exponer estas diferencias de modo más claro:

Tabla 1: Propiedades de los materiales

	AISI 4340	Ti-6Al-4V	2011T8
Densidad (g/cm³)	7,85	4,43	2,83
Módulo elástico (GPa)	210	113,8	70,3
Límite elástico (MPa)	480	800	310
Límite de fatiga (MPa)	370	240	124
Elongación en rotura (%)	22	12	12
Dureza (Brinell)	217	334	100
Coeficiente de expansión térmica (1/°C)	12,3*10 ⁻⁶	8,6*10 ⁻⁶	21,4*10 ⁻⁶

5.1.2. Tabla de decisión del material

Como último paso para elegir el material, conocidas tanto de forma cualitativa como cuantitativa las propiedades de las distintas opciones que hemos presentado, será realizar una tabla de decisión. En ella consideraremos factores que creamos que deben ser tenidos en cuenta en la decisión, a los que asignaremos un coeficiente de ponderación según su importancia y los calificaremos de acuerdo con la siguiente puntuación:

- **5:** Muy bueno
- **4:** Bueno
- **3:** Medio
- **2:** Malo
- **1:** Muy malo

A continuación, se presenta la tabla de decisión con todos los criterios a considerar, sus coeficientes de ponderación y las puntuaciones finales:

Tabla 2: Tabla de decisión de la alternativa de material

	Coeficientes de ponderación	Acero	Titanio	Aluminio
Propiedades mecánicas	0,60	5	3	1
Propiedades térmicas	0,10	3	3	1
Peso	0,30	2	4	5
Conformabilidad	0,15	5	2	2
Maquinabilidad	0,15	5	2	5
Precio	0,20	4	2	4
Puntuación final		11,60	4,30	4,05

Finalmente, con la tabla de decisión realizada, observamos, como el acero sería el material más adecuado para la fabricación de nuestro componente. Esto es coherente con lo que hemos explicado durante este apartado, y con lo que ocurre en la industria en realidad, puesto que más del 90% de las bielas del sector del automóvil se fabrican de acero a día de hoy.

5.2. Alternativas en el proceso de fabricación

5.2.1. Descripción de los procesos de fabricación

Una vez seleccionado el material, el siguiente paso es elegir qué proceso se va a seguir para la fabricación del producto. Los procesos que pueden ser empleados para la fabricación de bielas son el forjado, el sinterizado y la fundición.

Una de las ventajas de haber elegido el acero, es que puede ser utilizado en cualquiera de los tres procesos sin ningún problema, por lo que en ese aspecto, el material no supondrá ninguna restricción. Sin embargo, sí habrá que tener en cuenta, por ejemplo, como cada proceso afectará a las propiedades del material o que restricciones de diseño impone cada uno.

A continuación, se describirá brevemente cada uno de estos procesos, tratando de destacar los aspectos que después serán considerados en la toma de decisión:

A. FORJA

La forja es un proceso de fabricación por deformación plástica que puede realizarse en caliente o en frío y en el que la deformación del material se produce por la aplicación de fuerzas de compresión.

La forja de una biela, en general, se hará en caliente por lo que la temperatura del material tendrá que ser superior a la de recristalización (850°C-1050°C en el caso del acero). Lo habitual es realizar un forjado con estampa con el objetivo de conseguir la forma deseada a base de ejercer presión de forma constante con una prensa.

Las características más destacables de este proceso son:

- Permite controlar el tamaño de grano y su dirección mejorando así la dureza, ductilidad y resistencia a la fatiga en esa dirección. Se obtiene, por tanto, un producto anisótropo.
- Las zonas funcionales suelen precisar de mecanizado posterior.
- No es posible forjar cualquier tipo de geometría, imponiendo una serie de restricciones en el diseño.

En ocasiones, tras al proceso de forja, las piezas son sometidas a un granallado. Mediante este proceso, a la pieza se le introducen unas tensiones superficiales de compresión, evitando la propagación de grietas y mejorando el comportamiento a fatiga. Se trata, además, de un proceso relativamente económico cuando hablamos de largas tiradas de piezas como es el caso de la producción de bielas.

B. SINTERIZADO

La materia prima de un componente sinterizado es siempre un polvo metálico. A esta mezcla es necesario añadirle una serie de aditivos para asegurar la compactación y unas buenas propiedades mecánicas finales. La mezcla de polvos se carga en el interior del utillaje y se aplica sobre ella, en función de la densidad final a conseguir, una presión uniaxial de 200 a 1500 MPa. La pieza compactada obtenida tras esta primera etapa (pieza 'en verde' o 'en crudo'), se expulsa del utillaje y lo que se consigue como resultado es una pieza que tiene una cierta consistencia mecánica y que puede ser manipulada.

Finalmente, se procede al sinterizado, proceso de difusión que provoca la unión entre partículas. Este proceso será más rápido si se aumenta la temperatura o presión del mismo. Normalmente suele realizarse a una presión del 70%-80% de la temperatura de fusión del material.

Las piezas fabricadas mediante este proceso se caracterizan por:

- Se trata de piezas con buena precisión en cuanto a tolerancias dimensionales.
- Las piezas tienen una porosidad uniforme y controlada.
- Las piezas tendrán limitaciones tanto de tamaño como de diseño.

Tanto la materia prima como el utillaje empleados en este proceso tienen costes elevados, por ello, el precio del sinterizado puede ser un 30% mayor que el del proceso de forja. Este aumento de precio de la materia prima y la porosidad uniforme que se consigue en la pieza no introducen una mejora significativa en comportamiento mecánico del componente, ya que como se ha dicho, a las piezas fabricadas por forja, es habitual someterles a un proceso de granallado en caso de considerarse necesario, suficiente para que sean capaces de soportar todos los esfuerzos a los que se ve sometida.

C. FUNDICIÓN

Se trata de un proceso en el cual el material fundido se introduce en un molde con la forma de la pieza que se quiere fabricar, para posteriormente ser enfriado y obtener la pieza deseada. La temperatura de fundición de los aceros es de unos 1400°C, requiriendo este proceso la mayor cantidad de energía para llevar al material a la temperatura deseada.

Para el proceso de fundición lo normal es utilizar moldes de arena. La ventaja de emplear moldes de este material es su bajo precio y que son fácilmente reciclables.

Las características de este proceso son:

- Impone ciertas restricciones de diseño, pero aun así, permite una buena versatilidad en cuanto a la forma de la pieza y su tamaño.
- La pieza tendrá peores prestaciones mecánicas que si fuera fabricada por forja o sinterizado dado que favorece la aparición de defectos en la pieza, haciendo estas bielas compatibles solo con automóviles de baja potencia.
- Las piezas obtenidas son de baja precisión siendo necesario un proceso de mecanizado posterior.

En lo que al precio se refiere, se trata de un proceso de fabricación que puede competir con la forja, siendo por tanto más barato que el sinterizado. Además, se adapta perfectamente tanto a series largas como a series cortas de fabricación, dadas las características de los moldes de arena que se emplean.

5.2.2. Tabla de decisión del proceso de fabricación

De nuevo, al igual que los materiales, explicado brevemente en que consiste cada proceso y las características de las piezas que vamos a obtener, procederemos a decidir qué proceso se va a emplear para fabricar la biela, apoyándonos en una tabla de decisión para justificar la elección.

Elegiremos otra vez una serie de factores que se considera que se deben tener en cuenta a la hora de tomar la decisión asignándole a cada uno su correspondiente coeficiente de ponderación. Cada factor se puntuara en base a los mismos criterios que en el caso de los materiales:

- **5:** Muy bueno
- **4:** Bueno
- **3:** Medio
- **2:** Bajo
- **1:** Muy bajo

A continuación, se presenta la tabla de decisión con todos los criterios a considerar, sus coeficientes de ponderación y las puntuaciones finales:

Tabla 3: Tabla de decisión del proceso de fabricación

	Coeficiente de ponderación	Forja	Sinterizado	Fundición
Propiedades mecánicas	0,45	4	4	2
Acabado final	0,15	3	4	3
Flexibilidad de diseño	0,10	3	3	4
Puntuación final		4,05	3,30	2,95

Tras realizar la tabla de decisión, se observa que el proceso más recomendable para la fabricación de la biela es el de forja. De nuevo, esto es coherente con lo que sucede en la industria en realidad, puesto que la mayoría de las bielas de automóviles convencionales se fabrican empleando este método.

6. Procedimiento de desarrollo de las tareas

Las tareas llevadas a cabo para la realización del trabajo pueden dividirse en tres etapas principalmente:

1. Etapa de investigación y revisión de información
2. Etapa de análisis resistente del componente
3. Etapa de fabricación

A continuación se detallará el procedimiento de desarrollo cada una de las tres etapas mencionadas:

6.1. Etapa de investigación y revisión de la información

La primera fase de esta etapa fue recopilar información sobre el componente a estudiar durante el trabajo centrándose en primera instancia en su modo de funcionamiento y sollicitaciones a las que se ve sometido. Esta información sería complementada con un estudio más amplio sobre el motor y el mecanismo pistón-biela-cigüeñal, de modo que pudiera entenderse el funcionamiento del conjunto completo y de este modo se tuviera la mayor información posible para analizar posteriores resultados.

Posteriormente, y con un conocimiento más amplio del componente que se iba a analizar, se procedió a investigar sobre distintos tipos de materiales y procesos de fabricación. El haber realizado un primer estudio sobre el componente en particular y el mecanismo en el que se integra, resultó de gran ayuda para ser capaz de decidir, en el posterior análisis de alternativas cual era la mejor opción en cuanto a material y proceso de fabricación.

6.2. Etapa de análisis resistente del componente

Esta etapa consiste en modelizar el comportamiento de la biela, su geometría y acciones a la que se ve sometida, de modo que se obtengas las tensiones durante el funcionamiento y mediante el análisis de estos resultados se pueda evaluar la validez del modelo.

Dentro etapa podemos diferenciar de nuevo diferentes subetapas que serán explicadas a continuación:

6.2.1. Modelado en CAD

Para realizar el modelo en CAD y puesto que se disponía físicamente de la biela, el primer paso a realizar fue la medición de la misma empleando un calibre electrónico.

El empleo del calibre nos permitió medir de forma exacta dimensiones importantes como los diámetros interiores de la cabeza y pie de biela y de manera aproximada otras como la distancia entre centros de estas dos circunferencias. Esta segunda, pese a tratarse de una de las medidas principales, puesto que puede demostrarse mediante un simple análisis cinemático que influye en las aceleraciones del mismo que a su vez influyen en las fuerzas de inercia, no puede medirse con total precisión. Sin embargo, sí se puede comprobar revisando la bibliografía si se trata de una aproximación válida ya que existen unos valores habituales que actualmente suele cumplir el cociente entre la carrera del pistón y la longitud entre centros de la biela.

Para el resto de medidas se procedió de la misma manera: o bien se medían de forma exacta usando el calibre electrónico o se aproximaban de la forma más coherente posible. Algunas medidas incluso no podían medirse ni siquiera de forma aproximada, por lo que debían estimarse completamente como son los radios de redondeo que encontramos a lo largo de la pieza o los ángulos de inclinación de las pares del vaciado del cuerpo de la biela. Estas medidas, de cara al análisis resistente, puede que no tuvieran excesiva importancia, pero sí si se quería modelar con fidelidad la pieza original y que además fuera compatible la geometría del modelo con el proceso de forja.



Figura 7: Modelo CAD de la biela

Finalmente, como iba a ser necesario en el análisis tensional tener el conjunto entero montado, también se modeló el cigüeñal, el pistón y el bulón que une el pistón y la biela. Para modelar estos elementos solo se tuvieron en cuenta dos datos del motor: la carrera para modelar el cigüeñal, y el diámetro del cilindro de la cámara de combustión para modelar el pistón. Estos datos del motor, así como otros empleados posteriormente en el análisis resistente, se encuentran recopilados en la tabla 4.

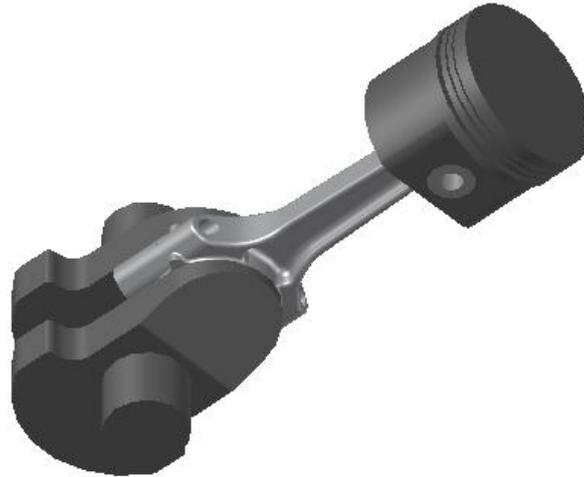


Figura 8: Modelo CAD del conjunto

Para el modelado del componente se ha decidido emplear el software AutoCAD 2016. Este software ofrece las herramientas necesarias para el modelado 3D de la pieza y la realización posterior de los planos. AutoCAD 2016 es un software del grupo Autodesk que permite la descarga de una versión de estudiante gratuita. Además ofrece una interface de usuario sencilla e intuitiva que facilita el aprendizaje del programa. Finalmente permite guardar archivos con la extensión '.iges' de modo que puedan ser leídos con el software empleado en el análisis resistente. Empleando el mismo software se realizan los planos de diseño del componente incluidos en el Anexo IV.

6.2.2. Obtención de las solicitaciones sobre la biela

En el mecanismo biela-pistón-cigüeñal, la presión originada en la cámara de combustión se aplica directamente sobre el pistón y se transmite a través de la biela al cigüeñal, originando un par que es el causante del movimiento del vehículo.

El problema en este punto es modelizar esta presión que actúa sobre el pistón. El ciclo de cuatro tiempos que ocurre en la cámara de combustión de un motor de gasolina, como es nuestro caso, es conocido como el 'Ciclo Otto', y puede estudiarse de manera teórica de una forma sencilla. Por ello, la primera opción por la que se optó fue esta misma: calcular el ciclo termodinámico de forma teórica. Esta opción fue descartada rápidamente pues se obtenía, teniendo en cuenta las prestaciones del motor a analizar, una presión máxima excesiva. Esto es debido a que el ciclo termodinámico real que ocurre en la cámara se aleja notablemente del teórico en las zonas de presión máxima.

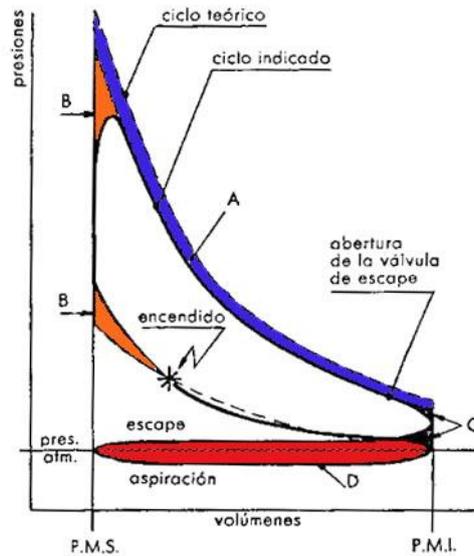


Figura 9: Ciclo de Otto teórico y real

La siguiente opción fue tener en cuenta una serie de hipótesis, relacionadas con el rendimiento del motor, que acercaban el ciclo teórico al experimental. Sin embargo, como se trataba de hipótesis sencillas, no fue suficiente. El siguiente paso para un cálculo manual hubiera sido una mayor profundización en conceptos termodinámicos experimentales, aspecto que complicaba bastante el cálculo y nos alejaba del propósito del trabajo.

Finalmente se optó por emplear un simulador programado en Matlab [3] que nos permitía obtener la gráfica de la presión sobre el pistón en función del giro del cigüeñal (figura 10) de manera sencilla introduciendo las especificaciones necesarias de nuestro sistema.

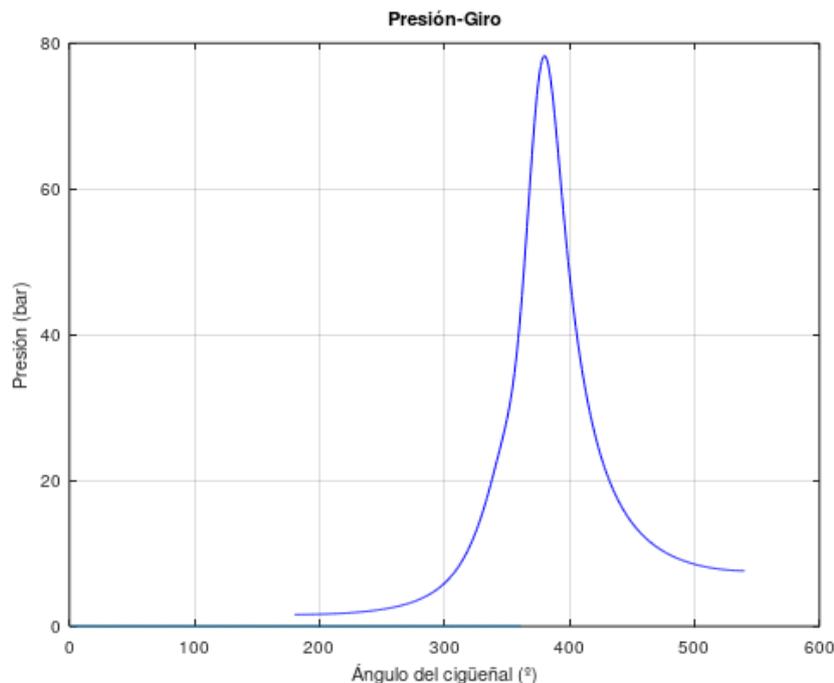


Figura 10: Gráfica presión-giro del cigüeñal a 3700 rpm

Este programa se centra básicamente en realizar un código de Matlab que sea capaz de devolver, entre otras, la gráfica Presión-Ángulo de giro del cigüeñal mencionada. Esto lo consigue mediante un análisis en profundidad de conceptos termodinámicos específicos del motor, los que previamente hemos mencionado que se alejaban del objetivo de este proyecto. Entre otros aspectos, emplea ecuaciones diferenciales que modelizan la combustión y tiene en cuenta pérdidas de carga o que la combustión se inicia antes de llegar al punto muerto superior.

De este modo, el programa obtiene como resultado final una función que tiene como variables de entrada la carrera del pistón, diámetro del pistón, longitud de la biela, el régimen de giro del cigüeñal y la presión inicial en la cámara de combustión y como variable de salida la gráfica que hemos mencionado. Empleando este programa se obtienen los valores de presión entre los 180° y 540° de giro del cigüeñal (zona crítica del ciclo en cuanto al cálculo de la presión), por lo que durante el resto del ciclo, se tomará como valor aproximado el valor de la presión inicial. Pese a que utilizando este programa se obtienen valores mucho más acordes a los valores reales según la bibliografía, es preciso mencionar que obviamente siguen siendo valores aproximados, pero que se consideran lo suficientemente precisos para el objetivo de este trabajo.

6.2.3. Realización del análisis resistente mediante software MEF

Una vez finalizado el proceso de modelado y obtenida la presión que actúa sobre el pistón, el último paso de la fase de diseño era realizar el análisis tensional del componente.

Para llevar a cabo esta tarea se ha decidido usar la versión estudiante del software ANSYS Workbench 2019 R1. La razón de emplear este software ha sido principalmente que ya se disponía de conocimientos previos sobre el uso del programa, aunque pese a no ser exactamente de los módulos empleados para el análisis llevado a cabo, servían como base.

El análisis podía enfocarse de dos maneras diferentes: realizando un análisis estático aplicando unas fuerzas y restricciones de movimiento que simularan el comportamiento del material o mediante un análisis dinámico.

La primera de las opciones tenía la ventaja de ser, posiblemente, menos costoso computacionalmente. Este análisis se debería realizar empleando el módulo 'Static Structural'. Sin embargo, se basaba en introducir más hipótesis sobre el funcionamiento para imponer las ligaduras y sobre las fuerzas actuantes, que unidas a las ya existentes sobre la presión que actúa, podían ofrecer resultados poco fiables. Además, dado que las fuerzas de inercia son de gran relevancia en el mecanismo, habría que obtener primero, mediante algún otro software, cuales son estas fuerzas. Por todo esto, se decidió descartar este método de análisis.

La opción elegida fue, por tanto, realizar un análisis dinámico directamente, en el que únicamente se tuviera que definir el movimiento del mecanismo mediante el módulo de ANSYS 'Rigid Dynamics' y las fuerzas que actúan en el módulo 'Transient Structural'. El

primero de los módulos nos permite obtener toda la información acerca de la cinemática del mecanismo y el segundo sobre las tensiones que actúan en los elementos. La principal ventaja que encontramos en realizar el análisis dinámico es que es el propio ANSYS el que tiene en cuenta las fuerzas de inercia únicamente introduciéndole los datos de la densidad de los materiales empleados.

Tras elegir haber elegido el método de análisis, el siguiente paso fue familiarizarse con los módulos a emplear e informarse de la forma correcta de ejecutar el análisis. Tras esto, se procedió a la realización del análisis obteniendo los resultados que se muestran en el apartado 7.1.

6.3. Etapa de fabricación

Esta etapa consiste en decidir cuáles serán las operaciones de mecanizado que se le realizarán al componente una vez ha sido forjada, decidir el orden de las mismas, las herramientas a emplear y realizar una hoja de procesos con todas la operaciones.

6.3.1. Decisión de las operaciones a realizar y su orden

La manera de decidir que operaciones a realizar ha sido mediante inspección de la misma (figura 28). A la hora establecer el orden de operaciones que se ha considerado más adecuado (apartado 7.2.1.) se ha tratado en todo momento de reducir el número de operaciones a realizar por el operario y el número de cambios de herramientas de modo que el proceso de mecanizado sea lo más rápido posible.

6.3.2. Decisión de las herramientas a emplear

Tras haber decidido que operaciones se realizaban, el siguiente paso era decidir que herramientas se van a emplear para llevar a cabo el proceso de mecanizado. Todas estas herramientas se han elegido de los siguientes tres catálogos de Sandvik:

- Herramientas de torneado 2017
- Herramientas rotativas 2017
- Herramientas rotativas de metal duro integral 2018

El modo de proceder para decidir que herramientas eran válidas se encuentra explicado de manera detallada en el apartado 7.2.2. y la lista completa de herramientas en el Anexo V.

6.3.3. Realización de la hoja de procesos

Con el orden de las operaciones decidido y las herramientas seleccionadas, el último paso para concluir con la parte relativa al mecanizado es elaborar la hoja de procesos. El objetivo de esta hoja es que el operario conozca cuales son las operaciones de cambio de fase que debe realizar, en que consiste cada una de las operaciones de mecanizado y cuáles son los parámetros de las operaciones. La hoja de procesos puede encontrarse en el apartado 7.2.3.

7. Descripción de los resultados

Continuando con el esquema global del trabajo, los resultados los dividiremos en dos apartados: uno correspondiente a la parte de diseño y otro a la parte de fabricación.

7.1. Resultados del análisis resistente

En lo referente al análisis resistente trataremos los resultados tanto del análisis cinemático como los del análisis dinámico, ya que a la hora de diseñar un componente, ambos resultados influyen el uno sobre el otro, siendo el proceso de diseño un proceso iterativo.

En el caso de realizar un diseño desde cero de un mecanismo, tras realizar las síntesis de estructural y la síntesis dimensional, se debe realizar un análisis cinemático para contrastar las trayectorias o los ángulos de transmisión de fuerzas por ejemplo. Además, del análisis cinemático se obtienen también como resultados las aceleraciones de los distintos elementos del mecanismo. Estos datos son totalmente necesarios para conocer las fuerzas de inercia actuantes en los distintos elementos, que condicionarán los esfuerzos que estos sufran, y por tanto, las secciones y características másicas de los mismos.

En nuestro caso particular, las etapas de síntesis estructural y síntesis dimensional ya las conocemos, dado que los componentes del mecanismo cigüeñal-biela-pistón son perfectamente conocidos y las dimensiones del mecanismo son dato ya que conocemos el motor en el que se emplea nuestra biela. El modelo de biela que estamos analizando se emplea en diversos motores del grupo Volkswagen. Las características que se presentan en la tabla 4 son las correspondientes al motor más potente de gasolina de todos en los que se utiliza la biela, de modo que al realizar el análisis nos encontrásemos en la situación más crítica.

Tabla 4: Características el motor

Modelo el motor	EA888 1,8 R4 TSI/TFSI
Carrera (mm)	84,1
Diámetro del pistón (mm)	82,5
Relación de compresión	9,6
Cilindrada (cm³)	1798
Número de cilindros	4
Potencia (kW)	125
Rango de potencia máxima (rpm)	[3800,5200]
Par motor (Nm)	320
Rango de par motor máximo (rpm)	[1400,3700]
Máxima presión inicial (bar)	1,6

Tal y como puede observarse en la tabla 4, existen dos situaciones donde podría considerar clave realizar el análisis. La primera es el momento de máxima potencia a máximas revoluciones, y el segundo, el momento de transmisión de máximo par a máximas revoluciones. El resultado que mostraremos a continuación es el referente al segundo caso por suponerse el más crítico en cuanto a tensiones, dado que se produce una mayor transmisión de esfuerzos. Este es el caso donde se produce la máxima presión inicial por ser la situación donde se solicita máxima fuerza. Los resultados del análisis del primer caso se incluirán en el Anexo III.

7.1.1. Uniones entre elementos

En primer lugar se mostrarán las uniones impuestas entre los diferentes elementos ya que es lo primero que hay que definir para poder resolver tanto la cinemática como la dinámica de la biela.

ANSYS permite dos tipos de uniones: 'Body-Ground' y 'Body-Body'. Las uniones del cigüeñal con los puntos de apoyo y las del pistón con las paredes del cilindro serán del primer tipo y resto del segundo. Las uniones definidas son:

- Cigüeñal - Punto de apoyo: Revolución
- Pistón - Cilindro: Translación
- Biela - Cigüeñal: Revolución
- Biela - Bulón: Revolución
- Pistón - Bulón: Fija

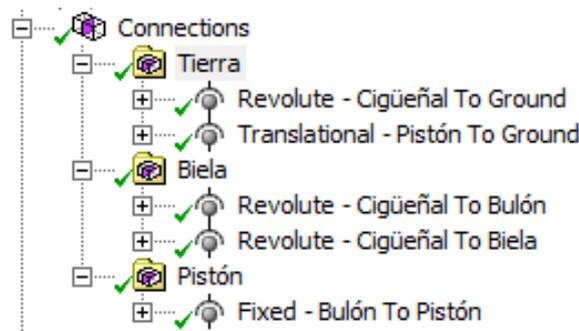


Figura 11: Uniones entre elementos

Un aspecto a considerar a la hora de definir las uniones entre elementos es la posición del sistema de referencia en las juntas de revolución. Para definir las correctamente es necesario definir el sistema de referencia de tal modo que el eje de giro coincida con el eje en el que ANSYS tiene definido el grado de libertad de la junta, que es el eje Z.

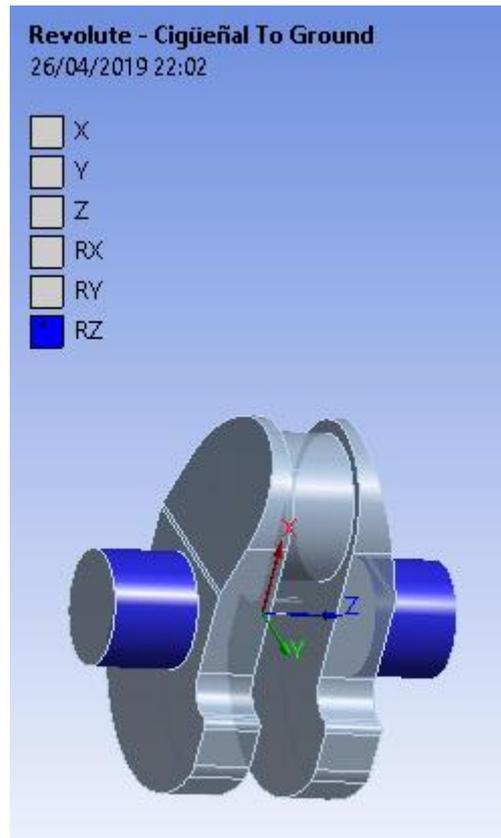


Figura 12: Sistema de referencia de la junta de revolución

7.1.2. Mallado

Antes de comenzar a analizar la biela, es necesario realizar el mallado de la misma. La calidad de este mallado será un factor importante a la hora de obtener los resultados del análisis. El propio ANSYS te realiza un mallado directamente de la pieza. Este mallado se ha considerado demasiado irregular por lo que se ha optado por mejorarlo empleando los comandos 'Method' y 'Body sizing'. El primero nos permite imponer que todos los elementos sean tetraedros y el segundo fijar el tamaño de elemento en la biela en 0,004m. Al haberse empleado la licencia de estudiante, se limita el máximo de nodos del mallado en 32000. El mallado obtenido cuenta con 30526 nodos y 17130 elementos.

Un aspecto a considerar en el mallado del elemento analizado es su geometría. La biela cuenta con zonas de redondeo importantes. Esto es porque se decidió en un primer momento reproducir de la manera lo más exacta posible la geometría del componente. Sin embargo, de cara al análisis una opción podría haber sido simplificarla para facilitar el mallado. El orden de los elementos (lineales o cuadráticos) se ha elegido automáticamente por el software de manera que se adapte de la mejor manera posible a la geometría.

En la siguiente figura puede observarse la diferencia entre el mallado realizado por ANSYS en un primer momento y el mallado mejorado.

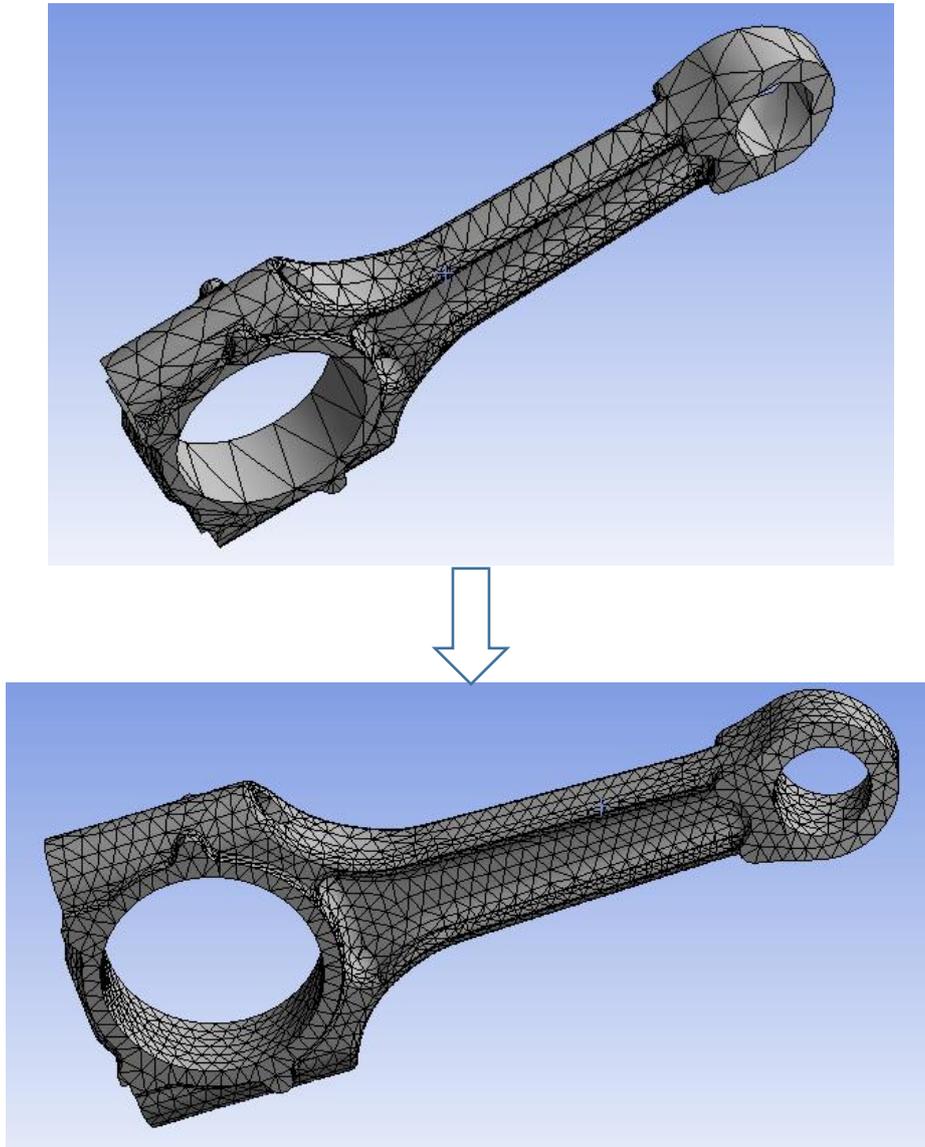


Figura 13: Mallado inicial y mallado mejorado

7.1.3. Análisis cinemático

Los resultados de mayor interés que podemos extraer de este análisis son la aceleración lineal y angular de la biela ya que serán las que tendrán influencia posterior en el análisis dinámico por ser las causantes de las fuerzas de inercia. Este análisis se hará a 3700 rpm por ser la aceleración angular máxima a la que se mantiene el par máximo.

A. ACELERACIÓN LINEAL

Los resultados que se obtienen referentes a la aceleración lineal son los siguientes:

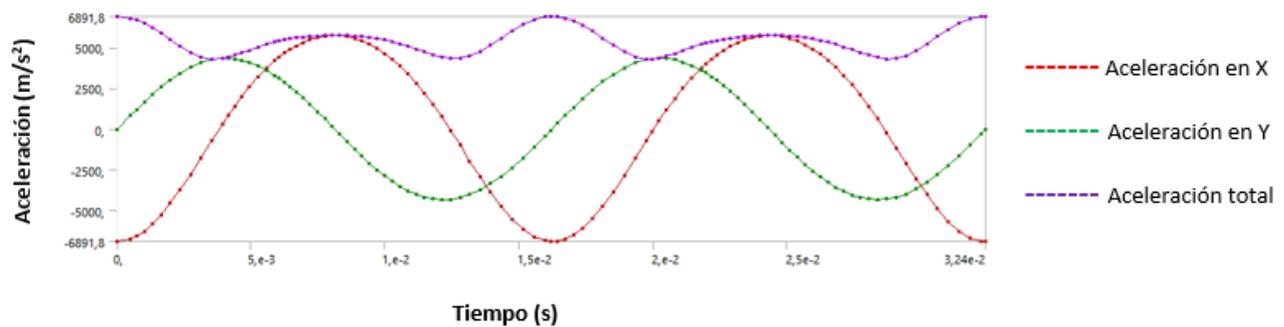


Figura 14: Aceleración lineal a 3700rpm

En la imagen mostrada se observa que tanto la aceleración en X como en Y varían de forma senoidal con un desfase entre ambas de 90° . La primera varía entre $5732,6$ y $-6891,8$ m/s^2 y la segunda entre $4329,4$ y $-4330,4$ m/s^2 . En la dirección Z, dado que está restringido el movimiento, el valor de la aceleración es nulo. Estas aceleraciones dan lugar a una aceleración total que varía entre $6891,8$ m/s^2 y $4300,3$ m/s^2 (teniendo solo en cuenta el módulo).

B. ACELERACIÓN ANGULAR

Los resultados que se obtienen en cuanto a la aceleración angular son los siguientes:

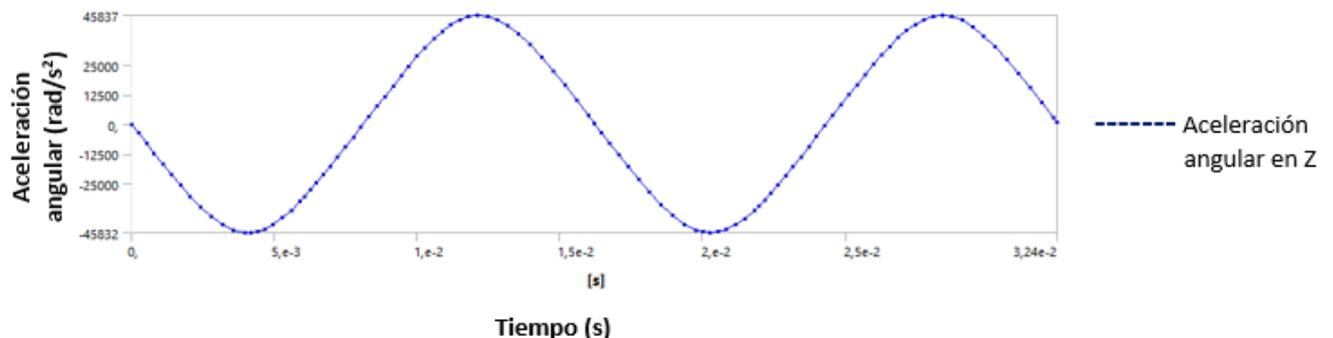


Figura 14: Aceleración angular a 3700rpm

En este caso únicamente tenemos aceleración angular en el eje Z, que es precisamente el que se ha definido como eje de giro. Tanto en el eje X como en el Y, el valor de la aceleración angular es nulo ya que no se le permite el giro.

La aceleración angular en Z varía, de nuevo, de forma senoidal entre los valores de 45837 y -45824 rad/s². Como solo existe aceleración angular en este eje, el valor de la aceleración total coincidirá en todo momento con ella tanto en módulo como en sentido, a diferencia de lo que ocurre en el caso de la aceleración lineal.

7.1.4. Análisis dinámico

Conocidas las aceleraciones, causantes de las fuerzas de inercia, y la presión sobre el pistón (figura 10) ya estamos en posición de realizar el análisis dinámico. Mediante este análisis se pretende comprobar que las tensiones no superan la tensión de fluencia del material y por tanto no se produce plastificación y, más importante aún, ya que es el principal modo de fallo, que no existe riesgo de fallo por fatiga en un principio.

Para el análisis dinámico es necesario definir las características másicas de todos los componentes del conjunto y las propiedades resistentes del componente que vamos a analizar que en nuestro caso es la biela. Todas las propiedades necesarias para definir el material empleado en la biela se encuentran especificadas en la tabla 1 excepto el valor del módulo Poisson, que al tratarse de un acero, toma un valor de 0,3. Para definir las propiedades másicas únicamente necesitamos la densidad. La biela, el cigüeñal y el bulón se fabrican los tres de acero por lo que su densidad será de 7850kg/m³. El pistón, por su parte se fabrica de una aleación de aluminio de la familia 4000 por lo que su densidad será de 2830kg/m³.

A. ANÁLISIS DE TENSIONES

En las figuras mostradas a continuación podemos ver la tensión de Von Mises máxima sufrida en cada uno de los puntos de la biela y las tensiones de Von Mises medias a lo largo del ciclo de cuatro tiempos:

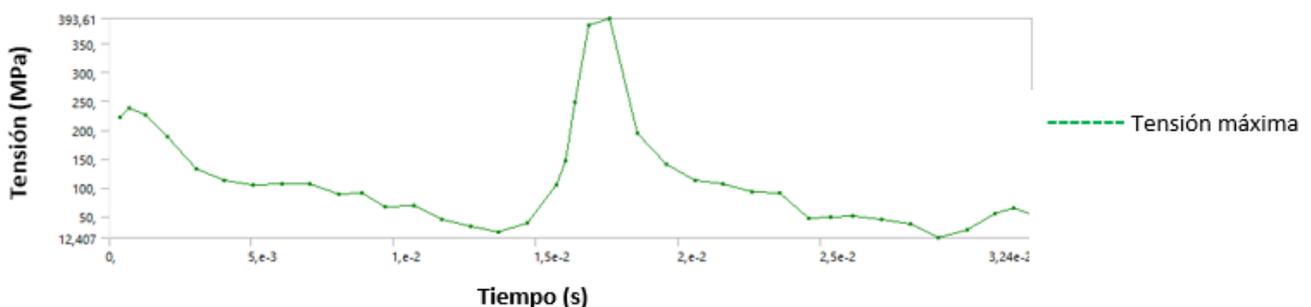


Figura 15: Tensiones máximas en la biela

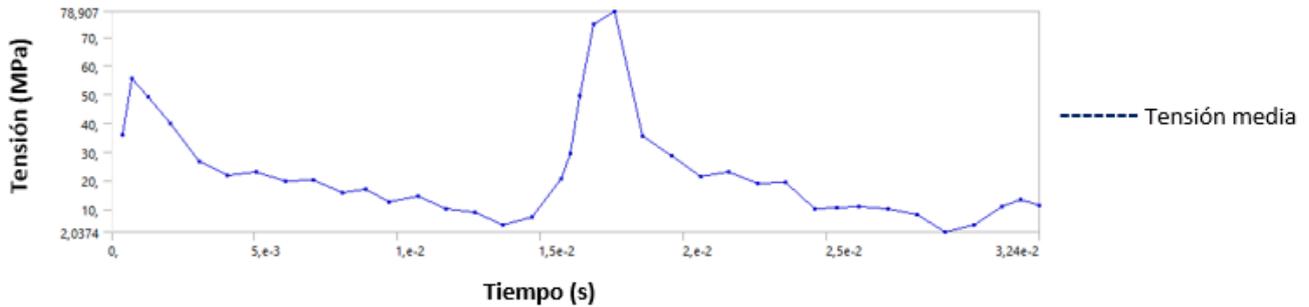


Figura 16: Tensiones medias en la biela

A la vista de la gráfica de las tensiones máximas (figura 15) se observa que el punto de máxima tensión equivalente de Von Mises no se sobrepasa la tensión de fluencia del material, por lo que no existe plastificación y el material trabaja en régimen elástico en todas las zonas. La tensión máxima es de 393,61MPa y el límite de fluencia de 480MPa por lo que trabajamos con un coeficiente de seguridad de 1,22.

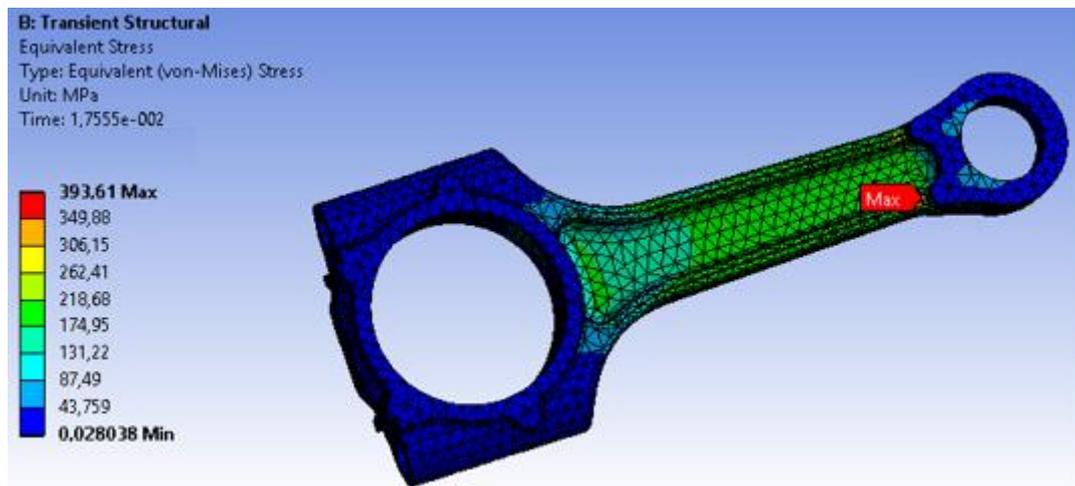


Figura 17: Distribución de tensiones en el momento de máxima tensión

Este punto de máxima tensión se da, además, en una zona muy localizada: lugar de transición entre pie y cuerpo de la biela. El resto de puntos, como puede observarse, las tensiones están muy por debajo de este valor máximo de tensión.

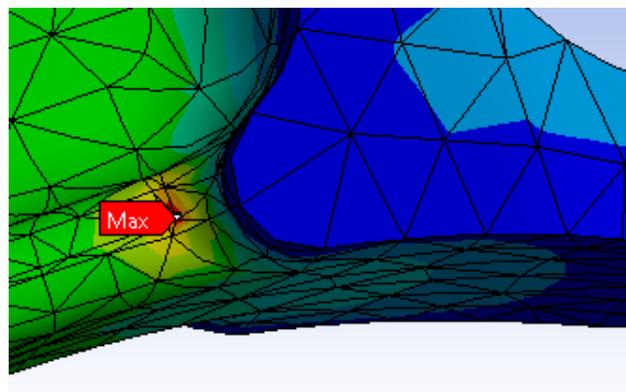


Figura 18: Detalle de la zona de máxima tensión

A la vista de estos resultados, desde el punto de vista de las tensiones, el modelo de biela que estamos analizando es válido y soporta los esfuerzos que se generan en el momento de transmisión del máximo par.

B. ANÁLISIS DE DEFORMACIONES

ANSYS Workbench no dispone de una herramienta en el módulo 'Transient structural' que nos devuelva como resultados las deformaciones que se producen en cada momento. Sin embargo, si nos permite calcular la deformación unitaria. Los resultados de deformación unitaria máxima y media son los mostrados a continuación:

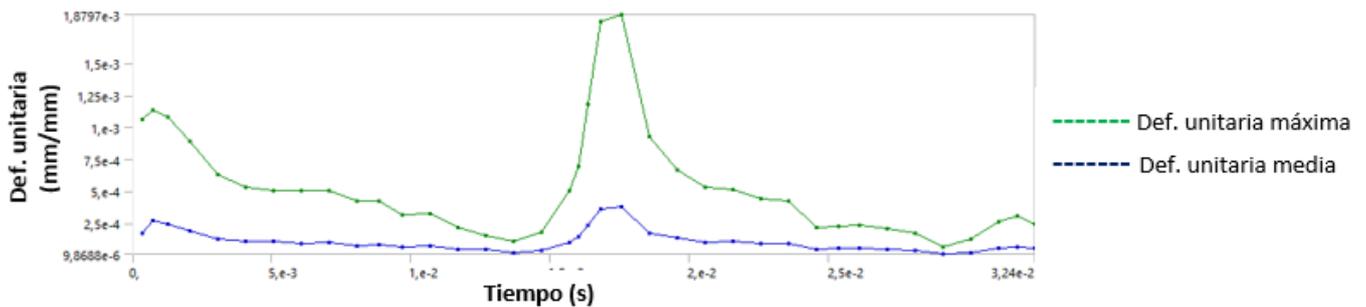


Figura 19: Deformaciones unitarias máximas y medias en la biela

Si estás gráficas las comparamos con las obtenidas en el caso de tensiones, se observa que la forma de la gráfica es la misma. Esto nos lleva a pensar, tal y como nos indicaban los valores de tensión inferiores a la tensión de fluencia, que la pieza trabaja en régimen elástico en todo momento. De todas formas esto se puede comprobar numéricamente de una forma sencilla. Comprobemos este resultado con la zona en la que se produce la máxima deformación unitaria.

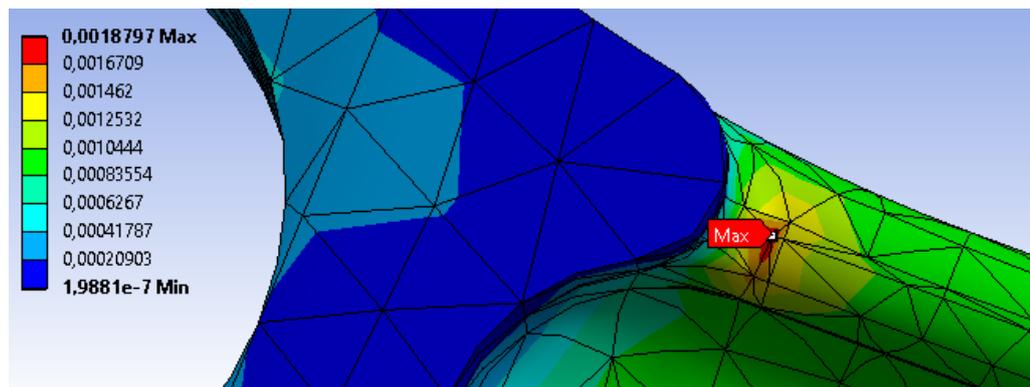


Figura 20: Detalle de la zona de máxima deformación unitaria

La comprobación consiste básicamente en verificar que al trabajar en régimen elástico, el cociente entre la tensión y la deformación en cada uno de los puntos da como resultado el módulo elástico del material, cumpliendo de este modo la 'Ley de Hooke'. El valor del módulo elástico de nuestro material es de 210 GPa tal y como puede verse en la columna correspondiente al AISI 4340 de la tabla 1. Si lo comprobamos con la zona de tensión y deformación unitaria máxima, veremos que efectivamente, se cumple esta relación.

Dado que se cumple la comprobación de trabajo en régimen elástico en la zona más crítica, podemos asegurar, que en resto de zonas se cumplirá en todo momento también y que por tanto no habrá problemas relativos a la deformación el componente.

C. ANÁLISIS DE FATIGA

Tal y como se ha comentado previamente en el documento, el modo de fallo más habitual en este componente es el fallo por fatiga. Esto hace que la comprobación de que el componente presenta en todo su conjunto una vida fatiga ilimitada con un coeficiente de seguridad aceptable sea de gran importancia.

El módulo 'Transient structural' nos permite realizar comprobaciones de fatiga con la herramienta 'Fatigue Tool'. Para poder realizar esta comprobación, es necesario, en primer lugar, definir la gráfica que relaciona la tensión alterna a la que está sometido el componente con el número de ciclos que este soportará. El método seguido para obtener esta gráfica (figura 21) viene desarrollado en el Anexo II.

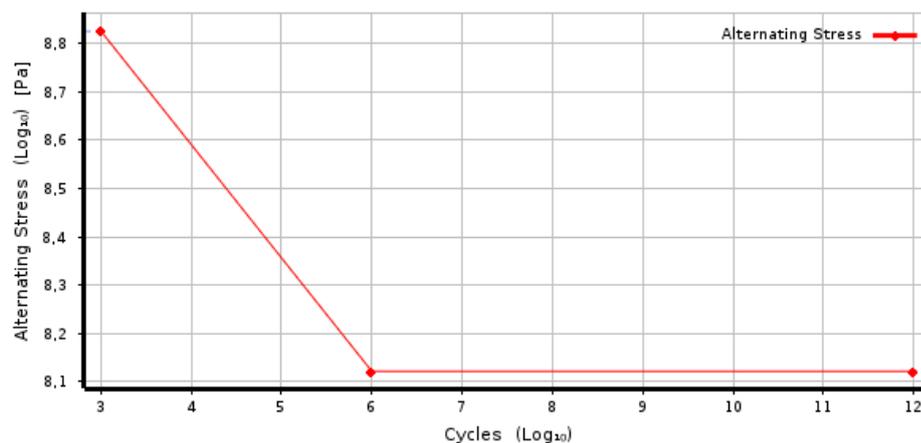


Figura 21: Gráfica $\log_{10}(\sigma)-\log_{10}(N)$

De cara a estudiar la fatiga, debemos tener en cuenta que es la diferencia máxima de las tensiones en cada punto de la biela la causante de la propagación de grietas por fatiga. Además también habrá que considerar que las tensiones de tracción influyen de manera más negativa que las de compresión. Este análisis, por tanto, debería estudiarse punto a punto.

Dado que ANSYS ofrece una herramienta de estudio de la fatiga limitada, estudiaremos el punto en el que en principio se produce la mayor diferencia a lo largo del ciclo de combustión en combinación una elevada tensión de tracción. ANSYS tampoco ofrece una manera de conocer cuál es este punto. Si observamos las gráficas de máxima tensión principal máxima y mínima tensión principal mínima a lo largo de todo el ciclo (figura 22 y figura 23) existe en cada una un punto que destaca frente al resto.

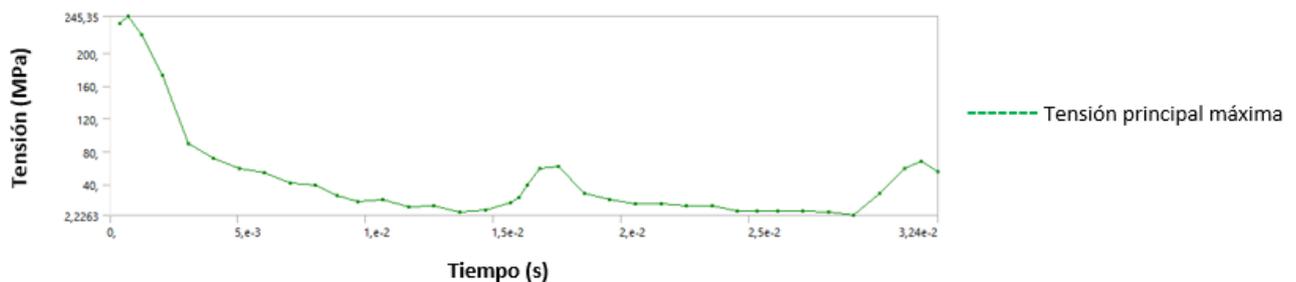


Figura 22: Máxima tensión principal máxima

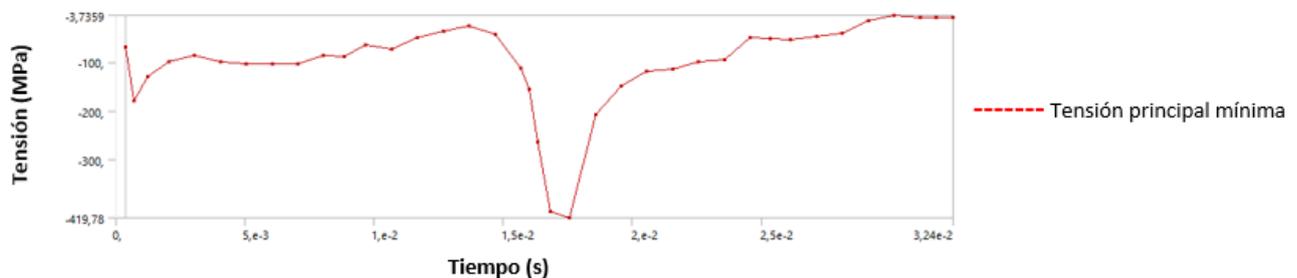


Figura 23: Mínima tensión principal mínima

Estos puntos además corresponden con los valores máximos de los picos que se observan en la gráfica de la figura 15. En el caso de la mínima tensión principal mínima, el punto donde se produce el mínimo es el mismo en el que se produce la tensión equivalente máxima, ya analizado en el apartado de las tensiones. A este punto lo llamaremos 'Punto 1'. No ocurre lo mismo con el punto de máxima tensión principal máxima. Sin embargo, el mayor valor de la tensión la tensión principal máxima de este punto a lo largo del ciclo, es muy cercana a la máxima absoluta (figura 24), del mismo modo que ocurre con la tensión equivalente de Von Mises (figura 25).

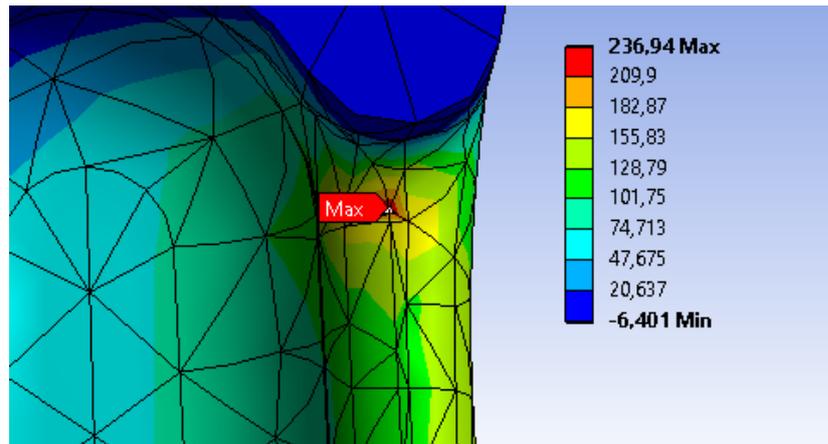


Figura 24: Valor máximo de la tensión principal máxima en el Punto 1

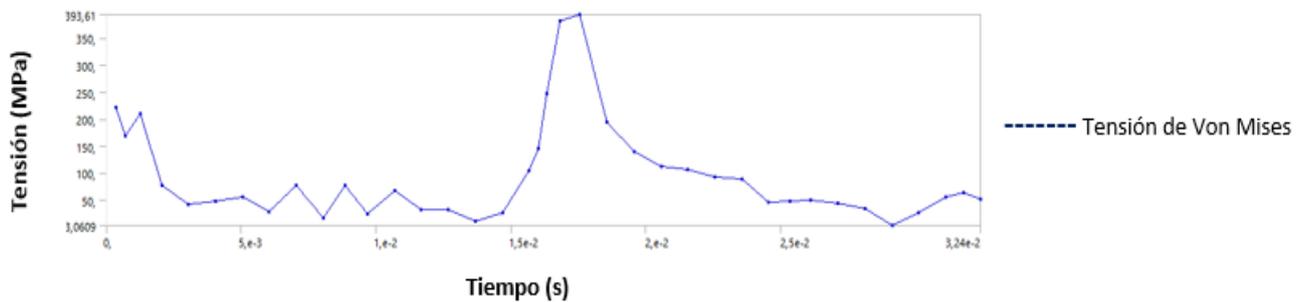


Figura 25: Tensión en el Punto 1 a lo largo del ciclo

Esto nos lleva a pensar que el ‘Punto 1’ puede ser el punto más crítico a fatiga. Aun así, comprobaremos la diferencia de tensión máxima en el punto en el que se produce la máxima tensión principal máxima dado el efecto negativo de las tensiones de tracción en fatiga. A este punto le llamaremos ‘Punto 2’. De este modo, determinaremos si realmente el ‘Punto 1’ puede considerarse como punto más crítico.

Para analizar el comportamiento a fatiga de dicho punto en ANSYS es necesario definir la relación de carga que se calcula como:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1)$$

Tanto para analizar la diferencia entre la tensión máxima y la mínima como para calcular R, la tensión máxima (σ_{max} , de tracción) y mínima (σ_{min} , de compresión) deben ser las equivalentes de Von Mises con signo. Para determinar el signo, deberemos comprobar que la suma de las tres tensiones principales en el momento que se produce el máximo y mínimo (σ_{pi_max} o σ_{pi_min}) es mayor o menor que cero, para saber si son positivas o negativas respectivamente. En la siguiente tabla se muestra el resumen del estado tensional de los dos puntos:

Tabla 6: Resumen estado tensional Punto 1 y Punto 2

	Punto 1	Punto 2
σ_{p1_max} (MPa)	236,94	245,38
σ_{p2_max} (MPa)	31,67	0,02
σ_{p3_max} (MPa)	1,16	-11,04
$\Sigma\sigma_{pi_max}$ (MPa)	272,77	33,61
σ_{max} (MPa)	222,11	238,19
σ_{p1_min} (MPa)	-1,63	-0,03
σ_{p2_min} (MPa)	-56,47	-0,48
σ_{p3_min} (MPa)	-419,78	-164,14
$\Sigma\sigma_{pi_min}$ (MPa)	-477,88	-143,83
σ_{min} (MPa)	-393,61	-143,83
$\Delta\sigma$ (Mpa)	666,38	409,52
R	-1,44	0,59

Con los resultados presentados en la tabla 6, podemos considerar que el 'Punto 1' es el punto crítico a fatiga al producirse en él la tensión máxima de compresión y una tensión de tracción muy cercana a la máxima, produciéndose así la mayor diferencia entre la tensión máxima y mínima. Por tanto, resulta razonable que se establezca como valor de R el calculado para este punto. Esto implica además estar trabajando en el resto de puntos en una situación más desfavorable de la que en realidad ocurre en esos puntos, por tanto, estamos trabajando del lado de la seguridad.

Los resultados que se obtienen en cuanto al coeficiente de seguridad a fatiga empleando el criterio de Soderberg son los siguientes:

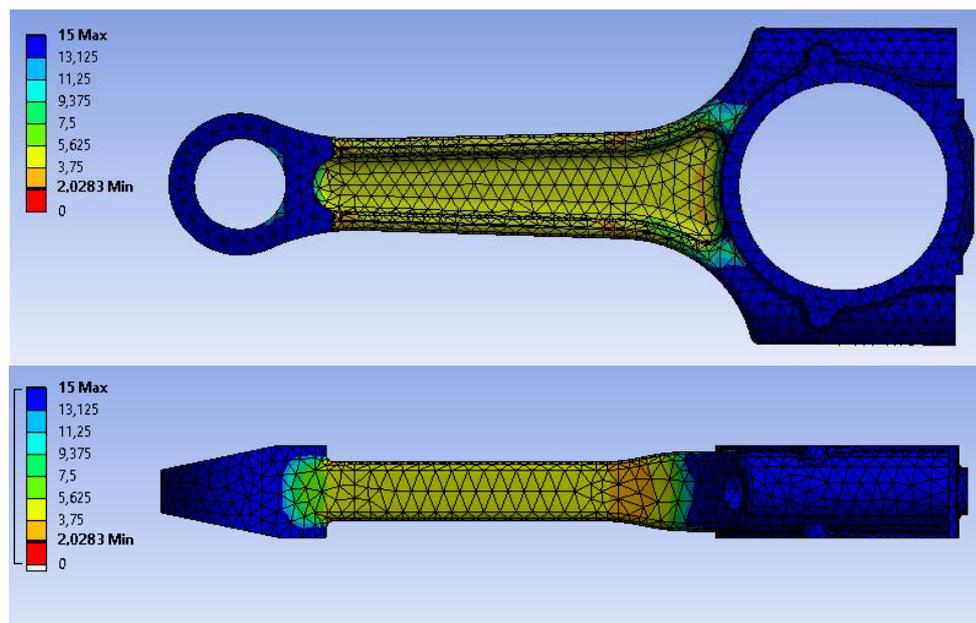


Figura 27: Coeficiente de seguridad a fatiga de la biela

El coeficiente de seguridad está calculado respecto a una vida de 10^9 ciclos. Respecto a esta vida, el coeficiente de seguridad mínimo es de 2,03 que se produce precisamente en el punto crítico. Esta vida de 10^9 ciclos respecto a la que se ha calculado el coeficiente de seguridad es superior de los 10^6 ciclos que marca el límite entre vida a fatiga finita e ilimitada. A la vista de estos resultados, puede validarse el diseño el componente respecto a su comportamiento a fatiga.

D. ANÁLISIS GLOBAL DE LOS RESULTADOS

Tal y como se ha comprobado en los análisis individuales realizados, todos los aspectos a considerar son favorables. Esto nos indica que el diseño del componente es perfectamente aceptable.

Aun así, los resultados expuestos en este análisis pueden considerarse válidos de cara a obtener una idea global del comportamiento del componente, ya que se han empleado una serie de hipótesis para obtener estos resultados. Las principales hipótesis adoptadas son:

- El material a emplear se ha decidido en base a revisión sobre materiales más habituales. Este material no tiene por qué ser el mismo del componente.
- No se ha considerado el efecto que tienen los tornillos que unen la cabeza de biela lo cual produciría un aumento de las tensiones locales de esa zona.
- No se ha considerado el estado de tensiones del componente tras el proceso de forja. El haber considerado esta opción hubiera sido favorable de cara a nuestro análisis, ya que las tensiones de compresión dificultarían la propagación de grietas por fatiga. Lo mismo ocurriría si se le somete a la biela a un granallado.
- La gráfica de presión real durante la combustión real es algo que solo conoce el fabricante y que su obtención se basa en métodos experimentales. La propuesta por nosotros está basada en una serie de ecuaciones termodinámicas para aproximar la presión durante la combustión.

7.2. Resultados del proceso de fabricación

En este apartado se mostrarán los resultados referentes al proceso de mecanizado del componente. En primer lugar, se establecerá un orden de las operaciones de manera justificada, después se explicará el proceso seguido para escoger las herramientas para cada una de las operaciones de mecanizado del componente, y finalmente se presentará la hoja de procesos. También se añadirá un resumen del proceso entero de fabricación.

7.2.1. Operaciones de mecanizado

El primer paso para realizar el mecanizado es establecer que operaciones van a realizarse y en qué orden. Las operaciones se han elegido por inspección de componente (figura 28). Las operaciones que es necesario realizar para mecanizar completamente la biela son:

- **Operación 1101:** planeado del material sobrante en la cabeza de la biela.
- **Operación 1102:** escuadrado de la zona donde posteriormente apoyarán las tuercas de los tornillos que unen la cabeza y el pie de la biela.
- **Operación 1103:** taladrado de aproximación para poder realizar la rosca.
- **Operación 1104:** taladrado para dar el diámetro adecuado al agujero.
- **Operación 1105:** roscado.
- **Operación 1106:** planeado frontal de la cabeza y fie de biela.
- **Operación 1107:** mandrinado de la cabeza de biela.
- **Operación 1108:** mandrinado del pie de biela.
- **Operación 1109:** planeado del pie de biela para darle forma trapezoidal.
- **Operación 1201:** planeado frontal de la cabeza y pie de biela.
- **Operación 1202:** planeado del pie de biela para darle forma trapezoidal.
- **Operación 1301:** taladrado de la pequeña parte que faltaba del agujero.



Figura 28: Biela original

En cuanto a la justificación del orden, se ha considerado que la pieza comenzará en posición vertical de modo que se han realizado todas las operaciones posibles sin tener que girar la mesa donde apoya. De este modo se han realizado las cinco primeras operaciones seguidas. Las operaciones 1 y 2 se han colocado una detrás de otra porque se emplea la misma herramienta en ambas, y además, colocándolas las primeras, la operación 2 disminuye la longitud a taladrar posteriormente.

Tras estas operaciones se gira la mesa de modo que la pieza queda horizontal. Se realiza primero la operación 6 para reducir la longitud de mandrinado de las operaciones 7 y 8 y la cantidad de material fresado en la operación 9. Estas operaciones de mandrinado se realizan en este instante y no tras haber realizado todas las operaciones de planeado porque al mandrinar el pie de biela planeado la herramienta no trabajaría de manera continua, sufriendo sucesivos impactos que afectarían a la vida de la misma. Tras el mandrinado ya se procede a realizar la operación 9, última antes de voltear la pieza. Tras voltear la pieza se mantiene el orden siguiendo la misma lógica ya que las operaciones son las mismas.

Finalmente, se coloca la mesa de nuevo en vertical y se realiza la única operación que queda para terminar el mecanizado de la biela.

7.2.2. Herramientas de mecanizado

Como resumen general, las operaciones que se van a realizar se pueden agrupar en cuatro grupos distintos, siendo el proceso de selección de herramienta y plaquita similar en todos ellos. Los cuatro grupos son:

- Fresado
- Mandrinado
- Taladrado
- Roscado

Dentro de cada uno de estos grupos se realizan distintas operaciones, cada una con su correspondiente herramienta y plaquita. Sin embargo, en este apartado se incluirá de manera detallada únicamente la elección de la herramienta y plaquita para una operación de cada grupo, pudiéndose encontrar el resto de elecciones en el Anexo V.

El criterio que se seguirá para elegir las diferentes herramientas será optar por una herramienta que cumpla las condiciones geométricas requeridas por el proceso (diámetro de la herramienta o profundidad de pasada por ejemplo) y a continuación elegir una plaquita compatible en tamaño con esta herramienta entre las recomendadas por el fabricante. Una vez seleccionado esto, los parámetros a emplear serán los que minimicen el tiempo de mecanizado.

A continuación se detallará el proceso seguido para la elección de las herramientas y las plaquitas a emplear en una operación de cada grupo:

A. OPERACIÓN 1101

Esta operación corresponde a una de las incluidas en el grupo de operaciones de fresado. Esta operación en concreto es un planeado. La zona de la biela donde se arranca el material está especificada en la hoja de procesos (apartado 7.2.3.).

Esta operación requiere de una profundidad de pasada máxima (a_{p_max}) de 2mm y un ancho de la herramienta superior a 11mm para poder realizar la operación de una única pasada. Estas dos condiciones no son excesivamente restrictivas en cuanto a la elección de la herramienta, por tanto, la elección de esta herramienta la haremos teniendo en cuenta que en la operación 1102 se tiene un $a_p = 1,8\text{mm}$ y se necesita un diámetro de herramienta (D_c) de 50mm para cumplir con la geometría de la biela. Además, deberá ser compatible con plaquitas redondas. Por tanto, las condiciones finales, para poder realizar las operaciones 1101 y 1101 con la misma herramienta son:

- Profundidad de pasada máxima de la herramienta (a_{p_max}) superior a 2mm.
- Diámetro de la herramienta (D_c) igual a 50mm.
- Geometría de las plaquitas: redonda.

Teniendo esto en cuenta, una de las opciones que encontramos en el catálogo de Sandvik 'Herramientas rotativas 2017' es la Coromill 300 Capto.



Figura 29: Coromill 300 Capto

Las características de la herramienta seleccionada son las siguientes:

DC		CZC _{MS}	APMX _{EW}	APMX _{FW}	RMPX	AZ	CNSC			Código de pedido
40.0	12	C5	9.0	6.00	5.00°	3.0	3	4		R300-052C5-12M
	12	C5	9.0	6.00	5.00°	3.0	3	5		R300-052C5-12H
44.0	08	C5	6.0	4.00	2.00°	1.9	3	8		R300-052C5-08H
46.0	20	C6	15.0	10.00	9.40°	6.0	3	4		R300-066C6-20M
	20	C6	15.0	10.00	9.40°	6.0	3	5		R300-066C6-20H
50.0	16	C6	12.0	8.00	4.50°	3.8	3	5		R300-066C6-16M
	16	C6	12.0	8.00	4.50°	3.8	3	6		R300-066C6-16H
54.0	12	C6	9.0	6.00	3.50°	3.0	3	5		R300-066C6-12M
	12	C6	9.0	6.00	3.50°	3.0	3	7		R300-066C6-12H

Figura 30: Tabla de características Coromill 300 Capto

Se observa como la herramienta tiene un $D_c=50\text{mm}$, un $a_{p_max}=8\text{mm}$ y la geometría de las plaquitas es redonda. De este modo se cumplen todas las exigencias impuestas anteriormente. En la tabla aparecen dos opciones que cumplen la condición de $D_c=50\text{mm}$. Se ha optado por la segunda opción ya que al tener mayor número de dientes que la otra, se minimiza el tiempo de mecanizado como podrá observarse más adelante en (2).

Respecto a la elección de las plaquitas, cabe recordar que vamos a tratar un componente de un acero de baja aleación sin templar por lo que la plaquita se elegirá de metal duro y correspondiente al grupo P, es decir, capaces de mecanizar piezas de acero. Además, cada herramienta tiene un hueco para alojar la plaquita con unas determinadas dimensiones, que deberán ser compatibles con la plaquita que elijamos (figura 31). Estos dos criterios serán comunes para todas las operaciones, por lo que no se volverán a mencionar.

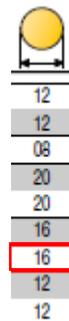


Figura 31: Dimensión de la plaqueta

La tabla de plaquitas correspondientes a la herramienta elegida es la siguiente:



		P											
	RE	Código de pedido	1010	1025	1030	1040	2030	2040	3040	4220	4230	4240	S40T
Medio	16	8.00	R300-1648E-KM										
		8.00	R300-1648E-MM			☆		☆					
		8.00	R300-1648E-PM	☆	☆							★	☆
		8.00	R300-1648M-MM			☆	☆	☆					
		8.00	R300-1648M-PM		☆						★	☆	☆

Figura 32: Tabla de selección de plaquita

Para elegir la plaquita, se ha escogido una que fuera compatible en dimensiones con la geometría, válida para un desbaste medio y que fuera recomendada por el fabricante como ya se indicó al inicio del apartado que se haría.

Para concluir con la elección, será necesario obtener los parámetros de la operación. Estos deberán ser añadidos posteriormente en la hoja de diseño. Las tablas con los parámetros de corte de la plaquita es la siguiente:

ISO P	GC1025	GC1130	GC4220	GC4230
	Espesor de viruta máx., h_{ex} mm			
	0.05-0.1-0.2	0.05-0.1-0.2	0.1-0.15-0.3	0.1-0.2-0.3
Material	Velocidad de corte v_c , m/min			
De baja aleación (elementos de aleación ≤5%)				
No templado	300-295-285	285-280-265	400-390-365	325-315-300
Endurecido y templado	170-165-160	185-180-175	260-255-240	215-205-195

Figura 33: Tabla con los parámetros de corte en función del material

CoroMill® 300

Código de pedido		Avance por diente, f_z mm/diente		Espesor de viruta máx., h_{ex} mm	
		Valor de partida	(min.—máx.)	Valor de partida	(min.—máx.)
R300-1648M-PH	P	0.29	(0.07-0.46)	0.25	(0.06-0.4)
R300-1648M-PM	P	0.21	(0.07-0.29)	0.18	(0.06-0.25)
R300-2060E-ML	M	0.28	(0.06-0.35)	0.2	(0.04-0.25)

Figura 34: Tabla con parámetros de corte en función de la plaquita

Una vez realizado esto ya tenemos todos los datos necesarios para calcular los parámetros de corte de la operación que deberán ser añadidos en la hoja de procesos. El criterio que se empleará para determinar estos parámetros es el de minimizar el tiempo de mecanizado.

El tiempo de mecanizado viene determinado por una de las siguientes expresiones, en función de los datos:

$$t_m = \frac{L_m}{f_n \frac{1000V_c}{\pi D_c}} \quad (2)$$

$$t_m = \frac{L_m}{z f_z \frac{1000V_c}{\pi D_c}} \quad (3)$$

Siendo t_m el tiempo de mecanizado en minutos, L_m la longitud de mecanizado en milímetros, f_n el avance por revolución en mm/rev, f_z el avance por diente en mm/diente, z el número de dientes, V_c la velocidad de corte en m/min y D_c el diámetro de la herramienta en mm.

Por tanto, a la vista de (2) y (3), para minimizar el tiempo de mecanizado será necesario maximizar el producto $f_n \cdot V_c$ o $f_z \cdot V_c$ en función de los datos. Como puede observarse en las tablas de las figuras 33 y 34, estas dos magnitudes son inversamente proporcionales y se relacionan mediante el espesor de viruta (a_c). Al ser inversamente proporcionales se podría optar por maximizar f_z , V_c o cualquier combinación de valores intermedios. A modo de justificación y al ser la primera elección de herramienta explicada, se comprobarán los resultados de maximizar las dos y tomar dos combinaciones intermedias y se mostrarán en la tabla 7.

Tabla 7: Comparación entre maximizar f_z o f_n , maximizar V_c o una combinación intermedia

	Maximizar f_z	Combinación 1	Cominación 2	Maximizar V_c
f_z (mm)	0,29	0,22	0,17	0,11
a_c (mm)	0,25	0,19	0,15	0,10
V_c (m/min)	307,5	316	320	325
$f_z \cdot V_c$	89,18	69,52	54,4	35,75

Como se puede observar, el resultado más favorable es el de maximizar f_z o f_n . Este resultado no es válido únicamente para este caso concreto, sino que es la situación más favorable siempre. Por tanto, se seguirá este criterio de ahora en adelante.

Para obtener todos los parámetros que se deben incluir en la hoja de procesos a partir del valor máximo posible de f_z el procedimiento seguido es el siguiente:

1. Al haber maximizado f_z el valor de a_c para calcular V_c a emplear será el máximo.
2. Se entra en la tabla de la figura 33 con el valor de a_{c_max} y se interpola linealmente en el rango correspondiente para obtener V_c .

3. Calculado el valor V_c el valor de la velocidad de giro de la herramienta (N) en rpm se calcula empleado la siguiente fórmula:

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D_c} \quad (4)$$

siendo V_c la velocidad de corte en m/min y D_c el diámetro de la herramienta en mm.

Realizado todo esto, se puede dar por concluido el proceso de selección de la herramienta para esta operación. Los resultados finales de todas las operaciones se podrán encontrar en la hoja de procesos apartado 7.3.3.

B. OPERACIÓN 1107

Se trata de una operación de mandrinado. En este caso deberemos buscar la herramienta en el catálogo de Sandvik que en la operación anterior: ‘Herramientas rotativas 2017’.

En este caso, el único requisito que debe cumplirse para seleccionar la herramienta es que sea capaz de mandrinar agujeros de un diámetro de 50mm. Además, en este caso habrá que considerar que algunas herramientas de mandrinado imponen una longitud máxima a mecanizar. Esta longitud máxima viene dada como un valor máximo del cociente entre la longitud a mecanizar y el diámetro del agujero a mecanizar (ULDR en los catálogos). En nuestra operación, donde la longitud a mecanizar es de 22mm y el diámetro 50mm el valor ULDR de la herramienta deberá ser superior a 0,44. Viendo las opciones que ofrece el catálogo, una posible opción es la CoroBore BR20 Coromant Capto.

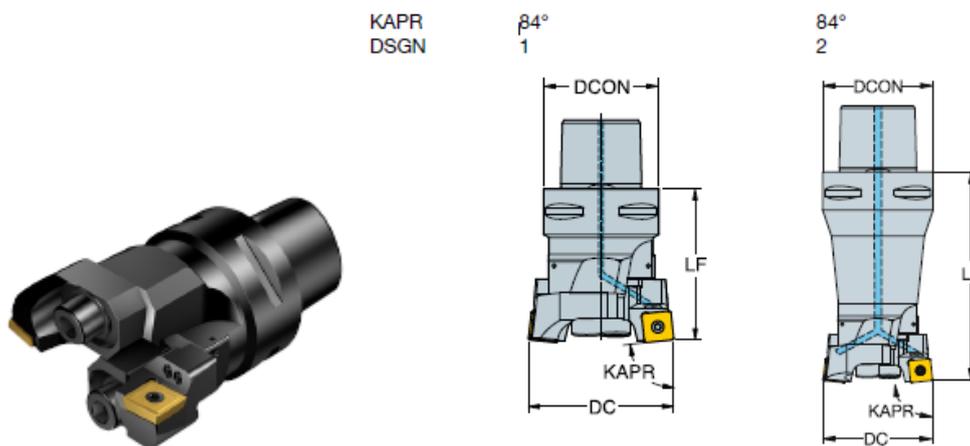


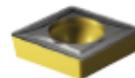
Figura 35: CoroBore BR20 Coromant Capto

Las características de la herramienta seleccionada son las siguientes:

DCN	DCX		CZC _{MS}	CNSC	DSGN	Código de pedido	DCON	ADJLX _{RED}	ULDR
23.00	29.00	06	C3	3	2	BR20-29CC06F-C3	32.00	3.00	2.00
28.00	36.00	06	C3	3	2	BR20-36CC06F-C3	32.00	4.00	2.00
35.00	45.00	09	C3	3	1	BR20-45CC09F-C3	32.00	5.00	
35.00	45.00	09	C4	3	2	BR20-45CC09F-C4	40.00	5.00	1.50
44.00	56.00	09	C4	3	1	BR20-56CC09F-C4	40.00	6.00	
44.00	56.00	09	C5	3	2	BR20-56CC09F-C5	50.00	6.00	1.50
55.00	71.00	12	C5	3	1	BR20-71CC12F-C5	50.00	8.00	
55.00	71.00	12	C6	3	2	BR20-71CC12F-C6	63.00	8.00	1.50

Figura 36: Tabla de características CoroBore BR20 Coromant Capto

Elegida una herramienta que cumple con todas las restricciones impuestas, el siguiente paso vuelve a ser elegir la plaquita que vamos a emplear. El concepto en cuanto a que procedimiento seguir es completamente análogo al que se ha seguido en la operación de fresado. En este caso, es posible usar dos tipos de plaquetas diferentes: CoroBore 111 o CoroTurn 107. En el catálogo que estamos empleando, podemos encontrar la información relativa a la plaquita CoroBore 111, pero ninguna de las que se ofrecen son compatibles en dimensiones con el hueco de la herramienta para alojar la plaquita. Por ello, es necesario escoger una plaquita CoroTurn 107 verificando que el código de la geometría es compatible con los que admite la herramienta además de comprobar dimensiones. Estas herramientas se encuentran en el catálogo de Sandvik ‘Herramientas de torneado 2017’.



-  CCMT, CCGT
CCGX, CCET
-  CCMW

Figura 37: Códigos de plaquetas compatibles

Entre las distintas opciones disponibles, se ha escogido la siguiente, de código CCMT:

		LE	S	RE	CÓDIGO ISO	P					
						1625	4025	4015	4025	4035	5015
Medio	PM	06	6.0	2.38	0.40	CCMT 06 02 04-PM	☆	☆	★	☆	☆
			5.6	2.38	0.79	CCMT 06 02 06-PM	☆	☆	★	☆	☆
		09	9.3	3.97	0.40	CCMT 09 T3 04-PM	☆	☆	★	☆	☆
			8.9	3.97	0.79	CCMT 09 T3 08-PM	☆	☆	★	☆	☆
		12	12.5	4.76	0.40	CCMT 12 04 04-PM		☆	★	☆	☆
			12.1	4.76	0.79	CCMT 12 04 08-PM	☆	☆	★	☆	☆
			11.7	4.76	1.19	CCMT 12 04 12-PM		☆	★		

Figura 38: Tabla de selección de plaquita

Una vez elegida la herramienta y la plaquita, disponemos de todos los datos necesarios para calcular los parámetros de corte. Las tablas con los parámetros de corte son las siguientes:

ISO P	Fuerza de corte específica k_{ct}	Dureza Brinell	<<<< RESISTENCIA AL DESGASTE		
			CT5015	GC1525	GC4325
Material	N/mm ²	HB	f_{ms} , mm = avance f_n , mm/r		
			0.05-0.1-0.2	0.05-0.1-0.2	0.1-0.4-0.8
			Velocidad de corte (V_c), m/min		
Acero de baja aleación (elementos de aleación ≤5%) No templado	1700	180	480-400-320	375-320-255	460-305-215
Acero para rodamientos de bola	1800	210	-	-	395-265-190
Endurecido y templado	1850	275	285-235-190	200-165-135	255-180-140
Endurecido y templado	2050	350	230-190-150	160-135-110	205-145-110

Figura 39: Tabla con los parámetros de corte en función del material

Plaquita	Profundidad de corte			Avance		
	Rec	a_p = mm Min.	Máx.	Rec	f_n = mm/r Min.	Máx.
CCMT09T308-MR	2	1	4	0.25	0.12	0.35
CCMT09T308-PF	0.35	0.15	2	0.15	0.08	0.3
CCMT09T308-PM	0.8	0.5	3	0.2	0.1	0.3
CCMT09T308-PR	2	1	4	0.25	0.12	0.35

Figura 40: Tabla con parámetros de corte en función de la plaquita

El procedimiento a seguir para el cálculo de los parámetros de corte es el explicado anteriormente y los resultados se pueden encontrar, como ya se ha mencionado, recopilados en la hoja de procesos. En este caso, habrá que comprobar además si entramos en los rangos de a_p impuestos por la tabla de la figura 40.

C. OPERACIÓN 1103

La operación 3 se corresponde con una operación de taladrado. En este caso deberemos seleccionar la herramienta del catálogo de Sandvik ‘Herramientas rotativas de metal duro integral 2018’.

La operación consiste en realizar un taladro pasante de 7,8mm de diámetro y de una longitud de 54mm. En la selección de la broca para taladrar, al igual que en el caso del mandrinado, tendremos que tener en cuenta el valor máximo de ULDR que es capaz de soportar la broca. En el caso de nuestra operación este valor es de 7 aproximadamente, por lo que el que la broca es capaz de soportar deberá ser mayor. Entre las distintas opciones del catálogo, se decide optar por la broca de metal duro integral CoroDrill 860.

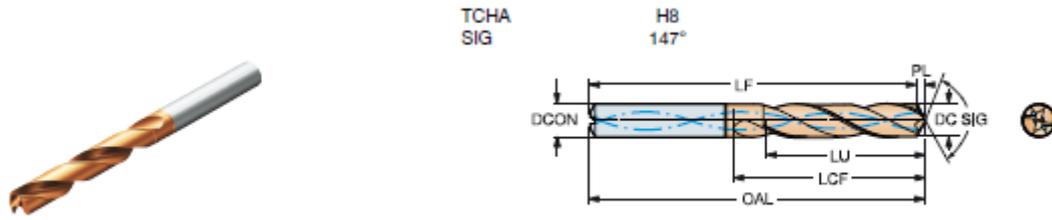


Figura 41: Broca CoroDrill 860

Las características de esta broca son las siguientes:

DC	DC*	LU	LU*	ULDR	CZC _{MS}	Código de pedido	4234
7.80	.307	24.7	.972	3	8	860.1-0780-028A1-PM	★
7.80	.307	40.3	1.587	5	8	860.1-0780-040A1-PM	★
7.80	.307	63.7	2.508	8	8	860.1-0780-064A1-PM	★

Figura 42: Tabla de características Corodril 860

Los rangos de los distintos parámetros de corte son los que se muestran a continuación:

Material	Dureza Brinell HB	Calidad	Velocidad de corte (V_c), m/min	Diám. de taladrado, mm		
				6	8	10
Acero de baja aleación				Avance (f_n), mm/r		
No templado	175	4234	120-170-240	0.12-0.18-0.28	0.14-0.22-0.30	0.15-0.24-0.39
Endurecido y templado	275	4234	80-110-140	0.18-0.24-0.32	0.20-0.28-0.36	0.20-0.32-0.40
Endurecido y templado	350	4234	60-80-100	0.18-0.22-0.30	0.20-0.25-0.33	0.20-0.29-0.37

Figura 43: Parámetros de corte broca CoroDrill 860

La elección de la broca presenta dos diferencias fundamentales respecto a las dos elecciones anteriores:

- Al tratarse de una herramienta entera fabricada de metal duro, la elección de la herramienta se simplifica notablemente puesto que no hay que elegir plaquita.
- En la figura 43, donde se muestran los parámetros de corte, se observa como en este caso no V_c y f_n no están relacionados mediante a_c . Esto nos permite maximizar tanto V_c como f_n . A la hora de seleccionar f_n habrá que tener en cuenta que será necesario interpolar linealmente entre los valores correspondientes a 6mm y 8mm.

Con todos estos datos, ya podemos proceder al cálculo de los parámetros de corte. Los resultados finales correspondientes a todos los parámetros de corte se encuentran en la hoja de procesos.

D. OPERACIÓN 5

Esta operación se corresponde con un roscado interior. En este caso deberemos seleccionar la herramienta del catálogo de Sandvik ‘Herramientas rotativas de metal duro integral 2018’.

La operación consiste en realizar una rosca métrica de diámetro 9mm y longitud 23,6mm. El parámetro ULDR de la operación es 2,4 aproximadamente. Teniendo en cuenta las características de la operación, se decide optar por el macho de laminación CoroTap 400.

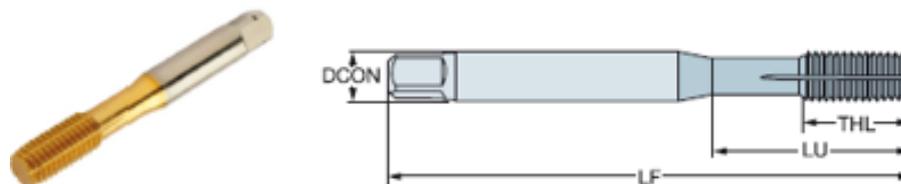


Figura 44: Macho de laminación CoroTap 400

Las características de esta herramienta son las siguientes:

TDZ	TP	LU	CZC _{1/2}	THCHT	TCTR	Código de pedido	±3 LC	P
M8	1.25	35.00	8.00 x 6.20	C	6HX	T400-PM100DA-M8	★	
		1.378						
M9	1.25	35.00	9.00 x 7.00	C	6HX	T400-PM100DA-M9	★	
		1.378						
M10	1.50	39.00	10.00 x 8.00	C	6HX	T400-PM100DA-M10	★	
		1.535						

Figura 45: Tabla de características CoroTap 400

En el caso de esta herramienta, para conocer los datos de corte se debe emplear la herramienta de cálculo de la página web de Sandvik. La herramienta nos proporcionará los parámetros de corte introduciendo el valor del diámetro de la rosca y de la longitud roscada.

VC [m/min]	FN [mm]	N [1/min]
VELOCIDAD DE CORTE	AVANCE POR VUELTA	VELOCIDAD DEL HUSILLO
22.3	1.25	790

Figura 46: Parámetros de corte del roscado

Como comentario final de este proceso y en relación con el taladrado antes explicado, mencionar que el haber realizado el taladro de 7,8mm viene impuesto por ser la rosca una M9. La tabla que relaciona el diámetro del taladro inicial, con el diámetro de la métrica es la siguiente:

DIN 13		Métrico		Pulgadas	
TDZ	TP	PHD	PHDX	PHD	PHDX *5H/6H
M 1*	x 0,25	0,75	0,785	0,0295	0,0309
M 1,1*	x 0,25	0,85	0,885	0,0335	0,0348
M 1,2*	x 0,25	0,95	0,985	0,0374	0,0388
M 1,4*	x 0,30	1,10	1,142	0,0433	0,0450
M 1,6	x 0,35	1,25	1,321	0,0492	0,0520
M 1,8	x 0,35	1,45	1,521	0,0571	0,0599
M 2	x 0,40	1,60	1,679	0,0630	0,0661
M 2,2	x 0,45	1,75	1,838	0,0689	0,0724
M 2,3	x 0,40	1,85	1,938	0,0728	0,0763
M 2,5	x 0,45	2,05	2,138	0,0807	0,0842
M 2,6	x 0,45	2,15	2,238	0,0846	0,0881
M 3	x 0,50	2,50	2,599	0,0984	0,1023
M 3,5	x 0,60	2,90	3,010	0,1142	0,1185
M 4	x 0,70	3,30	3,422	0,1299	0,1347
M 4,5	x 0,75	3,70	3,878	0,1457	0,1527
M 5	x 0,80	4,20	4,334	0,1654	0,1706
M 6	x 1,00	5,00	5,153	0,1969	0,2029
M 7	x 1,00	6,00	6,153	0,2362	0,2422
M 8	x 1,25	6,80	6,912	0,2677	0,2721
M 9	x 1,25	7,80	7,912	0,3071	0,3115

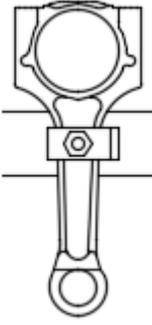
Figura 47: Relación entre el diámetro inicial y diámetro final de la rosca

7.2.3. Hoja de procesos

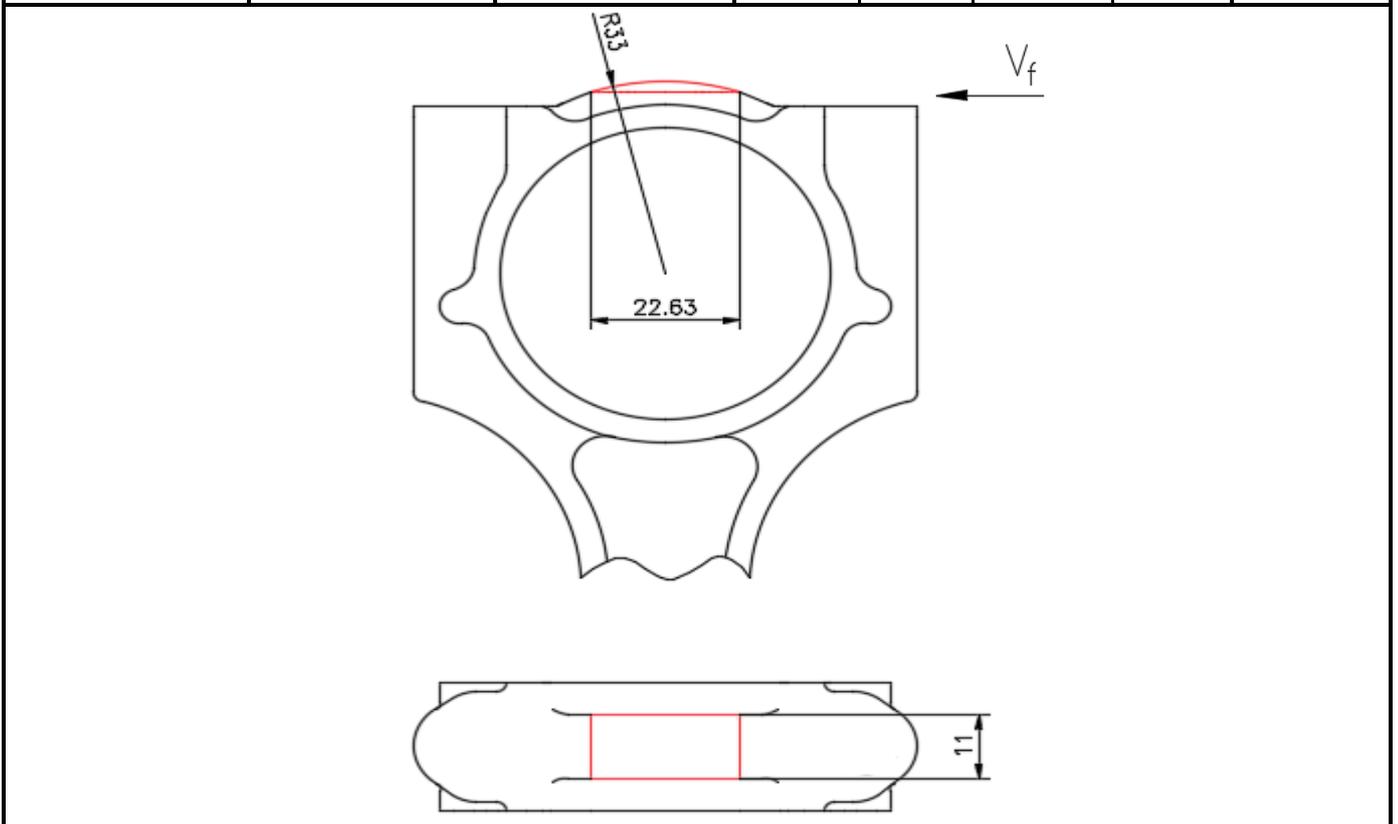
Una vez establecido el orden de las operaciones y elegidas todas las herramientas, el último paso es reunir todos estos datos, junto con los parámetros de corte en la hoja de procesos que se muestra a continuación:

HOJA DE PROCESO

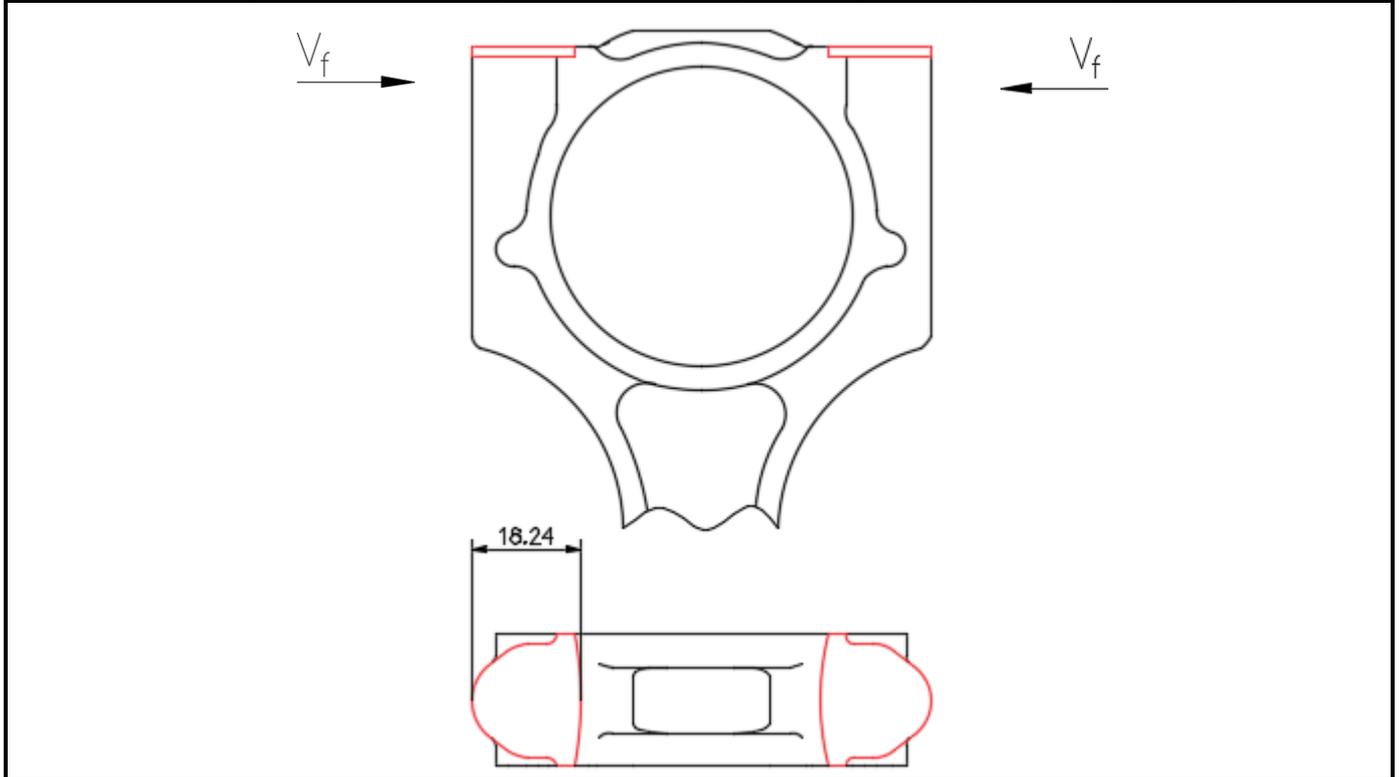
Conjunto: Cigüeñal-Biela-Pistón	Pieza: Biela
Bruto: 194x76x26	Material: Acero AISI 4340

Descripción de la operación	Colocar la pieza verticalmente con la cabeza de la biela hacia arriba
Esquema de amarre	
Herramientas necesarias	Llave de boca fija

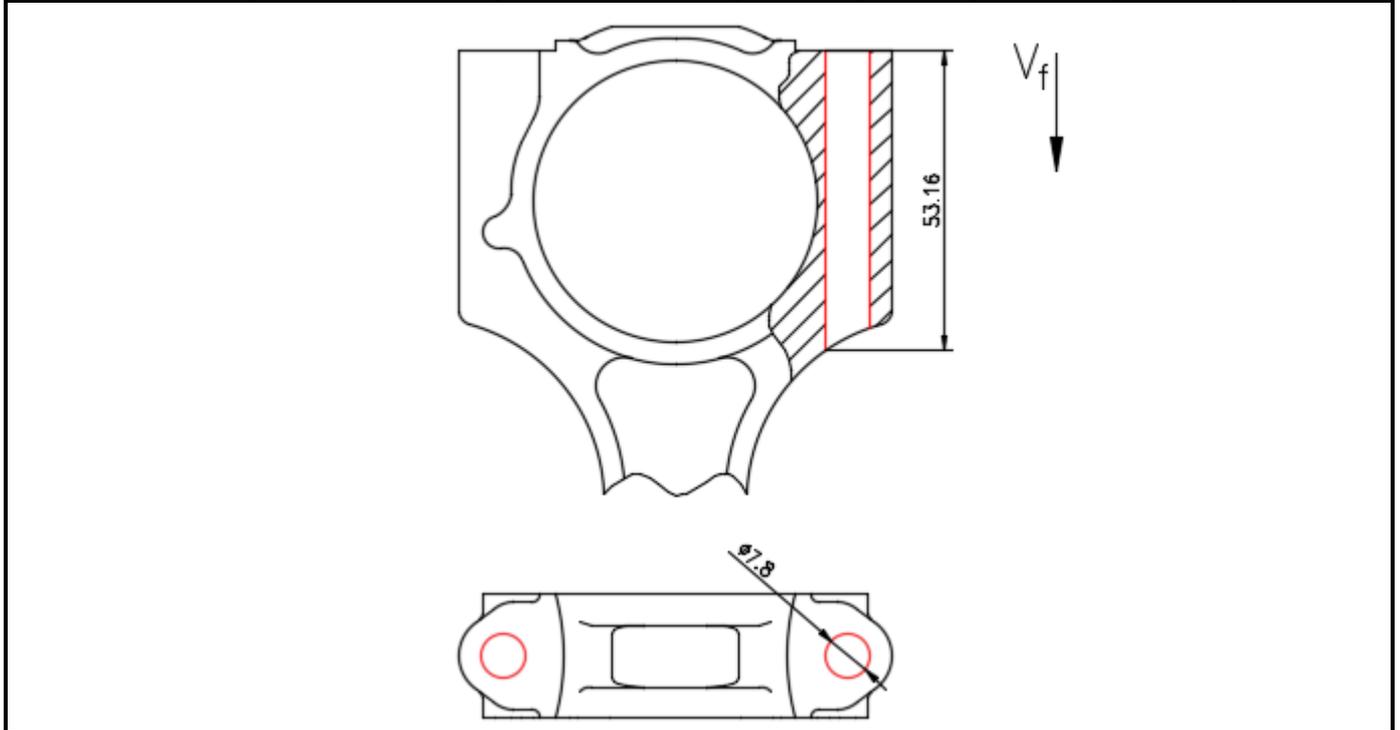
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V _c (min)	N (rpm)	f _z (mm/d)	a _p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	307,5	1957,6	0,29	2	0,4
Amarre 1	1100	R300-066C6-16H					
Fresado	1101	-					



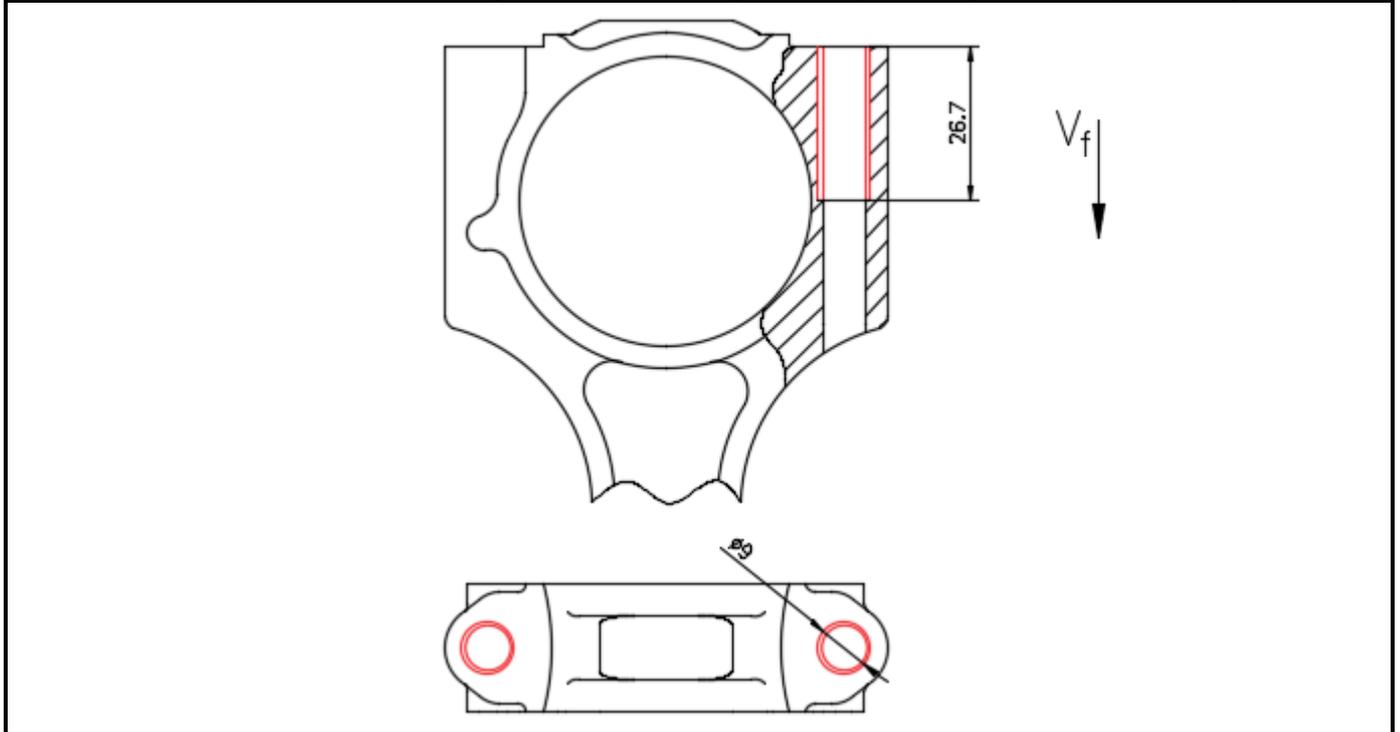
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
			V_c (min)	N (rpm)	f_z (mm/d)	a_p (mm)	
Fase	Fase	Herramientas	307,5	1957,6	0,29	1,8	2x0,32
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-					
Amarre 1	1100	R300-1648M-PM					
Fresado	1102	-					



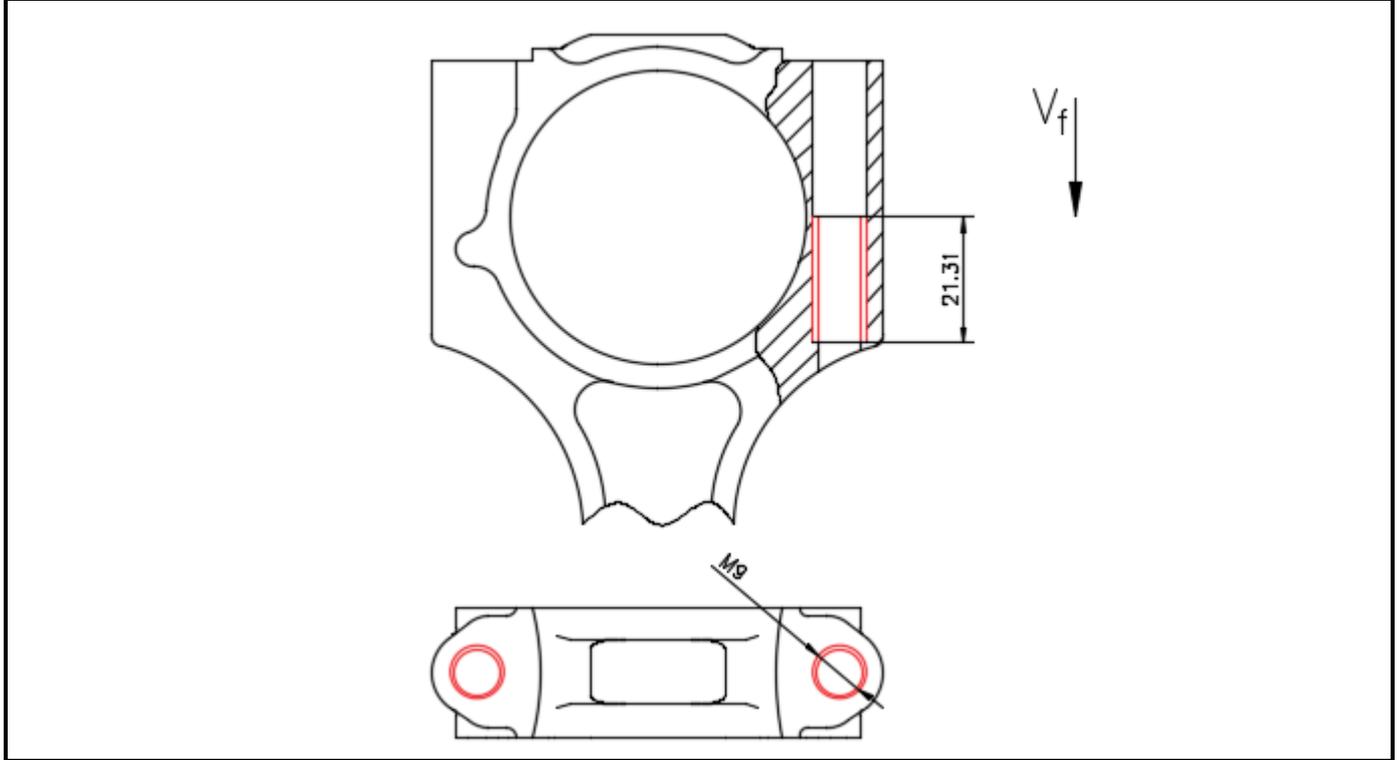
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_n (mm/r)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	240	9794	0,298	-	2x1,09
Amarre 1	1100	860.1-0780-064A1-PM					
Taladrado	1103	-					



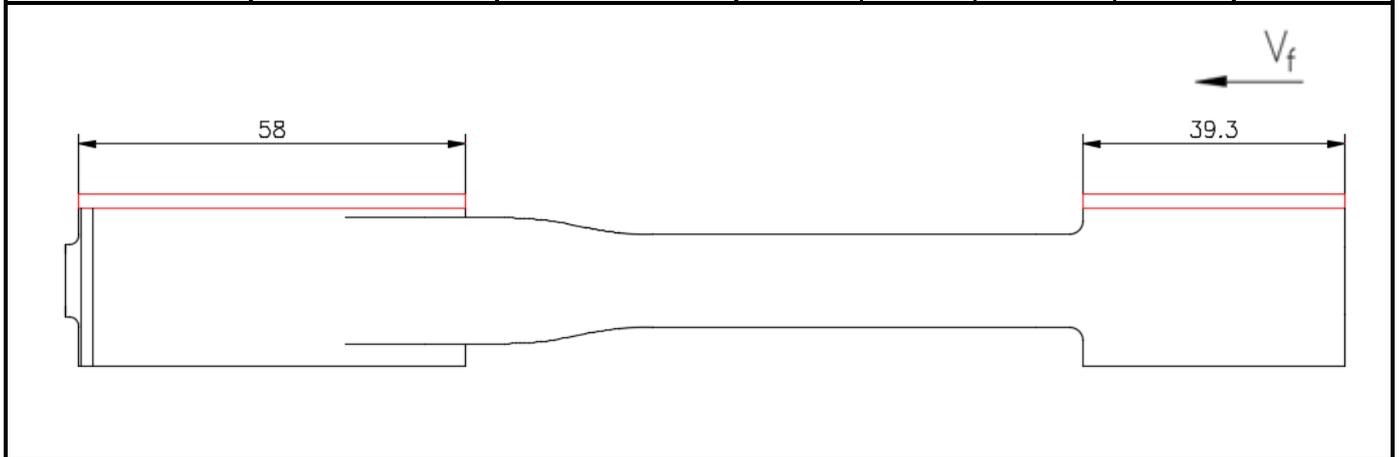
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_n (mm/r)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	240	8488	0,345	-	2x0,55
Amarre 1	1100	860.1-0900-080A1-PM					
Taladrado	1104	-					



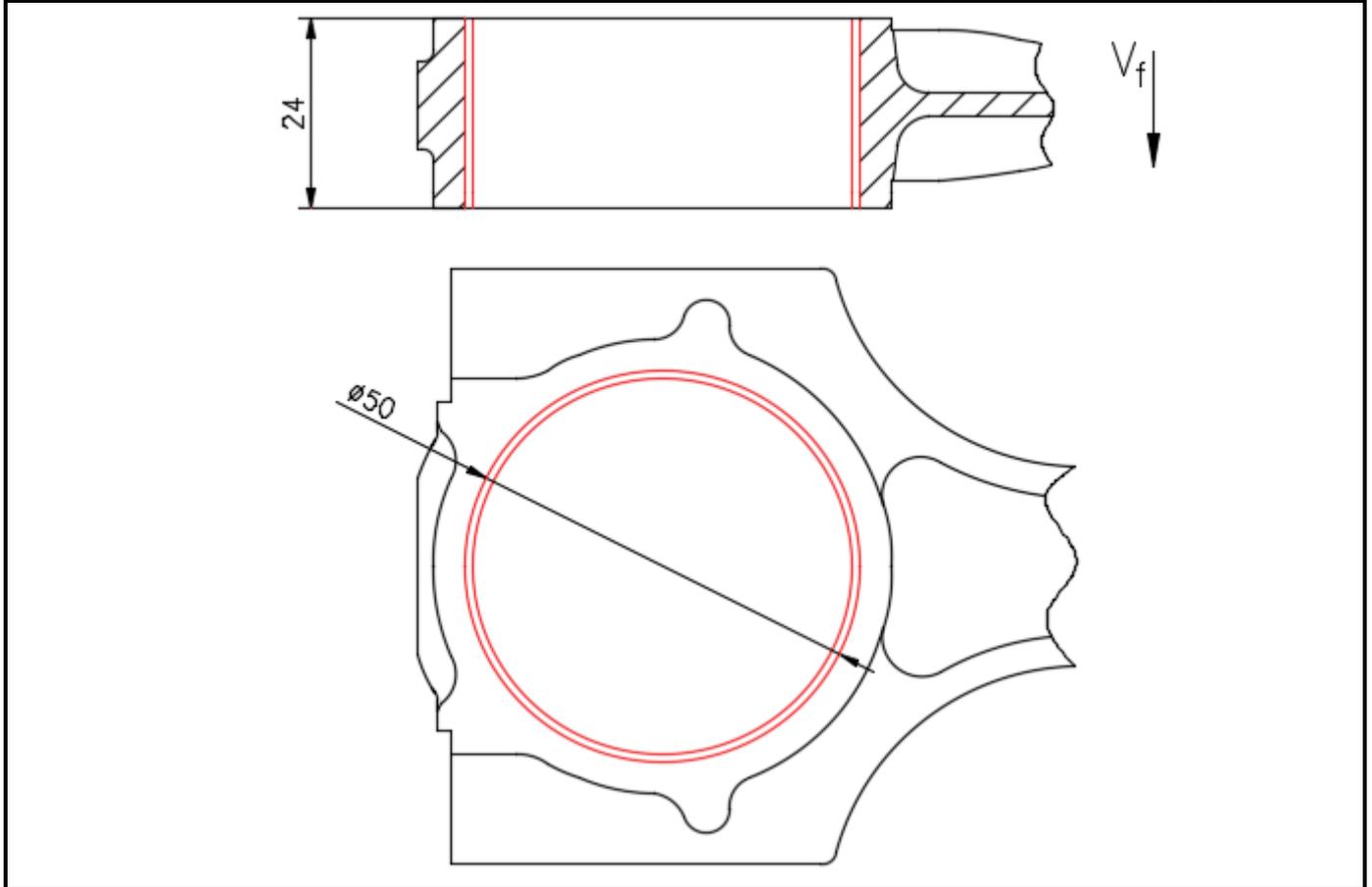
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_n (mm/r)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	22,3	790	1,25	-	2x1,3
Amarre 1	1100	BR20-56CC09F-C5					
Roscado	1105	-					



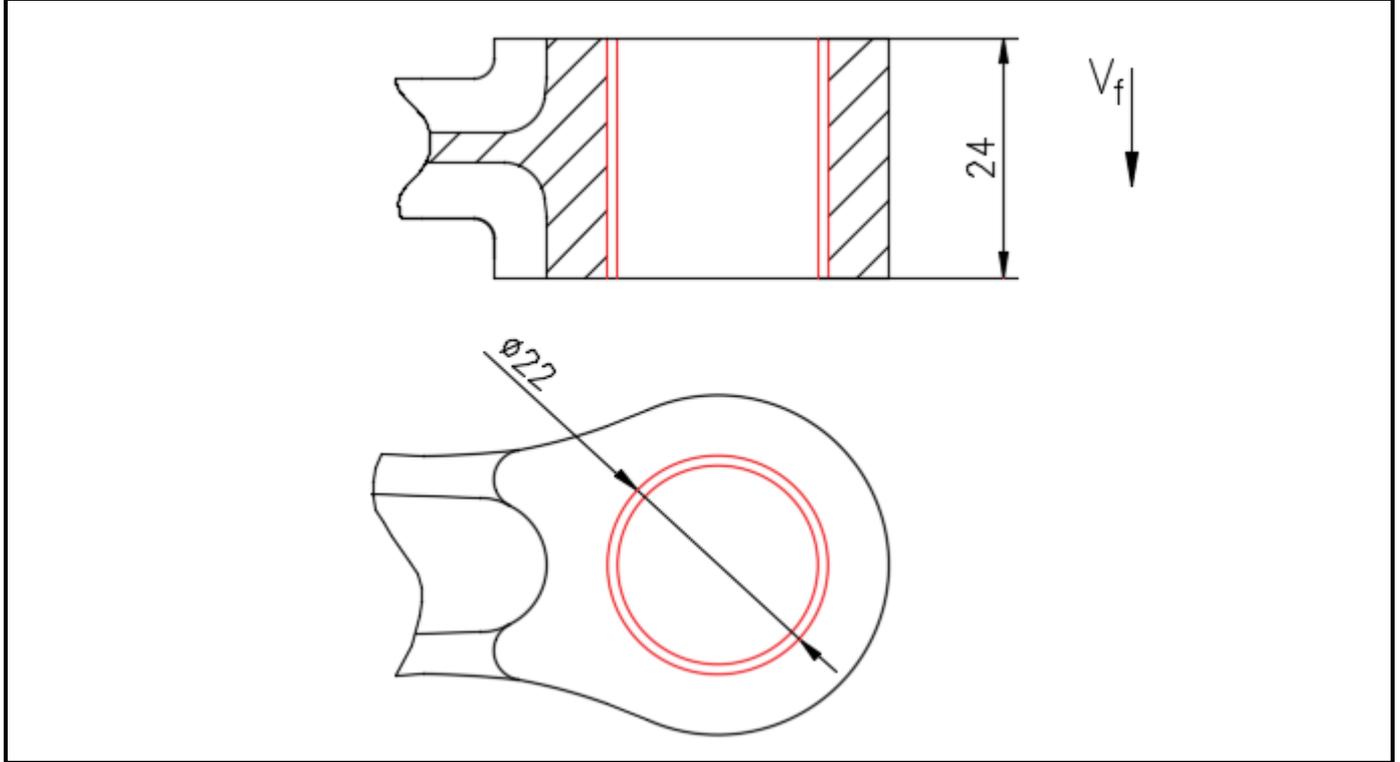
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_z (mm/d)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	272,5	1084	0,25	2	3,59
Amarre 1	1100	490-084Q27-14H					
Fresado	1106	-					



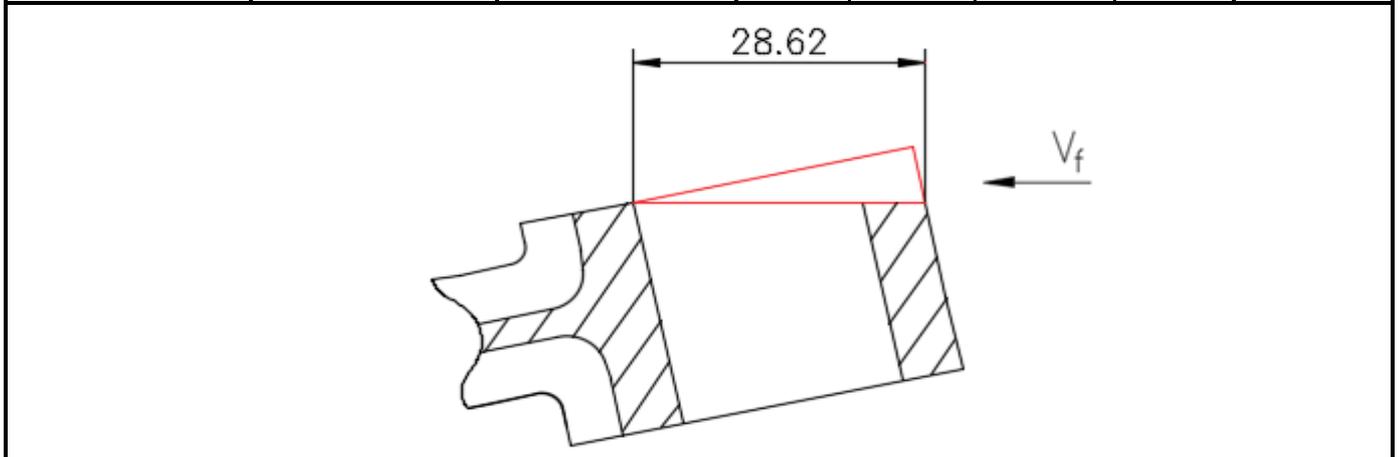
Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (S)
			Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control	V_c (min)	N (rpm)	f_z (mm/r)	a_p (mm)	Tiempo (S)
Operación	Operación						
1	1000	-	356,7	2270,6	0,3	1	2,11
Amarre 1	1100	BR20-56CC09F-C5					
Mandrinado	1107	-					

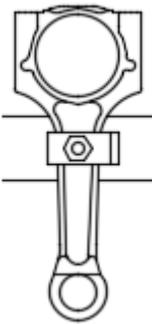


Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_n (mm/r)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	373,3	5401,6	0,15	1	1,78
Amarre 1	1100	825-23TC06C3					
Mandrinado	1108	-					



Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_z (mm/d)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	272,5	1084	0,25	5,8	1,01
Amarre 1	1100	490-084Q27-14H					
Fresado	1109	-					

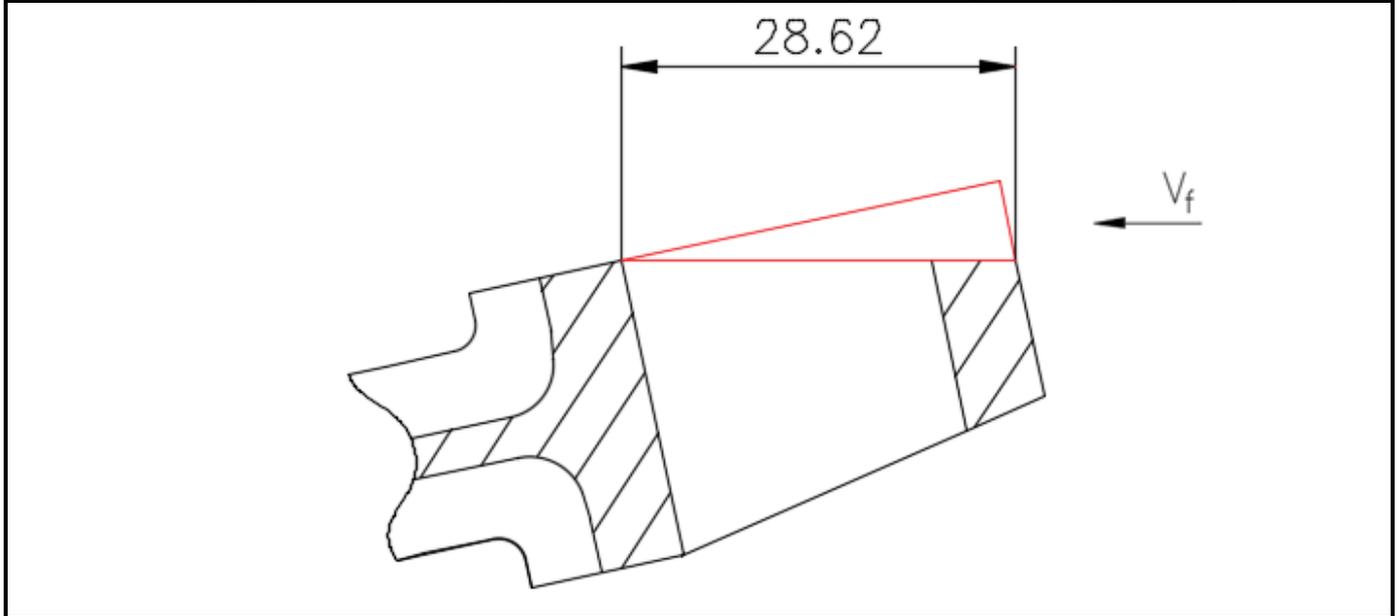


Descripción de la operación	Darle la vuelta a la pieza para poder fresar la cara posterior
Esquema de amarre	
Herramientas necesarias	Llave de boca fija

Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_z (mm/d)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-					
Amarre 2	1200	490-084Q27-14H	272,5	1084	0,25	2	3,59
Fresado 2	1201	-					

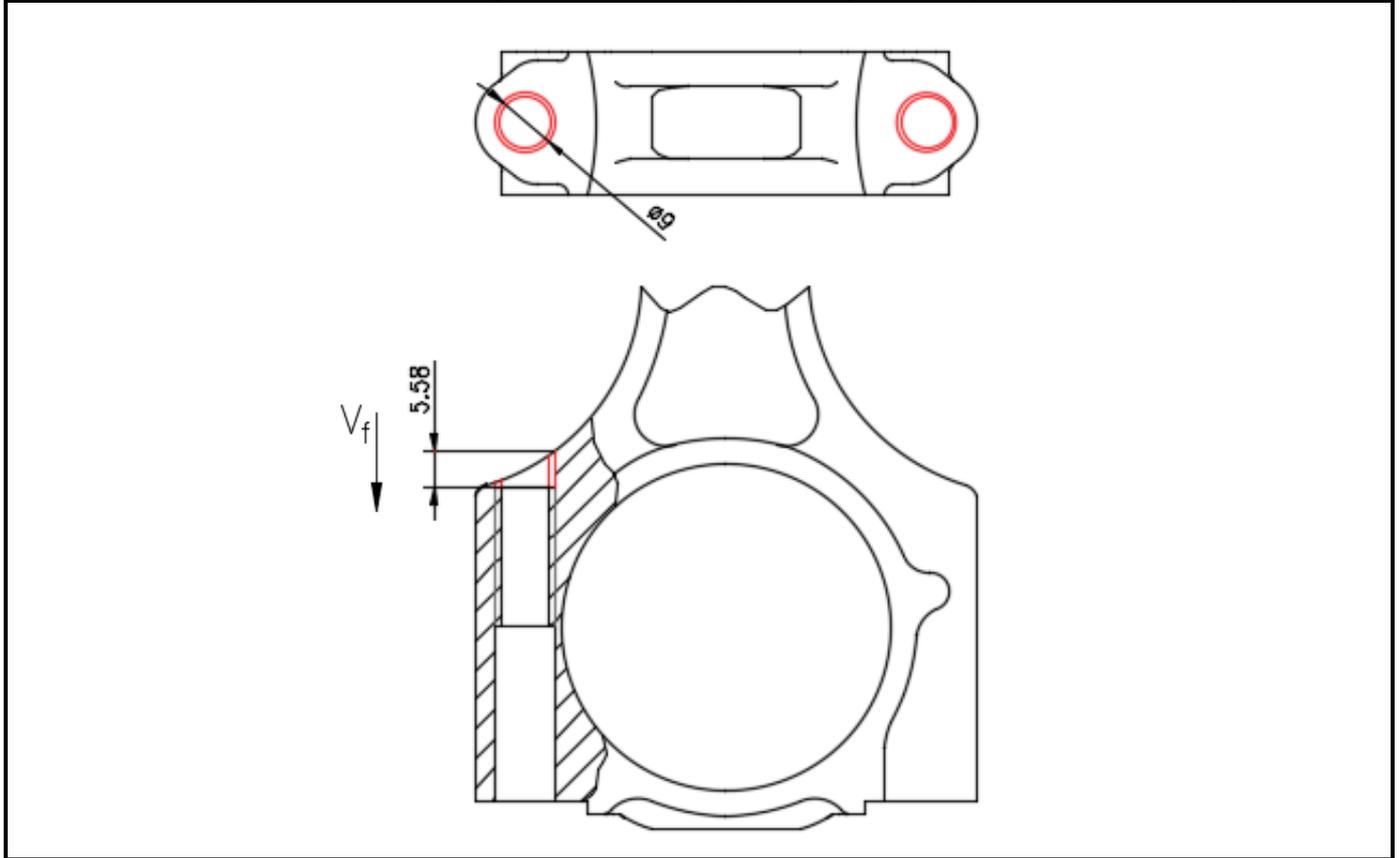


Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	N (rpm)	f_z (mm/d)	a_p (mm)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control					
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	272,5	1084	0,25		1,01
Amarre 2	1200	490-084Q27-14H					
Fresado	1202	-					



Descripción de la operación	Colocar la biela verticalmente con la cabeza de biela hacia abajo
Esquema de amarre	
Herramientas necesarias	Llave de boca fija

Descripción de:	Número de:	Utillajes	Condiciones de corte				Tiempo (s)
			Fase	Fase	Herramientas	V_c (min)	
Subfase	Subfase	Aparatos de control	V_c (min)	N (rpm)	f_n (mm/r)	a_p (mm)	Tiempo (s)
Operación	Operación						
Centro de mecanizado	1000	-	240	8488	0,345	-	0,11
Amarre 3	1300	860.1-0900-080A1-PM					
Taladrado	1301	-					



7.2.4. Resumen del proceso de fabricación

Para concluir los apartados referentes a la fabricación de la biela se hará un breve resumen sobre el proceso completo de fabricación y sus diferentes etapas.

El primer paso es obtener la pieza en bruto a partir del material seleccionado. Esta etapa puede llevarse a cabo mediante distintos procesos de fabricación como ya se ha explicado en el análisis de alternativas (apartado 5.2.). El proceso más común entre todos los posibles, y el elegido en el trabajo como mejor opción, es el de forja. Este proceso nos permite obtener una pieza con buenas propiedades mecánicas sin limitar en exceso el diseño del componente.

Tras haber forjado la pieza, es necesario quitarle la rebaba exterior y el material sobrante que se encuentra en el interior de la cabeza y pie de biela. Para ello se le realiza un punzonado a la pieza de modo que se obtiene la pieza en bruto lista para ser mecanizada. Tras este proceso, de manera optativa, se puede someter la pieza a un granallado. En este proceso se introducen tensiones residuales de compresión en el componente mediante impactos, de manera que se mejoran sus propiedades mecánicas.

Una vez obtenida la pieza en bruto, el siguiente paso es mecanizar las superficies necesarias eliminando las creces de mecanizado. Este proceso variará tanto en número de operaciones como en herramientas dependiendo el diseño de la biela. Pese a todo habrá operaciones comunes como el taladrado y roscado para los tornillos o el mandrinado de las superficies interiores de la cabeza y pie de biela.

Para finalizar el proceso, el último paso es separar la cabeza de la biela, obteniendo lo que se conoce como una biela partida. Este proceso no es obligatorio, pero es muy común en el sector de la automoción ya que permite quitar las bielas del cigüeñal de manera sencilla. La manera más común de llevar a cabo este proceso es realizar una pequeña entalla por donde quiere partirse la biela y separarla mediante un golpe seco. La superficie rugosa que se obtiene permite que ambas piezas encajen perfectamente la una con la otra.

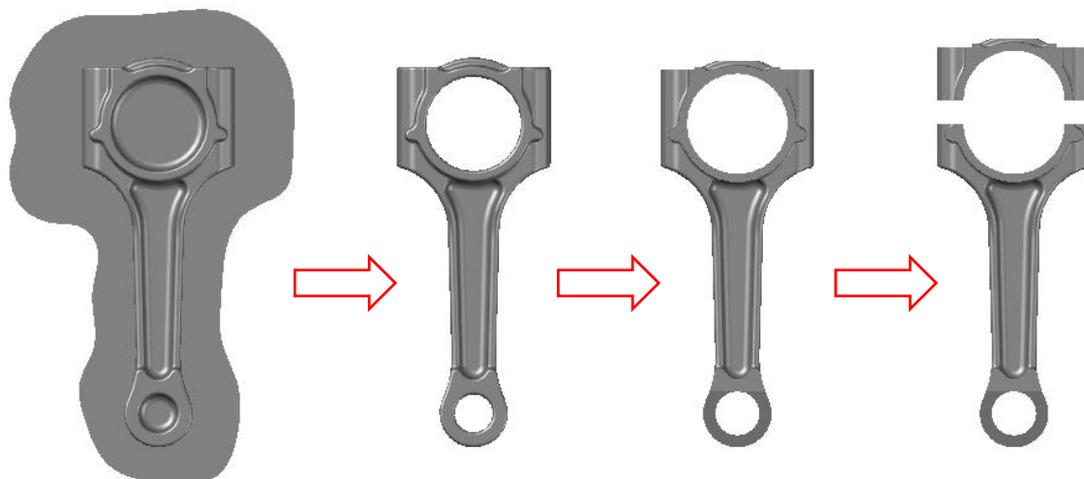


Figura 48: Etapas de la fabricación

8. Planificación del proyecto

8.1. Fases

Durante el proyecto, se han llevado a cabo las siguientes fases:

8.1.1. Fase 1: selección del componente

En esta fase se parte de una idea de proyecto en el que se pretendían desarrollar distintas etapas del proceso de obtención de una pieza desde el diseño hasta la fabricación. Con el tema concretado se barajaron diferentes opciones. Finalmente, tras haberle presentado a la directora del TFG las distintas opciones, se decidió analizar la biela de un motor de combustión interna alternativo por el ser un componente mecánico muy presente en cualquier tipo de máquina y por tener un proceso de fabricación que resultaba interesante estudiar. Las distintas etapas en las que se desarrolló esta fase son:

T.1.1. Elección de diferentes componentes

T.1.2. Decisión final

RECURSOS HUMANOS: ingeniera senior y graduado.

RECURSOS MATERIALES: ninguno.

DURACIÓN: 8 días.

8.1.2. Fase 2: investigación sobre el componente

Esta etapa tiene como objetivo realizar un estudio inicial sobre el componente. El resultado final es la elaboración de un análisis de alternativas que incluirá la elección del material a emplear y la elección del proceso de fabricación previo al mecanizado. Las distintas etapas de esta fase son:

T.2.1. Revisión de la documentación

T.2.2. Elaboración del análisis de alternativas

RECURSOS HUMANOS: ingeniera senior y graduado.

RECURSOS MATERIALES: bibliografía y ordenador.

DURACIÓN: 20 días.

8.1.3. Fase 3: diseño del componente

Esta fase se inicia midiendo el componente con un calibre para realizar un primer boceto con todas las medidas necesarias para su posterior modelado 3D. El resultado final de esta fase es por tanto un modelo en 3D de la pieza que servirá para posteriores análisis y los planos de diseño. Por tanto, las distintas tareas que se han llevado a cabo en esta fase son:

T.3.1. Toma de medidas de la pieza

T.3.2. Modelado 3D de la pieza

T.3.3. Planos

RECURSOS HUMANOS: ingeniera senior y graduado.

RECURSOS MATERIALES: calibre, software CAD y ordenador.

DURACIÓN: 21 días.

8.1.4. Fase 4: análisis mecánico del componente

Como primer paso para llevar a cabo esta fase es obtener los datos de entrada al software de EF: datos de presión, modelo 3D y datos del material. El resultado final será un análisis mecánico del componente que se empleará para determinar la validez del componente que se está estudiando. Las tareas llevadas a cabo son:

T.4.1. Obtención de la presión en la cámara de combustión

T.4.2. Análisis por EF

RECURSOS HUMANOS: ingeniera senior y graduado.

RECURSOS MATERIALES: bibliografía, software de EF, Matlab y ordenador.

DURACIÓN: 56 días.

8.1.5. Fase 5: mecanizado del componente

En esta fase del proyecto se detallan tanto las operaciones que se deben realizar como las herramientas que se deben emplear para llevar a cabo estas operaciones. El resultado final de esta fase será una hoja de procesos que reúna todos estos datos. Las tareas llevadas a cabo son:

T.5.1. Selección de las operaciones a realizar

T.5.2. Determinar las herramientas a utilizar

T.5.3. Realizar la hoja de procesos

RECURSOS HUMANOS: ingeniera senior y graduado.

RECURSOS MATERIALES: catálogos y ordenador.

DURACIÓN: 28 días.

8.1.6. Fase global: gestión

Esta fase abarca el proyecto completo, desde su inicio hasta la entrega del documento. En ella se incluye tanto el seguimiento de cómo se realizan las etapas anteriores como la redacción del trabajo. Esta fase se compone por una única tarea:

T.G.1. Gestión del TFG

RECURSOS HUMANOS: ingeniera senior y graduado.

RECURSOS MATERIALES: ordenador.

DURACIÓN: 138 días.

8.2. Hitos

En la siguiente tabla se muestran los hitos establecidos en el proyecto:

Tabla 8: Hitos del proyecto

Nº	Hito	Fecha
H1	Análisis de alternativas finalizado	02/12/2018
H2	Planos finalizados	17/02/2019
H3	Análisis mecánico finalizado	28/04/2019
H4	Hoja de proceso finalizada	23/06/2019
H5	Proyecto aceptado	28/06/2016

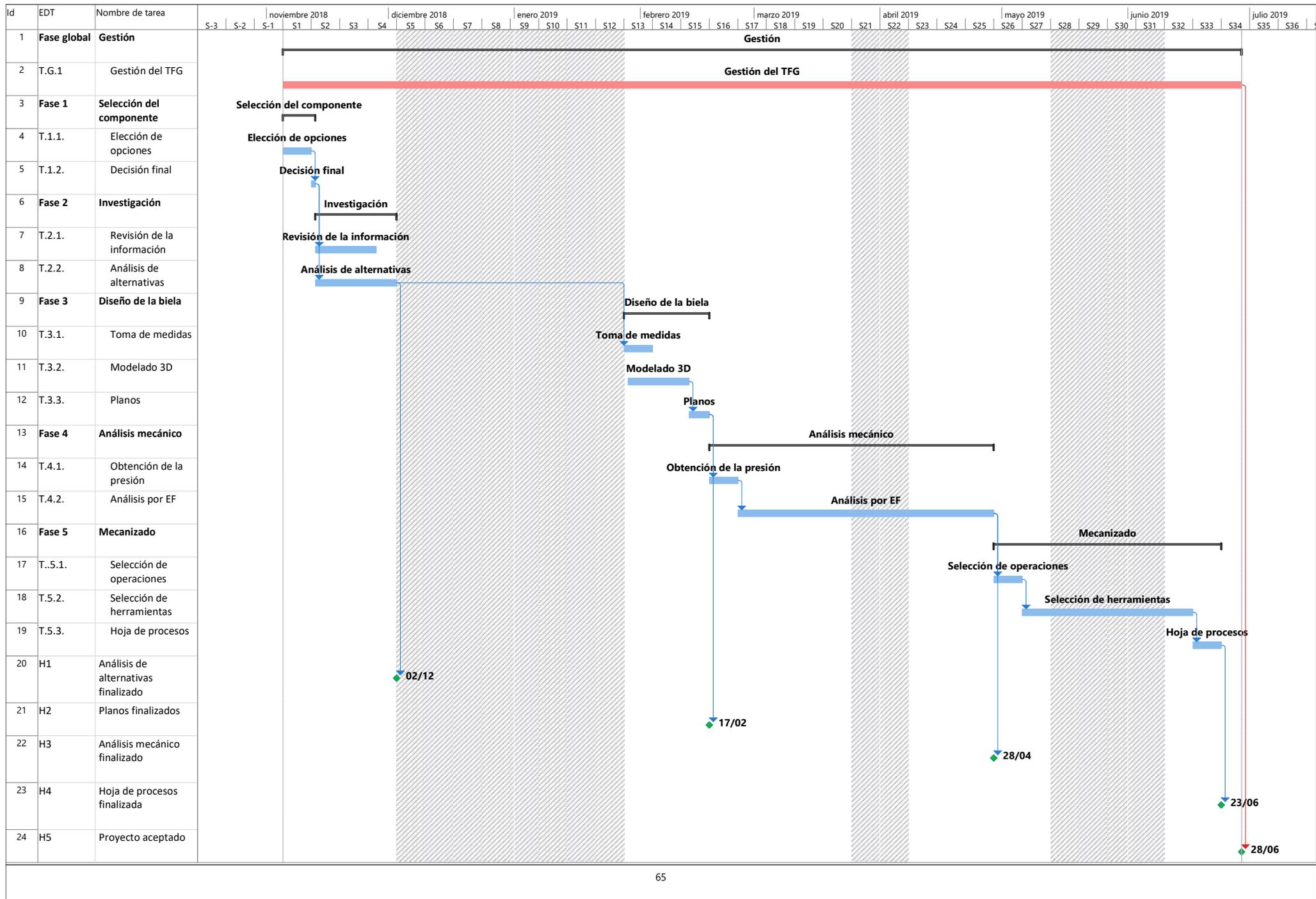
8.3. Duración total del proyecto y diagrama Gantt

El proyecto comienza el 05/11/2018 y termina el 28/06/2019. El periodo de trabajo útil se establece de lunes a domingo y se consideran los siguientes periodos de inactividad en la realización del trabajo:

Tabla 9: Periodos de inactividad

Periodo de inactividad	Fecha inicio	Fecha final
P11	03/12/2018	27/01/2019
P12	25/03/2019	07/04/2019
P13	13/06/2019	09/06/2019

De acuerdo a lo establecido anteriormente se establece la duración del proyecto en 138 días útiles, es decir, unas 20 semanas. A continuación se incluye el diagrama Gantt del proyecto:



9. Descargo de gastos

9.1. Costes directos

A. GASTOS DE PERSONAL

El coste unitario de la ingeniera superior se establece en 50€/h mientras que el del graduado 20€/h. Se ha considerado como el número de horas invertidas por el graduado son las que equivalen al coste en créditos del TFG y las del director del TFG el 20% de las invertidas por el alumno.

B. AMORTIZACIONES

- **Ordenador.** Supone una inversión de 800€. Se pretende amortizar en 4 años, pudiéndose usar todos los días del año una media de 4 horas diarias. El uso en el proyecto es de 130 horas.
- **Licencia Microsoft office.** Supone una inversión de 149€. Se pretende amortizar en 4 años, pudiéndose usar todos los días del año una media de 2 horas diarias. El uso en el proyecto es de 30 horas.
- **Licencia Matlab.** Supone una inversión de 2000€. Se pretende amortizar en 2 años, considerando que se usa 250 días al año una media de 8 horas diarias. El uso en el proyecto es de 5 horas.
- **Calibre.** Supone una inversión de 30€. Se pretende amortizar en 5 años, considerando que se usa 250 días al año una media de 1 hora diaria. El uso en el proyecto es de 1 hora.

C. GASTOS

Se considera un gasto de 40€ en bibliografía y de 10€ en material de oficina.

9.2. Costes indirectos

Se considera que los costes indirectos suponen un 10% de los costes directos del proyecto.

9.3. Resumen descargo de gastos

A continuación se muestra la tabla resumen del descargo de gastos del proyecto:

Tabla 10: Descargo de gastos

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTE UNITARIO (€/ud.)	COSTE	TOTAL
COSTES DIRECTOS					4.572,22€
Gastos de personal					4.500,00€
Ingeniera senior	hora	30	50	1.500€	
Graduado	hora	150	20	3.000€	
Amortizaciones					22,22€
Ordenador	hora	130	0,14	18,20€	
Licencia Office	hora	30	0,05	1,50€	
Licencia Matlab	hora	5	0,50	2,50€	
Calibre	hora	1	0,02	0,02€	
Gastos					50,0 €
Bibliografía	-	-	-	40,00€	
Mat. de oficina	-	-	-	10,00€	
COSTES INDIRECTOS					457,22€
COSTE FINAL					5.029,44€

10. Conclusiones

La biela es un componente que admite múltiples soluciones en cuanto a su fabricación. Existen distintos materiales viables y distintos procesos de fabricación mediante los cuales obtener el componente. Sin embargo, en la industria automovilística esta gran cantidad de opciones no implica que en realidad se barajen todas ellas. Lo más común, debida a factores de gran importancia como el precio o las propiedades del componente es fabricarlas de acero mediante forja.

El proceso completo de fabricación es un proceso compuesto por diversas etapas. Se empieza forjando la pieza en la mayoría de los casos, para posteriormente mecanizar y aplicar un granallado. Esto hace que el componente sea de gran interés de cara a analizar distintos procesos de fabricación y a la vez muy instructivo.

El mecanizado es un proceso que se debe particularizar para cada biela, ya que no todas se someterán a las mismas operaciones. El problema que a nosotros se nos ha planteado se ha resuelto con un total de 12 operaciones para las cuales se han empleado 6 herramientas diferentes. Este bajo número de herramientas en comparación con la operaciones se debe a que se deben definir bien las operaciones para poder elegir las herramientas de un modo conjunto, buscando compatibilidades entre operaciones. Esto permite un ahorro importante en comparación con elegirlas de manera separada y no tratar de optimizar la elección.

En el primer análisis resistente, la situación de par máximo, ha resultado ser más crítica en cuanto a las tensiones soportadas por la biela trabajando con un coeficiente de seguridad de 1,22 el componente. Este resultado era de esperar puesto que es la situación donde más esfuerzos debían transmitirse con la mayor velocidad angular posible. En cuanto a fatiga el coeficiente de seguridad obtenido ha sido de 2 aproximadamente.

En el segundo análisis, el componente soportaba unas tensiones inferiores siendo el coeficiente de seguridad de 1,46. Sin embargo, al aumentarse las revoluciones y reducirse la presión encargada de comprimir la pieza, las tensiones de tracción aumentaban siendo una situación más crítica a fatiga. En este caso el coeficiente de seguridad era aproximadamente 1,6.

De cualquier manera, en ambos casos se han obtenido resultados favorables que nos han permitido validar el diseño del componente. Además, también ha valido para profundizar en el manejo de los softwares de análisis mecánico y para saber adoptar una posición crítica frente a los resultados que nos permiten obtener.

11. Bibliografía

- [1] Comisiones Obreras (CCOO). *Situación y perspectivas en el sector del automóvil*. Madrid, septiembre de 2018. [En línea]. Available: <http://www.industria.ccoo.es/9ddeee3ef0745110d18ae92f9a4bc706000060.pdf> [Último acceso: 19 de junio de 2019].
- [2] David Sedgwick (Automotive news). *Which suppliers will survive to electric era?* 30 de julio de 2017. [En línea]. Available: <https://www.autonews.com/article/20170730/OEM05/170739947/which-suppliers-will-survive-the-electric-era> [Último acceso: 19 de junio de 2019].
- [3] Ardanuy Agulló, Miquel. *Modelització de la fase tancada en motors alternatius de combustió interna de cicle Otto mitjançant Matlab*. Junio de 2014. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23072> [Último acceso: 19 de junio de 2019].
- [4] Avilés, Rafael. *Análisis de fatiga en máquinas*. Primera edición. Madrid: Ediciones Paraninfo, 2015. ISBN: 978-84-283-3518-8.
- [5] Desantes, Jose María; Payri, Francisco. *Motores de combustion interna alternativos*. Barcelona: Editorial Reverté. ISBN 978-84-291-4802-2.
- [6] Libro de mecanismos
- [7] ASM International handbook committee. *Metals Handbook. Volume 7. Powder metallurgy*. Novena edición. Ohio: Metals Park. ISBN: 0-87170-013-1.
- [8] ASM International handbook committee. *Metals Handbook. Volume 14. Forming and forging*. Novena edición. Ohio: Metals Park. ISBN: 0-87170-007-7.
- [9] ASM International handbook committee. *Metals Handbook. Volume 15. Casting*. Novena edición. Ohio: Metals PARK. ISBN: 0-87170-007-7.
- [10] ASM International handbook committee. *Properties and selection: iron, steels and high-performance alloys*. Décima edición. Ohio: Metals Park. ISBN: 0-87170-377-7.
- [11] ASM International handbook committee. *Properties and selection: nonferrous alloys and specil-purpose materials*. Décima edición. Ohio: Metals Park. ISBN: 0-87170-378-5.

ANEXO I. Normativa aplicable

- **ISO 513:2012.** Clasifica los materiales empleados en operaciones de mecanizado por arranque de viruta (metal duro, cerámicos, diamante y nitruro de boro cúbico) y especifica el uso de cada uno de ellos.

ANEXO II. Obtención gráfica $\log_{10}(\sigma)$ - $\log_{10}(N)$

El objetivo de este anexo es explicar de forma más detallada como se ha obtenido la gráfica σ - N empleada en los cálculos de fatiga.

La forma más habitual de expresar esta gráfica es hacerlo en escala logarítmica ($\log_{10}(\sigma)$ - $\log_{10}(N)$). La gráfica así expresada consta de dos tramos: uno diagonal y otro horizontal. El tramo diagonal se define mediante dos puntos, para los que es necesario conocer la tensión última del material (σ_u) y el límite de fatiga real. Estos puntos se definen como:

- **Punto inicial:** ($\log_{10}(0,9\sigma_u)$ - $\log_{10}(10^3)$)
- **Punto final:** ($\log_{10}(\sigma'_e)$ - $\log_{10}(10^6)$)

La tensión última es una característica del propio material, por tanto, es un dato conocido (tabla 1). Para conocer el límite fatiga real hay que aplicar una serie de coeficientes modificativos al límite de fatiga teórico (σ_e).

El límite de fatiga teórico se puede obtener, para un acero de tensión última menor a 1400 MPa, como $\sigma_e=0,5\sigma_u$. El límite fatiga real será, por tanto, σ_e por todos los coeficientes modificativos. Los coeficientes modificativos empleados son:

- **Coefficiente de acabado superficial:** $c_s=0,5$
- **Coefficiente de dimensiones y geometría:** $c_d=0,8$
- **Coefficiente de forma de trabajo:** $c_t=0,7$
- **Coefficiente de fiabilidad:** $c_f=0,5$
- **Coefficiente de tratamientos mecánicos:** $c_m=1,8$

Aplicando los coeficientes se obtiene que $\sigma'_e= c_s*c_d*c_t*c_f*c_m*\sigma_e=132,16$ Mpa. La gráfica que se obtiene es la de la figura 21.

ANEXO III. Análisis resistente a 5200rpm

En este anexo se incluirán los resultados del análisis resistente a 5200rpm, para complementar el realizado en el apartado 7.1. a 3700rpm. Además de cambiar el régimen de giro, también se cambiará la presión a la entrada en la cámara de combustión por no ser esta la situación donde se requiera ejercer el mayor esfuerzo. Los resultados se harán con los valores de presión obtenida con una presión de 1,3bar a la entrada (figura 49). Gran parte de las explicaciones realizadas en ese apartado son válidas en este caso particularizando los resultados a este análisis, de modo que en algún caso se incluirán únicamente los resultados y un breve comentario en caso de ser necesario.

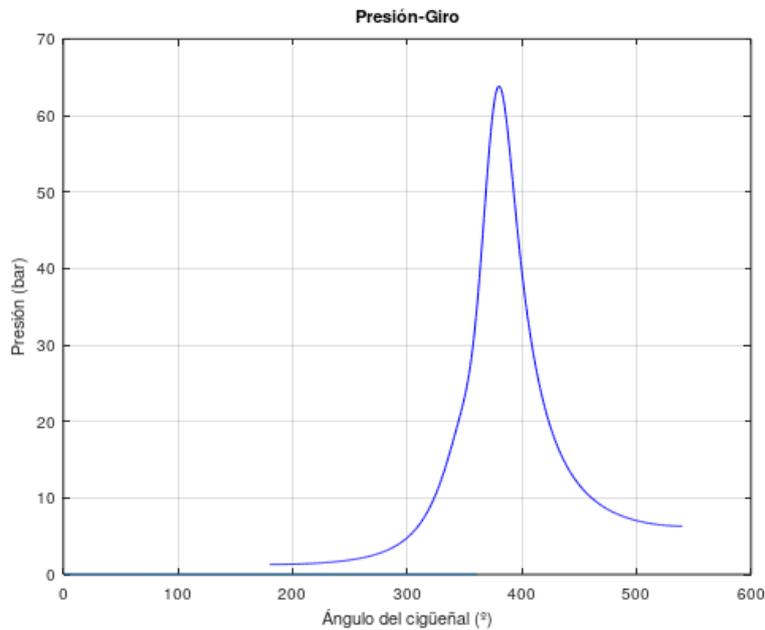


Figura 49: Gráfica presión-giro del cigüeñal a 5200rpm

AIII.1. Uniones entre elementos y mallado

Tanto las uniones entre elementos como el mallado se ha realizado de igual manera que en el análisis a 3700rpm.

AIII2. Análisis cinemático

A. ACELERACIÓN LINEAL

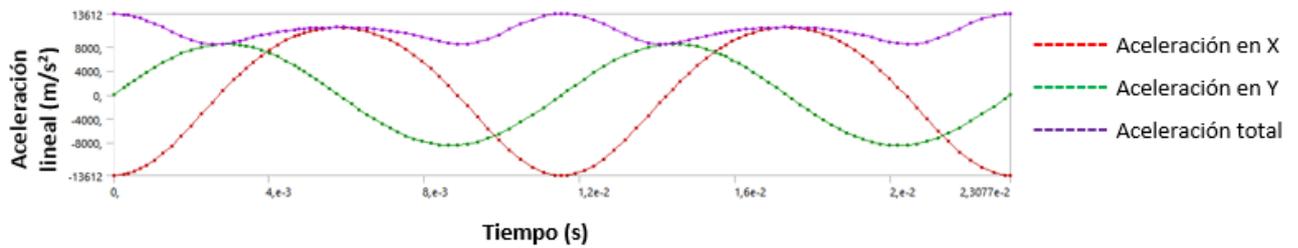


Figura 50: Aceleración lineal a 5200rpm

B. ACELERACIÓN ANGULAR

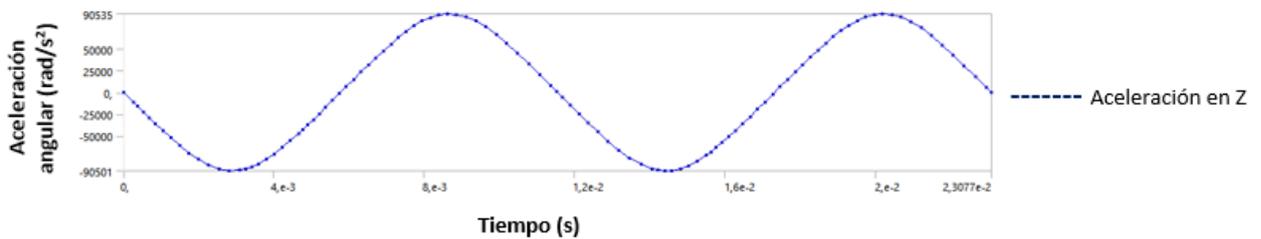


Figura 51: Aceleración angular a 5200rpm

Al haberse aumentado notablemente las revoluciones por minuto del cigüeñal se han aumentado las aceleraciones lineales y angulares de manera significativa lo que resultará en unas mayores fuerzas de inercia.

AIII2. Análisis dinámico

A. ANÁLISIS DE TENSIONES

Las tensiones de Von Mises máximas y medias durante el ciclo en este caso son:

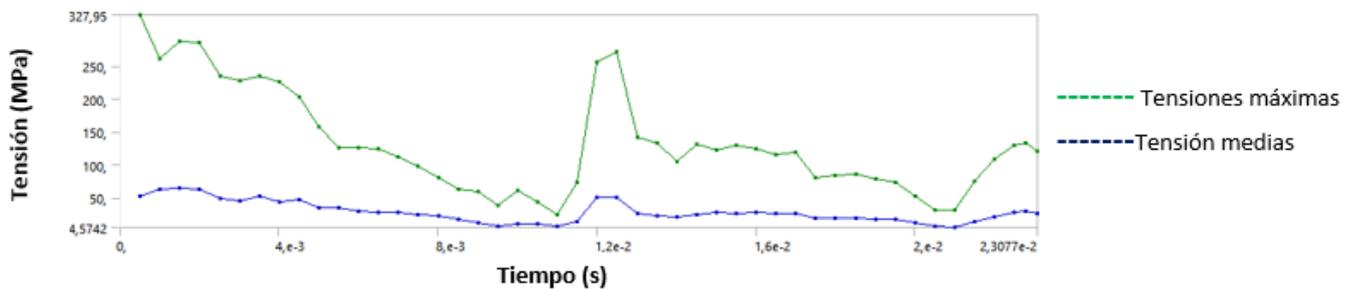


Figura 52: Tensiones equivalentes máximas y medias

Se obtiene en este caso una tensión equivalente máxima (327,95MPa) menor que en el caso anterior y, por tanto, de nuevo se obtiene una tensión máxima inferior a la tensión de fluencia. Las tensiones medias son también muy inferiores a las máximas. El coeficiente de seguridad en este caso es de 1,46.

El punto en el que se da la máxima tensión vuelve a ser el mismo que en el análisis anterior. A continuación se muestra la distribución de tensiones en el momento de tensión máxima y un detalle del punto crítico:

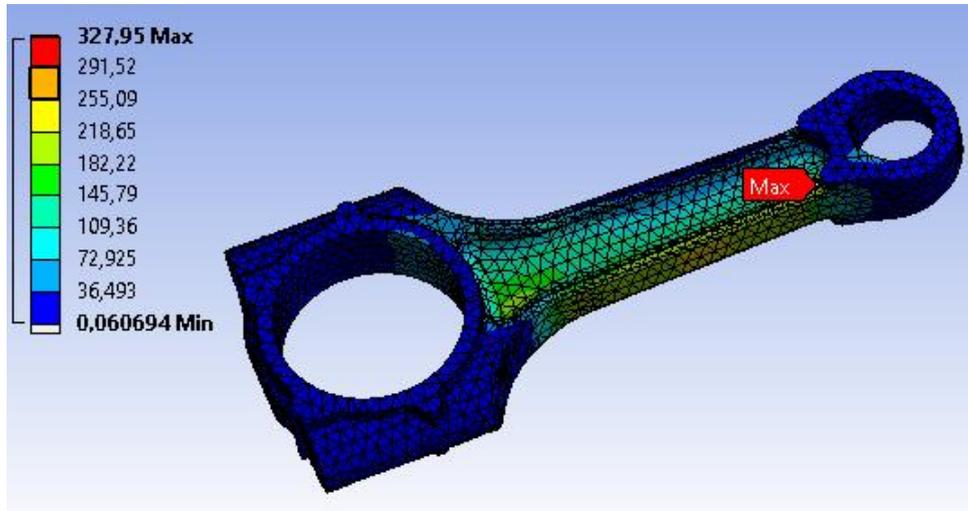


Figura 53: Distribución de tensiones en el momento de tensión máxima

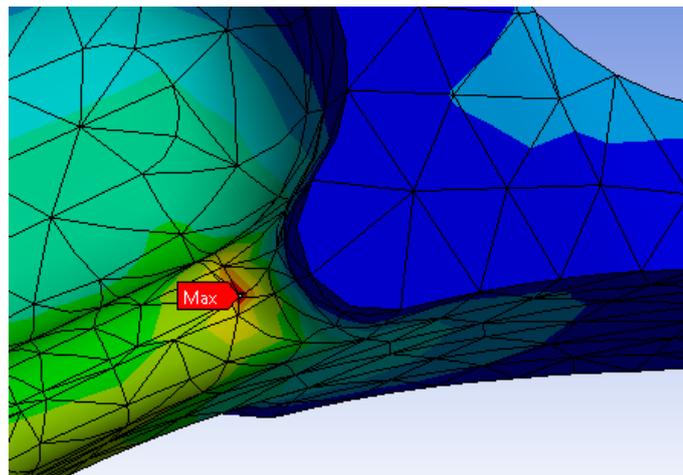


Figura 54: Detalle del punto de tensión máxima

B. ANÁLISIS DE DEFORMACIONES

La situación es exactamente la misma que la del análisis anterior y la comprobación de que la pieza trabaja en régimen elástico también. Por ello, solo se mostrará la gráfica de deformaciones unitarias máximas para poder compararla con la de tensiones máximas.

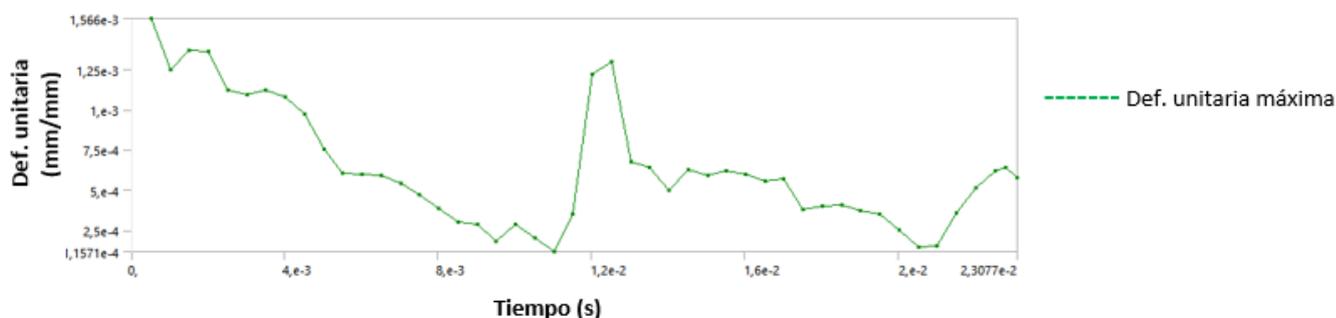


Figura 55: Deformación unitaria máxima

C. ANÁLISIS DE FATIGA

En este caso existe una diferencia respecto al caso anterior y es que los dos picos de tensión que pueden apreciarse se dan en el mismo punto. De nuevo uno es de tracción y otro de compresión como se justifica en la tabla 11. La diferencia está en que en este caso la mayor de las tensiones es la de tracción, pero sin embargo, la diferencia entre ambos es menor. El origen de que en este caso la tensión mayor sea la de tracción es el elevado aumento de las fuerzas de inercia.

Tabla 11: Estado tensional punto crítico

	Punto crítico
σ_{p1_max} (MPa)	349,86
σ_{p2_max} (MPa)	46,97
σ_{p3_max} (MPa)	1,59
$\Sigma\sigma_{pi_max}$ (MPa)	398,42
σ_{max} (MPa)	327,95
σ_{p1_min} (MPa)	-1,28
σ_{p2_min} (MPa)	-39,06
σ_{p3_min} (MPa)	-290,14
$\Sigma\sigma_{pi_min}$ (MPa)	-340,48
σ_{min} (MPa)	-270,03
$\Delta\sigma$ (Mpa)	599,98
R	-0,83

Empleando este valor de R, el coeficiente de seguridad frente a una vida de 10^9 ciclos empleando el criterio de Von Mises es:

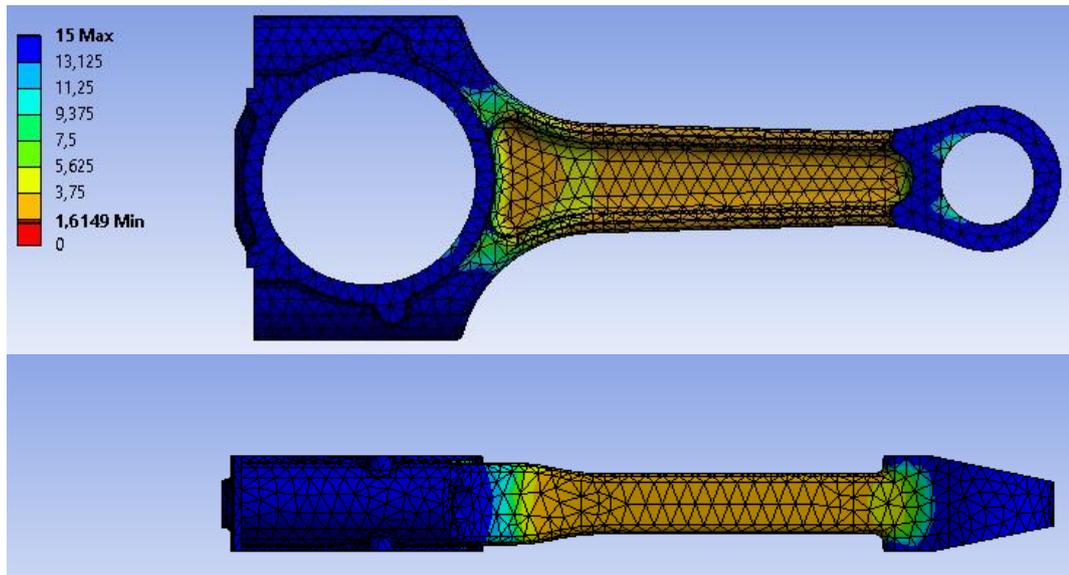
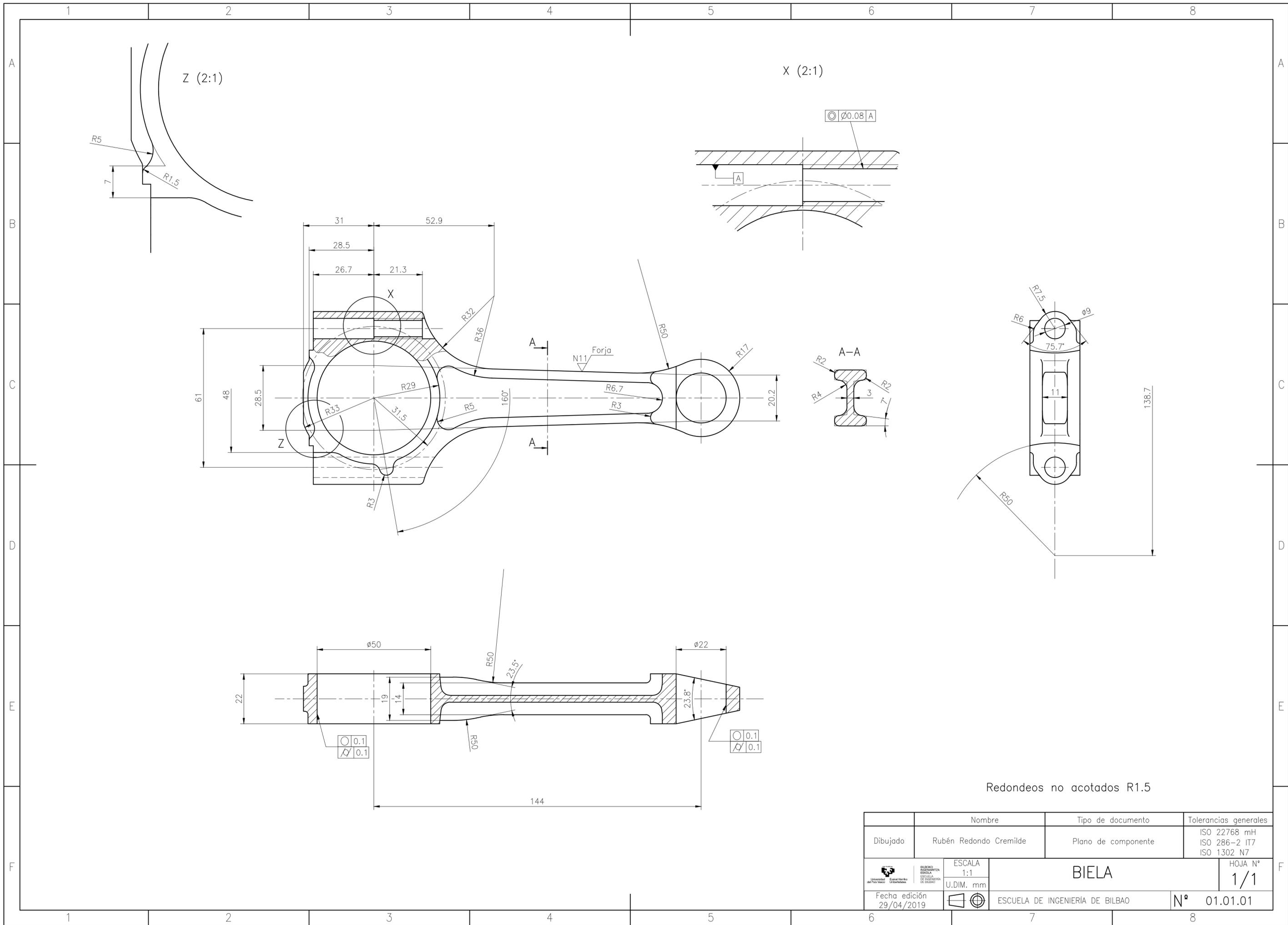


Figura 56: Coeficiente de seguridad a fatiga a 5200rpm

En este caso se observa como el coeficiente de seguridad a fatiga es menor y se vuelve a producir en el punto crítico ese mínimo. Esto es debido al gran aumento de la tensión de tracción manteniéndose una diferencia de tensiones similar. Por tanto, pese a ser este un caso menos crítico respecto a la tensión por transmitirse menos esfuerzos, es más crítico respecto a la fatiga.

ANEXO IV. Planos de diseño

En este anexo se incluye el plano de diseño de la biela.



Redondeos no acotados R1.5

Nombre	Tipo de documento	Tolerancias generales
Rubén Redondo Cremilde	Plano de componente	ISO 22768 mH ISO 286-2 IT7 ISO 1302 N7
BIELA		HOJA N° 1/1
Fecha edición 29/04/2019	ESCALA 1:1 U.DIM. mm	ESCUOLA DE INGENIERÍA DE BILBAO N° 01.01.01

ANEXO V. Lista de herramientas de mecanizado

En este anexo, se recogen de manera resumida todas las herramientas empleadas en las doce operaciones de mecanizado y su diámetro. Además, si no son herramientas enterizas, también aparecerán su número de dientes y plaquitas. La elección de las mismas sigue los criterios explicados en el apartado 7.2.2.

Tabla 12: Herramientas de mecanizado

	Herramienta	Plaquita	Dc (mm)	z
Operación 1	 Coromill 300 Capto R300-066C6-16H	R300-1648M-PM GC4230	50	6
Operación 2	 Coromill 300 Capto R300-066C6-16H	R300-1648M-PM GC4230	50	6
Operación 3	 CoroDrill 860 860.1-0870-064A1-PM	-	7,8	-
Operación 4	 CoroDrill 860 860.1-0900-080A1-PM	-	9	-
Operación 5	 CoroTap 400 T400-084Q27-14M	-	M9	-

<p>Operación 6</p>	 CoroMill 860 Eje 490-084Q27-14H	490R-140420-PM GC1130	80	6
<p>Operación 7</p>	 CoroBore BR20 Capto BR20-56CC09F-C5	CCMT09T3M8-PM GC4325	[44,56]	2
<p>Operación 8</p>	 CoroBore 825 Capto 825-23TC06-C3	TCMT06T102-UF CT5015	[19,23]	2
<p>Operación 9</p>	 CoroMill 860 Eje 490-084Q27-14H	490R-140420-PM GC1130	80	6
<p>Operación 10</p>	 CoroMill 860 Eje 490-084Q27-14H	490R-140420-PM GC1130	80	6

<p>Operación 11</p>	 <p>CoroMill 860 Eje 490-084Q27-14H</p>	<p>490R-140420-PM GC1130</p>	<p>80</p>	<p>6</p>
<p>Operación 12</p>	 <p>CoroDrill 860 860.1-0900-080A1-PM</p>	<p>-</p>	<p>9</p>	<p>-</p>