UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Trabajo final de grado:

Estudio mecánico de un componente de automoción utilizando herramientas de simulación numérica

EMSN.001

MEMORIA

Estudiante: Víctor Cortés Abad.
Director: Rafael Weyler.
Co-director: José Antonio Ortiz Marzo.
Grado: GRETI.
Fecha de entrega: Junio 2016.

Me gustaría iniciar el presente documento con los agradecimientos correspondientes a todas las personas que me han ayudado y apoyado durante la elaboración de este proyecto.

Primeramente, agradecer a Rafael Weyler y José Antonio Ortiz el apoyo incondicional prestado. Sin ellos, el presente trabajo no hubiera podido llegar a culminarse.

De un modo semejante, dar gracias a Roger Fabra, quien nunca ha vacilado en prestar ayuda cuando esta ha sido demandada por mí. Sacrificando siempre pequeñas partes de su jornada laboral.

Finalmente, agradecer a aquellos docentes que me han motivado e introducido en el mundo de la automoción, así como a la escuela y su personal e infraestructuras.

Sin todos ellos este proyecto no habría llegado a culminarse.

I. Índice de contenido

1. Objetivo del proyecto 9
2. Alcance 9
3. Especificaciones básicas del proyecto 10
4. Justificación del proyecto 11
5. Estado del arte 13
6. Estudio de herramientas CAD y CAE 13
6.1. Introducción 13
6.2. CAD 14
6.3. CAE 15
6.4. *Samcef* 18
6.5. *Siemens NX* 18
7. Validación 20
7.1. Objetivo de la validación 20
7.2. Método de validación 21
7.3. Benchmarks realizados 21
7.3.1. BT1 - Viga plana en flexión pura 22
7.3.2. BN1 - Lámina elíptica - NAFEMS LE1 23
7.3.3. BN2 - Lámina cilíndrica - NAFEMS LE2 24
7.3.4. BN3 - Lámina semiesférica - NAFEMS LE3 25
7.3.5. BN4 - Ménsula de con sección en Z - NAFEMS LE5 26
7.3.6. BN5 - Lámina sesgada – NAFEMS LE6 27
7.3.7. BN6 - Presión en placa gruesa - NAFEMS LE10 28
7.4. Conclusiones 29
8. Elección del componente a estudiar 31
8.1. Introducción 31
8.2. Posibles Componentes 31
8.3. Factores de decisión 31
8.4. Proceso de selección 32
8.5. Conclusión 34

9. Estudio del componente 34
9.1. Introducción 34
9.2. Función 35
9.2.1. Biela común 35
9.2.2. Biela para motores en V 38
9.3. Materiales 41
9.3.1 Acero 41
9.3.2 Aluminio 44
9.3.3 Titanio 44
9.4. Fabricación 45
9.4.1. Proceso productivo común para bielas de acero 45
9.4.2. Proceso productivo para bielas aluminio y titanio 51
9.4.3. Proceso productivo por pulvimetalurgia 52
9.5. Cargas 52
9.5.1. Presión 53
9.5.2. Fricción 53
9.5.3. Fuerzas inerciales 54
9.6. Restricciones 56
10. Simulación mecánica de una biela 56
10.1. Introducción 56
10.2. Hipótesis 57
10.3. Geometría y diseño CAD 59
10.4. Mallado 60
10.5. Cargas 61
10.5.1. Caso 1 – PMS 61
10.5.2. Caso 2 – PMI 62
10.5.3. Caso 3 – tita 21,5º 63
10.6. Restricciones 64

10.7. Resultados 65
10.7.1. Predicción 65
10.7.2. Análisis de resultados 66
11. Estudio de viabilidad técnica de *NX Samcef* 70
12. Estudio de viabilidad ambiental 72
12.1. Introducción 72
12.2. Energía 74
12.3. Reducción de prototipos físicos 78
12.4. Conclusión sobre la viabilidad ambiental 79
13. Estudio de viabilidad económica 81
13.1. Introducción 81
13.2. Viabilidad económica de la validación de *NX Samcef* 81
13.3. Viabilidad económica del estudio mecánico de una biela 82
14. Líneas futuras 83
15. Conclusión general 84
16. Glosario 85
17. Bibliografía de referencia 87

II. Índice de diagramas

Diagrama 5.1: Ventajas de las herramientas CAE. 12
Diagrama 6.1: Integración CAD y CAE. 17
Diagrama 10.1: Esquema de fuerzas del primer caso. 61
Diagrama 10.2: Esquema de fuerzas del segundo caso. 62
Diagrama 10.3: Esquema de fuerzas del tercer caso. 63
Diagrama 12.1: Procesos y recursos involucrados. 73
Diagrama 12.2: Orígenes de la electricidad generada.
Fuente: Red Eléctrica Española. 74

III. Índice de ilustraciones

Ilustración 6.1: Diseño en CAD de una biela. Fuente: www.thesamba.com. 15

Ilustración 6.2: Diagrama de fatiga para biela de motor.
Fuente: www.comsol.com. 16

Ilustración 6.3: Menús de NX10. 19

Ilustración 7.1: Test BT1. 22

Ilustración 7.2: Test BN1. 23

Ilustración 7.3: Test BN2. 24

Ilustración 7.4: Test BN3. 25

Ilustración 7.5: Test BN4. 26

Ilustración 7.6: Test BN5. 27

Ilustración 7.7: Test BN6. 28

Ilustración 8.1: Biela fabricada por Saenz Group. Fuente: www.saenzgroup.net. 34

Ilustración 9.1: Esquema de piezas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net. 35

Ilustración 9.2: Esquema de la unión con bulón flotante. 36

Ilustración 9.3: Esquema de la cabeza de biela.
Fuente: www.aficionadosalamecanica.net. 37

Ilustración 9.4: Plano de unión inclinado.
Fuente: www.aficionadosalamecanica.net. 38

Ilustración 9.5: Motores en V y en W. Fuente: upload.wikimedia.org. 38

Ilustración 9.6: Bielas conjugadas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net. 39

Ilustración 9.7: Bielas ahorquilladas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net. 39

Ilustración 9.8: Bielas articuladas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net. 40

Ilustración 9.9: Barras de acero en bruto. Fuente: www.mooregoodink.com. 45

Ilustración 9.10: Biela en bruto con rebaba. Fuente: www.mooregoodink.com. 46

Ilustración 9.11: Biela en bruto sin rebaba. Fuente: www.acast.com.au. 46

Ilustración 9.12: Pieza de acero en bruto con estructura orientada.
Fuente: CATerpillar..... 47

Ilustración 9.13: Proceso de mecanizado de bielas en bruto.
Fuente: Recoal Europa. 47

Ilustración 9.14: Granalla de diferentes tamaños.
Fuente: www.blastingexperts.com. 48

Ilustración 9.15: Bielas entrando en horno de tratamiento térmico. 48

Ilustración 9.16: Acabado de precisión del orifico de la cabeza de la biela. 49

Ilustración 9.17: Separación por rotura. Fuente: www.neweng.org.uk. 50

Ilustración 9.18: Marcaje del punto de corte mediante láser.
Fuente: Scantech Laser. 50

Ilustración 9.19: Separación de las semicabezas mediante presión.
Fuente: Scantech Laser. 51

Ilustración 9.20: Esquema de aplicación de la presión.
Fuente: seat600.mforos.com. 53

Ilustración 9.21: Fuerza de fricción camisa-pistón. Fuente: Casanova y Aguirre..... 54

Ilustración 10.1: Diseño CAD de la biela adaptada. 59

Ilustración 10.2: Mallas resultantes. 60

Ilustración 10.3: Sistema de coordenadas alternativo. 64

Ilustración 10.4: Puntos de falla comunes. Fuente: CATerpillar. 65

Ilustración 10.5: Deformación axial en primer y segundo caso. 68

Ilustración 10.6: Deformación axial en el tercer caso. 69

Ilustración 11.1: Opciones de modelado síncrono. 70

IV. Índice de tablas

Tabla 7.1: Tabla de resultados BT1. 22

Tabla 7.2: Tabla de resultados BN1. 23

Tabla 7.3: Tabla de resultados BN2. 24

Tabla 7.4: Tabla de resultados BN3. 25

Tabla 7.5: Tabla de resultados BN4. 26

Tabla 7.6: Tabla de resultados BN5. 27

Tabla 7.7: Tabla de resultados BN6. 28

Tabla 7.8: Promedio de errores (a excepción de los resultados BN2 – case 2). 30

Tabla 8.1: Tabla de valor técnico. 33

Tabla 9.1: Composición química del acero AISI 4340. Fuente: www.azom.com. 41

Tabla 9.2: Propiedades físicas AISI 4340. Fuente: www.azom.com. 42

Tabla 9.3: Propiedades térmicas AISI 4340. Fuente: www.azom.com. 42

Tabla 9.4: Propiedades mecánicas AISI 4340 (1). Fuente: www.azom.com. 43

Tabla 9.5: Propiedades mecánicas AISI 4340 (2). Fuente: www.azom.com. 43

Tabla 9.6: Tabla de equivalencias según norma. Fuente: www.grantadesign.com. 43

Tabla 10.1: Presiones en la cámara de combustión. 57

Tabla 10.2: Fuerzas de fricción camisa-émbolo en cada caso. 58

Tabla 10.3: Valores referencia de parámetros constructivos. 58

Tabla 10.4: Grados de libertad en el pie. 64

Tabla 10.5: Grados de libertad en el pie (caso 3). 64

Tabla 10.6: Grados de libertad en la cabeza. 65

Tabla 10.7: Resultados con malla fina. 66

Tabla 12.1: Cómputo de horas. 76

Tabla 12.2: Referencias de emisiones en procesos. 77

Tabla 12.3: Tabla resumen de emisiones. 79

1. Objetivo del proyecto

El objetivo del presente proyecto es el análisis y validación del *solver NX Samcef* en el campo de la simulación mecánica lineal y elástica, mediante elementos finitos. Asimismo, una vez validado se debe llevar a cabo el estudio mecánico de un componente de automoción.

2. Alcance

El presente proyecto abarca la validación de un código de elementos finitos para el posterior estudio mecánico de un componente de automoción. Para ello se listan las actividades que deben llevarse a cabo durante el estudio:

- Planificación y programación del proyecto.
- Formación en el uso del programa de elementos finitos.
- Validación del código a utilizar.
- Elección del componente a estudiar.
- Estudio del componente seleccionado y de las condiciones de trabajo.
- Simulación mecánica virtual.
- Realización de estudios de viabilidad económica y ambiental.

Mediante la elaboración de las citadas actividades, se deberá alcanzar el objetivo del proyecto de estudio.

3. Especificaciones básicas del proyecto

El estudio que a desarrollar debe cumplir una serie de requisitos y especificaciones básicas con tal de asumir los objetivos del mismo. A continuación, se procede a detallar tales especificaciones:

- Debe validarse y utilizarse el programa *Samcef*, integrado en *Siemens NX*.
- La validación y el estudio se limitarán al carácter mecánico, sin tener en cuenta efectos térmicos.
- La validación y el estudio se centrarán en simulaciones lineales.
- Se debe validar el programa en los ámbitos de configuración de la simulación, proceso y pos procesado de datos.
- El componente a estudiar debe ser del sector automoción.
- Todo el proyecto debe tener una carga de trabajo cercana a las 300h.

Asimismo, quedan fuera del alcance del presente proyecto:

- Estudio térmico del componente. Para los estudios a realizar no se tendrán en cuenta los efectos térmicos de dilatación, compresión o variación de propiedades mecánicas del componente.
- Estudios y simulaciones no lineales.
- Estudios y simulaciones de respuesta en frecuencia.
- Dimensionado y diseño completo del componente. Este proyecto contempla el estudio de modelos ya existentes.
- Comparación del *solver* utilizado frente a otros programas de simulación de elementos finitos existentes en el mercado.

4. Justificación del proyecto

El presente proyecto se justifica en atención a las ventajas de la implementación de métodos virtuales, como el método de elementos finitos, frente a métodos físicos basados en prototipos en el campo del diseño y prueba de componentes.

Hasta mediados del siglo XX, la única manera de diseñar y mejorar componentes y mecanismos pasaba por la producción y análisis de diferentes prototipos. Este método físico convencional requiere multitud de ensayos en condiciones controladas, además de la fabricación de un nuevo prototipo con cada posible mejora. En cambio, con la aparición de los métodos de elementos finitos (FEM), durante la segunda mitad del siglo XX, se ha modificado la manera de diseñar componentes tecnológicos.

La simulación mediante elementos finitos permite diseñar y analizar componentes a un coste muy inferior respecto al método físico convencional. Esta reducción de costes es debida en gran mesura a la escasa producción de prototipos. Asimismo, la desvinculación del prototipado convencional permite extremar la versatilidad del diseño; se eliminan los gastos de transporte de prototipos en caso de una producción descentralizada. Del mismo modo, si se requiere un servicio externo, basta con enviar el CAD del prototipo y el archivo de soluciones.

Gracias al FEM se pueden obtener imágenes y diagramas de todas las secciones y vistas posibles, así como detallar con exactitud los puntos críticos del diseño. Tal característica es de suma importancia y justifica también este estudio: se genera la posibilidad de corregir errores de diseño incluso antes de producirse físicamente. Esta corrección de errores prematuros, así como la detección de los puntos críticos, permiten reducir de manera cuantiosa el tiempo de desarrollo de un producto. Gracias a esta reducción del tiempo de producción, se reduce también en gran medida el coste total del proceso.

Dado que los programas de simulación por elementos finitos están evolucionando a gran velocidad, cada vez se realizan simulaciones más precisas y fieles a la realidad. Cabe mencionar que la simulación nunca será exacta a la realidad, puesto que las condiciones de contorno se hipotetizan en la fase previa a la simulación. De cualquier modo, como se ha expuesto anteriormente, las técnicas FEM permiten reducir los costes del prototipado, pero siempre deberá existir un prototipo final. Este último (y a veces único) prototipo deberá pasar las pruebas de control de calidad. La aplicación de elementos finitos cobra especial importancia en el estudio de componentes difíciles de sensorizar.

A modo general, todo estudio físico requiere de un sensorizado más o menos extenso para la caracterización de su comportamiento en condiciones de trabajo. En el caso que se ocupa, los componentes de automoción, y especialmente los del motor, son muy costosos de sensorizar. Esta complejidad es debida al gran número de piezas móviles y las condiciones de contorno problemáticas como velocidades elevadas, fuerzas de inercia altamente variables o temperaturas elevadas. Por consiguiente, los componentes de automoción son idóneos para justificar la necesidad de un estudio mediante elementos finitos.

Es por este motivo que el mercado de los servicios de simulación FEM se nutre en gran medida del sector automovilístico y aeronáutico. Asimismo, cada vez más a menudo, se incorporan nuevas empresas a las tecnologías CAE, en busca de reducir los costes de prototipado. Ligado a este fenómeno se encuentra la imparable evolución tecnológica de *software*, que cada día aportan más precisión de cálculo.

Asimismo, la creciente evolución tecnológica de las computadoras permite realizar simulaciones en tiempos más reducidos. Los cálculos que antaño tardaban semanas y costaban miles, actualmente se pueden realizar en ordenadores de oficina en unas horas. Así pues, la clara tendencia al alza de estos servicios indica directamente un mercado en plena expansión y crecimiento *(Chavez 2015)*.

Diagrama 5.1: Ventajas de las herramientas CAE.

Por todos estos motivos, cabe mencionar el interés de la empresa *Análisis y Simulación* en validar el *solver Samcef*, integrado recientemente en el entorno *Siemens NX*. Asimismo, existe un interés personal de formarme en el campo de la simulación numérica. Campo que se profundiza de manera muy leve durante el grado de tecnologías industriales.

5. Estado del arte

Dado que *NX Samcef* es un *solver* comercial integrado en el entorno de *Siemens NX*, se supone que ha sido validado por *Siemens* antes de salir al mercado. A pasar que tal suposición es muy probable, no se puede afirmar la existencia de un estudio de validación para *NX Samcef*. Si tal estudio existe, forma parte de los documentos clasificados por la empresa que lo comercializa, *Siemens*, a los cuales no se tiene acceso en el presente.

Asimismo, cabe destacar que existen documentos públicos que muestran la validación de otros *solvers* integrados en *Siemens NX*, como *NX Nastran*. Dichos documentos servirán de guía para la elaboración del estudio de validación.

6. Estudio de herramientas CAD y CAE

6.1. Introducción

El presente proyecto pretende estudiar mecánicamente una biela de motor alternativo y combustión interna. En la actualidad es posible realizar simulaciones mecánicas únicamente con una computadora. Así pues, durante el presente proyecto no se va a realizar ninguna prueba mecánica física, sino que todos los datos se obtendrán de simulaciones y pruebas virtuales.

Para ello, es necesario el uso y conocimiento de las herramientas CAD y CAE. Por este motivo, se procede a describir brevemente estas herramientas y sus funciones. También se encuentra resumida en el presente documento la evolución de estas herramientas.

6.2. CAD

Las siglas CAD hacen referencia al término inglés "*Computer-Aided Design*", en español, se traduce como Diseño Asistido por Computadora. Así pues, las herramientas CAD son programas informáticos enfocados a los campos de la ingeniería, fabricación y diseño.

Las herramientas CAD permiten al usuario realizar el diseño de un producto de manera virtual, de esta manera, se puede tanto crear como modificar y optimizar un componente sin necesidad de producirlo físicamente. Asimismo, las herramientas CAD facilitan la documentación de esta fase puesto que son capaces de almacenar información de tolerancias, dimensiones, procesos y materiales.

Inicialmente, dichas herramientas permitían únicamente la gestión de los diseños geométricos de piezas y ensamblajes. Actualmente, estas herramientas permiten desde modificar y analizar tolerancias hasta calcular propiedades físicas como masa, volumen, centros de gravedad o inercias.

Durante los años cincuenta y sesenta, los ordenadores ocupaban habitaciones enteras y costaban una fortuna. En aquellas épocas, cada empresa diseñaba su propio sistema de CAD, principalmente las industrias del automóvil, empresas aeronáuticas y grandes compañías multinacionales.

Posteriormente, en la década de los setenta, aparece el diseño en tres dimensiones asistido por ordenador. Esto supone un punto de inflexión en los métodos de diseño, pues cada vez toma más peso el diseño en tres dimensiones frente al diseño convencional de planos.

A principios de los ochenta, se produce un incremento de la potencia de las computadoras, que pasas a trabajar a 32 bits, este cambio posibilita que las herramientas CAD puedan trabajar y generar superficies complejas y modelado sólido. Posteriormente, a finales de los ochenta, nace *AutoCAD* y el concepto de PC, es en este momento cuando el mercado del CAD se generaliza en las empresas.

Desde el inicio de la década de los noventa hasta la actualidad, las computadoras han evolucionado de manera exponencial, el precio del hardware ha caído y la aparición de internet permite una conexión global y muchas facilidades a las multinacionales. Son estas las grandes impulsoras de los sistemas CAD; diseñan, analizan, simulan e incluso fabrican con programas basados en esta tecnología *(Chavez 2015)*.

Ilustración 6.1: Diseño en CAD de una biela. Fuente: www.thesamba.com.

Actualmente, el uso de herramientas CAD se ha extendido y todo el mundo conoce la existencia de programas de diseño, como por ejemplo, *AutoCAD*. De cara al futuro, son inimaginables los avances que se pueden llegar a realizar en esta materia, y más, teniendo en cuenta las ventajas que supone su implantación tanto en grandes como en pequeñas empresas.

6.3. CAE

Las herramientas CAD guardan una estrecha relación con las herramientas CAE. Estas siglas identifican el término "*Computer-Aided Engineering*", y dan nombre a las herramientas capaces de simular y analizar diseños realizados con programas CAD.

Estas herramientas son capaces de evaluar, simular, analizar y optimizar componentes y ensamblajes. Con ellas es posible predecir el comportamiento de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, así como detectar los puntos críticos y posibles fallos prematuros. Las herramientas CAE permiten la reutilización en las etapas de análisis de los archivos creados como programas CAD. La evolución de los programas de simulación ha estado estrictamente ligada a la evolución de las herramientas de diseño y se ha visto limitada habitualmente por la capacidad de las computadoras. Actualmente se pueden realizar simulaciones complejas, que usualmente requieren gran cantidad de horas y máquinas con potencia de cálculo elevada.

De entre las diferentes funciones de las herramientas CAE encontramos el análisis cinemático de grandes desplazamientos o el análisis por el método de elementos finitos. Siendo este último el más utilizado en la actualidad. Las siglas FEM identifican el término "*Finite Element Method*", dichos métodos permiten determinar tensiones, deformaciones, transmisiones de calor o flujos magnéticos y re*solver* problemas fluido-dinámicos. Para ello se construye un modelo con multitud de elementos interconectados que permiten dividir el componente o mecanismo a analizar en elementos manejables por la computadora.

La simulación mediante elementos finitos permite diseñar y analizar componentes a un coste muy inferior respecto al método convencional. Esta reducción de costes es debida en gran mesura a la escasa producción de prototipos. Asimismo, la desvinculación del prototipado convencional permite extremar la versatilidad del diseño; se reducen los gastos de transporte de prototipos en caso de una producción descentralizada. Del mismo modo, si se requiere un servicio externo, basta con enviar el CAD del prototipo y el archivo de soluciones.

Gracias al FEM se pueden obtener imágenes y diagramas de todas las secciones y vistas posibles, así como detallar con exactitud los puntos críticos del diseño. Tal característica es de suma importancia: se genera la posibilidad de corregir errores de diseño incluso antes de producirlo físicamente. Esta corrección de errores y fallas de manera prematura, así como la detección de los puntos críticos, permiten reducir de manera cuantiosa el tiempo de desarrollo de un producto. Gracias a esta reducción del tiempo de producción, se reduce en gran medida el coste del proceso.

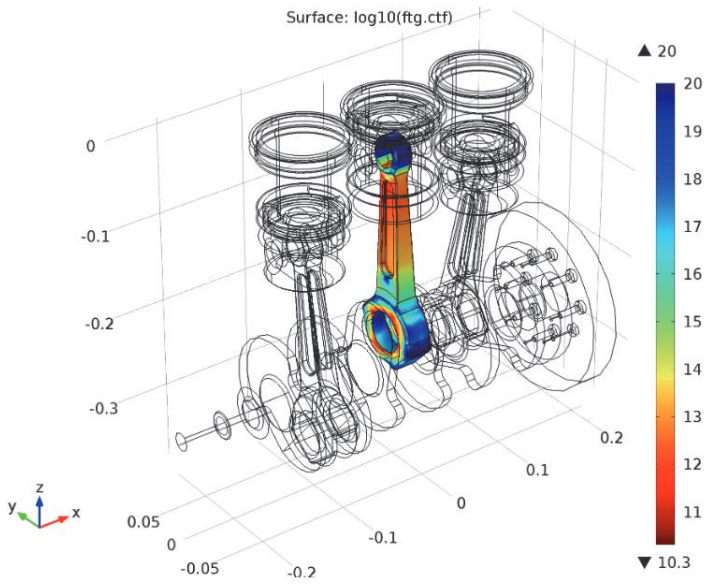

Ilustración 6.2: Diagrama de fatiga para biela de motor. Fuente: www.comsol.com.

Dado que los programas de simulación por elementos finitos están evolucionando a gran velocidad, cada vez se realizan simulaciones más precisas y fieles a la realidad. Cabe mencionar que la simulación nunca será exacta a la realidad, puesto que las condiciones de contorno se hipotetizan en la fase previa a la simulación.

De cualquier modo, como se ha expuesto anteriormente, las técnicas CAE permiten reducir los costes del prototipado, pero siempre deberá existir un prototipo final. Este último (y a veces único) prototipo deberá pasar las pruebas de control de calidad. La aplicación de elementos finitos cobra especial importancia en el estudio de componentes difíciles de sensorizar.

Así pues, en la actualidad el uso de las herramientas CAD y CAE ha pasado a ser prácticamente obligatorio en la industria de la producción tecnológica. Si se desea ser competitivo, la mayor reducción de costes se encuentra en muchos casos en la implantación de técnicas de diseño y análisis asistido por ordenador.

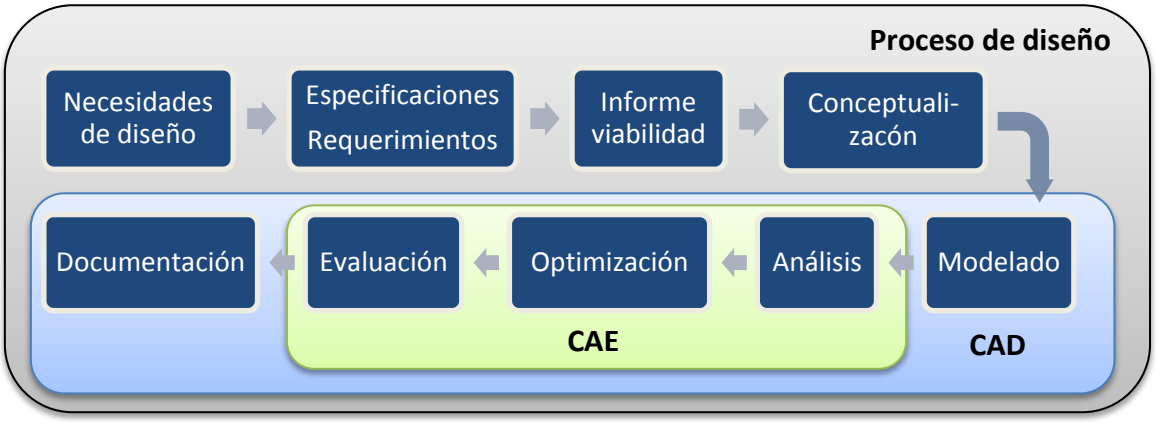

Diagrama 6.2: Integración CAD y CAE.

En el *diagrama 1* se puede describe la completa integración de los sistemas CAE dentro del proceso de diseño. La implantación de los sistemas CAE, como puede observarse, tiene mucho mayor sentido cuando ya se utilizan las herramientas CAD en un proceso de diseño. De todas maneras, actualmente también existen empresas dedicadas exclusivamente a la externalización del servicio de simulación y análisis.

6.4. *Samcef*

Tal y como se expone en las especificaciones, el presente proyecto debe realizarse con el código *Samcef*. En este documento se procederá a exponer sus principales características y metodología de trabajo.

Samcef es un *solver* de simulación mediante elementos finitos. Inicialmente fue creado por la compañía *LMS Samtech*, actualmente la empresa Siemens ha absorbido dicha empresa y comercializa el *software* bajo el nombre de *LMS Samcef*. La compra de *LMS Samtech* por parte de *Siemens* ha permitido integrar el *solver* en el entorno NX. Seguidamente se realiza una breve exposición del entorno NX.

6.5. *Siemens NX*

El programa *NX* ofrece una solución integrada de diseño, ingeniería y fabricación de productos. Estos tres módulos se encuentran unidos por el entorno NX, que permite pasar de uno a otro con facilidad y sin necesidad de conversores de archivos o datos.

Durante la realización del presente proyecto, la versión actual del *software* es *NX10*, concretamente la actualización 10.0.3. Las operaciones de diseño y simulación necesarias a lo largo del presente proyecto serán realizados íntegramente con la versión anteriormente citada.

En primera instancia, al ejecutar el programa *NX*, el usuario encuentra un entorno agradable. Muy similar en forma a las versiones actuales de *MS Word*, *Autocad* o *SolidWorks*, ya que presenta, como ellos, una organización por pestañas. Asimismo, se los iconos son muy visuales y permiten intuir rápidamente la función que desempeñan.

Según el orden lógico, primeramente se debe diseñar el componente, para ello se crea un nuevo archivo al seleccionar la opción de pieza de diseño. Una vez creado, se activa el módulo de diseño de *NX*, dicho módulo permite la creación virtual de componentes. Dicho módulo permite también la conformación de ensamblajes con sus diferentes relaciones de posición y el posterior renderizado de los mismos.

El método de trabajo es muy similar al de otros programas de diseño tridimensional, basándose en croquis paramétricos (*sketch*), con los que posteriormente se realizaran operaciones. Este módulo cuenta con las herramientas habituales de extrusión, revolución, acotación, etc.

Como puede apreciarse en la *il. 6.3*, llama especialmente la atención el grupo de operaciones denominadas *modelado síncrono*, que posibilita una fácil y sencilla la modificación de las formas. Actualmente este método de modelado se encuentra implantado únicamente por *Simenes*, y desde la compañía se muestran orgullosos de este método de modelado.

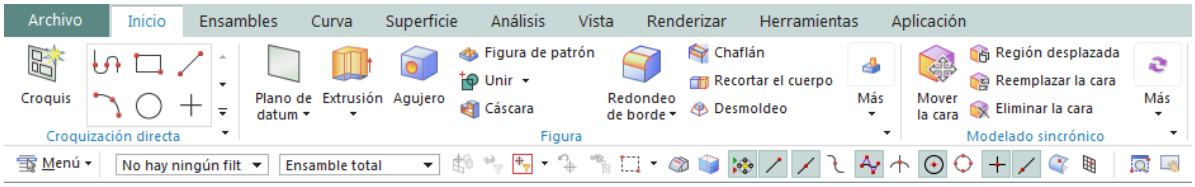

Ilustración 6.3: Menús de NX10.

Tal y como sucede con la mayoría de programas de modelado, las operaciones realizadas se visualizan mediante un esquema en forma de *árbol*, en el que se muestran también las relaciones padre-hijo de las operaciones.

Posteriormente según el orden lógico de diseño de un proyecto, encontramos el módulo de simulación avanzada. Dicho módulo nos permite mallar, preparar, procesar y analizar los resultados de estudios de fatiga, deformaciones, tensiones, velocidades, etc. Existen diversos *solvers* a utilizar, y cuando se desea realizar una simulación nueva, el programa requiere saber que código de simulación desea implementarse.

Se pueden crear a la vez o por separado el archivo de mallado (*.fem*) y el de simulación (*.sim*). En los archivos de mallado se almacena la información relacionada con la malla que se le aplica a la estructura, es decir, número y posicionamiento de nodos y elementos. También el tipo de material es almacenado en este tipo de archivos. En cambio, en los archivos de simulación, se almacena la información referente a las cargas y las restricciones.

El módulo de simulación de *NX10* incluye desde las operaciones de mallado hasta las funciones de análisis de resultados. De este modo, permite con facilidad la modificación de las condiciones iniciales sin necesidad de lanzar de nuevo el cálculo. Como se ha comentado anteriormente, este módulo mantiene el aspecto del módulo de diseño, siendo altamente eficiente y amigable.

Finalmente, si se desea implantar un proceso de fabricación automatizado, *NX10* dispone del módulo de fabricación CAM. Dado que en el presente estudio no es necesario dicho módulo, se procede a obviar su caracterización.

7. Validación

7.1. Objetivo de la validación

Tal y como se expone en el alcance y objetivo del presente estudio, previamente a poder realizar la simulación mecánica de un componente de automoción, debe validarse el *solver* a utilizar, en este caso, *NX Samcef*. Tal y como queda expuesto en la justificación del proyecto, parte de este está enfocada a validar el *solver NX Samcef*. El principal propósito de la misma es valorar la viabilidad de la incorporación y uso de *NX Samcef* en las empresas del grupo *Análisis y Simulación (AyS)*. La vertiente de desarrollo de productos y procesos (*P&PD*) abarca el uso de un amplio programario de simulación, ya sea de elementos o volúmenes finitos. Actualmente se trabaja con *MSC Nastran, NX Nastran, Marc, Moldex 3D* o *Quickcast*, entre otros.

En la actualidad, los cálculos dinámicos o lineales estáticos se realizan con las variantes de *Nastran*, tanto la producida por *MSC* como la que comercializa *Siemens*. Según el director técnico de la oficina de Sabadell de la empresa *Análisis y Simulación S.L.*, Roger Fabra, ambas interfaces son relativamente sencillas de utilizar, con comandos intuitivos y posibilidades de re*solver* sin necesidad de excesiva preparación.

Por el contrario, cuando es requerido un cálculo no lineal se utiliza el *solver Marc*, con el post y pre procesado con *Mentat*. Según el señor Fabra, dicho programa es muy complejo puesto que tiene infinidad de parámetros que pueden ser modificados. Este hecho supone una ventaja en cuanto a precisión de cálculo, pero implica un consumo de tiempo muy elevado.

¿Qué se espera de *NX Samcef*? Dada la gran diferencia de tiempo de preparación de los cálculos entre *Marc* y *Nastran*, el grupo *AyS* pretende encontrar un *solver* que sea un punto intermedio entre ambos. Dicho *solver* se espera que sea *NX Samcef*, del que se espera una buena respuesta y precisión en cálculos no lineales. Eso sí, requiere mucho menos tiempo de preparación que *Marc*. Así pues, las conclusiones de este proyecto de validación lineal elástico se espera que sean positivas, y que den luz verde a una validación de casos no lineales.

7.2. Método de validación

El presente estudio contempla casos de validación, también llamados *benchmarks,* para el *solver Samcef*, integrado en el entorno *Siemens NX*. Como se ha expuesto anteriormente, la totalidad de dichos los casos corresponde de problemas elásticos lineales. La solución de referencia para el primer caso, viga plana en flexión pura, es de carácter teórico. En cambio el resto de casos se contrastan con una solución de carácter ingenieril ampliamente aceptada, calculada por la asociación independiente *National Agency for Finite Element Methods and Standards (NAFEMS)*.

En el *anexo* I se puede encontrar la descripción de los datos e información de geometrías, de elementos y densidades de malla a configurar para cada problema. Asimismo, se detalla el material, las condiciones de contorno y finalmente, los resultados. Estos últimos son comparados con los resultados *benchmark* y los que retorna *NX Nastran* del mismo caso.

Se considera oportuno también realizar uno de los casos de manera pautada y guiada, por tal de ilustrar el programa NX, así como detallar los pasos a seguir. Dicho tutorial se realiza en el caso BN2, puesto que este resulta idóneo para explorar diferentes facetas del *software*. Dicho tutorial se encuentra en el *anexo* III.

7.3. Benchmarks realizados

A continuación se elabora un resumen de los problemas llevados a cabo y los resultados obtenidos en cada caso. Nótese que el *anexo* I contiene la información completa de los parámetros introducidos, así como las conclusiones detalladas de cada benchmark evaluado.

Cabe mencionar que las figuras representan un soporte gráfico para una mejor comprensión de los resultados. Para conocer con precisión el parámetro que representan y su contenido exacto véase el test correspondiente en el anexo previamente citado.

7.3.1. BT1 - Viga plana en flexión pura

Este es un caso de solución teórico en el que se debe determinar la máxima tensión, máxima flecha y la energía acumulada en una viga plana cargada con una fuerza de flexión pura.

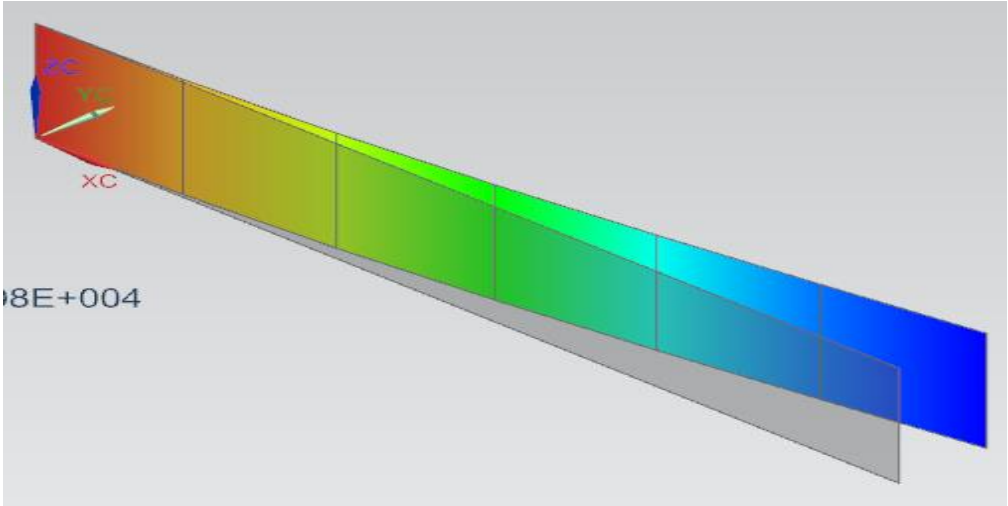

Ilustración 7.1: Test BT1.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output	Benchmark	*Nastran*	Error	*Samcef*	Error
Desplazamiento máx. [in]	4,320	4,264	0,056	4,319	0,001
Tensión principal máx. [psi]	2,16E+07	1,98E+07	0,083	2,16E+07	0,000

Tabla 7.1: Tabla de resultados BT1.

7.3.2. BN1 - Lámina elíptica - NAFEMS LE1

Como puede apreciarse en la *tabla 1*, *Samcef* reproduce mejor los resultados reales del problema BT1, ya que llega incluso a obtener la tensión principal sin error alguno, aproximando el resultado a tres decimales.

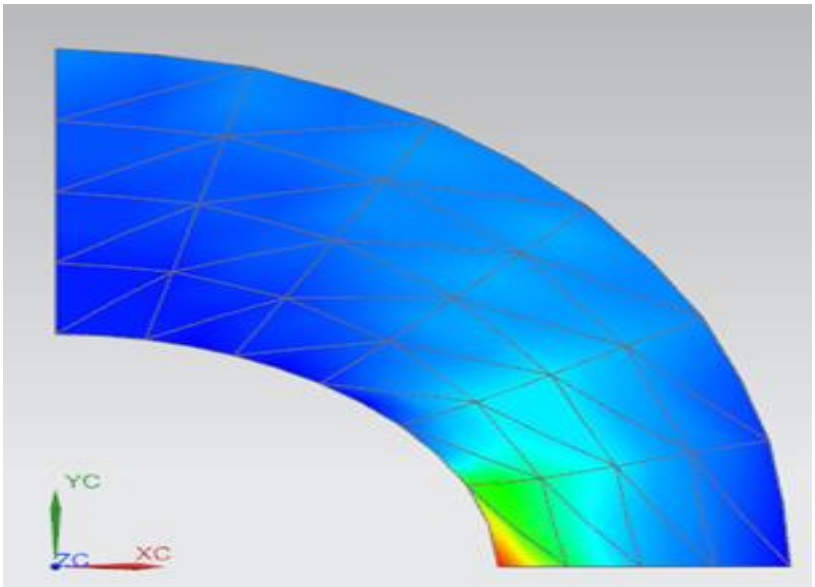

Ilustración 7.2: Test BN1.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output: Tensión YY [MPa] (dirección AB) en punto D.	**Benchmark**	***Nastran***	**Error**	***Samcef***	**Error**
Linear quad – malla basta	92,7	62,1	30,6	56,3	36,4
Linear quad – malla fina		79,6	13,1	75,8	16,9
Parabiolic quad – malla basta		82,1	10,6	79,9	12,8
Parabiolic quad – malla fina		89,9	2,8	90,4	2,3
Linear tria – malla basta		52,9	39,8	47,6	45,1
Linear tria – malla fina		70,8	21,9	67,0	25,7
Parabolic tria – malla basta		76,8	15,9	82,9	9,8
Parabolic tria – malla fina		93,6	0,9	91,7	1,0

Tabla 7.2: Tabla de resultados BN1.

7.3.3. BN2 - Lámina cilíndrica - NAFEMS LE2

Este test es un análisis elástico lineal de una superficie cilíndrica, se valorarán dos situaciones de carga mediante elementos planos (*shell*). Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE2 *(NAFEMS 1986a)*.

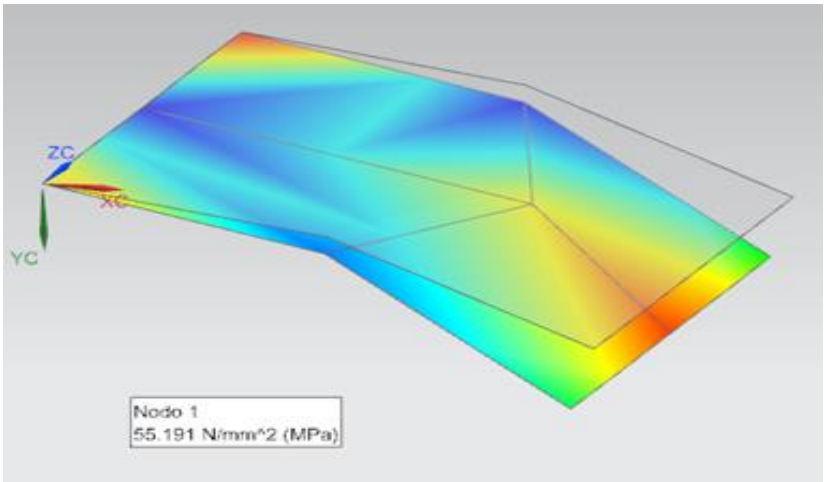

Ilustración 7.3: Test BN2.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output: Tensión TT [MPa] en el punto E.	**Benchmark**	***Nastran***	**Error**	***Samcef***	**Error**
Case 1 - Linear quad	60,0	51,8	8,2	55,2	4,8
Case 1 - Parabolic quad		56,4	3,6	59,2	0,8
Case 2 - Linear quad		51,1	8,9	664,7	604,7
Case 2 - Parabolic quad		56,4	3,6	222,2	162,2

Tabla 7.3: Tabla de resultados BN2.

Como puede apreciarse en la *tabla 7.3*, los resultados del segundo caso se alejan en exceso del valor benchmark. Después de estudiar la fuente de error, se concluye que:

i) No se han podido reproducir correctamente las condiciones de las cargas expuestas en el enunciado.
ii) El programa tiene carencias en la integración de superficies para elementos tan deformados como los del enunciado original.

7.3.4. BN3 - Lámina semiesférica - NAFEMS LE3

Este test es un análisis elástico lineal de una superficie semiesférica, se utilizarán mallas bastas y finas de elementos bidimensionales tipo *shell*. Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE3 *(NAFEMS 1986b)*.

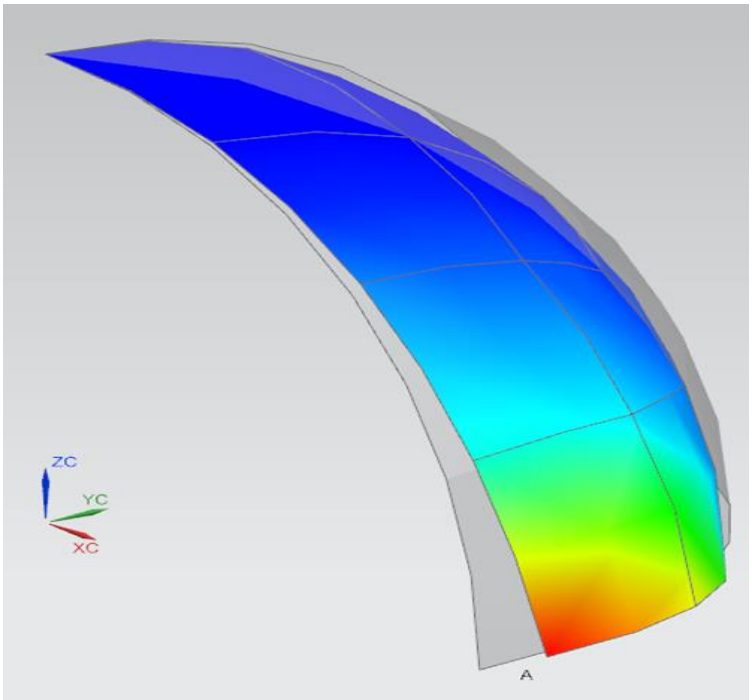

Ilustración 7.4: Test BN3.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output: Desplazamiento [mm] en dirección X del punto A.	**Benchmark**	***Nastran***	**Error**	***Samcef***	**Error**
Linear quad – malla basta	185	184,8	0,2	135,4	49,6
Linear quad – malla fina		186,5	1,5	185,9	0,9
Parabolic quad – malla basta		141,6	43,4	158,7	26,3

Tabla 7.4: Tabla de resultados BN3.

7.3.5. BN4 - Ménsula de con sección en Z - NAFEMS LE5

Este test es un análisis elástico lineal de una ménsula con sección en Z, se utilizarán mallas de elementos planos (*shell*). Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE5 *(NAFEMS 1986c)*.

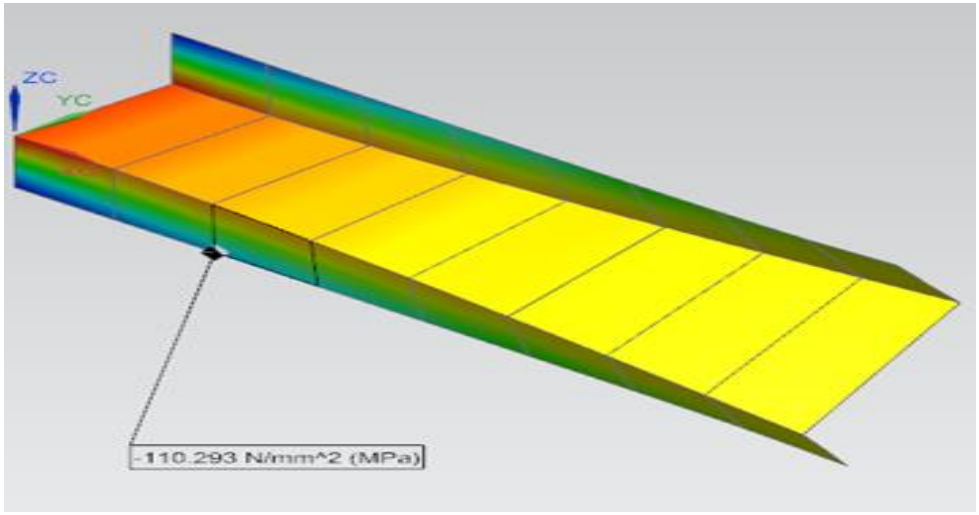

Ilustración 7.5: Test BN4.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output: Tensión axial (XX) en el plano medio del punto A [MPa]	**Benchmark**	***Nastran***	**Error**	***Samcef***	**Error**
Linear quad	-108,0	-111,0	3,0	-103,4	4,6
Parabolic quad		-110,3	2,3	-110,3	2,3

Tabla 7.5: Tabla de resultados BN4.

7.3.6. BN5 - Lámina sesgada – NAFEMS LE6

Este test es un análisis elástico lineal de una lámina sesgada, se utilizarán mallas bastas y finas de elementos bidimensionales tipo *shell*. Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE6 *(NAFEMS 1989)*.

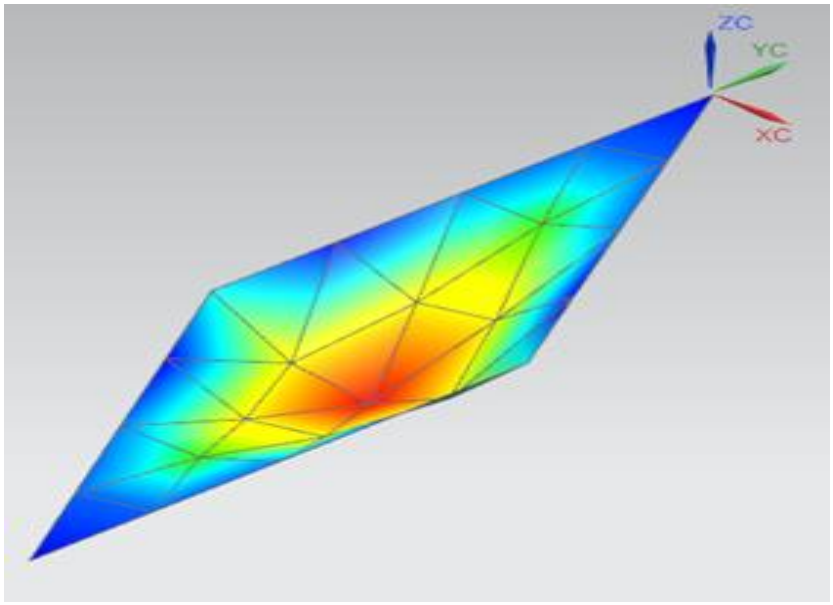

Ilustración 7.6: Test BN5.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output: Tensión principal máximo [MPa] en el nodo central de la lámina.	**Benchmark**	***Nastran***	**Error**	***Samcef***	**Error**
Linear quad – malla basta	0,802	0,325	0,477	1,560	0,758
Linear quad – malla fina		0,683	0,119	0,997	0,195
Parabolic quad – malla basta		0,625	0,177	0,672	0,130
Parabolic quad – malla fina		0,719	0,083	0,661	0,141
Linear tria – malla basta		0,396	0,406	1,184	0,382
Linear tria – malla fina		0,720	0,082	0,930	0,128
Parabolic tria – malla basta		0,926	0,124	0,572	0,230
Parabolic tria – malla fina		0,857	0,055	0,776	0,026

Tabla 7.6: Tabla de resultados BN5.

7.3.7. BN6 - Presión en placa gruesa - NAFEMS LE10

Este test es un análisis elástico lineal de una placa gruesa elíptica, se utilizarán mallas bastas y finas de elementos sólidos. Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE10 *(NAFEMS 1990)*.

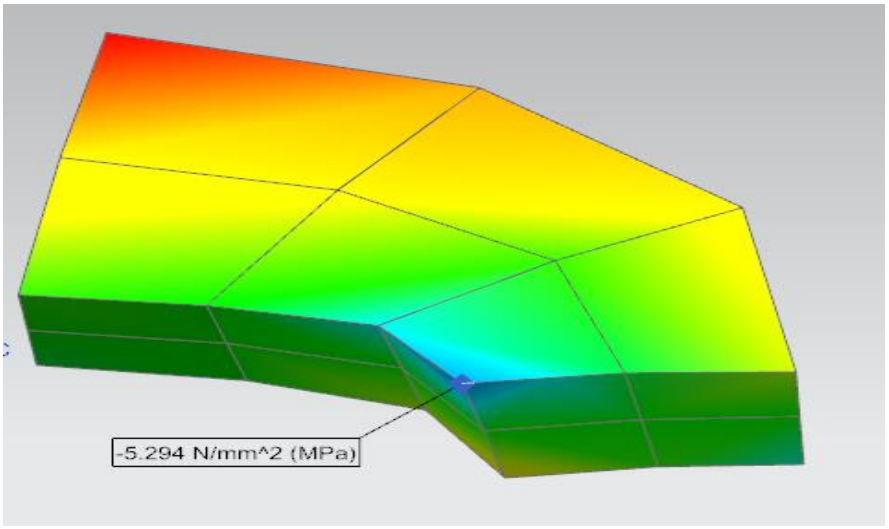

Ilustración 7.7: Test BN6.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Output: Tensión [MPa] YY (dirección AB) en el punto D.	**Benchmark**	***Nastran***	**Error**	***Samcef***	**Error**
Linear brick – malla basta	-5,50	-5,41	0,09	-5,29	0,21
Linear brick – malla fina		-5,67	0,17	-5,63	0,13
Parabiolic brick – malla basta		-6,13	0,63	-5,64	0,14
Parabiolic brick – malla fina		-6,04	0,54	-5,63	0,13
Linear wedge – malla basta		-5,94	0,44	-5,60	0,10
Linear wedge – malla fina		-5,83	0,33	-6,14	0,64
Parabolic wedge – malla basta		-5,32	0,18	-6,38	0,88
Parabolic wedge – malla fina		-6,01	0,51	-6,13	0,63
Linear tetra – malla fina		-2,41	3,09	-3,04	2,46
Parabolic tetra – malla fina		-5,28	0,22	-6,01	0,51

Tabla 7.7: Tabla de resultados BN6.

7.4. Conclusiones

Una vez realizada toda la batería de problemas, se determina *NX Samcef* como un *solver* válido para el análisis de elemento finitos, en el rango de la simulación elástica lineal. *Samcef* cumple razonablemente con la correcta reproducción de los problemas mecánicos estáticos lineales. Asimismo, el presente estudio ha dejado datos interesantes y algunas afirmaciones generalizables.

La primera generalización que puede pronunciarse es que los elementos parabólicos parecen ser los que mejor funcionan en *Samcef*. Tales elementos generalmente convergen con mayor rapidez en relación al número de elementos, cuando de afinan las mallas, en comparación con *Nastran*. Del mismo modo, los elementos lineales solamente parecen converger más rápido, en función de la cantidad de elementos, en un par de problemas.

Por el contrario, se puede observar una tendencia generalizada de los elementos lineales a devolver resultados menos precisos cuando se calcula con *Samcef*. En conclusión, se remarca que el uso de elementos parabólicos genera, normalmente, resultados más precisos que los elementos lineales, a igual número de elementos. Nótese que tales elementos son también más caros, puesto que los cálculos con elementos parabólicos requieren más tiempo, a igual número de elementos. Este hecho es causa del elevado número de nodos que tiene cada elemento parabólico. Dado que los elementos lineales son más baratos, muchas veces se debe tener en cuenta su uso, sobretodo en cálculos con elevadas cantidades de elementos.

A pesar de los resultados razonables obtenidos, se ha encontrado problemática y resultados imprecisos en el test de la lámina cilíndrica (NAFEMS LE2). Tales imprecisiones parecen ser debidas a una incorrecta aplicación de las cargas (dirección errónea) y a una pésima calidad de malla, tanto en densidad como geometría de los elementos. Estos hechos no niegan que *Samcef* sea capaz de solucionar correctamente el test, sino que, al parecer, la carga no se encuentra bien aplicada. Asimismo, al re*solver* con una malla fina y regular, se corrobora que la calidad de la malla es también causante del error comentado.

En cuanto a los elementos tridimensionales, estos solo han sido utilizados en el último test, que paradójicamente (en comparación con los elementos bidimensionales) parece indicar que los elementos tetraédricos resultan más precisos en *Samcef*. Sucede lo contrario con la velocidad de convergencia en función del número de elementos de la malla, que parece ser más elevada con los elementos tetraédricos en *Nastran*. Dicho test apunta también que los elementos tipo *wedge* resultan ser los elementos tridimensionales menos precisos en cálculos con *Samcef*. Asimismo, también se ha podido valorar que los elementos tipo *brick* tienden a reproducir con *Samcef* resultados más precisos que con *Nastran*.

A modo de resumen final, se realiza una tabla comparativa de los errores promedio de los casos estudiados. En ella aparecen tanto los errores generados por *NX Nastran* como por *NX Samcef*. Nótese que para el cálculo del error promedio no se han tenido en cuenta los resultados reportados en el segundo caso del test BN2, por no ser razonablemente admisibles.

	Nastran	***Samcef***
Error promedio	7,5%	10,0%

Tabla 7.8: Promedio de errores (a excepción de los resultados BN2 – case 2).

Como puede apreciarse en la *tabla 7.8*, *NX Nastran* parece ser más preciso y mejor reproductor de la realidad, con un error relativo promedio del 7,5%. Asimismo, el error promedio producido en las simulaciones mediante *NX Samcef* se sitúa en torno al 10% para casos estáticos lineales, sin tener en cuenta los resultados comentados del segundo caso del test BN2, los cuales no se han aceptado como válidos por los motivos expuestos anteriormente.

8. Elección del componente a estudiar

8.1. Introducción

Una vez validado el *solver* a utilizar y previamente a realizar la simulación mecánica, es necesario determinar el componente de automoción a estudiar. Se desea encontrar un componente que represente una dificultad de simulación media. Si bien siempre se pueden hacer simplificaciones e hipótesis, se busca que la simulación mecánica se corresponda con la realidad. Por tanto, no es conveniente focalizar el estudio en un componente que represente una dificultad demasiado elevada. Asimismo, se desea realizar un trabajo potente y con fundamento, por lo que se descartan elementos demasiado sencillos.

8.2. Posibles Componentes

Se considera descartar componentes sencillos de analizar y se realiza una lista de posibles componentes:

- Barras del reposacabezas
- Biela
- Arandelas de fricción del pistón
- Árbol de levas del motor
- Brazo de suspensión

Una vez se han listado estos cinco posibles componentes de un vehículo, se debe proceder a determinar los factores de decisión.

8.3. Factores de decisión

Se estipulan una serie de factores que afectan en diferente medida a la dificultad de cálculo y simulación:

- **Cargas**: se trata del factor de decisión más influyente, puesto que para realizar una buena simulación es necesario conocer las cargas que actúan sobre el componente. Será necesario determinar con precisión el modulo y dirección de todas las cargas, así como los apoyos y anclajes de la pieza. Un componente con muchas cargas no tiene por qué ser excesivamente complicado de simular, siempre y cuando se conozcan dichas fuerzas.

- **Movimiento**: en relación al factor de las cargas, el movimiento puede ser también altamente influyente. Es sabido que los cuerpos en movimiento reciben fuerzas de inercia, como se ha comentado anteriormente, es necesario conocer todas las cargas sobre el componente. Por este motivo será de vital importancia conocer también sus patrones de movimiento.

- **Condiciones de contorno**: el tercer factor identificado son las condiciones de contorno cuando el componente se encuentra en el ciclo de trabajo. Para una simulación precisa es necesario conocer los rangos de temperatura de trabajo. Asimismo, el medio que envuelve la pieza puede jugar un papel importante en el caso de ser un fluido viscoso.

- **Geometría**: lógicamente no todos los componentes tienen la misma geometría. Puesto que deberá diseñarse la pieza elegida en CAD, es necesario que no sea extremadamente compleja. No interesa invertir más horas en diseño que en simulación mecánica, puesto que este no es un proyecto de diseño.

- **Material**: otro factor influyente en la elección del componente es el material de este. Para una simulación precisa son más adecuados materiales que trabajen en sus zonas elásticas, de esta manera la simulación es lineal y el cálculo queda al alcance. Es importante también contar con información precisa sobre el material de fabricación para poder introducir los datos en el programa.

- **Contactos**: por último, aunque no menos importante, se tiene en cuenta el número y tipo de contactos que deberán simularse. Los contactos son puntos conflictivos a la hora se simular mecánicamente componentes, puesto que todo contacto supone una no linealidad en el sistema. Para realizar un cálculo adecuado en cuanto a nivel de dificultad, es necesario mantenerse conceptualmente lo más cerca de los casos lineales.

Determinados los factores y los posibles componentes, se puede proceder a realizar un estudio de selección para determinar sobre que componente ejecutar el estudio mecánico.

8.4. Proceso de selección

Se ha considerado realizar la selección del componente mediante un análisis del valor técnico. Para realizar dicho proceso, es necesario asignar un valor a cada factor en los diversos componentes.

En el caso que se ocupa, se ha caracterizado la complejidad y viabilidad de cada factor con una nota entre el uno y el cinco. El valor 5 indica una simulación altamente viable respecto el factor que evalúa. Por el contrario, un factor con valor 1 indica una futura simulación altamente compleja o imposibilidad de obtener una caracterización adecuada.

Así pues, se procede a realizar la tabla de evaluación y la selección mediante el valor técnico resultante de cada componente.

	Barras del reposacabezas	Biela	Arandelas de fricción	Árbol de levas del motor	Brazo de suspensión
Cargas	1	5	1	3	4
Movimiento	2	5	4	5	3
Condiciones de contorno	4	3	1	2	3
Geometría	4	4	5	3	1
Material	5	3	5	4	2
Contactos	1	4	1	2	1
Valor técnico	**2,8**	**4,0**	**2,8**	**3,2**	**2,3**

Tabla 8.1: Tabla de valor técnico.

Una vez calculado el valor técnico, puede observarse como el mejor resultado es obtenido por la biela de un motor de combustión interna. La biela será, entonces, el componente escogido para la realización del estudio mecánico. Asimismo, los demás componentes se descartan por obtener un valor técnico inferior.

Se procede a exponer brevemente las principales dificultades de cada componente descartado en el proceso de selección mediante el valor técnico:

- **Barras del reposacabezas**: el esfuerzo en caso de impacto depende de su masa propia y de la fuerza que ejerce la cabeza sobre él. Esta fuerza se debe extraer de un modelo del asiento completo y con modelo de cuerpo humano. El tema de los contactos también es influyente puesto que el contacto la mayoría de ellos implican simulaciones no lineales en este caso.

- **Arandelas de fricción**: trabajan mayoritariamente por contacto con el pistón y la camisa de éste. Esta característica complica en exceso la simulación.

- **Árbol de levas:** como en el caso de las arandelas, este componente trabaja continuamente con fricción contra las levas. Este hecho puede salvaguardarse mediante la imposición de una carga rotativa o variable en los guiadores de las levas, pero no deja de generarse una simulación demasiado complicada. Asimismo, las condiciones de contorno y de trabajo pueden ser difíciles de determinar.

- **Brazo de suspensión:** es el componente con menor valor técnico, esto es debido a que trabaja en continuo movimiento irregular y las condiciones de contorno son altamente variables. Además, el material y la geometría pueden

ser muy difíciles de determinar puesto que posiblemente son información confidencial de los fabricantes.

8.5. Conclusión

Mediante el método del valor técnico, se ha llegado a determinar que el componente a estudiar la biela de un motor de combustión interna alternativo. Este componente deberá ser analizado, determinado y caracterizado en las posteriores fases del proyecto.

Ilustración 8.1: Biela fabricada por Saenz Group. Fuente: www.saenzgroup.net.

9. Estudio del componente

9.1. Introducción

Una vez determinada la biela de un motor de combustión interna alternativo como el componente a estudiar, debe realizarse un estudio exhaustivo de dicho componente para su futura caracterización y diseño.

Con el objetivo de caracterizar el componente biela, el presente documento se divide en cinco campos de estudio concretos:

- **Función**: caracterización general. Exposición de la función de una biela así como breve historia de su evolución y partes que la componen
- **Materiales**: caracterización de materiales de fabricación. Exposición detallada de los materiales más habituales en la producción de bielas en el sector de la automoción.
- **Fabricación**: caracterización del proceso de fabricación. Exposición del proceso completo de producción de bielas más común, así como las diferencias presentes con diferentes procesos de producción alternativos.
- **Cargas:** definición y caracterización de las cargas aplicadas en la biela.

- **Restricciones**: caracterización de las condiciones de contorno y trabajo de una biela. Exposición detallada las restricciones que afectan a la biela.

9.2. Función

La biela de un motor de combustión interna alternativo es el elemento encargado de transmitir la fuerza recibida en el pistón hasta el cigüeñal. Entre estos tres componentes (pistón, biela y cigüeñal) los motores de combustión interna alternativos son capaces de convertir la potencia generada, durante la combustión del combustible, en movimiento circular.

Así pues, la biela es un componente indispensable en un motor de combustión alternativo. Tales motores tienen siempre una biela por cada pistón, pero pueden tener varias bielas para un único cigüeñal.

Dicha biela debe ser suficientemente resistente como para soportar los esfuerzos de compresión, tracción y pandeo que se generaran en ella. Asimismo, la biela debe ser diseñada teniendo en cuenta que su longitud determina el comportamiento del motor, ya que influye en la carrera del pistón y los ciclos de funcionamiento. La longitud viene determinada en gran medida por las revoluciones que alcanza el motor, puesto que a mayores revoluciones se generan mayores inercias.

9.2.1. Biela común

El componente biela está formado por la biela en sí, el sombrerete y los pernos de unión. La biela propiamente dicha se divide en tres partes, el pie, el cuerpo y la semicabeza. Diferenciar estas partes favorece la correcta colocación y caracterización de la biela durante las fases de diseño y producción del motor.

Ilustración 9.1: Esquema de piezas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

En la *il. 9.1* se representan todas las piezas de una biela así como la nomenclatura de las partes diferenciadas. Nótese que paradójicamente el pie se suele representar en la parte superior del esquema, asimismo, la cabeza de la biela acostumbra a aparecer en debajo.

Estos componentes se unen al pistón por el orificio del pie de la biela, usualmente mediante bulones flotantes *(il. 9.2) (Aficionadosalamecanica.com 2014)*. Dada que esta debe ser una unión móvil, se añade un casquillo antifricción al orificio del pie de la biela. Por tal de mantener dicho casquillo lubricado, se perfora el denominado taladro de engrase en la parte superior del pie de la biela. Este pequeño orificio permitirá lubricar el casquillo y el bulón con el aceite circulante en el interior del motor.

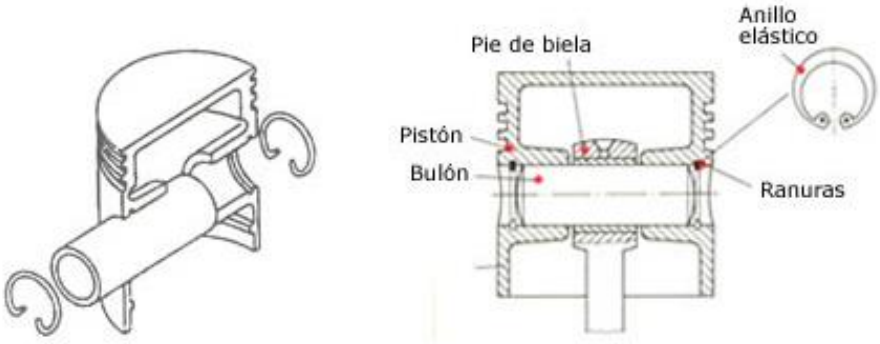

Ilustración 9.2: Esquema de la unión con bulón flotante.
Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

La *il. 9.2* esquematiza la unión recientemente expuesta, e identifica las partes de esta. En el presente estudio no se contempla el diseño ni caracterización del casquillo antifricción, pero se considera necesaria la descripción del mismo.

Por otro lado, la cabeza de la biela se encuentra unida a otro componente, en este caso, el cigüeñal. Este elemento hace la función de manivela de un mecanismo biela-manivela. El cigüeñal debe ir unido a todas las bielas del motor. La unión de la cabeza de la biela con el cigüeñal se fija mediante pernos, identificados en la *il. 9.1*. Puesto que esta también es una unión móvil, es necesaria la colocación de cojinetes para reducir fricciones y mantener la zona lubricada, se denominan cojinetes de biela.

Durante las fases de diseño de un componente hay que tener siempre presente el proceso de montaje del mismo. En el caso que se ocupa, el motor de un vehículo es un sistema muy complejo y con pocos espacios libres. Por este motivo, en busca de facilitar el montaje de las bielas en el cigüeñal, la cabeza de la biela se encuentra dividida en dos mitades.

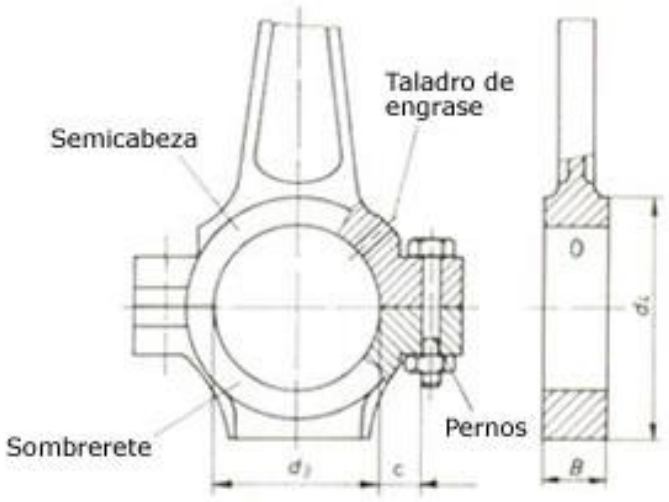

Ilustración 9.3: Esquema de la cabeza de biela. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

Tal y como puede observarse en la *il. 9.3*, el sombrerete se une a la semicabeza de la biela mediante pernos. Por tal de asegurar una buena unión entre ambas mitades de la cabeza, se acostumbra a realizar estrías de anclaje en ambas superficies. Tales estrías aumentan el rozamiento entre superficies y descargan parte de los esfuerzos de cizallamiento que deben soportar los pernos.

De manera semejante a la unión del pie de la biela, en este caso también se perfora un taladro de engrase para mantener el cojinete de biela lubricado constantemente. En el estudio de cargas de la biela se tratará el tema de la fricción con los cojinetes tanto en la cabeza como en el pie de la biela.

El plano de unión entre las dos mitades de la cabeza puede ser horizontal (*il. 9.3*) o inclinado (*il. 9.4*). La segunda variante se suele implementar para bielas de grandes dimensiones, por tal de facilitar la extracción de la misma a través del cilindro. También es usual encontrar uniones de plano inclinado en motores que soportan cargas elevadas *(Aficionadosalamecanica.com 2014)*. En el apartado de cargas y dimensionado se estudiará más en profundidad las diferentes disposiciones y dimensiones.

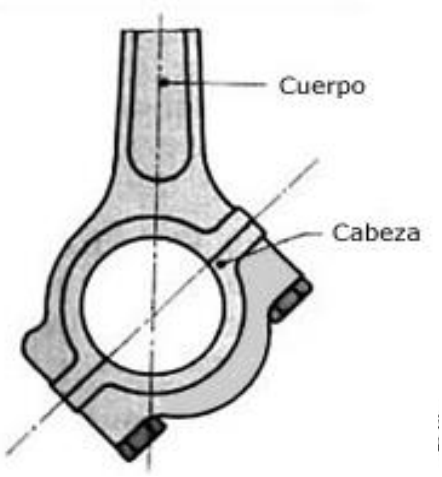

Ilustración 9.4: Plano de unión inclinado. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

9.2.2. Biela para motores en V

Los motores con disposición de los cilindros en V requieren de bielas específicas. En estos casos, cada muñequilla del cigüeñal debe alojar dos bielas. Asimismo, los motores en disposición W deben alojar tres bielas en cada muñequilla y los motores en estrella cinco bielas por muñequilla. En la *il. 9.5*, se puede observar la disposición de los cilindros y las bielas en un motor en V y en W.

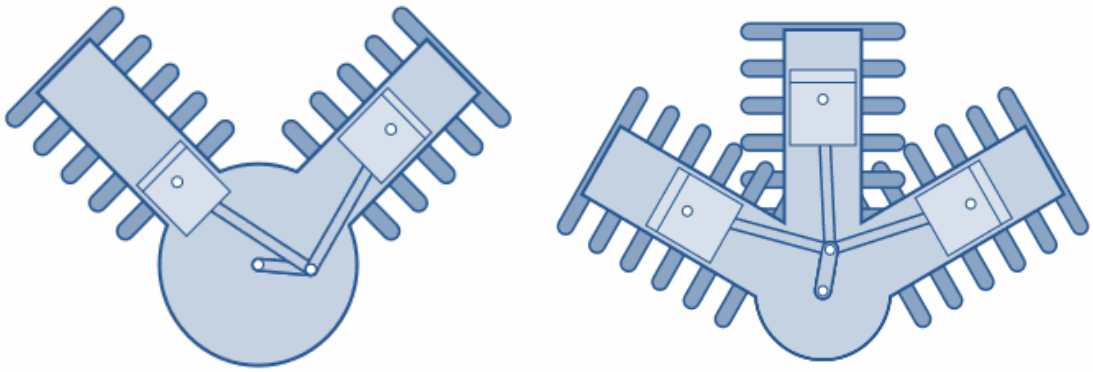

Ilustración 9.5: Motores en V y en W. Fuente: upload.wikimedia.org.

Dado que los motores en línea y los motores en V son más comunes que otras disposiciones *(Christian M. 2010),* el presente apartado del estudio se centrará en las bielas diseñadas para motores en V. Existen tres maneras diferenciadas de realizar la unión entre bielas y cigüeñal para motores con disposición en V. Principalmente existen tres tipos de unión, las bielas conjugadas, ahorquilladas o articuladas:

- **Bielas conjugadas:** se trata del método más implantado en la actualidad *(Aficionadosalamecanica.com 2014)*. Es la unión más semejante a la realizada en las bielas de motores en línea. En este caso ambas bielas son simétricas y tienen un movimiento independiente y se articulan sobre la misma muñequilla del cigüeñal.

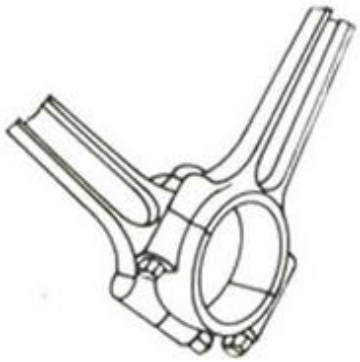

Ilustración 9.6: Bielas conjugadas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

Como puede observarse en la *il. 9.6*, existe una zona de contacto entre ambas bielas. Esta superficie es crítica en este tipo de unión. Por tal de reducir el rozamiento, se deben tratar superficialmente ambas bielas en la zona de desgaste.

- **Bielas ahorquilladas**: estas bielas se unen al cigüeñal mediante un único casquillo, sobre el que se acoplan ambas bielas. El casquillo de fija a la biela principal y hace de bulón a la biela secundaria. En este caso, las bielas no son idénticas ni simétricas, pero si realizan movimientos independientes.

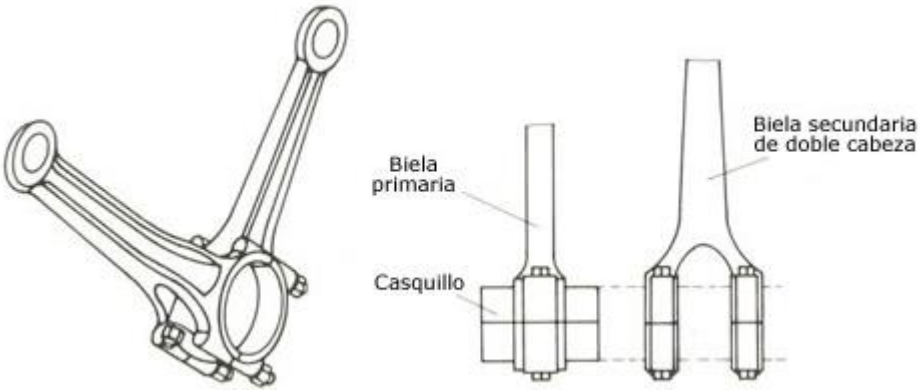

Ilustración 9.7: Bielas ahorquilladas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

Como puede observarse en la *il. 9.7*, la zona de contacto y de fricción entre ambas es mucho más reducida que en las bielas conjugadas. Por este motivo las carreras se realizan prácticamente sin esfuerzos añadidos. Este sistema de unión es más costoso y tiene el inconveniente de tener un solo casquillo para ambas bielas. Dicho casquillo deberá soportar los esfuerzos de las dos bielas y su desgaste será mayor que en las otras configuraciones.

- **Bielas articuladas**: se trata del método más económico y sencillo de unión. En este caso se produce la biela principal con un alojamiento en un costado que permitirá la articulación de la biela secundaria.

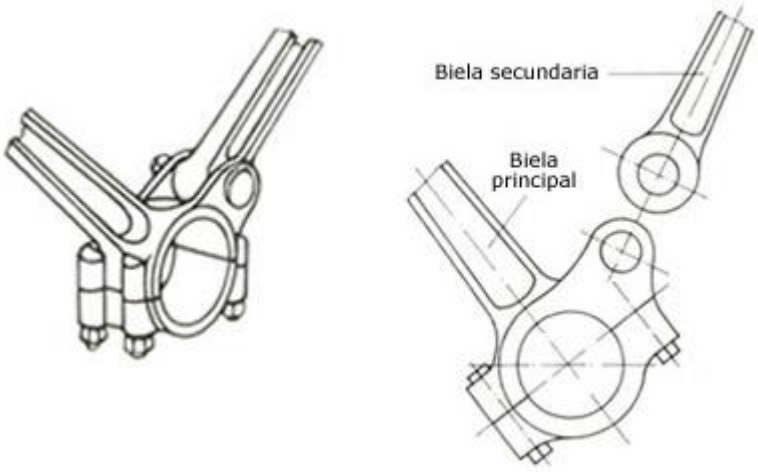

Ilustración 9.8: Bielas articuladas. Fuente: www.aficionadosalamecanica.net.

En este caso también se instala un único cojinete que recibe esfuerzos de ambas bielas. Además, con este tipo de unión, aparecen esfuerzos de flexión sobre la biela principal debidos al empuje que realiza la biela secundaria sobre la articulación.

Así pues, se concluye la definición de las bielas comunes y las bielas de motores no lineales. Una vez determinadas las funciones del componente biela y de sus partes, se procederá a detallar y caracterizar los aspectos relacionados con los materiales de fabricación y el propio proceso productivo.

9.3. Materiales

Para la producción de bielas no existe un único material válido. En función de las solicitaciones, las dimensiones o rasgos característicos de cada motor, se fabricará la biela con diferentes materiales. Aun así, existen tres materiales ampliamente utilizados por la industria de la producción de bielas *(Carley 2008)*.

El material de producción de una biela de automoción debe ser altamente resistente a esfuerzos, tanto de tracción como de compresión. Asimismo, también deben ser tenaces y tener una resistencia a fatiga elevada. Como se ha indicado anteriormente, la masa de una biela determina directamente sus inercias. Por este motivo, la densidad del material es también una propiedad a tener en cuenta. Propiedades de mecanizado y ductilidad son también determinantes, puesto que afectan al proceso productivo.

9.3.1 Acero

El acero es el material por excelencia en la fabricación de automóviles. Se trata de una aleación de hierro y carbono, como tal, puede tener infinidad de variantes. Además a la aleación se le pueden añadir otros elementos para otorgar determinadas propiedades.

En la producción de bielas para automóviles comerciales se utiliza mayoritariamente el acero AISI 4340, este es conocido normalmente como acero de grado aeronáutico por su resistencia y durabilidad superior *(Carley 2008; Precious Industries 2014a; Castañeda Avendaño 2012; Edwards 2007)*. El acero AISI 4340 tiene una composición determinada, descrita a continuación *(AZO Materials 2012)*:

Elemento	Contenido (%)
Hierro, Fe	95,195 – 96,33
Níquel, Ni	1,65 – 2,00
Cromo, Cr	0,700 – 0,900
Manganeso, Mn	0,600 – 0,800
Carbono, C	0,370 – 0,430
Molibdeno, Mo	0,200 – 0,300
Silicio, Si	0,150 – 0,300
Azufre, S	0,0400
Fósforo, P	0,0350

Tabla 9.1: Composición química del acero AISI 4340. Fuente: www.azom.com.

Como puede observarse en la *tabla 9.1*, para obtener acero AISI 4340 se debe añadir a la aleación de hierro y carbono elementos como níquel, cromo o manganeso, entre otros. Dichos elementos otorgan al acero dureza, resistencia, ductilidad y resistencia a fatiga *(Carley 2008)*.

Según la norma AISI, este acero se considera de baja aleación con Ni-Cr-Mo, con un contenido medio del 3% para estos tres elementos. Asimismo, la nomenclatura indica que el acero debe contener cerca de 4‰ de carbono *(Ingemecánica.com 2003)*.

La utilización de este acero en concreto para la fabricación de bielas se debe a sus propiedades físicas, térmicas y mecánicas. Se procede a exponer dichas propiedades en tres tablas diferenciadas *(AZO Materials 2012):*

Propiedades físicas	Valor
Densidad	7,85 g/cm3
Punto de fusión	1427°C

Tabla 9.2: Propiedades físicas AISI 4340. Fuente: www.azom.com.

Propiedades térmicas	Valor
Coeficiente de expansión térmica	12,3 µm/m°C
Conductividad térmica	44,5 W/mK

Tabla 9.3: Propiedades térmicas AISI 4340. Fuente: www.azom.com.

Ambas tablas de propiedades son extensibles para el acero AISI 4340, independientemente de los tratamientos térmicos posteriores. Estos tratamientos no modifican las propiedades físicas o térmicas. En cambio, los tratamientos térmicos sí modifican las propiedades mecánicas de los aceros. Por este motivo, la *tabla 9.4* identifica valores para las propiedades mecánicas finales de un acero AISI 4340 recocido *(AZO Materials 2012)*.

Nótese pues que no todos los aceros AISI 4340 son iguales, los tratamientos térmicos pueden variar las propiedades del acero en gran medida. Propiedades como la resistencia a tracción, a cedencia o la dureza dependen de la temperatura de forjado y de los tratamientos posteriores. Variaciones en la temperatura o procedimiento de templado pueden modificar ampliamente las siguientes propiedades, llegando incluso a poder duplicar algunos valores *(Carley 2008)*. Así pues, tómense los valores de la *tabla 9.4* como valores de referencia.

Propiedades mecánicas	Valor
Resistencia a tracción	745 MPa
Resistencia a la cedencia	470 MPa
Módulo de Bulk	140 GPa
Módulo de corte (G)	80 GPa
Módulo elástico (E)	190-210 GPa
Ratio de Poisson	0,27-0,30
Elongación en rotura	22%

Tabla 9.4: Propiedades mecánicas AISI 4340 (1). Fuente: www.azom.com.

Propiedades mecánicas	Valor
Reducción de área	50%
Dureza, Brinell	217
Dureza, Knoop (obtenido de dureza Brinell)	240
Dureza, Rockwell B (obtenido de dureza Brinell)	95
Dureza, Rockwell C (obtenido de dureza Brinell)	17
Dureza, Vickers (obtenido de dureza Brinell)	228

Tabla 9.5: Propiedades mecánicas AISI 4340 (2). Fuente: www.azom.com.

Este acero es también localizable en las listas de aceros según SAE, pero con diferente nomenclatura. En nomenclatura SAE, el acero AISI 4340 corresponde con los aceros SAE J1397, J404 y J412 *(AZO Materials 2012)*. Asimismo, la nomenclatura de dicho acero equivale a los siguientes códigos, según las normas *(Granta 2016)*:

Norma (país)	Denominación
ISO	683/VIII type 4
UNE	F-1272
ASTM	4340
New BS (UK)	817M40
Old BS (UK)	En 24
UNS (USA)	G43400
W.-Nr. (Alemania)	1.6565
DIN (Alemania)	40NiCrMo6
UNI (Italia)	40NiCrMo7
JIS (Japón)	SNCM439

Tabla 9.6: Tabla de equivalencias según norma. Fuente: www.grantadesign.com.

El acero AISI 4340 no es el único utilizado en la producción de bielas. En función del fabricante, también se podrán encontrar bielas en el mercado fabricadas con aceros como 42CrMo4, 43CrMo4, 44csr4, C-70, EN-8D o SAE1141, entre otros. *(Precious Industries 2014a).* Asimismo otras empresas como Deutz declaran en su página web utilizar acero forjado C45 o C70 *(Deutz Spain 2012)*.

9.3.2 Aluminio

El aluminio es también un material utilizado en la producción de bielas debido a su reducida densidad. Esto permite reducir las masas en rotación, por tanto, se reducen las fuerzas de inercia que afectan a diferentes componentes del motor, como la biela o el cigüeñal. Gracias a esta reducción de masa, las bielas de aluminio permiten a los fabricantes producir motores aptos para girar hasta catorce mil revoluciones por minuto *(Precious Industries 2014b).* La reducción de masa genera también reducción de las vibraciones del motor, así como la posibilidad de implantar pistones más resistentes y pesados.

A pesar de estos beneficios, las bielas de aluminio tienen una vida de uso más reducida que las de acero. Este hecho se debe a que el aluminio tiene peores propiedades mecánicas de resistencia a tracción o a fatiga. Por este motivo, las bielas de aluminio suelen producirse únicamente para alta competición, donde los motores se reemplazan al cabo de unas pocas carreras de uso *(Carley 2008).*

Como se ha expuesto, las bielas de aluminio tienen un uso relativamente restringido debido a su acelerada fatiga. Por este motivo, no se considera oportuno realizar el estudio sobre bielas de aluminio. El presente proyecto pretende analizar mecánicamente bielas utilizadas en automóviles comerciales de gama media, no deportivos de gama alta o vehículos exclusivos de competición.

9.3.3 Titanio

Otro de los materiales ampliamente utilizados en la producción de bielas es el titanio. Del mismo modo que con el aluminio, su reducida densidad justifica la producción de bielas de titanio. Como se ha expuesto anteriormente, este hecho propicia que los motores con bielas de titanio puedan alcanzar las catorce mil revoluciones por minuto *(Precious Industries 2014b)*.

A pesar de su reducida densidad, el titanio se caracteriza por sus elevadas propiedades mecánicas. Una biela de titanio pera cerca del 23% menos que una de acero comparable en resistencia y tiene aproximadamente la misma durabilidad. Estas elevadas propiedades mecánicas en relación a la reducida densidad propician que el titanio sea un metal altamente demandado en la actualidad. Hecho que ha disparado el precio del metal, dando lugar a un aumento representativo del coste de las bielas de titanio *(Carley 2008)*.

En el apartado anterior se determina que el aluminio se descarta de ser estudiado en el presente. De un modo semejante, el titanio se descarta también, pero en este caso por sur reducida implantación. Al ser el titanio un metal de coste tan elevado, su aplicación se reduce únicamente a motores de altas prestaciones o de competición.

9.4. Fabricación

Conocidos ya los materiales utilizados en la fabricación de bielas, tiene cabida la exposición detallada del proceso productivo completo de este componente. Tal y como se detalla en el apartado anterior, las bielas se producen en la actualidad con tres materiales diferenciados; acero, aluminio y titanio. En el presente apartado se procederá a exponer las etapas y fases más comunes en la producción de bielas.

9.4.1. Proceso productivo común para bielas de acero

Como se expone en el apartado de materiales, el acero AISI 4340 es el más común en la fabricación de bielas. El proceso productivo comienza con barras de dicho acero en bruto. Tales barras son cortadas en trozos más pequeños *(il. 9.9)*. Por tal de adaptarse mejor al proceso de forja que se realizará. Las dimensiones de dichas barras son semejantes a las de la biela terminada, pero siempre son exceso de material. En algunos casos, tan solo el 20% de todo el material forjado formará la biela definitiva, el resto será viruta *(Edwards 2007).*

Ilustración 9.9: Barras de acero en bruto. Fuente: www.mooregoodink.com.

Estas barras son calentadas en hornos hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 1200ºC *(Logan 2014; CATerpillar 2012)*. Una vez alcanzada la temperatura, con el material en condiciones plásticas, un juego de matrices de estampación moldean las barras hasta obtener la pieza en bruto. La geometría de las bielas en bruto es semejante a la forma definitiva del componente pero sin la perforación de los orificios.

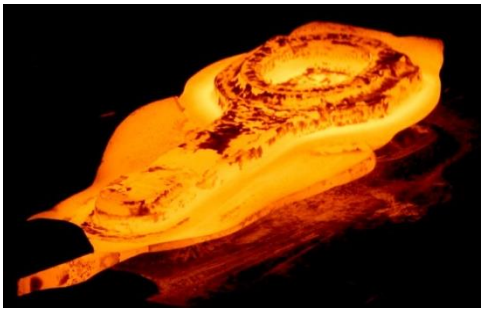

Ilustración 9.10: Biela en bruto con rebaba. Fuente: www.mooregoodink.com.

Como puede observarse en la *il. 9.10*, la biela en bruto abandona los moldes de estampación con la rebaba característica del proceso de forjado. Seguidamente se deben eliminar las rebabas para obtener la biela en bruto más adecuada *(il. 9.11),* posteriormente ese sobrante será refundido.

Ilustración 9.11: Biela en bruto sin rebaba. Fuente: www.acast.com.au.

El proceso de forjado otorga al material la estructura orientada longitudinalmente. Esta característica distribución de la estructura da a la biela la resistencia necesaria a esfuerzos de tracción y compresión. Asimismo, la estructura orientada protege de posibles roturas, dado que una grieta tenderá siempre a expandirse en la dirección de las líneas de textura y no en dirección transversal, donde hay una sección mucho menor. En la *il. 9.12* puede apreciarse una pieza en bruto de acero, con la estructura claramente orientada en dirección longitudinal *(CATerpillar 2012)*.

Una vez se ha obtenido la biela en bruto con la estructura orientada, esta se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. A continuación, con la pieza en bruto terminada, se procede a la primera fase de la mecanización de la misma, el desbastado. En tal proceso se deberán ajustar las dimensiones y realizar las perforaciones, pero se mantiene un pequeño exceso de material en determinadas superficies, que posteriormente será eliminado en la fase de acabado para ajustar las tolerancias finales.

Ilustración 9.12: Pieza de acero en bruto con estructura orientada. Fuente: CATerpillar.

En la actualidad, prácticamente la totalidad de mecanizados se realiza en maquinaria controlada por computadora. Estas máquinas son capaces de realizar orificios o tornear superficies con elevadas precisiones dimensionales.

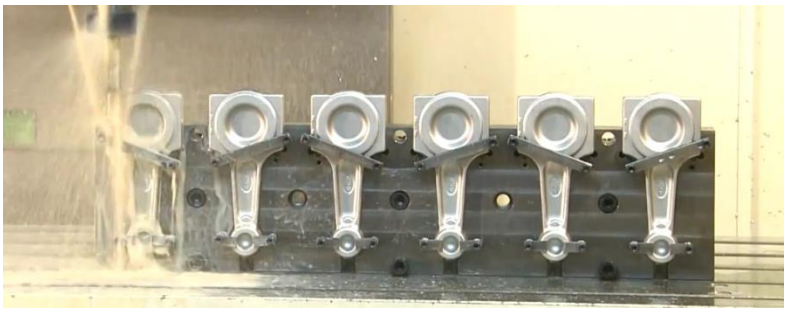

Ilustración 9.13: Proceso de mecanizado de bielas en bruto. Fuente: Recoal Europa.

Puede observarse en la *il. 9.13* como las máquinas automáticas de desbastado realizan las operaciones con total autonomía. En el caso de dicha ilustración se observa un brazo robótico que prepara la superficie donde se realizará la perforación para los pernos de la cabeza de la biela.

En este punto la pieza en bruto se encuentra desbastada, con las perforaciones realizadas y la geometría prácticamente finalizada. En este punto del proceso productivo, algunas empresas realizan un granallado. Dicho tratamiento elimina los posibles defectos del forjado, como escamas de picaduras, agujeros o micro grietas.

El proceso de granallado también induce esfuerzos de compresión en la superficie. De este modo se precarga la superficie a compresión, y se reducen las posibilidades de agrietado, ya que las grietas se generan por tracción *(CATerpillar 2012; Edwards 2007)*.

Ilustración 9.14: Granalla de diferentes tamaños. Fuente: www.blastingexperts.com.

El proceso de granallo consiste en hacer impactar granalla contra la superficies del componente. El tamaño de la granalla a utilizar, así como su geometría, puede variar en función del acabado final deseado. En la *il. 9.14* puede apreciarse dos tipos de granalla diferentes, en tamaño y geometría.

Seguidamente, se procede a aplicar los tratamientos térmicos a la biela que otorgarán los valores definitivos de dureza y configuraran la estructura metálica final. Dichos tratamientos dependen de la empresa productora, pero usualmente todas realizan un tratamiento de bonificado.

Ilustración 9.15: Bielas entrando en horno de tratamiento térmico.
Fuente: Hot Rods Products.

El tratamiento de bonificado es habitual en aceros que requieren elevada resistencia mecánica. Dicho tratamiento térmico consta de dos etapas diferenciadas. Primeramente se realiza un temple, para ello se introducen las bielas en hornos *(il.9.15)* hasta alcanzar temperaturas de austenización.

Algunas empresas productoras de bielas pueden llegar a mantener las bielas hasta diez horas en los hornos de temple *(Hot Rods Products 2014)*. Posteriormente, una vez salen las bielas del horno, se sumergen en aceite para ser enfriadas rápidamente y completar así el temple.

El proceso de templado endurece notablemente el componente tratado, pero también genera elevadas tensiones internas (acritud), reduciendo así la tenacidad de la pieza. Por tal de reducir estas tensiones, se realiza el proceso de revenido. Este proceso consiste también en la introducción de las bielas en un horno y su posterior enfriado, pero en este caso el horno se encuentra a menor temperatura. Según el fabricante Hot Rods, sus hornos de revenido calientan hasta 350ºC durante unas pocas horas *(Hot Rods Products 2014)*. Posteriormente las bielas son enfriadas al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Gracias al templado se asegura una elevada dureza al componente, asimismo, el revenido sacrifica parte de esta dureza por tal de recuperar la tenacidad requerida en una biela de motor. Si fuera necesario, el proceso de revenido podría repetirse para seguir reduciendo la acritud del acero, pero se reduciría también la dureza de la pieza.

Las bielas continúan ahora su proceso productivo con el acabado por mecanizado. Es en este punto cuando se requiere de máquinas capaces de otorgar las elevadas precisiones dimensionales requeridas en una biela. La precisión y las superficies a acabar dependerán del fabricante. De todos modos, todos ellos realizarán un proceso de acabado en las caras interiores de los orificios *(il. 9.16)*, puesto que los casquillos deben insertarse con elevada precisión.

Ilustración 9.16: Acabado de precisión del orifico de la cabeza de la biela.
Fuente: Recoal Europa.

Seguidamente, se procede a insertar el casquillo del pie de la biela. Tal casquillo se inserta a presión en el orificio previamente calibrado. Si fuera necesario, puede procederse a calentar el pie de la biela para generar una pequeña dilatación que permitirá insertar el casquillo con más facilidad. En este punto del proceso, el fabricante puede optar también por aplicar un tratamiento superficial químico, dotando a la biela de protección anticorrosión extra.

Finalmente con la geometría y las propiedades mecánicas finales alcanzadas, queda únicamente el proceso de separación de las semicabezas de la biela. En este punto de la fabricación ambas semicabezas se encuentras unidas, ya que es la mejor manera de asegurar el calibrado del orificio mayor. Los fabricantes tienen en este punto dos opciones, se puede realizar la separación mediante un corte o mediante fractura.

Ilustración 9.17: Separación por rotura. Fuente: www.neweng.org.uk.

La opción de realizar la separación mediante fractura es la que genera mejor resultado de ambas *(EPS Formación 2015)*. Como se puede observar en la *il. 9.17*, este procedimiento genera una superficie rugosa única, de este modo, ambas semicabezas encajarán a la perfección y se asegura la precisión dimensional del orifico. Además al tratarse de superficies rugosas, generan mayor coeficiente de rozamiento, por lo que los pernos sufrirán menos los esfuerzos de cizallamiento.

La separación por rotura se realiza mediante la generación de una pequeña marca que determina el punto de corte *(il. 9.18)*. Posteriormente, una prensa aplica presión hasta generar la fractura de la cabeza de la biela.

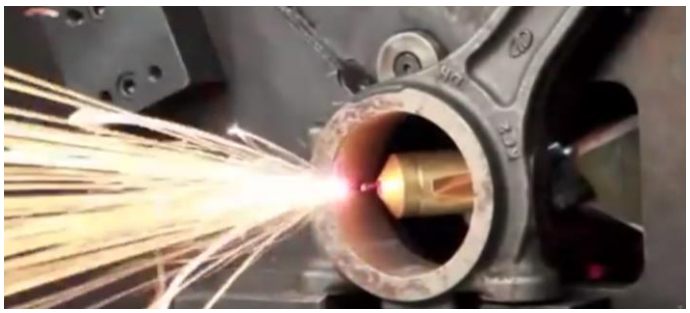

Ilustración 9.18: Marcaje del punto de corte mediante láser. Fuente: Scantech Laser.

En la *il. 9.18* puede observarse como la marca de corte se realiza mediante un cabezal láser. Asimismo, en la *il. 9.19* puede apreciarse como una prensa con punta de cuña aplica presión hasta conseguir fracturar la cabeza justo en la zona deseada.

Finalmente, con la separación de las semicabezas de la biela concluye su producción.

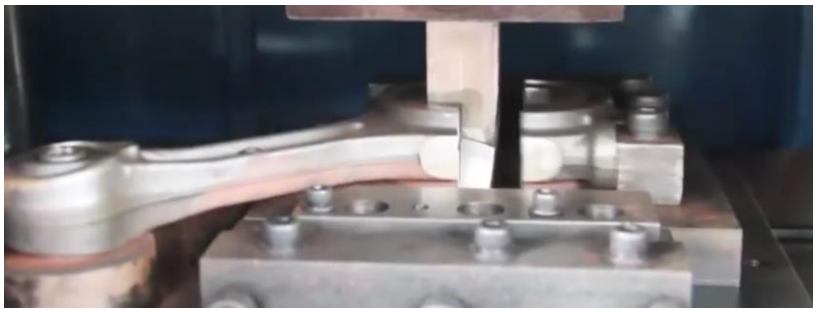

Ilustración 9.19: Separación de las semicabezas mediante presión. Fuente: Scantech Laser.

Como se ha expuesto anteriormente, este es el método más común para fabricar bielas de acero forjado. Cada fabricante puede variar la producción, pero en líneas generales todos deben seguir este proceso. Seguidamente se procederá a exponer otros métodos de fabricación para las bielas que no son de acero.

9.4.2. Proceso productivo para bielas aluminio y titanio

Como se ha expuesto en el apartado de materiales, las bielas más habituales en el mercado son de acero, aun así también existen las bielas de aluminio y titanio. Estas bielas se fabrican mediante mecanizado total de un bloque del material deseado *(Castañeda Avendaño 2012)*.

Al no existir proceso de forja o temple, los materiales a mecanizar tienen ya el valor de dureza definitivo. Habitualmente, las bielas terminadas son sometidas a un tratamiento térmico por tal de liberar las tensiones internas generadas durante el mecanizado *(Edwards 2007)*.

Del mismo modo que con las bielas de acero, el producto resultante final puede ser tratado químicamente para proteger las superficies de agentes externos. Esta etapa es opcional para el titanio, pero poco útil para el aluminio, puesto que este genera una capa protectora de óxido de aluminio a lo largo de su superficie exterior.

9.4.3. Proceso productivo por pulvimetalurgia

Finalmente, existe un proceso productivo alternativo a los dos expuestos anteriormente. Se trata de la conformación de bielas mediante pulvimetalurgia. Dicho proceso consiste en la conformación de las bielas definitivas mediante el compactado y sinterizado de partículas de metal. Al terminar el conformado, las bielas tienen ya prácticamente el acabado dimensional definitivo, a falta de realizarse un acabado de precisión en las superficies comprometidas y calibrado de los orificios.

En la actualidad, este proceso se utiliza para conformar bielas de aleación Ti-6Al-4V, entre otras, usada por su alta resistencia a fatiga y optima temperatura de trabajo *(Albeza 2011)*. El proceso productivo mediante pulvimetalurgia es interesante dado que permite fabricar bielas a menor coste, aun así, para elevadas prestaciones, son preferibles bielas de acero, aluminio o titanio *(Logan 2014)*.

En conclusión, actualmente las bielas de aleaciones especiales de acero son fabricadas mediante forjado. Las bielas de aluminio o titanio habitualmente son producidas mediante un mecanizado completo. Finalmente, en algunos casos, se fabrican bielas con procesos pulvimetalúrgicos con materiales como el titanio.

9.5. Cargas

Una vez definido el material de fabricación de la biela a estudiar, así como los procesos productivos y las alteraciones que provocan, se procede a determinar las cargas. Dado que las cargas no son constantes a lo largo de un ciclo motor, cabe mencionar que se estudiarán varias posiciones y situaciones de carga de la biela. Dichas posiciones a simular se definirán más adelante.

El presente estudio de las cargas que interaccionan con la biela contempla la determinación y valoración de todas las cargas no térmicas. Como se expone en las especificaciones del proyecto, la realización del estudio térmico implica una excesiva carga de trabajo para el presente proyecto.

Por tal de poder definir las cargas, se debe determinar el tipo de motor, combustible, presión de trabajo o la carrera de la biela, entre otros. Por tal de utilizar valores moderados y habituales, se considera utilizar como base de medidas un motor convencional de gasolina, especificadas posteriormente en las hipótesis de simulación.

Durante los cuatro tiempos de un motor alternativo convencional, la biela puede sufrir la aplicación de tres cargas diferenciadas: presión, fricciones y fuerzas inerciales:

9.5.1. Presión

La fuerza causada por la presión es la carga más intuitiva y sencilla de determinar, la presión que ejercen los gases en el pistón durante la combustión se traduce en una fuerza aplicada en el pie de la biela. Como se ha comentado anteriormente, se estudiarán varios casos de carga, atendiendo a diferentes ángulos (β) entre la biela y el eje del cilindro. Cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior, dicho ángulo tiene un valor de 0º para motores centrados, y en el punto muerto inferior, 180º.

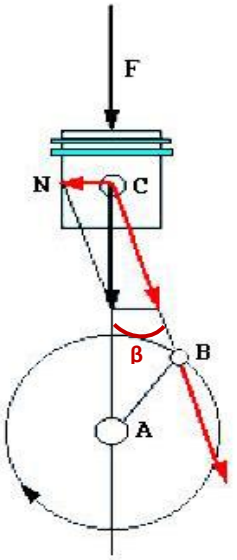

Ilustración 9.20: Esquema de aplicación de la presión. Fuente: seat600.mforos.com.

Así pues, en función de la presión en la cámara de combustión y del ángulo β, el pie de la biela sufrirá las siguientes cargas:

- Carga en dirección axial: $T = P \cdot S \cdot \cos(\beta)$
- Carga en dirección cortante: $N = P \cdot S \cdot \sin(\beta)$

Siendo 'P' la presión en la cámara de combustión en pascales y 'S' la superficie del émbolo en metros cuadrados.

9.5.2. Fricción

Dado que la biela es una pieza móvil, se generarán cargas de fricción en las uniones móviles con otros elementos. Localizado en la superficie cilíndrica interior del pie de la biela, se encontrará aplicado el rozamiento con el bulón del pistón. De un modo semejante, en la superficie interior de la cabeza, se encuentra aplicado el rozamiento con el cigüeñal. Cabe mencionar también el efecto la fricción entre la camisa y el pistón, que desencadena una reducción de la presión efectiva.

La determinación de estas fricciones depende de muchos factores, tales como el tipo de lubricante, la situación de desgaste o los materiales, por lo que debe realizarse de manera empírica. Dicha adquisición y análisis de datos corresponde a trabajos completos de investigación. Por este motivo, se ha optado por caracterizar los rozamientos según los datos o fórmulas empíricas obtenidos por otros autores.

Primeramente, la obtención de los valores de fricción en los cojinetes, para ello se recurre a los apuntes de teoría de motores de combustión alterna de la Universidad de la República, Montevideo *(Corallo, Vassallo y Dall'Orto 2003)*. En dichos apuntes se detalla la fórmula empírica obtenida por Bishop, que caracteriza las pérdidas de fricción en los cojinetes de un motor de gasolina según:

$$F[N] = 41.4 \cdot \frac{D_{piston}}{L_{carrera}} \cdot N \cdot 0.14 \cdot S$$

Siendo '*N*' la velocidad angular del motor en revoluciones por minuto y '*S*' la superficie de aplicación de la fuerza del cojinete, en metros cuadrados.

Seguidamente, se procede a asignar las pérdidas por fricción en el contacto cilindro-camisa. Tales fuerzas se estudian en el trabajo de investigación realizado por J. Casanova y V. Aguirre, para la Revista iberoamericana de ingeniería mecánica *(Casanova y Aguirre 2005)*. En dicho trabajo, se puede apreciar que la fuerza de fricción depende lógicamente del movimiento del pistón, y se caracteriza según la siguiente gráfica *(il. 9.21*) en función del ángulo girado por el cigüeñal.

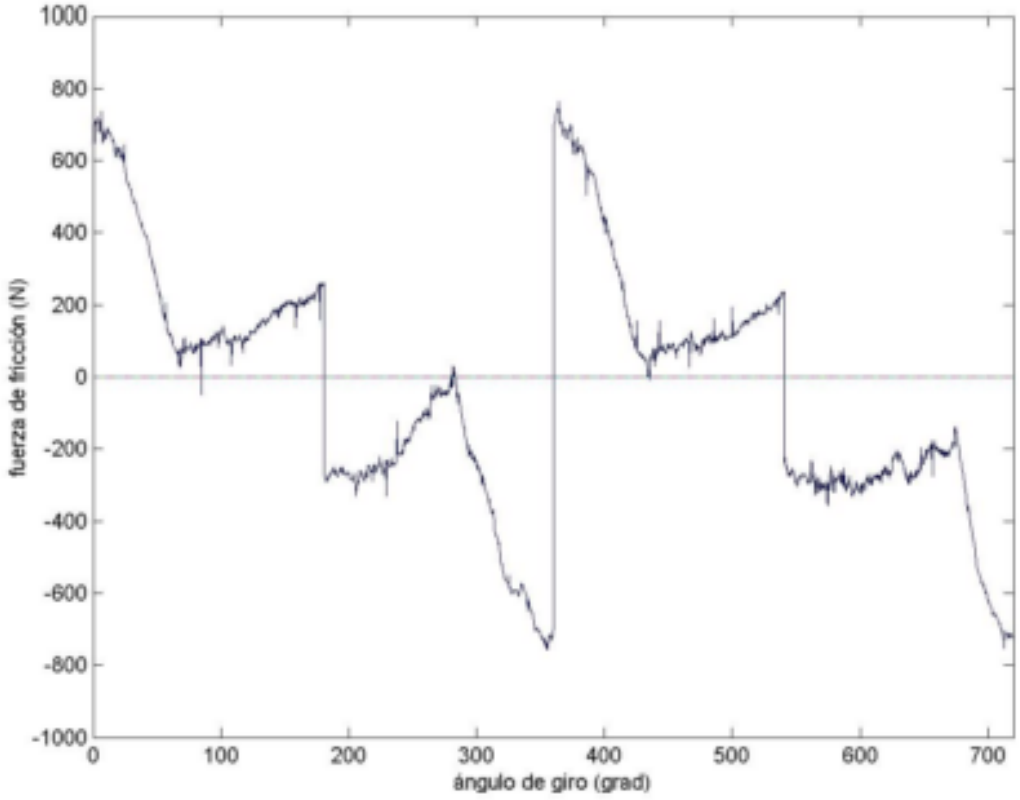

Ilustración 9.21: Fuerza de fricción camisa-pistón. Fuente: Casanova y Aguirre.

La *il. 9.21*, corresponde al estudio empírico de las fuerzas de fricción según el ángulo girado, para el caso de arrastre sin compresión, para un motor de gasolina de características detalladas en el artículo. Así pues, según el caso de simulación, se aplicarán cargas de fricción entre cero y setecientos néwtones.

9.5.3. Fuerzas inerciales

Tales cargas son las generadas por las variaciones en la velocidad de los componentes, es decir, las aceleraciones que estos sufren durante el ciclo de trabajo. Dado que el conjunto pistón-biela-cigüeñal contempla tanto movimiento alterno como circular, se hallarán dos fuerzas inerciales correspondientes a cada uno de los movimientos.

Así pues, por tal de determinar las cargas inerciales causadas por el movimiento alterno, se caracteriza la aceleración lineal del pistón según los apuntes de teoría del profesor Ángel Comas *(Comas 2010)*:

$$a = r\omega^2(\cos\theta + \lambda \cdot \cos 2\theta)$$

Siendo 'r' el radio del cigüeñal, 'ω' la velocidad angular en radianes por segundo, 'θ' el ángulo girado en radianes y 'λ' el cociente entre el radio de la manivela (cigüeñal) y la longitud de la biela.

También del libro de apuntes se obtiene las aceleraciones máximas y mínimas, obtenidas en el PMS, en el PMI y en el ángulo α que cumple $arc\cos\left(-{}^{1}/_{4\lambda}\right)$:

$$a_{PMS} = r\omega^2(1+\lambda)$$

$$a_{PMI} = -r\omega^2(1-\lambda)$$

$$a_{\alpha} = r\omega^2\left\{\cos\left[\cos^{-1}\left(-{}^{1}/_{4\lambda}\right)\right] + \lambda \cdot \cos\left[2 \cdot \cos^{-1}\left(-{}^{1}/_{4\lambda}\right)\right]\right\}$$
$$= r\omega^2\left[\frac{-1}{4\lambda} + \lambda \cdot \left(\frac{1}{8\lambda^2} - 1\right)\right]$$

Una vez conocida la aceleración del pistón en función del ángulo girado, para determinar las fuerzas de inercia simplemente hay que multiplicar dicha aceleración por la masa alterna (cantidad de masa que se considera en movimiento alternativo) del sistema biela-pistón.

La masa alterna es considerada como la suma de la masa total del pistón (pistón y segmentos), el bulón de unión, los cojinetes y dos tercios de la biela *(Comas 2010)*. Esta división de la biela es necesaria puesto que es el único componente que se mueve tanto en rotación como en translación alterna.

De un modo semejante, para calcular la fuerza inercial de rotación hay que determinar la aceleración centrífuga causada por el movimiento circular del cigüeñal:

$$a_n = r\omega^2$$

La aceleración centrífuga, y por tanto la fuerza inercial de rotación, varía de dirección según el ángulo girado, manteniéndose siempre normal a la trayectoria y en sentido hacia afuera.

9.6. Restricciones

Seguidamente a determinar las cargas que afectan a la biela, corresponde definir las restricciones de la misma. Tal y como se ha expuesto anteriormente, el movimiento de la biela es una composición entre movimiento alternativo lineal y movimiento rotativo.

Las restricciones en una biela se verán únicamente localizadas en las uniones del pie con el émbolo y la cabeza con el cigüeñal. La restricción aplicable al pie de la biela debe ser tal que permita únicamente la traslación en la dirección axial de la misma. Por otro lado, el movimiento de la cabeza de la misma se verá supeditado al movimiento de la muñequilla del cigüeñal.

10. Simulación mecánica de una biela

10.1. Introducción

Conocido y estudiado el componente a estudiar, la biela, se procede a ejecutar la simulación mecánica mediante elementos finitos. Tal y como se expone previamente, las más utilizadas son las bielas de acero AISI 4340, fabricadas mediante forja. Habitualmente con plano de unión recto entre sombrerete y cuerpo, mediante pernos.

La simulación realizada en el presente proyecto pretende ilustrar las cargas mecánicas que afectan a la biela. Se toman valores moderados y habituales, utilizando como base de medidas un motor convencional de gasolina de un turismo, definido a continuación en las hipótesis de trabajo.

A pesar de haber validado el *solver NX Samcef*, los resultados obtenidos son generados mediante la aceptación de hipótesis que alejan el problema de la realidad. Dado este hecho, cabe mencionar que nunca deberán ser tomados como realidad absoluta e indiscutible. Las herramientas de simulación mediante elementos finitos permiten obtener información básica útil de los patrones tensionales. Dicha información se puede utilizar para localizar errores prematuros de diseño o identificar las posibles zonas de máxima tensión. En ningún caso deberá ser considerarse como información empírica, puesto que proviene de una simulación implementada mediante hipótesis.

10.2. Hipótesis

Por tal de poder simular el comportamiento mecánico de la biela, son necesarias ciertas hipótesis de trabajo. Todas ellas se realizan atendiendo a las limitaciones impuestas en las especificaciones del proyecto:

- El estudio se limitará a la simulación lineal.
- El estudio se limitará al carácter mecánico del ciclo de trabajo.
- No se realizará estudio térmico alguno del componente.
- Tampoco se generarán estudios y simulaciones de respuesta en frecuencia.
- No es necesario un dimensionado y diseño completo del componente.

Una vez remarcadas las limitaciones, se procede a listar las hipótesis utilizadas. Dado que los fundamentos técnicos que avalan las hipótesis se encuentran detallados en el *anexo II*, en el presente documento solo se exponen brevemente las mismas.

- Material: AISI 4340.
- Régimen de trabajo constante.
- Sentido de giro del cigüeñal: antihorario.
- Tres posiciones de la biela a estudiar: PMS (saco 1), PMI (caso 2) y ángulo concreto en carrera de aspiración (caso 3).
- Instante de estudio posterior al paso por los puntos muertos (PMS y PMI).
- Geometría unificada.
- Elementos a utilizar: tetraédricos parabólicos.
- Presión en la cámara de combustión según caso:

Caso; ángulo girado	Presión en la cámara de combustión
Caso 1; 0º (PMS)	Presión máxima (P).
Caso 2; 180º (PMI)	Presión atmosférica.
Caso 3; $arc\cos\left(-{}^{1}/_{4\lambda}\right)$	Presión negativa de aspiración ≅ 0.

Tabla 10.1: Presiones en la cámara de combustión.

- Fricción en los cojinetes según *(Corallo, Vassallo y Dall'Orto 2003)*:

$$F[N] = 41{,}4 \cdot \frac{D_{piston}}{L_{carrera}} \cdot N \cdot 0{,}14 \cdot S$$

- Fricción entre camisa y émbolo según caso *(Casanova y Aguirre 2005)*:

Caso; ángulo girado	Fuerza de fricción camisa-émbolo
Caso 1; 0º (PMS)	700 N
Caso 2; 180º (PMI)	300 N
Caso 3; $arc\cos\left(-{}^{1}/_{4\lambda}\right)$	500 N

Tabla 10.2: Fuerzas de fricción camisa-émbolo en cada caso.

- Fuerza inercial alternativa *(Comas 2010)*, aplicada en el pie de la biela:

$$F_a = m_a \cdot a = m_a \cdot r\omega^2(\cos\theta + \lambda \cdot \cos 2\theta)$$

- Masa alterna considerada:

$$m_a = m_{émbolo} + {}^{2}/_{3}\, m_{biela} = 0.5 + {}^{2}/_{3} \cdot 1 = 1{,}17\ kg$$

- No aplicación de la fuerza inercial centrífuga.
- Fuerzas en pie y cabeza: únicamente aplicadas en la mitad correspondiente (según dirección y sentido) de las caras internas cilíndricas *(Kates y Luck 1981).*
- Fuerzas axiales puras.
- Parámetros constructivos del motor *(Comas 2010):*

Parámetro	Valor
N [rpm]	3500
$\omega = N{\cdot}\pi/30$ [rad/s]	366,5
$D = s$ [m]	0,086
$S_{pistón} = \pi \cdot D2/4$ [m]	0,006
$r = s/2$ [m]	0,043
l [m]	0,160
$\lambda = r/l$ [adim.]	0,269
pme [kPa]	910
P [bar]	27

Tabla 10.3: Valores referencia de parámetros constructivos.

Como se ha expuesto previamente, para conocer los fundamentos técnicos que avalan las hipótesis citadas, consultar el *anexo II*. Asimismo, cabe mencionar que en el mismo anexo se encuentra detallado todo el proceso de preparación, simulación y análisis de resultados.

10.3. Geometría y diseño CAD

Tal y como se expone en las especificaciones básicas del proyecto, no es objeto de este el diseñar y dimensionar completamente una biela. Únicamente se debe obtener una geometría valida y trabajar con ella. Por este motivo, se ha decidido utilizar una geometría ya existente, descargada de *www.grabcad.com*, un banco de componentes virtuales en formatos CAD.

De dicha página se ha descargado la biela diseñada por Syed Azhar, que posteriormente ha sido modificada y unificada como se expone en las hipótesis. Como se aprecia en la *il. 10.1*, los taladros de los pernos han sido rellenados, y aunque no se pueda apreciar en la imagen, todos los componentes han sido unidos en un solo cuerpo sólido.

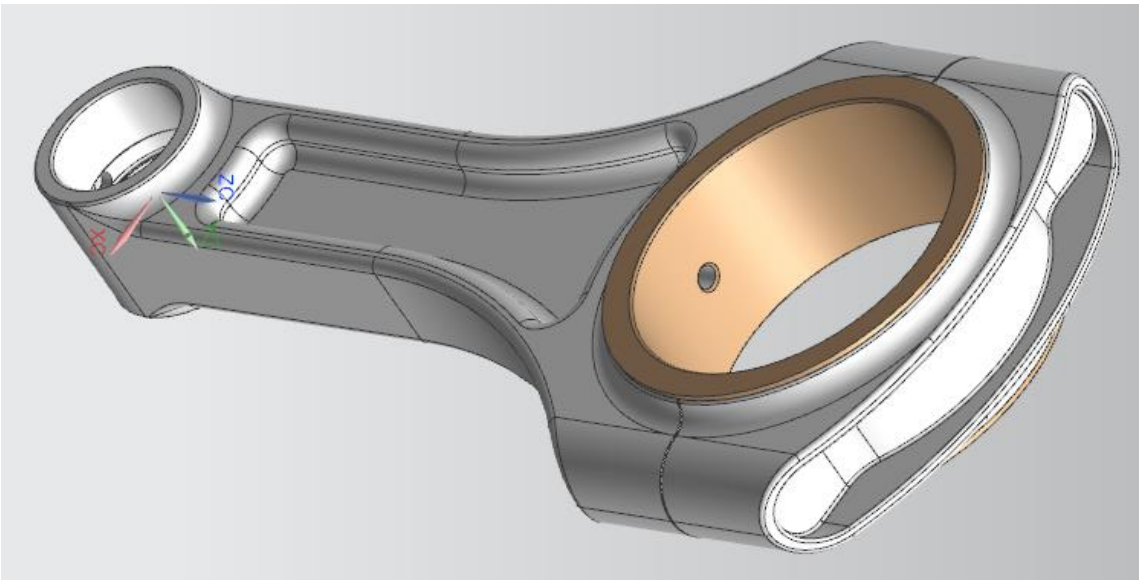

Ilustración 10.1: Diseño CAD de la biela adaptada.

Finalmente, el diseño CAD de la biela se encuentra definido, pudiendo proceder a continuación al mallado del único cuerpo sólido obtenido.

10.4. Mallado

El proceso de mallado de la biela se ha realizado mediante la opción de mallado tetraédrico parabólico automático. De un modo semejante a los apartados anteriores de hipótesis y geometría, la descripción detallada del mallado se expone en el *anexo II*. Por tal de obtener dos calidades de malla diferentes y después poder compararlas, se han generado dos mallas diferenciadas:

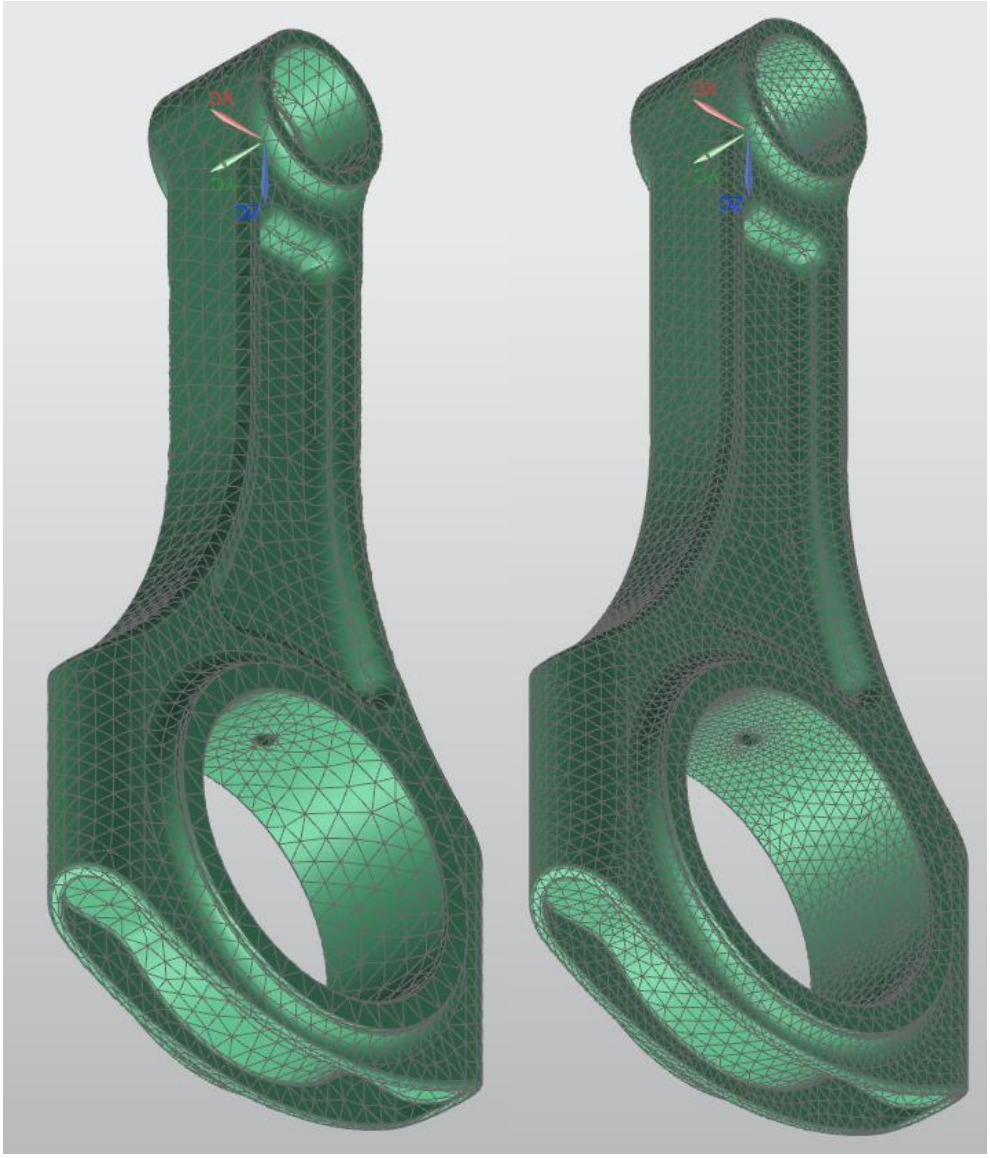

Ilustración 10.2: Mallas resultantes.

Como se aprecia en la *il. 10.2*, las mallas generadas son formadas por el mismo tipo de elementos (tetraédricos parabólicos), pero tienen diferente cantidad de elementos. La malla más basta tiene alrededor de 15.000 elementos, en cambio, la malla más fina está formada por 47.000 elementos.

10.5. Cargas

Seguidamente, después de generar ambas mallas, se procede a aplicar las cargas que afectan a la biela. Como se expone en el estudio de la misma y se detalla en el *anexo II*, cada caso de estudio recibe diferentes cargas. A continuación, se procede a realizar una breve descripción de cada caso de carga.

10.5.1. Caso 1 – PMS

En primer lugar se analiza el caso del PMS, una vez aplicadas todas las hipótesis y las condiciones especificadas, quedan determinadas las cargas:

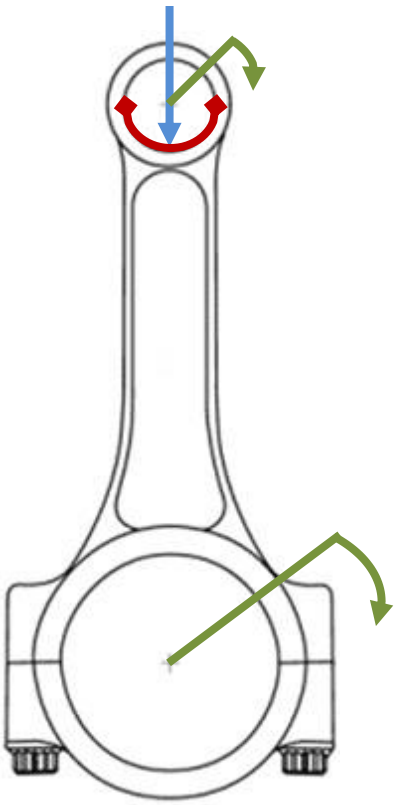

Diagrama 10.1: Esquema de fuerzas del primer caso.

Las fuerzas verticales (azul), aplicadas en el pie son:

$$F_{presión} = 16.200\ N$$

$$F_{fricción} = -700\ N$$

$$F_{inercial} = -8.576\ N$$

Como puede apreciarse, la fuerza de fricción y la inercial tienen el mismo sentido (signo negativo), opuesto al sentido de la fuerza ejercida por los gases en el pistón. Finalmente, la resultante de la suma de estas es (vector azul):

$$F_{total} = 6.924\ N$$

Las fuerzas de fricción de los cojinetes, representadas como el momento que generan sobre el centro de los agujeros (verde):

$$F_{c,pie} = 22\ N$$

$$F_{c,cabeza} = 55\ N$$

Asimismo, en el diagrama de fuerzas de este caso puede apreciarse también la superficie sobre la que actúa la fuerza resultante. Dicha superficie se representa con el trazo rojo en el *diagrama 10. 1*.

Como puede apreciarse realizando un balance de fuerzas, los efectos de los momentos causados por las fuerzas de fricción de los cojinetes serán prácticamente despreciables. Tales fuerzas tienen un orden de magnitud cien veces menos que la fuerza vertical resultante.

10.5.2. Caso 2 – PMI

En segundo lugar se analiza el caso del PMI, una vez aplicadas todas las hipótesis y las condiciones especificadas, quedan determinadas las cargas:

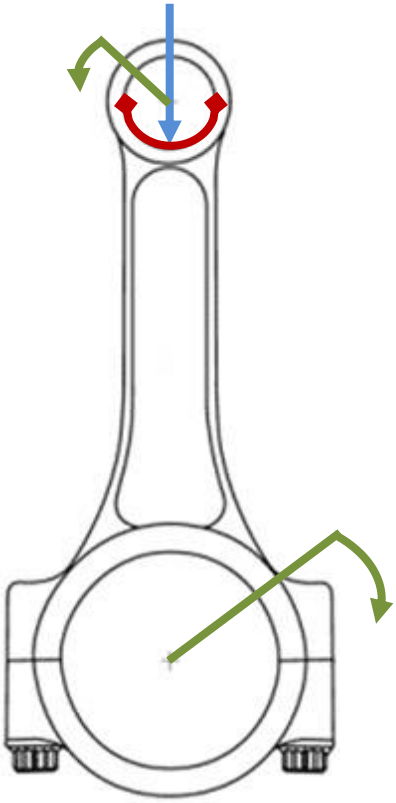

Diagrama 10.2: Esquema de fuerzas del segundo caso.

Las fuerzas verticales (azul), aplicadas en el pie son:

$$F_{presión} = 608\ N$$

$$F_{fricción} = 300\ N$$

$$F_{inercial} = 4.940\ N$$

Como puede apreciarse, todas ellas tienen el mismo sentido. Por ello, la resultante de la suma de estas fuerzas es (vector azul):

$$F_{total} = 5.848\ N$$

Las fuerzas de fricción de los cojinetes, representadas como el momento que generan sobre el centro de los agujeros (verde):

$$F_{c,pie} = 22\ N$$

$$F_{c,cabeza} = 55\ N$$

Asimismo, en el diagrama de fuerzas de este caso también puede apreciarse la superficie sobre la que actúa la fuerza resultante. Dicha superficie se representa con el trazo rojo en el *diagrama 10.2*. Como se puede deducir, esta zona es la misma que en el caso anterior, puesto que la fuerza resultante toma la misma dirección.

Además, se puede apreciar también como la magnitud de la fuerza resultante en el segundo caso es muy parecida a la del primer caso. Tal hecho generará presuntamente tensiones de un orden de magnitud parecido en ambos casos.

Del mismo modo que en el primer caso, se constata que los efectos de los momentos causados por las fuerzas de fricción de los cojinetes serán prácticamente despreciables.

10.5.3. Caso 3 – tita 21,5º

En segundo lugar se analiza el caso de la carrera de admisión, las cargas del cual quedan determinadas a continuación. En este caso en concreto se da la peculiaridad que la biela está inclinada un cierto ángulo β de aproximadamente 5º respecto el eje axial del componente:

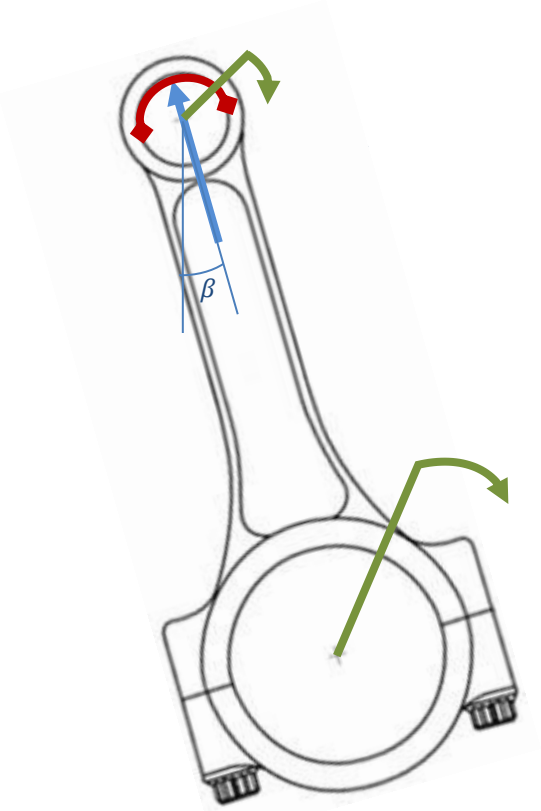

Diagrama 10.3: Esquema de fuerzas del tercer caso.

Las fuerzas axiales (azul), aplicadas en el pie:

$$F_{presión} = -5.487\ N$$

$$F_{fricción} = -500\ N$$

$$F_{inercial} = -502\ N$$

Como puede apreciarse, todas ellas tienen el mismo sentido y la resultante (vector azul), tiene sentido contrario a los dos primeros casos, ejerciendo tracción sobre la biela:

$$F_{total} = -6.489\ N$$

Las fuerzas de fricción de los cojinetes, representadas como el momento que generan sobre el centro de los agujeros (verde):

$$F_{c,pie} = 22\ N$$

$$F_{c,cabeza} = 55\ N$$

En el diagrama de fuerzas de este caso también puede apreciarse la superficie sobre la que actúa la fuerza resultante. Dicha superficie se representa con el trazo rojo en el *diagrama 10.3*. Como se puede deducir, esta zona es la opuesta al caso anterior, puesto que la fuerza resultante toma la misma dirección y sentido contrario.

Además, se puede apreciar también como la magnitud de la fuerza resultante en valor absoluto es muy parecida a los anteriores casos. Tal hecho generará presuntamente tensiones de un orden de magnitud parecido en ambos casos.

Del mismo modo que en los anteriores casos, se constata que los efectos de los momentos de fricción en los cojinetes serán prácticamente despreciables, dado su reducido valor frente a las fuerzas axiales.

10.6. Restricciones

Seguidamente a aplicar las cargas que afectan a la biela, corresponde aplicar las restricciones de la misma. Tal y como se expone en el estudio de la biela, el movimiento que sufre es una composición entre movimiento alternativo lineal y movimiento rotativo.

El movimiento trasnacional del pie de la biela se define (eje *Z* en dirección axial):

Grados de libertad pie	*X*	*Y*	*Z*
Traslación	0	0	libre
Rotación	0	libre	0

Tabla 10.4: Grados de libertad en el pie.

Cabe mencionar que el sistema de coordenadas utilizado se encuentra fijo con la geometría, por lo tanto es no inercial. Este hecho genera que no puedan las direcciones del sistema no correspondan con la dirección de movimiento del embolo. Para solucionar este problema, como se aprecia en la *il. 10.3*, se genera un nuevo sistema (en verde en la imagen) girando 5,66º el sistema original respecto el eje *Y*.

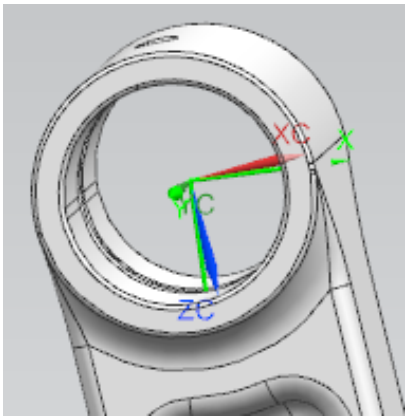

Ilustración 10.3: Sistema de coordenadas alternativo.

Con este nuevo sistema de coordenadas, y únicamente para el tercer caso, se aplicaran los siguientes grados de libertad:

Grados de libertad pie (caso 3)	*X'*	*Y'*	*Z'*
Traslación	0	0	libre
Rotación	0	libre	0

Tabla 10.5: Grados de libertad en el pie (caso 3).

Seguidamente, queda restringir el extremo de la cabeza de la biela. Esta restricción debería permitir el desplazamiento en dirección axial y cortante, aun así, para poder lanzar la simulación es necesario que todas las direcciones con carga alguna se encuentren restringidas en algún punto. Por este motivo se aplica una restricción con los tres grados de traslación fijos, convirtiendo el nodo de aplicación en el punto fijo a la bancada virtual, donde aparecerán las fuerzas de reacción externas.

Grados de libertad cabeza	*X*	*Y*	*Z*
Traslación	0	0	0
Rotación	0	libre	0

Tabla 10.6: Grados de libertad en la cabeza.

Finalmente, con todas las cargas y restricciones aplicadas, se puede proceder a lanzar la simulación, seguido de analizar y exponer los resultados obtenidos.

10.7. Resultados

10.7.1. Predicción

Previamente a obtener los resultados, es conveniente realizar un breve trabajo de predicción y anticipación. Es interesante adelantarse a los resultados para poder después comprobar con más seguridad la precisión de los mismos.

En bielas comunes, los puntos de máximo estrés tensional suelen ser los puntos de falla cuando una biela rompe, dichos puntos son actualmente conocidos y se localizan en las siguientes zonas *(CATerpillar 2012)*:

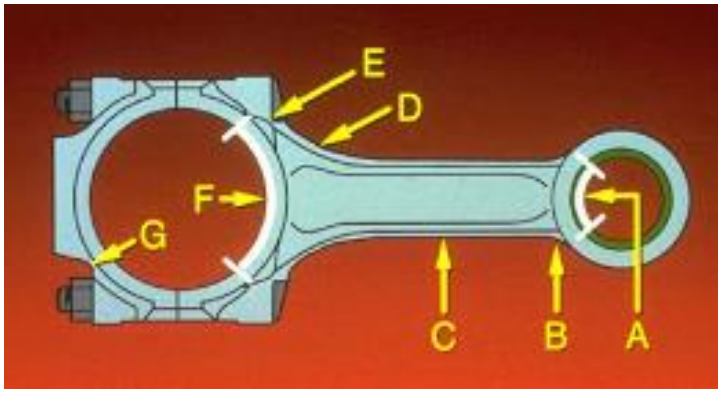

Ilustración 10.4: Puntos de falla comunes. Fuente: CATerpillar.

A. Los 120° inferiores del ojo de biela donde el pistón hace fuerza a través del pasador.
B. La unión entre vástago y ojo de biela.
C. En medio del vástago donde las fuerzas de pandeo son las más elevadas.

D. La unión entre vástago y agujero para el cigüeñal.
E. Los filetes próximos al asiento de la cabeza del perno.
F. Los 120° superiores del agujero para el cigüeñal, donde el pistón aplica al muñón del cigüeñal las cargas de la compresión y la ignición.
G. Los filetes próximos a los asientos de las tuercas.

Conocida esta predicción, se esperan las tensiones máximas en una de las siete zonas citadas anteriormente. Cabe mencionar que las zonas 'E' y 'G' no generarán resultados de tensiones elevadas, dado que, como se ha comentado en las hipótesis, los pernos no han sido implementados en el presente proyecto.

Finalmente, se procede a analizar los resultados de las simulaciones, atendiendo a las tensiones de Von Mises, que contemplan las tensiones en todas las direcciones. A pesar de analizar tales tensiones, se conoce que las bielas trabajan bajo cargas de tracción en el tiempo de admisión del motor, y a compresión en los demás tiempos.

10.7.2. Análisis de resultados

Después de haber realizado las simulaciones de los tres casos con ambas calidades de malla, se procede a la exposición de las conclusiones obtenidas. En primera instancia, cabe remarcar que parece haber una clara convergencia de los resultados, dado que la malla basta reporta resultados muy similares a los obtenidos con la malla más fina. Por este motivo, las siguientes conjeturas se basan únicamente en la malla fina.

Tensiones medias [MPa]	Caso 1 - PMS	Caso 2 - PMI	Caso 3 – tita 21º
Tensión zona 'A'	10	9	4
Tensión zona 'B'	31	28	14
Tensión zona 'C'	22	20	10
Tensión zona 'D'	24	22	11
Tensión zona 'F'	5	4	2

Tabla 10.7: Resultados con malla fina.

Como se expone en el estudio de la biela, el acero resiste hasta 700 MPa a tracción, como se aprecia en la *tabla 10.7*, las tensiones están muy lejos de este valor. A pesar de tal diferencia, en el dimensionado de bielas se debe tener muy en cuenta la fatiga del componente, que resulta ser habitualmente la causa de rotura de las mismas. Considerando un ritmo de giro del cigüeñal de 2000 rpm, a dos ciclos por vuelta realizada, la biela realiza 4000 ciclos de carga completos. Asimismo, para realizar un estudio más exhaustivo y preciso, debería analizarse la fatiga de la biela, puesto que esta es más crítica que la tensión máxima en un estado de carga puntual.

Debe tenerse en cuenta para analizar los resultados la unificación del modelo en un solo cuerpo sólido, que permite simular sin necesidad de aplicar contactos. Asimismo, aceptar y utilizar tal hipótesis desencadena que no se detecten tensiones remarcables en las zonas 'E' y 'G'. De todos modos, esta simplificación lleva la simulación a una zona más conservadora: debido a que los pernos trabajan comprimiendo la biela, se reduce el estado tensional de dichas zonas, en comparación con los resultados obtenidos mediante unificación de las partes.

Seguidamente, dado que se desea simular un problema elevadamente dinámico mediante una simulación estática, deben poderse validar o contrastar los resultados obtenidos. Esta acción es necesaria para poder edificar las conclusiones sobre una base razonablemente sólida. En caso de no poder contrastarse, se podría caer en el error de generar conclusiones especulativas, desde unos resultados engañosos.

Como se expone en el *anexo II*, la comparación del orden de magnitud de los resultados con los obtenidos por Zhou, Wang y Ji, da pie a aceptar los resultados cono razonablemente aceptables *(Zhou, Wang y Ji 2010)*. Parte de los objetivos del presente proyecto eran conseguir coincidencias en el orden de magnitud de los resultados, la comparación de estos con el artículo citado corrobora esta esperanza y otorga cierta solidez técnica a los valores obtenidos.

Así como la comparación citada, también dota de solidez técnica el hecho de que las predicciones inicialmente expuestas se hayan cumplido en cierta medida. Tal y como se predice en el apartado *10.7.1*, las tensiones locales máximas han sido localizadas en las zonas 'A', 'B', 'C', 'D' y 'F'. Cabe destacar especialmente las zonas 'B', 'C' y 'D', las cuales se diferencian por reportar las tensiones medias más elevadas.

En cuanto a los tres casos diferenciados, en todos ellos se aprecia una clara simetría respecto el plano XZ, puesto que la biela es simétrica y las fuerzas aplicadas en la dirección transversal son solo efecto de los momentos de fricción, de un valor muy reducido. Asimismo, despreciando el efecto de dichos momentos, cabe mencionar que la biela se encuentra únicamente sometida a esfuerzos axiales (dirección Z) dado que es un elemento biarticulado con dos rótulas en sus extremos.

En las imágenes que muestran los resultados (*il. 10.5 y 10.6*) se aprecia (ver la figura translúcida del modelo no deformado) como en los dos primeros casos la biela trabaja a compresión. En cambio, en el tercer caso, la biela se encuentra sometida a esfuerzos de tracción. Este resultado concuerda con los esperados, dado que, como se ha expuesto en anteriormente, la biela trabaja normalmente a compresión, excepto en la carrera de admisión (tercer caso).

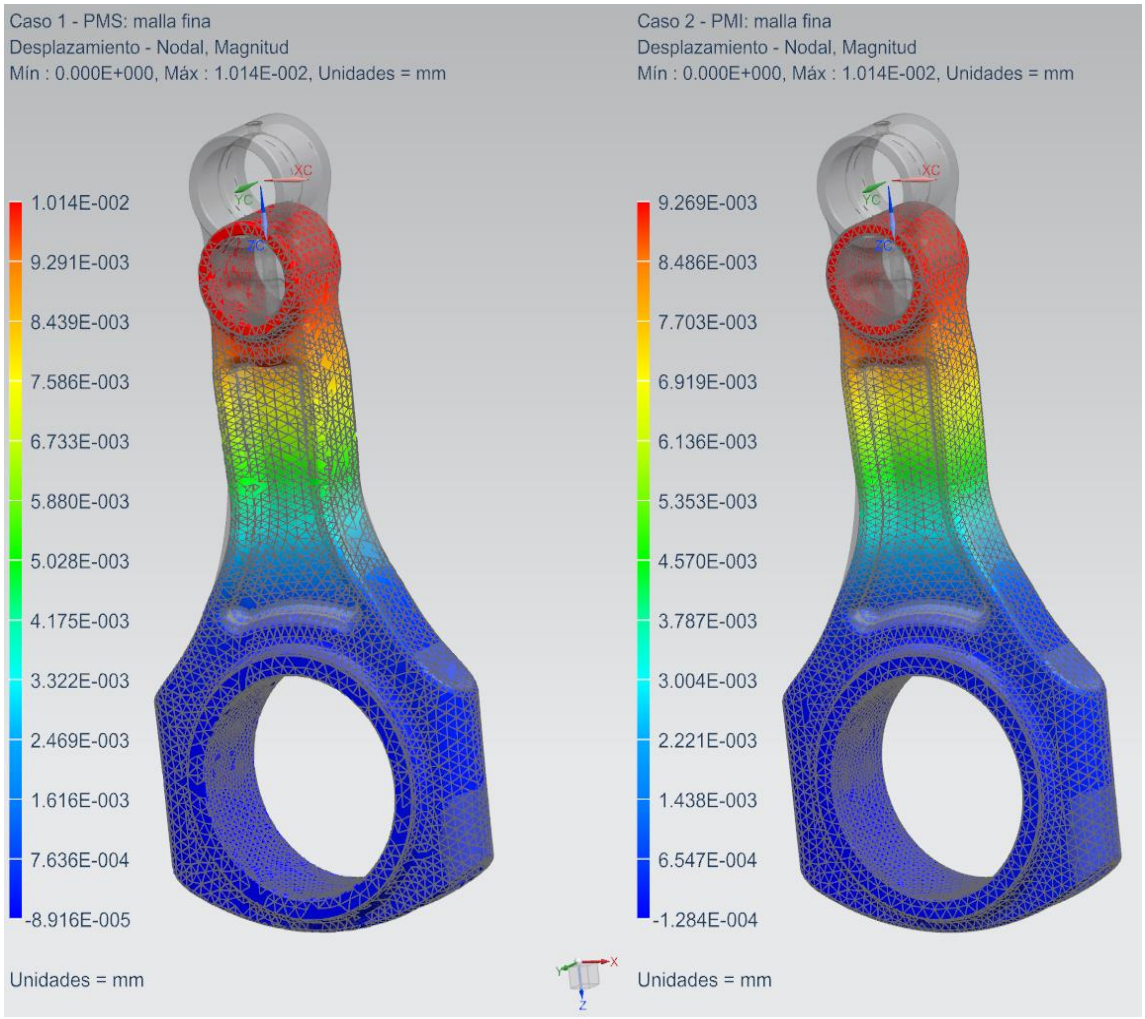

Ilustración 10.5: Deformación axial en primer y segundo caso.

Como se corrobora con la simulación, que la biela trabaja bajo efectos de compresión en los dos primeros casos (correspondientes al PMS y PMI). La magnitud de los desplazamientos máximos es del orden de diez micras, siendo levemente mayor en el primer caso. Asimismo, se considera oportuno comentar que las deformaciones representadas no se encuentran a escala real, sino que son aumentadas en el gráfico para poder ser apreciadas con más claridad.

Se analizan también los desplazamientos obtenidos en el tercer caso, que corresponde con el estudio de una posición concreta durante el ciclo de admisión de mezcla:

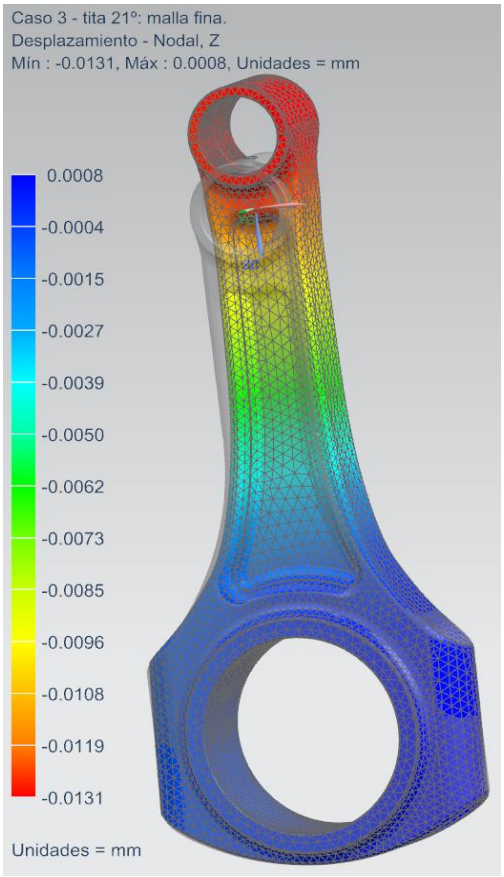

Ilustración 10.6: Deformación axial en el tercer caso.

Del gráfico obtenido de la tercera simulación *(il. 10.5)*, resulta que las deformaciones parecen muy semejantes en valor absoluto, con valores también alrededor de las diez micras. En cambio, en este caso, con la biela sometida a tracción, esta tiende a alargarse. Por este motivo aparecen los desplazamientos en negativo.

Si bien un incremento o decremento de diez micras sobre la longitud de la biela no es un grave problema para un motor de combustión, si puede llegar a serlo la variación de diámetro en los agujeros del pie y la cabeza. Como se expone en el *anexo II*, estas zonas presuntamente no devuelven resultados precisos, por lo que no se estudiarán tales deformaciones en los diámetros. Un apriete de los mismos podría suponer un grave aumento de la fricción con el cojinete, del mismo modo que un aumento del diámetro podría generar fallas causadas por vibraciones.

En conclusión, se cree razonable tomar estas simulaciones como punto base sólido para futuras simulaciones más exhaustivas, con modos de cálculo dinámicos y no lineales. Asimismo, se corrobora que *NX Samcef* parece ser un módulo de cálculo válido para simulaciones lineales, estáticas.

11. Estudio de viabilidad técnica de *NX Samcef*

El estudio de viabilidad técnica del *solver NX Samcef* es el documento técnico encargado de determinar si el *solver* propuesto es viable para su implantación y uso interno en la empresa cliente, en este caso, *Análisis y Simulación S.L.*

Tal y como se especifica en el alcance del proyecto, el estudio del *solver* no debe incorporar comparaciones con otros programas existentes en el mercado, debido al desconocimiento del autor sobre estos. En su lugar, el estudio de viabilidad técnica se debe basar en los ámbitos de configuración de la simulación, proceso y post-procesado de datos, desde el campo únicamente de la simulación lineal elástica. Algunas de estas variables pueden ser la calidad de mallado automático, cantidad de parámetros modificables, tiempo de cálculo o experiencia del usuario.

Asimismo, la base técnica que permite definir la viabilidad del *solver* se encuentra en las conclusiones positivas de la parte de validación del *solver*. Tales datos han validado el *solver* y permiten evaluar de un modo aceptable la viabilidad sin necesidad de estar familiarizado otros programas CAE de simulación mecánica. Además, el hecho de haber simulado la biela mecánicamente ha generado sensaciones y opiniones desde el punto de vista de usuario del programa.

Así como expone la validación del *solver*, de *NX Samcef* se espera que tenga buena respuesta y precisión en cálculos no lineales. Eso sí, requiere mucho menos tiempo de preparación que otros programas, como *Marc*. Dado que no entra dentro del alcance el comparar con otros *solvers*, únicamente se puede valorar el tiempo requerido en *NX Samcef* para re*solver* un problema.

Primeramente se valora el pre-procesado y post-procesado. Dada la experiencia obtenida desde el punto de vista de usuario, se considera un entorno muy intuitivo y fácil de usar. Se concluye tal afirmación teniendo en cuenta que en unas pocas horas ya se era capaz de simular problemas fáciles como vigas encastadas. Ya que se parte del desconocimiento, en cuanto a uso de programas FEM se refiere, se considera razonable concluir que los menús y opciones se encuentran muy bien ordenados, localizables y accesibles.

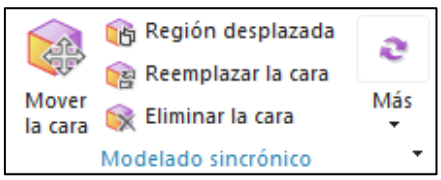

Ilustración 11.1: Opciones de modelado síncrono.

En cuanto al mallado, se ha comprobado que resulta muy útil la opción de mallado automático. Esta funcionalidad se considera un punto fuerte de NX, como se expone en la evaluación preliminar del *solver* (*anexo I*). Asimismo, otro de los puntos fuertes del entorno NX son las opciones de modelado síncrono, que permiten modificar el modelo rápidamente, eliminando caras, filetes o alargando superficies *(il. 11.1)*. Estas funcionalidades han sido de gran ayuda durante la preparación del modelo de la biela.

A pesar de los parámetros y funcionalidades utilizados, no es posible valorar el comportamiento de las leyes de materiales. Por supuesto que el *solver* devuelve valores razonables de tensión y deformación en función de las cargas. Pero dado que la simulación de la biela de ha llevado a cabo con un solo material, no se puede comparar su comportamiento con otros materiales.

De un modo semejante, tampoco es posible evaluar con precisión el tiempo de cálculo que requiere *NX Samcef*. Se sabe que los tiempos invertidos en la simulación de la biela son reducidos para tratarse de simulaciones FEM, pero este hecho tiene su fundamento en que las mallas utilizadas no son excesivamente grandes. Se conoce que con mallas de gran tamaño (muchos elementos) o simulaciones de ensamblajes, se pueden llegar a necesitar varias horas de cálculo. Pero, como se ha comentado, no puede valorarse el tiempo de cálculo sin compararlo con otros *solvers*, resolviendo el mismo problema.

Asimismo, es destacable que el programa ofrece una gran cantidad de parámetros a modificar, dando la posibilidad de simular con mucha precisión. Eso sí, la modificación de tales parámetros requiere un elevado grado de conocimiento técnico de elementos finitos, así como una larga experiencia. Para un usuario sin estas cualidades, ofrecer la posibilidad de modificar tantos parámetros puede ser desconcertante, por este motivo, NX deduce y recomienda valores para tales parámetros. Cabe mencionar que tanto en el caso de la biela como en la solución de los Benchmarks, se han mantenido la mayoría de estos tal y como recomienda el propio programa.

Otra característica remarcable del programa es el hecho de asociar los nodos a la geometría del cuerpo inicial. Esta característica permite la selección rápida de todos los nodos interiores de una cara o la modificación de la malla sin afectar a las cargas, en algunos casos, entre otras funcionalidades.

En conclusión, con los resultados de la validación y a la experiencia como usuario, se considera *Samcef*, en el entorno de *Siemens NX*, como un *solver* viable técnicamente. Así pues, se recomienda su implantación y uso interno en la empresa *Análisis y Simulación S.L.*

12. Estudio de viabilidad ambiental

12.1. Introducción

El estudio de impacto ambiental es un documento técnico-administrativo enfocado a identificar, prevenir e interpretar los impactos ambientales que produce o produciría un proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado. Un estudio de impacto ambiental completo debería incluir:

a) Aspectos Ecológicos y Ambientales

• Descripción técnica de las características y actividades del proyecto.
• Impactos ambientales significativos de las actividades propias del proyecto.
• Evaluación del medio ambiente del Proyecto y descripción de su área de influencia.
• Ámbito geográfico y aspectos bióticos y abióticos del área de estudio del Proyecto.
• Caracterización de los impactos ambientales potenciales en la flora y fauna.
• Caracterización de los impactos ambientales potenciales en los recursos hídricos.
• Caracterización de los impactos potenciales en la calidad del aire y del paisaje.
• Caracterización de los impactos potenciales en los aspectos socioeconómicos.
• Caracterización de los impactos ambientales en relación con el patrimonio cultural.

b) Determinación de Obras, Procesos y/o Medidas de Protección ambiental de los Impactos Ambientales Relevantes.

• Tratamiento de desechos sólidos y líquidos.
• Uso de tecnologías alternativas apropiadas y adaptadas.

c) Plan de Implementación de las Medidas de Mitigación.

• Coordinación con instituciones públicas.
• Establecimiento de medidas de atenuación adecuadas.
• Desarrollo de un plan de contingencia.
• Desarrollo de un programa de higienes y salud ocupacional.
• Desarrollo de un programa de Educación Ambiental.
• Programa de mantenimiento y tratamiento de los desechos líquidos sólidos.

d) Costos de Obras, Procesos y/o Medidas de Protección Ambiental y del Plan de Monitoreo.

• Evaluación económica de las medidas propuestas.
• Determinación de los costos de cada actividad y proceso.
• Creación de un fondo ecológico para mejorar las condiciones ambientales del área e influencia del proyecto y de su entorno.

e) Plan de Monitoreo Ambiental.

• Supervisión y mantenimiento de obras de proceso.
• Aplicación de normas de calidad ambiental.

Como se puede observar es un estudio muy completo y extenso, tanto como lo podría ser el proyecto en sí. Realizarlo conlleva mucho tiempo y recursos, por este motivo y teniendo en cuenta las limitaciones del trabajo, se realizará un estudio reducido.

Cabe remarcar que el presente proyecto no produce ningún bien como tal, lo que podría dar a pensar que pueden obviarse algunos de los puntos anteriormente citados. Esta deducción es incorrecta puesto que en un estudio ambiental extenso deberían considerarse las fases de producción y desmantelamiento de las computadoras y las instalaciones utilizadas en la realización del presente estudio.

De un modo general, se pueden representar los procesos y recursos a tener en cuenta en el estudio ambiental a realizar. Como se aprecia en el *diagrama 12.1*, los procesos de producción (tanto de la computadora como del código a validar) son necesarios para la validación de *Samcef*, así como una formación previa en el manejo del programa y, por supuesto, la energía necesaria para realizar el proyecto. Asimismo, el hecho de poder evitar la producción de cierto número de prototipos, si el *solver* queda validado, es la consecuencia positiva del presente proyecto. De un modo semejante, este proyecto tiene una consecuencia negativa desde un punto de vista medioambiental, puesto que las computadoras utilizadas deberán ser desmanteladas en algún momento.

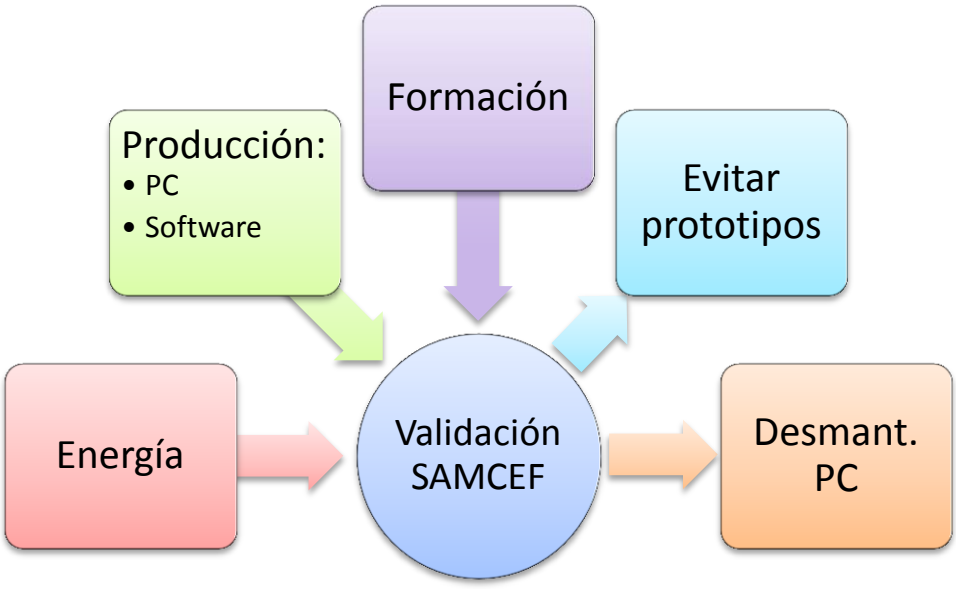

Diagrama 12.1: Procesos y recursos involucrados.

Como se ha comentado anteriormente, no es objeto de este proyecto académico el realizar un estudio medioambiental exhaustivo. Por este motivo, no se considera estudiar los efectos ambientales de la producción y desmantelamiento de las computadoras, así como la programación del *software*. El impacto ambiental producido por la formación requerida tampoco será estudiado por ser una variable muy volátil y altamente dependiente de la persona que la reciba.

Dadas estas simplificaciones, quedará por estudiar el impacto ambiental generado por la producción y transporte de energía, así como el hecho de evitar la producción de numerosos prototipos físicos.

12.2. Energía

Se tiene en cuenta que el proyecto se realiza en España, por lo que es conveniente atender a las diversas fuentes de producción de energía eléctrica en este país:

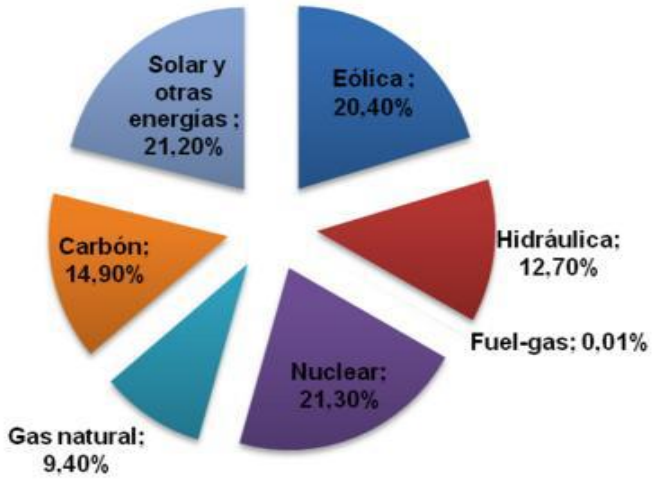

Diagrama 12.2: Orígenes de la electricidad generada. Fuente: Red Eléctrica Española.

El *diagrama 12.2* muestra que a pesar de tener una parte importante de energía generada por fuentes renovables, no deja de haber una parte importante que proviene de fuentes no renovables, por lo que el uso de la electricidad utilizada en el presente proyecto tendrá un impacto ambiental negativo.

Según la fuente de producción de la electricidad se generará un tipo de contaminante u otro, y sus respectivos impactos ambientales:

• **Centrales térmicas**: generan contaminantes debido a la combustión de combustibles fósiles como el carbón o el fuel, que generan cenizas y humos entre los cuales encontramos emisiones de CO_2 (dióxido de carbono), SO_x (óxidos de azufre) y NO_x (óxidos de nitrógeno). El dióxido de carbono (CO_2) favorece el efecto invernadero.

Los SO_x y los NO_x son los principales causantes de la lluvia ácida. Otro efecto en el medioambiente es el cambio térmico en el agua que utilizan para refrigerar las instalaciones.

• **Centrales nucleares**: no emiten humos, pero generan residuos radiactivos del combustible nuclear y producen también salto térmico en el agua.

• **Centrales renovables**: alteran el ecosistema y una vez finalizado su ciclo de vida generan muchos residuos durante el desmantelamiento.

Por tal de poder estimar de algún modo el impacto ambiental generado por las citadas emisiones, se utiliza la medida de CO_2 equivalente. Dicha medida se utiliza universalmente para para evaluar los impactos de la emisión (o evitar la emisión) de diferentes gases que producen el efecto invernadero *(The World Bank 2016)*.

Dado que no se conoce la procedencia de la energía utilizada en el proyecto, se considera conveniente estimar un valor medio de dióxido de carbono equivalente, tal tarea ha sido realizada ya numerosas veces por diferentes autores. En el presente proyecto se referencia dicho valor al estudio realizado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía *(IDAE 2014)*. En dicho documento se propone que el factor de emisión de CO_2 para la electricidad convencional nacional sea:

$$c_1 = 0{,}399\ \frac{kg\ CO_2}{kWh}$$

Como se ha expuesto, este factor de emisión es una media realizada con datos de diversas empresas y en toda España. Debe tenerse en cuenta que dependiendo de la empresa suministradora de energía y del contrato, el factor puede variar ampliamente. Desde suministros de energía certificada 100% renovable hasta suministros de energía con elevados factores de emisión. Así pues, para cada caso concreto deberá obtenerse del contrato o las facturas el factor concreto de emisión. En el presente estudio no ha sido posible consultar las facturas eléctricas, por lo que se continuará trabajando con el factor medio calculado por IDAE.

Se cree conveniente que el presente estudio evalúe la generación asociada de residuos radioactivos. Para llevar a cabo dicha tarea se considera un factor de emisión de residuos radiactivos obtenido de la factura energética de José Antonio Ortiz, codirector del presente proyecto.

$$c_2 = 0{,}56\frac{mg}{kWh}$$

Así pues, se pueden estimar las emisiones de CO_2 equivalentes y de residuos radioactivos en el proceso de producción de la energía consumida. Para ello, se recupera del presupuesto el cómputo de energía consumida durante el proyecto:

Concepto	Consumo [kW]	Consumo horario [kWh]
Pantalla HP LP2065	0,055	15,73
PC HP xw4600	0,356	101,82
Iluminación	0,095	27,17
Climatización	0,086	24,60
TOTAL		**169,32**

Tabla 12.1: Cómputo de horas.

Así pues, se computa una energía consumida total aproximadamente igual a 170kWh. Mediante este dato y los factores de emisión anteriormente expuestos, se considera la cantidad de emisiones equivalentes:

$$Emisión\ CO_2 = 0{,}399 \frac{kg\ CO_2}{kWh} * 169{,}32\ kWh = 67{,}56\ kg\ CO_2$$

$$Emisión\ R.radioactivos = 0{,}56 \frac{mg}{kWh} * 169{,}32\ kWh = 94{,}82\ mg$$

A continuación, una vez calculada la cantidad de CO_2 equivalente emitido, debe valorarse esta para el análisis de la viabilidad ambiental. Valorar un dato sin una referencia es muy poco útil, por este motivo, debe referenciarse la cantidad de carbono emitido mediante una escala de referencia, por tal de realizar valoraciones comparativas.

En cuanto a las emisiones de residuos radioactivos equivalentes, se considera no continuar evaluando las consecuencias medioambientales, dada la carga de tiempo que esto supone. Como se especifica al inicio, el presente estudio es un modelo reducido de un estudio de impacto ambiental completo.

Seguidamente, se ha procedido a confeccionar una tabla de emisiones de CO_2 equivalente de diferentes procesos de fabricación, así como actividades. Dicha tabla ha sido generada mediante la información aportada por las fuentes citadas en ella:

Proceso productivo / Actividad:	Emisiones de CO_2 eq. [kg CO_2]
Azúcar (paquete papel, 1 kg)[1]	0,06 kg
Refresco (lata aluminio, 33cl)[2]	0,17 kg
Botella de Vino (botella vidrio, 75cl)[1]	0,67 kg
Papel reciclado (1 kg)[3]	1,8 kg
Papel convencional (1 kg)[3]	3,3 kg
Aceite (garrafa PET, 5l)[1]	5 Kg
Viaje en metro o bus (100 km)[4]	6 kg
Alojamiento en un hotel (1 persona)[5]	10 kg
Viaje en coche (100 km)[4]	19 kg
Huella de carbono media diaria de un español[6]	21 kg

Tabla 12.2: Referencias de emisiones en procesos.

Una vez generada la escala de referencia representada en la *tabla 12.2*, se pueden comparar las emisiones equivalentes producidas durante el presente proyecto. Estas emisiones son cercanas a 70kg de CO_2, pueden ser fácilmente comparables con las emisiones generadas durante un viaje Barcelona-Zaragoza en coche. También, a modo comparativo, se pueden pensar esas emisiones como las que generaría un huésped en un hotel durante una semana, o las generadas por una persona (en España) durante algo más de tres días.

Por tal de poder evaluar el impacto que estas emisiones generan, deben primero estudiarse las ventajas medioambientales derivadas de realizar el presente estudio. A continuación, se procede a valorar la principal de dichas ventajas, el hecho de evitar la producción de varios prototipos físicos convencionales.

[1] Fuente: sustentabilidadydesarrollo.com. Blog dedicado a temas de sustentabilidad y desarrollo.

[2] Fuente: ppladmin.synapsis.mx. Blog mejicano dedicado a la conservación del medio ambiente.

[3] Fuente: www.ceroco2.org. Plataforma ciudadana para el cuidado del clima.

[4] Fuente: www.gasnaturalfenosa.es. Portal web de Gas Natural – Fenosa.

[5] Fuente: www.fuertehoteles.com. Portal web de Fuerte Hoteles.

[6] Fuente: calculator.carbonfootprint.com. Calculadora de emisiones de CO_2 en línea.

12.3. Reducción de prototipos físicos

Tal y como se expone en la justificación del presente proyecto, una de las principales ventajas de implementar la tecnología CAD/CAE, en procesos productivos y de diseño, es el hecho de evitar gran parte de la producción de prototipos físicos. Con las actuales tecnologías se puede detectar fácilmente (con pocos recursos) fallos prematuros y errores de diseño, incluso antes de generar el primer prototipo. Este hecho genera una notable reducción de los costes de prototipado, pero requiere de inversiones previas para implantar los sistemas y formar a la plantilla de técnicos de diseño.

Dado que la primera parte de este proyecto (validación de *NX Samcef*) es un servicio genérico y puede ser demandado por cualquier fabricante, no puede achacarse a ningún sector productivo en particular. En cambio, la simulación mecánica de la biela está enfocada únicamente a dicho componente, por tanto puede valorarse el efecto ambiental de evitar la producción de algunos prototipos.

Como se argumenta anteriormente, el presente documento no pretende realizar un estudio de viabilidad ambiental completo y exhaustivo. Por este motivo, no se procede a cuantificar el impacto ambiental causado por la producción de un prototipo de biela, sino a valorarlo sin excesivo detalle.

Tal y como se expone en el estudio del componente, en el proceso de producción de una biela común intervienen altos hornos para fundir el acero y para realizar el bonificado. Asimismo, intervienen también multitud de máquinas automatizadas de corte en las fases de devastado y acabado.

Toda la tecnología anteriormente citada consume energía, por supuesto, pero especialmente los hornos, para fundir el acero se requiere una temperatura superior a los 1500ºC en los hornos. Alcanzar esta temperatura requiere mucho combustible y además genera multitud de emisiones nocivas. Las emisiones gaseosas resultantes de la fundición están constituidas por monóxido de carbono, dióxido de azufre, compuestos de flúor, óxidos de nitrógeno y las resultantes de la colada, por un corto espacio de tiempo, fenol, amoníaco, aminas, compuestos de cianuro e hidrocarburos aromáticos (trazas) *(Estrucplan 2015)*. Asimismo, los procesos metalúrgicos generan también una elevada cantidad de aguas residuales, así como de residuos sólidos.

Según la empresa *Estrumetal*, durante los procesos siderúrgicos necesarios para producir un kilogramo de acero se emiten 2,4 kg de CO_2 equivalente *(Estrumetal 2015)*. Tal valor solo contempla el proceso de fundido y el moldeado inicial de la pieza en bruto. A dicho valor de emisión debe añadírsele después las emisiones derivadas del transporte y el procesado de la pieza en bruto, así como todos los acabados.

12.4. Conclusión sobre la viabilidad ambiental

Una vez determinados los principales impactos medioambientales causados por el presente proyecto y por la producción de bielas, se estudia la viabilidad ambiental del mismo. Cabe mencionar que este trabajo se compone de dos partes diferenciadas, la validación de *NX Samcef* y la simulación de la biela. A modo de resumen de los datos de emisiones expuestos hasta el momento, se realiza la siguiente tabla:

Proceso productivo / Actividad:	Emisiones de CO_2 eq. [kg CO_2]
Validación *NX Samcef* (205 h aprox.)	48 kg
Estudio mecánico biela (81 h aprox.)	20 kg
Proyecto EMSN.001 completo (286 h)	68 kg
Barcelona-Zaragoza en coche (320 km)	61 kg
Huella de carbono media diaria de un español	21 kg
Proceso siderúrgico (1 kg de acero)	2,4 kg

Tabla 12.3: Tabla resumen de emisiones.

Según la *tabla 12.3*, se puede analizar en gran medida la viabilidad ambiental del proyecto, si se considera este en las dos partes diferenciadas, se puede estudiar la viabilidad ambiental por separado.

La validación de *NX Samcef* es un proyecto que solo debe realizarse una vez, puesto que una vez validado se puede utilizar infinidad de veces, hasta que sea necesaria la validación de nuevas versiones o nuevos *solvers*. Además, gracias a la implantación de sistemas CAD/CAE, se puede evitar la producción de todo tipo de prototipos, no solo bielas, tantas veces como sea requerido. Por este motivo se considera la viabilidad ambiental de esta parte del proyecto, constatar que *NX Samcef* es válido permitiría la simulación de infinidad de componentes y, por tanto, puede evitar la producción de numerosos prototipos físicos.

Por otro lado, el proyecto de simulación mecánica de una biela es un trabajo mucho más específico y será realizado para clientes productores de este componente. Dicho estudio evita, como se ha comentado anteriormente, la detección de errores prematuros, eludiendo así la necesidad de producir varios prototipos físicos antes de obtener el diseño adecuado.

Con los datos estimados durante es estudio medioambiental, se puede concluir que realizar el estudio mecánico de la biela genera aproximadamente las mismas emisiones de CO_2 equivalente que la producción de unos ocho prototipos físicos de la biela. Cabe mencionar que no solo hay que prestar atención a las emisiones de CO_2 equivalente. A pesar de ser una buena herramienta de mesura, debe considerarse también la generación de aguas residuales y residuos sólidos o la contaminación acústica, impactos que muchas veces pueden ser más perjudiciales que las propias emisiones de gases a la atmósfera.

En conclusión, se considera medioambientalmente viable la simulación mecánica de la biela. A pesar de requerirse energía para ella, se evita la emisión de gases altamente contaminantes tales como los óxidos de azufre o de nitrógeno.

Es más, como ya se ha argumentado, prácticamente el único impacto generado por las actividades realizadas en este proyecto es la emisión de gases de efecto invernadero, durante la producción de la energía eléctrica utilizada. El presente proyecto se sitúa en un escenario dónde toda la energía utilizada haya sido generada mediante fuentes limpias de energía (energías renovables), se daría la condición para concluir que el impacto ambiental del proyecto es prácticamente despreciable.

Atendiendo a este escenario comentado, plausible y necesario a corto término, la viabilidad del presente proyecto sería máxima e innegable. A pesar de este hipotético escenario, en la situación actual se generan aproximadamente 0,4 kg de CO_2 equivalente durante la producción de un kilovatio hora de energía eléctrica. A pesar de estas emisiones, como se ha comentado, el proyecto se considera viable en términos medioambientales, tanto en su conjunto como en ambas partes del mismo.

13. Estudio de viabilidad económica

13.1. Introducción

El estudio de viabilidad económica completo del proyecto engloba el cálculo de marcadores económicos, así como su posterior análisis. En el presente estudio se dará conclusión sobre la viabilidad económica del proyecto, de manera simplificada, evaluando si resulta rentable implantarlo en una empresa. Dado que no se dipone de datos suficientes y la carga de trabajo se encuentra fijada, no se analizarán los indicadores económicos en este estudio.

Dada la naturaleza del proyecto, el beneficio para el cliente se plantea como el ahorro económico que supone la simulación de prototipos virtuales frente a la producción convencional de prototipos físicos.

Como se ha comentado en anteriores apartados, el presente proyecto se compone de dos partes diferenciadas, el estudio de validación de *NX Samcef* y la simulación mecánica de una biela. Dichas partes corresponden con posibles servicios a prestar a diferentes empresas, por un lado el servicio de validación es solicitado por la empresa *AyS*, para estudiar si el *solver* puede (y/o conviene) ser utilizado por ellos para futuras simulaciones. Por otro lado, el estudio mecánico es un servicio que se presta a ser solicitado por fabricantes de bielas, por tal de validar un prototipo diseñado en CAD.

Se estudiarán ambos casos por separado, teniendo en cuenta que el estudio de validación requiere unas 205 horas de trabajo (72% de la carga total) y cuesta unos 4.700€. La simulación de la biela, en cambio, tiene una carga de 81 horas (28% de la carga total) y cuesta 1.800€, según el presupuesto.

13.2. Viabilidad económica de la validación de *NX Samcef*

Primeramente, determina que el beneficio económico que *AyS* puede obtener de implantar *NX Samcef* a la plantilla de *solvers* utilizados. Se conoce que uno de los puntos fuertes de NX frente a sus competidores es la facilidad y rapidez del mallado automático. Tal hecho desencadena una reducción de los tiempos de mallado, aumentando así la productividad de los empleados. Como se determina anteriormente, mesurar estos aumentos de productividad implica una elevada carga de trabajo, por lo que se procede sin conocer valores concretos de beneficios.

Cabe estudiar también en el caso del *solver* el precio de la licencia. Como se detalla en el presupuesto, las licencias y mantenimiento de los módulos utilizados cuestan del orden de nueve mil euros al año. Para poder analizar este coste, es necesaria la comparación con los costes de otro *solver* parecido, como *NX Nastran*.

Mediante contacto con el departamento comercial de *Análisis y Simulación S.L.* se determina que el precio de *NX Nastran*, con todos sus módulos, siendo este de 30.000€. Una vez conocido este dato y el coste equivalente de *NX Samcef* (33.800€, detallado en el presupuesto) se determina que ambos tienen precios de mercado similares y competitivos.

Por los motivos expuestos, se considera razonable concluir que estudiar la viabilidad de *NX Samcef* puede ser viable económicamente. Debido a que el precio de este es ligeramente superior al de otros *solvers* semejantes, se considera que es viable plantear la adquisición de *NX Samcef* como *solver* de elementos finitos. Asimismo, queda analizar en un futuro estudio más exhaustivo si invertir cerca de 4.700€ en el estudio de validación resultará viable en un plazo de tiempo determinado.

13.3. Viabilidad económica del estudio mecánico de una biela

Seguidamente, se procede a comentar el beneficio económico de una empresa productora de bielas que decida implantar un sistema de diseño CAD/CAE, y que externalice el servicio de simulación mecánica de la biela. Adoptando esta estrategia, la empresa productora evitaría la fabricación de varios prototipos físicos. Los demás costes de diseño no deben, en principio, variar sensiblemente, puesto que los recursos de diseño son los mismos. Si se notara algún efecto de implantar un proceso de diseño basado en CAD/CAE, sería una reducción del coste de diseño, dada su mayor productividad frente a diseños convencionales.

Se considera que no puede conocerse el número de prototipos ahorrados, ya que es altamente variable en función de cada empresa. Por este motivo, no puede concluirse con precisión los beneficios reportados por implantar tecnologías de diseño CAD/CAE. De todos modos, como se argumenta en la justificación del proyecto, los costes de la realización de prototipos y ensayos virtuales tienden a ser muy reducidos en comparación con los costes de producción de prototipos y pruebas físicas.

Por otro lado, se puede comparar el coste asociado a la parte de simulación de la biela con el precio de mercado que tiene este tipo de servicios. Según el departamento técnico de *Análisis y Simulación S.L.*, un estudio mecánico lineal de la biela planteada, con las cargas conocidas cuesta del orden de dos mil euros.

Atendiendo al presupuesto, se conoce que el precio del trabajo de simulación de la biela mediante elementos finitos cuesta aproximadamente mil ochocientos euros. Si se comparan ambos precios, se concluye que realizar el estudio de una biela mediante *NX Samcef* es viable económicamente, puesto que el coste se encuentra ligeramente por debajo del precio de mercado de este tipo de servicios.

14. Líneas futuras

La finalización del presente proyecto deja abiertas una serie de líneas futuras de trabajo. Estas quedan abiertas debido a las restricciones impuestas en el alcance y las especificaciones básicas.

Primeramente, la línea de seguimiento más directa del presente trabajo es la validación de los módulos de cálculo no lineal y de respuesta en frecuencia de *NX Samcef*. Así pues, este estudio deja la puerta abierta a una futura validación, semejante a la que aquí se expone, de los demás módulos de cálculo del *solver*, por tal de validar la implantación del mismo en cálculos no lineales.

Asimismo, otra futura línea de estudio se basa en la elaboración de una comparación objetiva de los tiempos de cálculo necesarios en *NX Nastran* y *NX Samcef.* Tal estudio permitiría la comparación exhaustiva entre ambos *solvers,* permitiendo así escoger el que se considere más adecuado para cada caso.

Atendiendo a la simulación mecánica de la biela, se considera oportuno remarcar la posibilidad de realizar cálculos más precisos. Esto es, en términos de la simulación, preparar un cálculo no lineal con los contactos pertinentes e hipótesis más realistas. Por tal de conseguir una simulación más fiel a la realidad, también debe considerarse el simular la biela dinámicamente, junto a todo el conjunto pistón-biela-cigüeñal.

Finalmente, la última línea de trabajo futura que abre el presente proyecto es la verificación de los datos obtenidos en las simulaciones mecánicas de la biela. Para realizar dicha tarea, será necesario sensorizar la biela durante su ciclo de trabajo. Tal trabajo requerirá posiblemente de un gran número de sensores y tendrá un elevado coste. Se asume que no podrá ser estudiada la biela independientemente, sino que deberá ser monitorizada junto a los demás componentes que interaccionan con ella.

En conclusión, el presente estudio abre puertas a futuros trabajos en dos ámbitos. Por un lado se da pie a la validación y comparación de *solvers* de elementos finitos. Por otro lado, el presente proyecto establece un punto de partida para la verificación de los datos obtenidos en las simulaciones mecánicas de la biela, ya sea mediante simulaciones más realistas o mediante ensayos físicos.

15. Conclusión general

Una vez finalizado el proyecto, se da pie a la redacción de las conclusiones finales. En ellas aparecen las conclusiones más significativas del conjunto del presente estudio, desde un punto de vista personal y objetivo.

Primeramente, debe exponerse que el proyecto resuelve satisfactoriamente el problema planteado en el inicio del mismo. Este es, la validación de *NX Samcef* como *solver* FEM, desde la vertiente del análisis lineal estático. Así pues, la principal conclusión es que la empresa *Análisis y Simulación S.L*. puede plantearse la implantación de dicho *solver* para la resolución de problemas lineales estáticos, puesto que este cumple razonablemente con las especificaciones esperadas.

Las pruebas de validación que han conducido hasta tal afirmación han resultado aportar más que una mera conclusión sobre la validación del *solver*. Con ellas y el trabajo de estudio previo, se ha obtenido un nivel de conocimiento práctico, no esperado, sobre uso de los métodos de elementos finitos. Si bien ya se disponía de la base teórica impartida por el profesor Roberto Castilla López (en la asignatura *Fluid Dynamic Technologies in Vehicles)*, se ha mejorado en gran medida el conocimiento práctico de programas CAE. Así pues, se denota que la realización del presente proyecto ha sido una excelente manera de unir ambas vertientes de conocimiento.

De un modo semejante, haber realizado el presente estudio siguiendo las pautas aportada en la asignatura *Projectes* ha afianzado el saber elaborar un proyecto de ingeniería, con todos sus correspondientes documentos y apartados.

En cuanto a la parte referente a la simulación mecánica de la biela, se considera muy útil el hecho de poder visualizar los resultados de una manera entendedora. Esta parte ha dotado al proyecto de un estudio enfocado desde un punto de vista más práctico, de manera semejante a los trabajos de campo. Asimismo, se cree beneficioso el conocimiento obtenido sobre las condiciones de trabajo de una biela, puesto que será útil durante los estudios futuros.

Se considera también altamente productivo el haber tenido que enfrentarse a las dificultades aparecidas. Principalmente en la realización del test BN2 y la elaboración de hipótesis sobre la biela. Tales dificultades han obligado a indagar y plantear modificaciones, afianzando en gran medida los conocimientos adquiridos.

En conclusión, después de validar NX Samcef en el ámbito lineal elástico, se desea conocer más acerca del mundo del CAE. Viéndose este como una herramienta prácticamente de obligado uso en el futuro.

16. Glosario

Por tal de definir ciertos términos que pueden resultar desconocidos para el lector del presente proyecto, se elabora el glosario siguiente:

AISI Acrónimo en inglés de *American Iron and Steel Institute* (Instituto americano del hierro y el acero).

Benchmark Anglicismo que significa 'punto de referencia' o 'parámetro'.

CAD Acrónimo en inglés de *Computer Aided Design* (Diseño asistido por computadora).

CAE Acrónimo en inglés de *Computer Aided Engineering* (Ingeniería asistida por computadora).

Carrera del pistón El recorrido del pistón desde el PMS al PMI.

Datasheet Documento que resume el funcionamiento y otras características de un componente.

FEM Acrónimo en inglés de *Finite Elements Method* (Método de elementos finitos).

Granallado Método utilizado para limpiar, fortalecer o pulir metales.

Huella de carbono Método de medición del impacto ambiental que genera una persona o actividad.

Motor cuadrado Denominación del motor cuyos cilindros tienen la carrera de igual longitud que el diámetro.

Muñequilla del cigüeñal Zona excéntrica del cigüeñal comprendida entre los 2 brazos de manivela, sobre la que se acopla la cabeza de la biela.

NAFEMS Acrónimo en inglés de *National Agency for Finite Element Methods and Standards* (Agencia nacional –UK– de métodos y estándares de elementos finitos).

Par motor Momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia.

PMI Acrónimo en español de Punto Muerto Inferior, posición que alcanza el pistón al final de una carrera descendente.

PMS	Acrónimo en español de Punto Muerto Superior, posición que alcanza el pistón al final de una carrera ascendente.
Presión media efectiva	Media de todas las presiones instantáneas que se producen en la fase de combustión y expansión de los gases dentro del cilindro.
RBE	Acrónimo en inglés de *Rigid Body Element*, elemento que representa ecuaciones de restricción que definen una relación de desplazamiento entre los nodos correspondientes en que se definen.
SAE	Acrónimo en inglés de *Society of Automotive Engineers (*Sociedad de Ingenieros Automotores).
Sinterizado	Tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para aumentar la resistencia mecánica de la pieza, ya que se ha aumentado el tamaño de grano.
Software	Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.
Solver	Conjunto de programas y rutinas que permiten al programa de simulación obtener los resultados deseados.
Temp. de austenización	Temperatura para la cual la única fase en equilibrio del acero es la austenita.

17. Bibliografía de referencia

AFICIONADOSALAMECANICA.COM, 2014. Estudio del motor: elementos moviles. [en línea]. [Consulta: 23 febrero 2016]. Disponible en: http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm.

ALBEZA, F.D., 2011. Estudio de las propiedades microestructurales y mecánicas de aleaciones de Ti-Mo obtenidas por pulvimetalurgia. *Riunet UPV*,

AZO MATERIALS, 2012. AISI 4340 Alloy Steel (UNS G43400). [en línea]. [Consulta: 24 febrero 2016]. Disponible en: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772#2.

CARLEY, L., 2008. Connecting Rods: So Many Choices - Engine Builder Magazine. [en línea]. [Consulta: 23 febrero 2016]. Disponible en: http://www.enginebuildermag.com/2008/09/connecting-rods-so-many-choices/.

CASANOVA, J. y AGUIRRE, V., 2005. Banco de pruebas para medida de fricción en pistones. *Revista iberoamericana de ingeniería mecánica* [en línea], vol. 9, pp. 79-94. Disponible en: http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2218588&orden=320006&info=link.

CASTAÑEDA AVENDAÑO, M.A., 2012. *Diseño de producto para manufactura de una biela de un motor* [en línea]. S.l.: INSTITUTO TECNOLOGICO DE QUERETARO. [Consulta: 23 febrero 2016]. Disponible en: http://es.scribd.com/doc/98746742/Proceso-Biela-de-Un-Motor#scribd.

CATERPILLAR, 2012. Bielas: Funciones y Fabricación. [en línea]. [Consulta: 24 febrero 2016]. Disponible en: http://datoscaterpillar.blogspot.com.es/2012/11/bielas-funciones-y-fabricacion-la.html.

CHAVEZ, A., 2015. Introducción al CAD/CAM. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://lenguajedeingenieria.weebly.com/.

CHRISTIAN M., 2010. Tipos y geometría de los motores a combustión. [en línea]. [Consulta: 24 febrero 2016]. Disponible en: https://www.bolido.com/2010/12/sin-terminartipos-y-geometria-de-los-motores-a-combustion/.

COMAS, A., 2010. *El motor térmico alternativo*. Terrassa: s.n.

CORALLO, A., VASSALLO, T. y DALL'ORTO, H., 2003. Capítulo 13: Pérdidas y fricciones. , pp. 1-44.

DEUTZ SPAIN, 2012. Fabricación de Bielas. [en línea]. [Consulta: 24 febrero 2016]. Disponible en: http://www.deutzspain.com/web/guest/products/manufacturing/components-production/connecting-rods.

EDWARDS, J., 2007. Connecting Rods. *Saenz Performance*,

EPS FORMACIÓN, 2015. Las Bielas - Video refuerzo. [en línea]. [Consulta: 26 febrero 2016]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=HdQHlPJNsJE&feature=youtu.be.

ESTRUCPLAN, 2015. Impactos Ambientales y Actividades Productivas (hierro y acero). [en línea]. Disponible en: https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=157.

ESTRUMETAL, 2015. La Huella de carbono de la Industria Metalmecánica. [en línea]. Disponible en: http://www.estrumetal.com.co/web/hola-mundo/.

GRANTA, 2016. Ferrous Metals. [en línea]. Disponible en: https://www.grantadesign.com/resources/materials/designations/ferrous.lowalloysteel.htm.

HOT RODS PRODUCTS, 2014. *Hot Rods' Connecting Rod Manufacturing* [en línea]. [Consulta: 25 febrero 2016]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=ac5qiSDA1Xo.

IDAE, 2014. Propuesta de documento reconocido factores de emisión de CO2. [en línea], pp. 32. Disponible en: http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documents/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf.

INGEMECÁNICA.COM, 2003. Clasificación de los Aceros. [en línea]. [Consulta: 24 febrero 2016]. Disponible en: http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html#seccion35.

KATES, E.J. y LUCK, W.E., 1981. *Motores Diesel Y De Gas De Alta Compresión*. S.l.: s.n.

LOGAN, S., 2014. Competition Connecting Rods – Only the Strong Survive. [en línea]. [Consulta: 25 febrero 2016]. Disponible en: http://www.mooregoodink.com/news/tag/con-rod-manufacturing/.

NAFEMS, 1986a. NAFEMS Benchmark LE2. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le2.html.

NAFEMS, 1986b. NAFEMS Benchmark LE3. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le3.html.

NAFEMS, 1986c. NAFEMS Benchmark LE5. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le5.html.

NAFEMS, 1989. NAFEMS Benchmark LE6. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le6.html.

NAFEMS, 1990. NAFEMS Benchmark LE10. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le10.html.

PRECIOUS INDUSTRIES, 2014a. Precious Industries_Materials are used in connecting rod. [en línea]. [Consulta: 23 febrero 2016]. Disponible en: http://preciousind.com/connectingrod-manufacturing-materials.php.

PRECIOUS INDUSTRIES, 2014b. Types of connecting rod (segun material). [en línea]. [Consulta: 23 febrero 2016]. Disponible en: http://preciousind.com/connectingrod-types.php.

THE WORLD BANK, 2016. Environment. [en línea]. [Consulta: 31 mayo 2016]. Disponible en: http://www.worldbank.org/en/topic/environment.

ZHOU, Q., WANG, Y. y JI, W., 2010. The Finite Element Analysis of Connecting Rod of Diesel Engine. *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* [en línea], no. 2, pp. 870-873. DOI 10.1109/ICMTMA.2010.543. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5459521.